

139781

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

SMC YÖNTEMİ İLE KOMPOZİT ÜRETİMİ

139781-

Makina Yük. Müh. Zehra GÜLTEN

**FBE Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 12.12.2003

Tez Danışmanı

Jüri Üyeleri

: Prof. Dr. Mustafa ÇİĞDEM (YTÜ)

: Prof. Dr. Nişan SÖNMEZ (YTÜ)

: Prof. Dr. Yılmaz TAPTIK (İTÜ)

: Prof. Dr. Fevzi YILMAZ (SaÜ)

: Doç. Dr. Erdem DEMİRKESEN (İTÜ)

İSTANBUL, 2003

**TEZİN KÜTÜPHANESİNE
GİRİŞİ**

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ VE AMAÇ.....	1
2. SMC KOMPOZİT ÜRETİM YÖNTEMİ İLE İLGİLİ LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	3
2.1 SMC Kompozisyonunun Bileşenleri	3
2.1.1 Polyester Reçineler	3
2.1.1.1 Glikoller	4
2.1.1.2 Doymamış Asitler	5
2.1.1.3 Doymuş Asitler	6
2.1.1.4 Monomerler	6
2.1.1.5 İnhibitörler	9
2.1.2 Ticari Reçineler.....	9
2.1.2.1 Jelkot Reçineler.....	10
2.1.2.2 Genel Amaçlı Reçineler	10
2.1.2.3 Kimyasal Dayanımlı Reçineler	10
2.1.2.4 Alev Geciktirici Reçineler	11
2.1.2.5 Stiren Buharlaşması Az Olan Reçineler	11
2.1.2.6 Düşük Çekmeli Reçineler	12
2.1.2.7 Özel Amaçlı Reçineler	12
2.1.2.8 Döküm Reçineleri	13
2.1.3 Takviye Malzemeleri	14
2.1.3.1 Yüzey Tülleri	14
2.1.3.2 Cam Fiber Takviyeler	15
2.1.4 Dolgu Maddeleri ve Pigmentler.....	19
2.1.4.1 Mineral Dolgu Maddeleri	22
2.1.4.2 Karbonatlar	22
2.1.4.3 Silika ve Silikatlar.....	22
2.1.4.4 Alüminyum Silikatlar ve Killer	23
2.2 SMC Yöntemi ile Kompozit Üretiminin Avantajları	26
2.3 SMC Üretim Yöntemi.....	26
2.3.1 SMC Üretim İşlemi.....	26
2.3.2 Düşük Profil SMC Malzeme Özellikleri	29
2.3.2.1 Düşük Profil SMC	30
2.3.3 SMC ve Basıncılı Kalıplama Prosesi	31
2.3.3.1 Malzeme Hazırlama.....	31
2.3.3.2 Yük Modeli Hazırlama	31
2.3.3.3 Yük Yerleştirme.....	32
2.3.3.4 Kalıplama.....	32
2.3.3.5 Kalıp Açma	32

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
2.3.4 SMC ve BMC'nin Mukayesesi	33
2.4 SMC Kompozit Üretim Yöntemi ile İlgili Önceki Çalışmalar ve Bulguları:	
Proses ve Malzeme Değişkenlerinin Etkileri	34
2.4.1 Proses (Yöntem) Değişkenlerinin Etkisi.....	34
2.4.2 Malzeme (Bileşim) Değişkenlerinin Etkisi.....	45
3 . DENEYSEL ÇALIŞMALAR	60
3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Üretim Yöntemi	60
3.2 Numunelerin Hazırlanması	61
3.3 Deneylerin Yapılışı	64
3.3.1 Yoğunluk Deneyleri	64
3.3.2 Darbe Deneyleri	65
3.3.3 Eğme Deneyleri	67
3.3.4 Çekme Deneyleri	69
3.3.5 Su Absorbsiyonu Deneyi	71
3.3.6 Ultraviyole (UV) Deneyi	72
3.3.7 Bilya-Basınç Deneyi	74
3.3.8 Alev Deneyi	74
3.3.9 Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) ile Kırık Yüzey Analizi	75
3.3.10 Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) ile Mikroyapısal Muayene	76
4. DENEYSEL SONUÇLAR	78
4.1 Yoğunluk Değerleri	78
4.2 Mekanik Özellikler	85
4.2.1 Darbe Dayanımı	85
4.2.2 Eğme Dayanımı	92
4.2.3 Çekme Dayanımı	99
4.3.1 Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) ile Kırık Yüzeylerin Mikroyapısal Analiz Sonuçları	102
4.3.2 Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) ile Mikroyapısal Muayene Sonuçları	108
4.4 Çevresel Etkilere Dayanım Test Sonuçları	117
4.4.1 Su Absorbsiyonu Değerleri	117
4.4.2 Ultraviyole Işınlının Mekanik Özelliklere Etkisi	121
4.4.3 Yüksek Sıcaklık Özellikleri	126
4.4.3.1 Bilya-Basınç Deneyi Sonuçları	126
4.4.3.2 Alev Deneyi Sonuçları	127
5 SONUÇLARIN İRDELENMESİ	129
5.1 Yoğunluk Özellikleri	129
5.2 Mekanik Özellikler	129
5.3 Mikroyapısal Karakteristikler	131
5.4 Çevresel Etkilere Dayanım Kriterleri	132
5.5 Yüksek Sıcaklık Özellikleri	134
6 GENEL SONUÇ	135
KAYNAKLAR	137
ÖZGEÇMİŞ	140

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 SMC üretim prosesi	27
Şekil 2.2 Olgunlaştırma askılarında SMC makaraları	29
Şekil 2.3 SMC'nin iğne manipülatörleri ile yerleştirilmesi.....	31
Şekil 2.4 Hazır SMC parçasının kalıptan çıkarılışı.....	33
Şekil 2.5 Yaklaşımaya dayalı bir optimizasyon şeması	37
Şekil 2.6 Önerilen otomatik optimizasyon şemasının akış programı	38
Şekil 2.7 Kalıplama sıcaklığının fonksiyonu olarak eğmedeki elastiklik modülünün değişimi.....	40
Şekil 2.8 Kalıplama sıcaklığının fonksiyonu olarak eğme dayanımı	40
Şekil 2.9 Kalıplama basıncının fonksiyonu olarak eğmedeki elastiklik modülünün değişimi.....	41
Şekil 2.10 Kalıplama basıncının fonksiyonu olarak eğme dayanımı	41
Şekil 2.11 Deney sıcaklığının fonksiyonu olarak eğmedeki elastiklik modülünün değişimi ..	42
Şekil 2.12 Deney sıcaklığının fonksiyonu olarak eğme dayanımı	42
Şekil 2.13 Farklı kesme uzunlukları (l) için, kesme derinliğine karşı yatay kuvvetin (F_y) değişimi	44
Şekil 2.14 Farklı kesme uzunlukları (l) için, kesme derinliğine karşı düşey kuvvetin (F_d) değişimi	45
Şekil 2.15 SMC levhasının 4 farklı bölgesinden (A, B, C, D) alınan çeşitli numuneler için eğme dayanımının deney numunelerinin genişliğine göre değişimi	54
Şekil 2.16 SMC levhasının 4 farklı bölgesinden (A, B, C, D) alınan çeşitli numuneler için eğmedeki elastiklik modülünün deney numunelerinin genişliğine göre değişimi ...	55
Şekil 2.17 Basit ve orta büyüklükte parça için yıllık seri üretim miktarı 30 000 parçada iken toplam parça fiyatına farklı fiyat kategorilerinin katkısı.....	58
Şekil 2.18 Karmaşık parça için yıllık seri üretim miktarı 30 000 parçada iken toplam parça fiyatına farklı fiyat kategorilerinin katkısı	58
Şekil 2.19 Sandviç parça için yıllık seri üretim miktarı 30 000 parçada iken toplam parça fiyatına farklı fiyat kategorilerinin katkısı	59
Şekil 3.1 Kalıptan çıkmış parçanın teknik resmi üzerinde deney numunelerinin alınış bölgeleri.....	63
Şekil 3.2 Araştırmada kullanılan darbe deneyi cihazı	66
Şekil 3.3 Araştırmada kullanılan eğme deneyi cihazı.....	67
Şekil 3.4 Yükleme uygulayıcısı ve destek diyagramı (3 noktalı yükleme)	68
Şekil 3.5 Araştırmada kullanılan çekme deneyi cihazı.....	69
Şekil 3.6 Çekme deneyi numunesi, 4) ölçü uzunluğu, 5) kavramalar arasındaki mesafe, 6) deney numunesinin kalınlığı = 4 mm.....	70
Şekil 3.7 Ultraviyole deney düzeneğinin planı ve kesiti	72
Şekil 3.8 Araştırmada kullanılan ultraviyole deney düzeneği	72
Şekil 3.9 Numune sıcaklığının ölçülmesi	73
Şekil 3.10 Araştırmada kullanılan bilya-basınç deneyi cihazı (bilya yarıçapı $R = 2.5$ mm) ...	74
Şekil 3.11 Araştırmada kullanılan alev deneyi cihazı.....	75
Şekil 4.1 Yoğunluğun cam fiber hacim oranları ile değişimi	84
Şekil 4.2 Yoğunluğun merkezden kenara doğru değişimi	84
Şekil 4.3 Darbe dayanımının cam fiber hacim oranları ile değişimi	91
Şekil 4.4 Darbe deneyi sonuçlarının yoğunluk deneyi sonuçları ile karşılaştırılması.....	91
Şekil 4.5 Eğme dayanımının cam fiber hacim oranları ile değişimi.....	98
Şekil 4.6 Eğme deneyi sonuçlarının yoğunluk deneyi sonuçları ile karşılaştırılması.....	98

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 4.7 Çekme dayanımının cam fiber hacim oranları ile değişimi	102
Şekil 4.8 DP1-N ₅ (kenar) No'lu numunenin kırık yüzeyinin görünümü (SEM).....	103
Şekil 4.9 DP1-N ₁₀ (merkez) No'lu numunenin kırık yüzeyinin görünümü (SEM)	103
Şekil 4.10 DP2-N ₇ (merkez) No'lu numunenin kırık yüzeyinin görünümü (SEM).....	104
Şekil 4.11 DP2-N ₄ (kenar) No'lu numunenin kırık yüzeyinin görünümü(SEM).....	104
Şekil 4.12 DP3-N ₂ (kenar) No'lu numunenin kırık yüzeyinin görünümü (SEM).....	105
Şekil 4.13 DP3-N ₈ (merkez) No'lu numunenin kırık yüzeyinin görünümü (SEM).....	105
Şekil 4.14 DP4-N ₁ (kenar) No'lu numunenin kırık yüzeyinin görünümü(SEM).....	106
Şekil 4.15 DP4-N ₈ (merkez) No'lu numunenin kırık yüzeyinin görünümü (SEM).....	106
Şekil 4.16 DP5-N ₂ (kenar) No'lu numunenin kırık yüzeyinin görünümü (SEM).....	107
Şekil 4.17 DP5-N ₁₁ (merkez) No'lu numunenin kırık yüzeyinin görünümü(SEM)	107
Şekil 4.18 DP1-L ₈ (merkez) nolu numunenin mikro yapısı (SEM)	108
Şekil 4.19 DP1-L ₁ (kenar) nolu numunenin mikro yapısı (SEM)	108
Şekil 4.20 DP1-L _s (etek) nolu numunenin mikro yapısı (SEM)	109
Şekil 4.21 DP2-L ₈ (merkez) nolu numunenin mikro yapısı (SEM)	109
Şekil 4.22 DP2-L ₁ (kenar) nolu numunenin mikro yapısı (SEM)	110
Şekil 4.23 DP2-L _s (etek) nolu numunenin mikro yapısı (SEM)	110
Şekil 4.24 DP3-L ₈ (merkez) nolu numunenin mikro yapısı (SEM)	111
Şekil 4.25 DP3-L ₁ (kenar) nolu numunenin mikro yapısı (SEM)	111
Şekil 4.26 DP3-L _s (etek) nolu numunenin mikro yapısı (SEM)	112
Şekil 4.27 DP4-L ₈ (merkez) nolu numunenin mikro yapısı (SEM)	112
Şekil 4.28 DP4-L ₁ (kenar) nolu numunenin mikro yapısı (SEM)	113
Şekil 4.29 DP4-L _s (etek) nolu numunenin mikro yapısı (SEM)	113
Şekil 4.30 DP5-L ₈ (merkez) nolu numunenin mikro yapısı (SEM)	114
Şekil 4.31 DP5-L ₁ (kenar) nolu numunenin mikro yapısı (SEM)	114
Şekil 4.32 DP5-L _s (etek) nolu numunenin mikro yapısı (SEM)	115
Şekil 4.33 Su absorpsiyonu değerinin cam fiber hacim oranları ile değişimi	120
Şekil 4.34 Çözünen madde miktarı değerinin cam fiber hacim oranları ile değişimi.....	120
Şekil 4.35 UV deneyi uygulanan numuneler için çekme dayanımının cam fiber hacim oranları ile değişimi	125
Şekil 4.36 UV deneyi uygulanan numuneler için darbe dayanımının cam fiber hacim oranları ile değişimi	125
Şekil 4.37 UV deneyi uygulanan numuneler için eğme dayanımının cam fiber hacim oranları ile değişimi	126
Şekil 4.38 İz çapının cam fiber hacim oranları ile değişimi (izÇ1: DP1 için iz çapı, izÇ2: DP2 için iz çapı, izÇ3: DP3 için iz çapı, izÇ4: DP4 için iz çapı, izÇ5: DP5 için iz çapı)	127
Şekil 4.39 İz derinliğinin cam fiber hacim oranları ile değişimi (izD1: DP1 için iz derinliği, izD2: DP2 için iz derinliği, izD3: DP3 için iz derinliği, izD4: DP4 için iz derinliği, izD5: DP5 için iz derinliği)	128

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1 Sınıf "A" SMC bileşenlerinin miktar karşılaştırması	2
Çizelge 2.1 Değişik reçine ve camların kırılma indisleri.....	7
Çizelge 2.2 Sertleşmiş reçine tipik özellikleri	8
Çizelge 2.3 Değişik camların özellikleri.....	15
Çizelge 2.4 Bazı dolgu maddelerinin özellikleri	24
Çizelge 2.5 Tipik SMC Macun Formülasyonu, A/B = 15/1	28
Çizelge 2.6 SMC mekanik özelliklerinin karşılaştırılması	30
Çizelge 2.7 Düşük profil BMC özellikleri.....	34
Çizelge 2.8 Katalizörsüz SMC uygulaması için sıcaklığın fonksiyonu olarak esneme direnci (η) değerleri lb-fs/inç ² (MPaS) cinsinden.....	35
Çizelge 2.9 Katalizörsüz SMC uygulaması için sürtünme katsayısı değerleri lb-fs/inç ³ (kPaS) cinsinden	35
Çizelge 2.10 Deneysel ve basma reometresi ile belirlenen kalıplama kuvveti.....	36
Çizelge 2.11 Kullanılan SMC'nin bileşimi	39
Çizelge 2.12 Birleştirme dayanımı karşılaştırma, poliüretan yapışkan, XeCl laser yüzey hazırlama	43
Çizelge 2.13 Birleştirme dayanımı karşılaştırması, abanoz yapışkan sistemi, KrF laser yüzey hazırlama	43
Çizelge 2.14 Test edilen malzemenin hacim fraksiyonları.....	46
Çizelge 2.15 Çekme deneylerinin sonuçları; parantez içindekiler standart sapma.....	46
Çizelge 2.16 Basma deneylerinin sonuçları; parantez içindekiler standart sapma	47
Çizelge 2.17 Eğme deneylerinin sonuçları; parantez içindekiler standart sapma.....	47
Çizelge 2.18 30°C'de 7.8 ve 125 Hz frekanslarında ölçülmüş gerçek modül (E') ve kayıp faktörü (tan δ) değerleri; parantez içindekiler standart sapma	47
Çizelge 2.19 Epoksili Kraton D 1300X ile SMC'nin eğme özellikleri.....	49
Çizelge 2.20 Epoksili Stereon 840 A ile SMC'nin eğme özellikleri.....	49
Çizelge 2.21 Standart Class-A SMC sistemi ve PET esaslı SMC sistemleri.....	51
Çizelge 2.22 Malzeme özellikleri	51
Çizelge 2.23 SMC kompozitlerinin fiziko-kimyasal parametrelerini karşılaştırma	52
Çizelge 2.24 Test edilen malzeme özellikleri.....	56
Çizelge 2.25 DCB testlerinden elde edilen farklı malzemeler için ortalama kırılma özellikleri	56
Çizelge 3.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan SMC bileşimi	60
Çizelge 4.1 DP1-1, DP1-2, DP1-3 plakalar için yoğunluk deneyi sonuçları (merkez ve kenar)	77
Çizelge 4.2 DP2-1, DP2-2, DP2-3 plakalar için yoğunluk deneyi sonuçları (merkez ve kenar)	78
Çizelge 4.3 DP3-1, DP3-2, DP3-3 plakalar için yoğunluk deneyi sonuçları (merkez ve kenar)	79
Çizelge 4.4 DP4-1, DP4-2, DP4-3 plakalar için yoğunluk deneyi sonuçları (merkez ve kenar)	80
Çizelge 4.5 DP5-1, DP5-2, DP5-3 plakalar için yoğunluk deneyi sonuçları (merkez ve kenar)	80
Çizelge 4.6 DP1, DP2, DP3, DP4, DP5 için yoğunluk deneyi sonuçları (etek).....	81
Çizelge 4.7 DP1-1 için darbe deneyi sonuçları (merkez, kenar, etek).....	84
Çizelge 4.8 DP2-1 için darbe deneyi sonuçları (merkez, kenar, etek).....	85
Çizelge 4.9 DP3-1 için darbe deneyi sonuçları (merkez, kenar, etek).....	86
Çizelge 4.10 DP4-1 için darbe deneyi sonuçları (merkez, kenar, etek).....	87

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 4.11 DP5-1 için darbe deneyi sonuçları (merkez, kenar, etek).....	88
Çizelge 4.12 DP1-2 için eğme deneyi sonuçları (merkez, kenar, etek).....	91
Çizelge 4.13 DP2-2 için eğme deneyi sonuçları (merkez, kenar, etek).....	92
Çizelge 4.14 DP3-2 için eğme deneyi sonuçları (merkez, kenar, etek).....	93
Çizelge 4.15 DP4-2 için eğme deneyi sonuçları (merkez, kenar, etek).....	94
Çizelge 4.16 DP5-2 için eğme deneyi sonuçları (merkez, kenar, etek).....	95
Çizelge 4.17 DP1-1 için çekme deneyi sonuçları (enine, boyuna, etek)	97
Çizelge 4.18 DP2-1 için çekme deneyi sonuçları (enine, boyuna, etek)	98
Çizelge 4.19 DP3-1 için çekme deneyi sonuçları (enine, boyuna, etek)	98
Çizelge 4.20 DP4-1 için çekme deneyi sonuçları (enine, boyuna, etek)	99
Çizelge 4.21 DP5-1 için çekme deneyi sonuçları (enine, boyuna, etek)	99
Çizelge 4.22 Mikroyapı görüntüleri üzerinde belirlenen fiberlere ait sonuçlar.....	116
Çizelge 4.23 Yüzey numuneleri için su absorpsiyonu deneyi sonuçları	118
Çizelge 4.24 Etek numuneleri için su absorpsiyonu deneyi sonuçları	118
Çizelge 4.25 UV deneyi uygulanan numunelerin çekme deneyi sonuçları (kontrol grubu için).....	122
Çizelge 4.26 175 saat için çekme deneyi sonuçları	122
Çizelge 4.27 350 saat için çekme deneyi sonuçları	122
Çizelge 4.28 700 saat için çekme deneyi sonuçları	122
Çizelge 4.29 UV deneyi uygulanan numunelerin darbe deneyi sonuçları (kontrol grubu için).....	123
Çizelge 4.30 175 saat için darbe deneyi sonuçları	123
Çizelge 4.31 350 saat için darbe deneyi sonuçları	123
Çizelge 4.32 700 saat için darbe deneyi sonuçları	123
Çizelge 4.33 UV deneyi uygulanan numunelerin eğme deneyi sonuçları (kontrol grubu için).....	124
Çizelge 4.34 175 saat için eğme deneyi sonuçları	124
Çizelge 4.35 350 saat için eğme deneyi sonuçları	124
Çizelge 4.36 700 saat için eğme deneyi sonuçları	124
Çizelge 4.37 Bilya-basınç deneyi sonucu ölçülen iz çapı değerleri.....	127
Çizelge 4.38 Alev deneyi sonucu ölçülen iz derinliği değerleri	128

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde, çok değerli katkıları bulunan ve danışmanım olarak 4 yıl birlikte çalıştıktan sonra danışmanlıktan alınan sayın danışman hocam Prof. Dr. Ahmet Ünal'a, her türlü bilgi ve fikirleriyle çalışmalarımı destekleyen sayın hocam Prof. Dr. Nişan Sönmez'e, sayın hocam Doç. Dr. Erdem Demirkese'n'e ve değerli tecrübeleri ile tezime katkıda bulunarak danışmanlık görevini yerine getiren sayın danışman hocam Prof. Dr. Mustafa Çiğdem'e sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

SMC yöntemi ile kompozit plakaların üretimi aşamasında yardımcı olan Kimelsan LTD Şirketi yetkililerine, deney numunelerinin kesilmesinde yardımcı olan Erdemir A.Ş. yetkililerine, YTÜ Metalurji Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı olanaklarından yararlanmam da yakın ilgilerini gördüğüm YTÜ Metalurji Mühendisliği Bölümü Başkanı sayın hocam Prof. Dr. Müzeyyen Marşoğlu ve YTÜ Metalurji Mühendisliği – Malzeme Anabilim Dalı Başkanı Prof. Dr. Ahmet Topuz'a, ZKÜ Kimya Bölümü Laboratuvarı olanaklarından yararlanmam için yardımcı olan Prof. Dr. Türkan Kopaç'a, tezimin grafik çizim aşamasında yardımcı olan ZKÜ Fizik Bölümü öğretim üyelerinden Doç. Dr. Dilek Dadaylı ve Arş. Gör. Meral Eryürek'e, çalışmalarım süresince bana hoşgörü ve anlayış gösteren Bölüm Başkanım Sayın Prof. Dr. Durmuş Günay'a, çalışmalarım sırasında yakın ilgi ve yardımlarını gördüğüm YTÜ Metalurji Mühendisliği Bölümü uzmanı Aygöl Yeprem'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca maddi ve manevi destekleriyle çalışmalarım süresince benim yanımda bulunan canım anneme ve canım kardeşime teşekkür ederim.

ÖZET

Bu çalışmada; melez bir kompozit olan SMC (Sheet Molding Compound) levha kalıp bileşiminin üç bileşeninden matris olarak kullanılan ortoftalik polyester reçine hacim oranı sabit tutularak, dolgu maddesi olarak kullanılan CaCO_3 (kalsit) ve fiber olarak kullanılan E-camının hacim oranları değiştirilerek optimizasyonu yapılmıştır. SMC kompozit üretim yöntemi ile 5 ayrı plaka imal edilmiştir. Plakalar; %7.86, %11.74, %15.57, %19.36 ve %23.11 E-camı içermektedir. İmal edilen plakalar üzerinde dayanım deneyleri uygulanmıştır. Bu deneyler ile SMC plakalarının yoğunluğu, mekanik mukavemeti ve çevresel etkilere dayanımı incelenmiştir.

Yoğunluk deneylerinde; cam fiber hacim oranının artışı ile yoğunluğun azaldığı, ayrıca fiber dağılımı nedeniyle plakanın merkezinden kenarına doğru ve etek bölgesinde yoğunluğun azaldığı belirlenmiştir.

Mekanik dayanım deneylerinde; darbe tokluğunun, eğme dayanımının, çekme dayanımının cam fiber hacim oranının artışı ile arttığı ve plakanın merkezinde, kenarında ve etek bölgesinde fiber dağılımındaki değişim nedeniyle dayanım değerlerinin farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, cam fiber hacim oranının artışı ile malzemenin mukavemetinin arttığı tespit edilmiştir.

Çevresel etkilere dayanım deneylerinde; su absorpsiyonu değerlerinin cam fiber hacim oranının artması ile yükseldiği belirlenmiştir. Ultraviyole ışınlarına maruz bırakılan çekme, darbe ve eğme deneyi numunelerinin 175, 350 ve 700 saat gibi belli süreler sonunda yapılan çekme, darbe ve eğme deneyleri sonucunda mekanik dayanımlarının azaldığı gözlenmiştir. Bu durum güneş ışınlarının polimer malzemeler üzerinde yaptığı hasar etkisinin sonucudur. Ayrıca yüksek sıcaklıkta, belirli bir süre ve belirli bir kuvvet etkisi altında yapılan bilya-basınç deneyi ve alev deneyi ile kompozitin ısıya dayanıklılığı saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Levha Kalıp Bileşimi, cam fiber takviyeli polyester, mekanik özellikler, yoğunluk deneyi, çevresel etki deneyleri.

ABSTRACT

In this study, an attempt has been made to investigate the effect of CaCO_3 and E-glass contents of a three component hybrid composite of SMC (Sheet Molding Compound). In this material orthophthalic polyester the fraction of which is kept constant is used as matrix. Five separate laminates were produced by means of the SMC composite production method. The laminates contain %7.86, %11.74, %15.57, %19.36 ve %23.11 E-glass. Strength tests were carried out on the laminates produced. Through these tests, the density and mechanical strength of the laminates were investigated as well as their resistance to environmental effects.

In the density tests it was found that the density decreased as the volume fraction of the glass fibre increased and that due to the scatter of the fibres the density decreased from the centre through the side and in the skirt of the laminate.

Mechanical strength test results show that the impact toughness, the flexural strength and the tensile strength increased indirect proportionally to the increase in the volume fraction of the glass fibre and that the strength values displayed variety due to the scatter of the fibres in the centre, in the side and in the skirt of the laminate. In consequence, the volume ratio of the glass fibre was established to increase in parallel to the strength of the material.

The tests performed to assess the materials responses to environmental effects indicated that the water absorption values increased indirect proportion to the increase in the volume ratio of the glass fibre. The mechanical strength of the specimens used in the tensile, impact and flexural tests, which were exposed to ultraviolet lights, was observed to decrease following the tests which were carried out for the fixed periods of 175, 350 and 700 hours. This was caused by the damage effect of solar radiation on the polymer materials. Furthermore, the ball-pressure and glow-wire tests which were performed at high temperatures, for a definite periods of time under the effect of definite force indicated that the composite is resistant to heat.

Keywords: Sheet Molding Compound, glass fibre reinforced polyester, mechanical properties, density test, environmental effect tests.

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Polimerler fiziksel ve mekanik özelliklerini geliştirmek için fiber katı malzemeleri ile takviye edilirler. Özellikleri daha fazla geliştirmek ve daha önemlisi maliyeti azaltmak için dolgu malzemeleri (filler) ilave edilir. SMC (Sheet Molding Compound) hazır kalıp bileşimi, esasen termoset reçine, cam fiber takviye ve dolgu maddelerinden oluşan üç bileşenli kompozit bir malzemedir. Düşük profil bileşenleri, polimerizasyon başlatıcılar, yoğunlaştırıcılar, proses ilaveleri ve kalıp ayırma maddeleri gibi ilave içerikler, malzemenin performansını ya da işlenmesini artırmak için kullanılır. Yapısındaki cam fiber, malzemeye üstün mekanik özellikler, polyester ise izolasyon, dış etkilere dayanma, form zenginliği gibi özellikler verir. Dolgu maddesi olarak kullanılan CaCO_3 (kalsit) ise 3-10 μm boyutunda olup yapıya rijitlik kazandırdığı gibi ısı ve ses izolasyon özelliklerini artırır. Ancak su absorpsiyonunu artırabilme olumsuzluklarına karşı uygun reçine seçilerek olumsuz etkileri minimize edilebilir. Ama en önemli özelliği alev almama (self extinguishing) özelliği kazandırır.

Polyester, cam fiber ve CaCO_3 (kalsit)'in karıştırılmasından elde edilen kalıplamaya hazır bileşim, dünyada SMC adı altında yirmi seneden daha fazla süredir başarıyla kullanılmaktadır. SMC ile üretilen parçalar, yüksek mekanik direnç, elektriksel, termik ve kimyasal özellikleri, hafiflik ve mükemmel dış görünüşle kusursuz birleşirler. SMC, küçük komplike konstrüksiyon parçalarının yanı sıra büyük yüzeyli parçaların yapısında da başarıyla kullanılmaktadır. Bu nedenlerle, diğer termosetlerde ve termoplastiklerin yerine kullanılabilirler gibi, alüminyum, diğer metaller, ahşap ve porselen gibi klasik malzemeler yerine de başarıyla kullanılabilirler. Sonuç olarak SMC, günümüzde ulaştırma, konstrüksiyon, aletler ve pek çok diğer uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılır. Bunlardan otomotiv endüstrisi SMC tüketiminin en yüksek oranını oluşturur. Örneğin, yalnız Kuzey Amerikan pazarında, yıllık tüketim oranı 100 000 000 kg/yıl'ı aşmıştır (Kia, 1993).

SMC; termoset reçine, % 20-35 ağırlık oranında ve 12-50 mm uzunluğunda takviye edici cam fiber, dolgu ve katkı maddelerinin taşıyıcı bir film üzerine konularak, sürekli bir proses ile kalınlığı yaklaşık 6.5 mm olan levha formuna getirilerek üretilen kalıplanmaya hazır bir kompozit malzemedir. Kompozisyonun farklı kombinasyonları ile yani malzemelerin türleri ve yüzde bileşimleri değiştikçe, parçaların mekanik özellikleri ve prosese uygunluğu değişir. Bu durum yüzey kalitesini etkilemektedir. Çizelge 1.1 Sınıf "A" SMC sisteminde kullanılan malzeme bileşenlerinin miktar karşılaştırmasıdır. Bileşenlerin değişen çeşit ve oranı, mekanik özellikleri, işlenebilirliği ve hatta yüzey kalitesini bile etkileyebilir. Fiber miktarının artması

genellikle mekanik özellikleri artırır. Sürekli örgüler, dokunmuş iplikler ve cam kumaşlardan yüzey düzgünlüğünü uygun hale getirmek için kaçınılır.

Çizelge 1.1 Sınıf “A” SMC bileşenlerinin miktar karşılaştırması (Ünal, 2001).

Malzeme Bileşimi	% Ağırlık	% Hacim
Polyester Reçine	20-27	33-42
Cam	25-30	18-30
Dolgu Maddesi	40-50	29-39
Diğerleri (başlatıcılar, yoğunlaştırıcılar, kalıp ayırma maddeleri, vb.)	3-5	6-8

SMC, çekme yükü ya da sınıf “A” yüzeyi gibi özel uygulamalar için ve özel performans isteklerini karşılamak amacı ile formüle edilebilir.

Bu çalışmada, SMC’nin üç bileşeninden matris olarak kullanılan ortoftalik polyester reçine hacim oranı sabit tutularak, filler (CaCO_3) ve fiber (E-camı) hacim oranları değiştirilerek, SMC yöntemi ile imal edilmiş olan 5 ayrı tür plakalar üzerinde dayanım deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler ile malzemenin mekanik dayanımı, çevresel etkilere dayanımı, hafiflik gibi özellikleri incelenmiştir. Deney sonuçları literatürlerle karşılaştırma yapılarak yorumlanmıştır.

2. SMC KOMPOZİT ÜRETİM YÖNTEMİ İLE İLGİLİ LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1 SMC Kompozisyonunun Bileşenleri

SMC hazır kalıp malzemeleri i) Matris malzemesi, ii) Takviye malzemesi, iii) Dolgu malzemesi, iv) Diğer katkıları (başlatıcı, yoğunlaştırıcı, kalıp ayırma ajanı vb.) bileşenlerinden oluşmaktadır. Aşağıda bu bileşenlerin her biri detaylı olarak ele alınmıştır.

2.1.1 Polyester Reçineler

Matris malzemesi olarak kullanılan polyester reçineler iki ana grupta toplanırlar (Ünal, 2001).

- Doymuş polyesterler
- Doymamış polyesterler

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

Doymamış polyester reçineler ise, uygun bir katalizör ile çapraz bağ (şebeke yapısı) oluşturan termoset özellikli reçinelerdir. Cam takviyeli plastik üretiminde genellikle doymamış polyester reçine kullanılır ve değişik amaçlar için, değişik özellikte doymamış polyester reçine türleri geliştirilmiştir. Bundan sonra “polyester reçine” terimi “doymamış polyester reçine” anlamında kullanılmıştır.

Polyester reçine üretiminde kullanılan başlıca maddeler, bir dibazik organik asit veya anhidridi ile bir dihidrik alkol (glikol) dur. Termoset reçine içinde polimer zincirinin çapraz bağ yapabilmesi için dibazik asitin bir bölümünde doymamış grup veya çifte bağ bulunması gereklidir.

Ancak, doymamışlık, aromatik olmayan bir madde ile sağlanmalıdır. Aksi takdirde, çapraz bağ yine sağlanamaz. Örneğin, vinil benzen peroksit katalizör eşliğinde çapraz bağ yaparken, benzen halkası bozulmaz, yalnızca vinildeki çifte bağ açılır.

Basit bir polyester reçine propilen glikol, maleik anhidrid (doymamış) ve ortoftalik anhidrid (doymuş) ile hazırlanabilir. Her iki anhidrid’in oranında yapılacak değişiklik polyester reaktivitesini etkiler. Doymamış anhidrid oranı arttıkça polyesterin reaktivitesi de artış gösterir. Kullanılan değişik cins glikol ve dibazik asitlerle, değişik özelliklere sahip polyester reçinelerin elde edilmesi mümkündür.

Polyester reçine içinde ayrıca stiren monomeri bulunur. Bu monomerin rolü hem polyester zinciri için çözücü teşkil etmek, hem viskoziteyi düşürmek, hem de çapraz bağı sağlamaktır. Sertleşme sırasında, stiren monomeri, doymamış gruplarla birleşerek polyester zincirlerini birbirine bağlar ve çapraz bağ oluşturur.

Kısaca bakılacak olursa, polyester üretimi için gerekli olan maddeler;

- Bir glikol,
- Bir doymamış dibazik asit,
- Bir doymuş dibazik asit,
- Bir reaktif monomer'dir.

Ancak, ticari bir polyester reçine üretiminde bunlara ek olarak bir madde daha kullanmak gereklidir. Bu madde inhibitördür ve stoklama sırasında polyesterin kendi kendine jelleşmesini önlemek için polyester üretiminden sonra ambalajlama sırasında kullanılır.

Bu maddeleri birer birer incelemek gerekirse (Ünal, 2001):

2.1.1.1 Glikoller

Ticari olarak birçok glikolu geniş bir fiyat yelpazesi içinde bulmak mümkündür. Genel olarak glikol seçimi, aranan özelliği sağlayabilecek en ucuz hammadde olarak yapılır.

Glikollerin en basiti etilen glikoldür. Polyester üretiminde kullanılabilir, ancak, kristalleşmeye meyil eden bir polyester ürün verir ve stiren monomerle uyuma göstermez. Bu nedenle ya diğer glikollerle birlikte kullanılır ya da reçine içinde asetil veya propionil-grubu bulunması sağlanır.

Daha sonraki glikol, propilen glikol (propan 1,2 diol) dur. Kristalleşmeye neden olmaz, stiren ile uyum sağlar ve ucuz sayılır. Piyasada bulunan polyesterin büyük bir kısmında kullanılmaktadır.

Diğer glikolleri şöyle sıralayabiliriz;

Dietilen glikol, esnek polyester üretiminde kullanılır. Dipropilen glikol, hem esnek hem kimyasal dayanımlı polyester üretiminde kullanılır. Neopentil glikol, özellikle alkali kimyasal maddelere dayanım ve hidrolitik stabilite sağlar. Ancak stiren ile uyum sağlayabilmek amacı ile başka glikoller ile karıştırılarak kullanılır.

Yüksek kimyasal dayanım aranan polyesterler için genellikle Bisfenol A (2,2 – bis (4 hidroksifenil) propan) veya hidrojenlenmiş homoloğu (2,2 – bis (4 hidroksi siklohegzil) propan) kullanılır. Bu tür reçinelerde en yüksek kimyasal dayanımın sağlanabilmesi için ürünün fırınlanması gereklidir. Organik asit ile reaksiyona girebilecek bir glikol yapmak için Bisfenol A genellikle etilen oksit veya propilen oksit ile önceden reaksiyona sokulur.

Alev geciktiricilik (yanmazlık) sağlanması için molekül içine klorlanmış veya bromlanmış dioller katmak yeterlidir. Böyle bir diol katılmış polyesterler hem alev geciktirici özellik kazanmakta, hem de yüksek kimyasal dayanıma sahip olmaktadır. Dibromo neopentil glikol böyle bir diol için örnek verilebilir.

Gliserol, penta eritritol ve mannitol gibi polihidrik alkollerden % 5 oranında kullanılması halinde, ısı dayanımlı polyesterlerin elde edilmesi mümkündür.

2.1.1.2 Doymamış Asitler

Polyester içindeki doymamış asit, polyesterin çapraz bağ yapmasını sağlar. Kullanım oranı ne kadar yüksek ise, çapraz bağ derecesi o kadar yükselir. Ayrıca bu oranın artması yük altında deformasyon sıcaklığını da yükseltir. Ancak çekme dayanımı ve kırılmada uzama miktarında azalmaya neden olur. Bu oran bir de reçinenin reaktivitesini etkiler, ne kadar yüksek olursa o kadar reaktif polyester elde edilir. Reaktivite ve sertleşmiş polyester özellikleri, doymamış dibazik asit ile doymuş dibazik asiti belirli oranlarda karıştırarak elde edilir. Nitekim bu yöntem tüm polyester üreticilerince kullanılmaktadır.

En çok kullanılan doymamış asit maleik asittir (132-140°C). Genellikle düşük erime noktası nedeniyle anhidrit halinde kullanılır (60°C). Bir diğer asit, fumarik asittir. Maleik asitin trans izomeridir. Her ne kadar polimerizasyon sırasında maleik asit belli bir miktarda fumarik asit haline dönüşüyorsa da, doğrudan doğruya fumarik asit ile yapılan polyesterlerin kristalleşme eğilimi gösterdikleri ancak daha yüksek yumuşama noktasına sahip olduğu görülmüştür.

Kloromaleik asit, itakonik asit ve sitrakonik asit gibi diğer doymamış asitler hem pahalıdır, hem de polyester üretiminde yaygın kullanımı yoktur. Ayrıca bu tür asitlerde özellikle itakonik asitte stabilite sorunları ile karşılaşmıştır. Keza kloromaleik % 267 klor içermesine rağmen, alev geciktiricilik için bu miktar yeterli değildir.

2.1.1.3 Doymuş Asitler

Dibazik asit veya anhidritler için “doymuş” ifadesi, peroksit katalistler ile reaksiyona girecek serbest çifte bağ bulunmaması anlamını taşımaktadır. Ancak, molekül içinde aromatik halka bulunabilir. Doymamış polyester üretiminde ortoftalik anhidrit önceleri kristallenme problemlerini gidermek amacı ile kullanılmıştır. Ortoftalik anhidrit (veya diğer izomerleri anhidrit olmadığı için genellikle söylenen adı ile ftalik anhidrit) ile yapılan polyesterler berrak olmakta ve stiren monomeri ile mükemmel bir şekilde bağdaşabilmektedir. Ayrıca ucuz ve kolay bulunabilir olması da en çok kullanılan anhidrit haline getirmiştir.

Yine çok kullanılan bir doymamış asit izoftalik asittir. Sertleşmiş reçineye su dayanımı sağlar. Ayrıca, kimyasal maddelere karşı dayanım aranan polyester üretiminde kullanılır.

Diğer izomer şekli teraftalik asittir ve polyester üretiminde kullanılır ve diğer iki izomere benzer özellikler arzeder.

Alev geciktiricilik özelliğinin polyestere verilebilmesi için klorlu veya bromlu asitler kullanılır. Bunların başlıcaları tetrakloro-ftalikanhidrit ve HET anhidrit’dir (Hegzokloro-endo-metilen-tetrahidro ftalik anhidrit veya diğer adıyla Klorendik anhidrit). Yanmazlık konusunda HET anhidrit yüksek klor oranı nedeni ile daha faydalıdır.

Polyesterde esneklik özelliği doymuş dibazik asiti tamamen veya kısmen bir alifatik dibazik asit ile değiştirme ile sağlanır. Bu asitlere örnek olarak adipik asit ve sebazik asiti gösterebiliriz. Bu tür esnek reçineler genellikle esneklik sağlamak amacı ile konvansiyonel reçinelere katılırlar. Tek başına bu tür reçinelerin kullanımı çok sınırlıdır.

2.1.1.4 Monomerler

Monomerler iki amaçla kullanılır;

- Reçinenin viskozitesini düşürecek şekilde bir çözücü fonksiyon göstermesi
- Polyester zincirlerinin çapraz bağ ile birbirine bağlanmasını sağlaması.

Bu amaçla, düşük viskozitesi, düşük fiyatı ve kolay bulunabilirliği nedeniyle en çok kullanılan monomer stiren’dir. Bir diğer monomer, daha berrak ve ultraviyole stabilitesi aranan reçinelerde kullanılan metil metakrilat ve n-bütül metakrilat’dır. Bu tür reçineler ışık geçirgen levha üretiminde ve çatı ışıklığı üretiminde, “E” camı ile aynı kırılma indisine sahip oldukları için kullanılır.

Çizelge 2.1’de değişik reçine ve camların kırılma indisleri görülmektedir.

Çizelge 2.1 Değişik reçine ve camların kırılma indisleri (Ünal, 2001).

Malzeme kırılma indisi	Kırılma indisi
Ortoftalik polyester/stiren	1.569
Ortoftalik polyester/stifen/ışık stabilizörü	1.560
Ortoftalik polyester/metil metakrilat	1.552
HET asitli polyester	1.550
“E” camı	1.548
“C” camı	1.520

Diğer bazı monomerler ve kullanım amaçlarını da şöyle sıralayabiliriz;

- Diallil ftalat, özellikle sıcak pres üretiminde kullanılacak polyesterlerde kullanılır; oda sıcaklığında sertleşme yapmaz.
- Bünyesinde metil stiren bulunan reçineler hem daha esnek, hem de düşük çekmeli olmaktadır.
- Bünyesinde dikloro stiren veya dibromo stiren gibi halojinli monomerler bulunan reçineler belli oranda alev geciktirici özellik gösterirler; ancak bu monomerler çok pahalıdır.
- Yanmazlık özelliğini en iyi sağlayan monomer diallil benzen sülfonat’dır. Ayrıca polyesterin diğer özelliklerini de etkilemez. Fiyatının çok yüksek olması kullanımını sınırlamaktadır.
- Isıya dayanıklı polyester üretiminde triallil siyanürat da kullanılabilir.

Çizelge 2.2’de sertleşmiş reçinelerin tipik özellikleri görülmektedir.

Çizelge 2.2 Sertleşmiş reçinelerin tipik özellikleri (Ünal, 2001).

Polyester Reçine Tipi	Dökme Reçine Özelliği					Laminat Özelliği			
	Eğilme Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Uzama Yüzdesi (%)	Yük Altında Deformasyon Sıcaklığı (°C)	Cam Yüzdesi (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (GPa)
Ortoftalik	100	65-75	3.2	2.0-4.0	55-110	30	150	90	7
İzoftalik	140	70-85	3.5	3.5	75-130	30	230	120	8
Neopentil Glikol	130	70	3.4	2.4	110	30	170	90	7
İzoftalik/Neopentil Glikol	130	60	3.4	2.5	90-115	30	160	90	7
İzoftalik/HET Asit	85	55	3.2	2.9	70	30	150	90	7
HET Asit	80	40-50	3.2	1.3-4.0	55-80	30	150	85	7
Bisfenol A	130	60-75	3.2	2.5-4.0	120-136	30	170	90	7
Klorlu Parafin	110	50-60	3.4	1.2-4.8	55-80	30	140	90	7
İzoftalik/Klorlu	90	60	2.0	4.8	50	30	140	100	7

2.1.1.5 İnhibitörler

Polyester polimeri monomer içinde çözöldüğü zaman, oda sıcaklığında katalizör olmaksızın jelleşmeye başlar. Bu sakıncayı gidermek ve polyestere makul bir ömür kazandırmak amacı ile bir inhibitör katılır. Bu işlem, normal koşullarda polikondensasyon reaksiyonundan sonra ve monomer içinde çözölmeden önce yapılır.

İnhibitörler genellikle redükleyici kimyasal maddelerdir ve serbest radikalleri hidrojen atomu vererek absorblarlar, böylece reçinenin polimerizasyonunu önlerler. Ancak, devreye girecek yeni serbest radikaller reçinenin jelleşmesini başlatabilir.

Hızlandırıcısı katılmış bir polyestere peroksit katalizör katıldığı zaman meydana gelen olay, ilk önce inhibitörün nötrale edilmesidir. Jelleşme süresini geciktirmek için kullanılan bu yöntem ile belli bir süre reçinenin aktif olması önlenir. Ancak, nötralizasyon tamamlandıktan sonra polimerizasyon başlar. Bazı hallerde, oldukça uzun bir jelleşme süresi, ancak kısa bir sertleşme süresi arzu edilebilir. Bu gibi durumlarda ayrıca başka bir inhibitör kullanılması mümkündür.

Kullanılan başlıca inhibitörler hidrokinon, t-bütıl katekol ve süstitüe benzokinonlardır. Kullanım mertebeleri %0.01-0.03'dür. Ancak bu mertebe reçinenin cinsine veya tropikal iklimde kullanılıp kullanılmamasına bağılı olarak değışir. Uygulamada optimum stabiliteyi ve optimum reaktiviteyi sağlayacak miktarda inhibitör kullanılır.

Ayrıca inhibitör kullanılması istendiğinde, seyreltik çözeltiler kullanılmalıdır. Örneğın %1'lik inhibitör çözeltilisinden %1 oranında katılırsa, %0.01'lik mertebeye ulaşılır ve böyle bir ilave sonucu jelleşme süresi 18 dakikadan 50 dakikaya yükseltilebilir.

2.1.2 Ticari Reçineler

Polyester reçineler ticari olarak değışik cins ve türde bulunmaktadır. Bunları aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz (Ünal, 2001):

- Jelkot reçineler
- Genel amaçlı reçineler
- Kimyasal dayanımlı reçineler
- Alev geciktirici reçineler
- Stiren buharlaşması az olan reçineler
- Düşük çekmeli reçineler

- Özel amaçlı reçineler
- Döküm reçineleri

2.1.2.1 Jelkot Reçineler

Jelkot, kalıp yüzeyine sürülen ilk kat reçine tabakasıdır. Düzgün ve cam fiberi koruyucu bir yüzey elde etmek amacı ile kullanılır. Ortalama 0.4 mm kalınlıkta uygulamak için metrekareye yaklaşık yarım kilo jelkot kullanılır, istendiği takdirde kendinden renkli olarak kullanılabilir.

Özellikle kimyasal direnç aranan uygulamalarda, jelkot tabakasının arkasına “C” camından veya sentetik fiberden yapılmış yüzey keçesi kullanılmalıdır. Böylece cam fiber tamamen korunmuş olur.

Jelkot reçineler içinde genellikle tiksotropi özelliği sağlayan maddeler bulunur. bunun amacı, sertleşme sırasında jelkotun çukur noktalarda akma yapmasını önlemektir. Fırça ile sürülmek üzere veya püskürtme makinası ile püskürtülmek üzere iki tip jelkot vardır. Bu iki tür jelkot arasındaki fark viskozite ve tiksotropi özelliklerinden kaynaklanır.

Genel amaçlı jelkotlar ortoftalik veya izoftalik reçinelerden yapılabilir. İzofthalik reçineden yapılan jelkot aynı zamanda kimyasal maddelere de dayanıklıdır. Hava koşullarına dayanım aranan uygulamalarda kullanılacak jelkot hem izofthalik polyesterden yapılmış olmalı, hem de monomer olarak stiren ile birlikte metil metakrilat monomerlerini de içermelidir.

2.1.2.2 Genel Amaçlı Reçineler

Genellikle ortoftalik polyester reçinelerdir. Yakın zamana kadar tekne üretiminde çok kullanılmıştır; ancak yerini yavaş yavaş, su absorpsiyonu daha düşük olan izofthalik polyestere bırakmaktadır. Tekne üretimi dışında ortoftalik polyester reçinelerin geniş ölçüde kullanım alanı vardır. Değişik amaçlara uygun olarak yüksek veya düşük viskoziteli; sert veya yumuşak özelliklerde üretilebilir.

2.1.2.3 Kimyasal Dayanımlı Reçineler

Polyester molekülünde en zayıf bağ ester gruplarıdır ve kimyasal etkidenden korunmak zorundadır. Bu amaçla çapraz bağ derecesi yüksek tutulur ve ester bağları arasına büyük

molekül yapıları gruplar yerleştirilir. Orta dereceli kimyasal etkiler için genellikle izoftalik polyester kullanılması yeterlidir.

Daha yüksek bir kimyasal dayanım aranması halinde, propilen glikol yerine neopentil glikol kullanılır. Daha üstün dayanımlar için bisfenol A türevleri ve HET asit kullanmak gerekir.

Polyester üreticileri, hangi polyesterin hangi ortamlara dayanacağı konusunda bilgileri sağlamaktadır.

2.1.2.4 Alev Geciktirici Reçineler

Yangın ihtimalinin bulunduğu bir çok inşaat ve nakliye uygulamaları için alev geciktirici polyester reçineler kullanılmaktadır.

Alev geciktirici polyester üretimi için değişik maddeler kullanılabilir;

- Klorlu veya bromlu bir monomer
- Klorlu veya bromlu bir glikol
- Klorlu veya bromlu bir asit (doymuş, doymamış veya karışımı)
- Diğer alev geciktirici monomerler

Alev geciktirici özellik katmak için ayrıca klorlu hidrokarbonlar, trikloro etil fosfat veya brom içeren bileşikler de polyester molekülüne katılabilir. Bütün bu maddelerin vermiş olduğu alev geciktiricilik özelliği birbirinden farklıdır. Kullanım özelliğine ve aranan yanmazlık derecesine bağlı olarak reçine seçimi yapılmalıdır. Alev geciktiricilik özelliğini yükseltmek amacı ile halojen içeren polyesterlere antimon trioksit ilave edilebilir. Ancak, bu durumda polyester şeffaflığını kaybeder. Aynı şekilde alüminyum hidroksit ve çinko borat da kullanılabilir.

SMC laminatlarda reçine/cam oranı yanıcılığı etkileyen bir faktördür. Cam oranı ne kadar yüksek olursa, yanıcılık da o kadar azalmaktadır.

2.1.2.5 Stiren Buharlaşması Az Olan Reçineler

Dünyada bir çok ülkede çalışanların sağlığının korunması açısından, atölyelerde stiren buharının belli sınırlar içerisinde kalması zorunluluğu konmuş bulunmaktadır. Bu sınır genellikle 100 ppm (420 mg/m^3) mertebesinde dir. Bu sınırlamalar sonucu stiren buharlaşması az olan reçinelere rağbet artmıştır.

Böyle bir polyesterin sağlanması üç yoldan mümkündür;

- Daha az uçucu monomerler kullanmak,
- Polyester içindeki stiren oranını azaltmak,
- Film oluşturan veya polyesterle bağdaşmayan diğer katkıların kullanılması.

Değişik monomer kullanılması gerçekçi bir çözüm olamamaktadır. Çünkü, monomerler içinde en ucuzu stirendir ve çoğu monomer buharları en az stiren kadar zararlıdır.

Polyester içindeki stiren oranının % 42'den % 35'e düşürülmesi halinde, buharlaşma oranında büyük bir azalma olduğu deneyler sonucu görülmüştür. Ancak bu durumda viskozite büyük ölçüde artış göstermektedir. Bu sakıncayı önlemek için polyester molekülleri küçük tutulabilir, ancak böyle bir polyesterin de mekanik özelliklerinde düşüş görülür. Tüm bu avantaj ve dezavantajlar dikkate alınarak optimum bir mertebeye varılmalıdır.

Stiren buharlaşmasını önlemek için en çok kullanılan yöntem, reçine içine film oluşturuvcu bir madde katmaktır. Bu madde reçine ile bağdaşmaz ve sertleşme sırasında dışa atılarak laminat yüzeyinde film tabakası oluşturur. Böylece stiren buharlaşması önlenmiş olur.

2.1.2.6 Düşük Çekmeli Reçineler

Normal olarak, bünyesinde % 35 stiren içeren doymamış polyester reçinelerde % 8'e varan bir çekme görülmektedir. Bu çekme sonucu, istenmeyen yüzey bozuklukları görülmektedir. Çekme sorununu çözümllemek amacı ile genellikle termoplastik ilavesi kullanılmaktadır. Düşük çekme konusunda en çok kullanılan ilave maddeler şöyle sıralanabilir;

- Polivinil asetat homopolimer ve kopolimerleri,
- Polikaprolaktam selüloz asetat bütirat,
- Akrlık polimerler.

Polyester içine katılan bu maddeler, çoğunlukla tam bağdaşma meydana getirmediikleri için, kullanım oranı % 10-20 mertebesini aşmamaktadır.

Ayrıca, renklendirilememe, boya tutmama, yüzeyde boşluklar olması gibi bir çok problemleri olan bu tür reçineler oda sıcaklığında çalışmaya uygun değildir; ancak, sıcak pres çalışmalarında kullanılabilir.

2.1.2.7 Özel Amaçlı Reçineler

Esnek reçineler, sertleşme süresi tamamlandıktan sonra bile, yumuşak lastik gibi olan reçinelerdir. Doymuş asit yerine adipik ve sebasik asit gibi dibazik alifatik asit kullanılarak

üretir. Bu tür reçinelerde kimyasal dayanım büyük ölçüde düşer ve su absorpsiyonu çok miktarda artar. Başlıca kullanım alanı esnekliği ve darbe dayanımını arttırmak üzere diğer fiber tipi ve döküm tipi reçinelere katılmasıdır.

Hazır kalıplama bileşimleri için reçineler: SMC üretimi için değişik tür reçineler kullanılabilir. Önemli olan husus çok miktarda dolgu kabul edilmemesi, bu dolgu miktarına rağmen cam fiberi ıslatabilmesi, katalist ile birlikte uzun süre reaksiyona girmeden kalabilmesi, yüksek ısıda çabuk sertleşebilmesidir. Bu amaçla kullanılan reçinelerde genellikle düşük çekme sağlayan katkı maddeleri bulunur. SMC hamurunun yapılması için her şeyden önce az uçan monomer kullanılmalıdır. Bu monomer genellikle diallil ftalat' ır. Cam fiber, aseton içinde çözülmüş reçine ile ıslatılır ve asetonun uçması beklenir ve hamur elde edilmiş olur.

Işıklı sertleşen reçinelerin, doymamış polyester içerisine özel bir katalizör katılarak yalnızca ışık altında sertleşmesi sağlanabilmektedir. Genellikle ışık geçirgen levha üretiminde kullanılan bu tür reçinelere % 0.5 oranını geçmemek kaydı ile pigment de katılabilir. Bu tür reçinelerin avantajları şöyle sıralanabilir;

- Kullanıcı tarafından ayrıca katalizör ilave edilmesi gerekmediğinden, karıştırma ve ölçme hataları olmaz.
- Reçine fırça üzerinde donmaz, dolayısı ile temizlik kolaydır.
- Özellikle kuvvetli ışık kaynağına tutulmadıkça sertleşme olmayacağından istenilen yerlere fazladan reçine uygulama olanağını verir.

2.1.2.8 Döküm Reçineleri

Polyester reçineler düğme üretiminde büyük ölçüde kullanılır. Kabartma desenli düğmeler için silikon kauçuğu veya esnek PVC kalıplar kullanılır. Sonradan işlenecek düğmeler için ise, savurma döküm tekniği ile polyester levha dökülür ve tam sertleşmeden özel kesme bıçakları ile kesilir. Suni mermerlerin yapımında da döküm tipi polyester kullanılmaktadır.

Köpük polyester reçineler:

Açık hücre yapısı sayesinde su buharı geçirgenliği vardır. Dolgu ve cam takviyesi kabul eder. Hafif sandviç panel üretiminde, ısı ve ses izolasyonunda kullanılabilir. Mekanik özellikleri yoğunluğuna ve cam takviyesi oranına bağlı olarak değişmektedir.

2.1.3 Takviye Malzemeleri

Takviye malzemeleri, reçine sistemlerinin mekanik özelliklerini arttırmak amacı ile kullanılır. Bu takviye malzemeleri içinde pratikte en çok kullanılan cam fiberdir ve devamlı fitil, dokuma, keçe gibi değişik türlerde kullanılır.

Son zamanlarda, çok yüksek mekanik mukavemete sahip olan karbon fiberinin geliştirilmesi özellikle mukavemet ve hafifliğin önem kazandığı havacılık endüstrisinde yeni boyutlar getirmiştir.

Son zamanların bir diğer yeni uygulaması aromatik poliamid fiber (Kevlar) dir. Bu tür fiberin kullanılması, cam fiber takviyeye oranla % 30, alüminyum alaşımına oranla % 50 civarında ağırlık tasarrufu sağlamaktadır.

Ayrıca takviye malzemesi olarak poliakrilo nitril, polietilen teraftalat, asbest, pamuk ve selüloz fiberi de kullanılmaktadır (Ünal, 2001).

2.1.3.1 Yüzey Tülleri

Yüzey tülü veya yüzey keçesi olarak bilinen takviye malzemesi, fiberin tesadüfi bir dağılım içinde keçe şeklinde yapılmış, reçinece zengin ve düzgün yüzeyli bir tabaka oluşturan malzemedir.

Yüzey tülü veya keçesi 0.08 mm'den 0.34 mm kalınlığa kadar, metrekaresi 30 gramdan 60 gram'a kadar üretilmektedir. Bu takviye malzemesinde cam fiber ve poliakrilonitril veya polyester gibi sentetik fiberler kullanılabilir. Cam fiberinden yapılan yüzey tüllerinde genellikle kimyasal dayanım ve hava koşullarına dayanım sağlamak amacı ile "C" camı kullanılır.

SMC üretiminde yüzey tülü kullanmanın avantajları şöyle sıralanabilir:

- Kimyasal dayanım ve hava koşullarına dayanım sağlamak üzere reçine bakımından zengin bir tabaka oluşturma olanağı,
- Jelkot tabakası ile SMC laminat arasında daha sağlam bağ kurma olanağı,
- Jelkot yüzeyinde yıldız çatlamlara engel olması,
- Yüzeyde cam fiber görüntüsünü önlemek,
- Yüzeyin darbelerden daha az etkilenmesi için belli bir esneklik sağlaması (Ünal, 2001).

CTP ürünlerin son katı olarak da yüzey tülü kullanılması halinde, bozuk yüzey görüntüsü önlenebileceği gibi, ayrıca laminat üzerindeki kalınlık farklılıklarını da dengelemek mümkündür.

2.1.3.2 Cam Fiber Takviyeler

Her ne kadar cam fiber ticari olarak İngiltere’de 1930’larda üretilmeye başlanmışsa da devamlı cam fiberin plastiklerin takviyesinde kullanılmasına 30 yıl kadar önce başlanmıştır. Fiber haline dönüştürülebilecek değişik cam kompozisyonları vardır; ancak ticari nedenlerle bunların çok azı kullanılır. Bir zamanlar, cam fiber üretiminde “A” camı veya diğer adı ile Alkali camı kullanılırdı. Bugün ise, bu üretimde “E” camı veya diğer adı ile elektrik dayanımlı cam kullanılmaktadır. “E” camı, çok az alkali içeren borosilikat camıdır ve çok üstün elektriksel ve mekanik özellikleri vardır. Ayrıca kimyasal dayanımı da yüksektir.

Cam fiber üretiminde kullanılan bir diğer cam cinsi, “C” camıdır. Kimyasal dayanımı çok üstün bir cam cinsidir ve özellikle yüzey tülü üretiminde kullanılır.

Özel uygulamalar için çok yüksek mekanik dayanımlı “R” ve “S” camları da geliştirilmiştir ve uçak endüstrisi ile uzay endüstrisinde kullanılmaktadır. Değişik cam cinsleri, kompozisyonları ve özellikleri Çizelge 2.3’te görülmektedir.

Çizelge 2.3 Değişik camların özellikleri (Ünal, 2001).

	Kompozisyon				
	A	C	E	R	S
SiO ₂	72.0	64.6	52.4	60.0	64.4
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₂	1.5	4.1	14.4	25.0	25.0
CaO	10.0	13.4	17.2	9.0	-
MgO	2.5	3.3	4.6	6.0	10.3
Na ₂ O, K ₂ O	14.2	9.6	0.8	-	0.3
B ₂ O	-	4.7	10.6	-	-
BaO	-	0.9	-	-	-
Mekanik Özellikleri					
Spesifik Yoğunluk	2.45	2.45	2.56	2.58	2.49
Kırılma İndisi	1.512	1.520	1.548	-	1.523
Tel Lif Çekme Dayanımı, (GPa)	3.1	-	3.6	4.4	4.5
Çekme Modülü (GPa)	72	-	76	85	86
Yumuşama Noktası (°C)	700	690	850	990	-

Cam fiber üretimi için genelde iki yöntem vardır;

- Bilyalardan veya

- Doğrudan eritme yöntemleri.

Günümüzde genellikle ikinci yöntem kullanılmaktadır. Doğrudan eritme prosesinde eritilmiş “E” camı, çok sayıda hassas boyutlu delikleri olan, platin alaşımından yapılmış, ısıtılmış kovanlardan dökülür. Sabit ısıda ve yüksek hızda bir bobine sarılan cam fiberi belirli toleranslarla istenilen çapta çekilir.

Tüm cam fiber üretim sırasında “bağlayıcı” ile kaplanır. Bu “bağlayıcı” hem cam fiberin kullanım özelliğini belirler, hem de lifler arasında aşınmayı engeller. Ayrıca dokuma veya kumaşlarda liflerin bir arada durmasına da yardımcı olur.

Cam fiber üzerine uygulanan bağlayıcı dört değişik ana maddeden oluşur:

- Reçinenin cam fibere bağlanmasını sağlayan “coupling agent” (Genellikle bir organik silikon bileşiği veya silandır).
- Bir film oluşturuucu polimer (Genellikle polivinil asetat emülsiyonudur).
- Bir yağlayıcı madde (Genellikle bir asit amid’dir).
- Antistatik özellik gibi fibere özellik katan diğer maddeler.

Avrupa’da cam fiber, fiber çapına göre sınıflandırılmaktadır. Buradan da “teks” sayısı ortaya çıkmaktadır. “Teks” sayısı yaklaşık 400 liften oluşan cam fiber demetinin 1000 metresinin gram olarak ağırlığıdır. Örneğin ortalama fiber çapı 10 μm olan ve 1000 metresi 80 gram gelen demetin teks 80’dir.

Devamlı fitil, bir veya daha çok sayıda cam fiber demetinin, hükümsüz olarak bir mandrel üzerine birbirine paralel olarak sarılması ile oluşturulur.

Demet sayısı ve bobin boyutları son kullanım amacına göre farklılık gösterir. Bazı özel uygulamalar için cam fiber demetleri kendi içinde iki veya daha çok ayrıma bölünebilir. Fiber üzerindeki bağlayıcı genellikle polyester reçine ile bağdaşabilen türdendir.

Değişik gereksinimleri karşılamak üzere fitiller değişik tiplerde üretilirler. Proseslere göre aralarındaki farklar aşağıda belirtilmiştir.

- Püskürtme yöntemi için bu amaçla üretilen fitiller kolayca kırılabilmesi ve kolay ıslanabilme özelliği ile demet bütünlüğü özelliğini içermeli, ayrıca az hava kabarcığı bırakan ve statik özelliği düşük olan yapıya sahip olmalıdır. Demetler genellikle orta sertlikte ve 10-13 μm çapındaki liflerden oluşmalıdır. Genelde 80 teks civarındaki demetler kullanılır.

- Keçe üretiminde kullanılmak üzere üretilen fitiller kolayca kırılabilmesi ve keçe üretim kademesinde kolayca düzgün bir şekilde dağılabilmelidir. Demetler birbirine çok iyi yapışma özelliği gösterdiği gibi, aynı zamanda kullanım sırasında kolaylıkla ıslanabilmelidir. Genellikle orta sertlikte ve 10-13 μm çapındaki liflerden oluşan, tek veya çok splitli (ayrıklı) demetler kullanılır.

Işık geçirgen levha üretimi için, fiber görünümünü azaltması nedeniyle çok splitli demetlerin kullanımı tavsiye edilir.

- Hazır kalıplama bileşimi üretiminde kullanılan fitiller orta sertlikten çok sertliğe kadar değişen bir sertliğe sahiptir. Kolay kırılabilir, maksimum reçine penetrasyonunu sağlar, demet bütünlüğünü kalıplamadaki akma sırasında koruyacak niteliktedir. Yüzeyde dalgalanmaları ve elyaf görüntüsünü önlemek için bazı özel önlemler alınmıştır. Fiber çapı 10-17 μm arasında değişir ve genellikle tek splitli demet kullanılır.
- Fiber sarma ve çekme için fitiller yumuşak ile çok yumuşak arasında değişen demetlerden üretilir. Genellikle iki tür demetin bileşiminden oluşur. Demetlerin paralel ve eşit olmalarına özellikle dikkat edilmesi gereklidir. Yeni gelişmeler tüm liflerin aynı gerilimle sarılmasını mümkün kılmıştır. Fiber çapı 10 ila 15 μm arasında değişmektedir.
- Dokuma için kullanılan fitillerde elyaf sarma için kullanılanlar gibi yumuşak ve çok yumuşak demetlerden oluşur. Ayrıca, dokuma sırasında demetlerin ayrışmaması için çok iyi bir "ribbonisation"a sahip olması gerekir. Dokunmuş fiberin de reçine ile kolay ıslanabilmesi lazımdır. Fiber çapı 10-15 μm arasında değişmektedir.

Kırılmış demet, SMC hamuru üretimi için veya termoplastiklerin takviyesi için kullanılır. Uzunlukları 3 mm ile 50 mm arasında değişir. Ayrıca devamlı cam fiberini öğütürerek 0.08 mm'den 0.2 mm'ye kadar değişen uzunlukta cam fiberi elde etmek mümkündür. Bu tür fiber genellikle dolgu malzemesi olarak kullanılır. Ağırlıkça % 40 oranına kadar çıkmak mümkündür.

Keçe, SMC üretiminde kullanılan cam fiber türleri içerisinde en çok kullanılanıdır. Gerek mekanizasyon gerek püskürtme yöntemi konusunda yapılmış olan geliştirmeler bir çok ülkede, iş yerinde stiren buharlaşma miktarının kanunla kısıtlanması sonucu daha az kullanılır hale gelmiştir. Özellikle kapalı kalıplarda keçe ile SMC üretimi en çok kullanılan üretim prosesi haline gelmiştir.

Keçe, kırılmış cam fiberin tesadüfi bir dağılımdan sonra birbirine eklenerek tekdüze bir yapı meydana getirmesi ile oluşur. Genellikle kırılmış fiber boyu 50 mm'dir ve keçe ağırlığı 225-600 gr/m² arasında değişmektedir.

Cam keçeler, değişik amaçlara yönelik olarak değişik nitelikte üretilmekle birlikte, fiberin birbirine bağlanması genelde iki türde olmaktadır:

- Sıvı bağlayıcı ile
- Toz bağlayıcı ile

Sıvı bağlayıcı genellikle polivinil asetat emülsiyonu ile; toz bağlayıcı, bisfenolik polyester ile bağlanmayı sağlar.

Bağlayıcı miktarı ve cinsi, keçeden keçeye farklılık gösterir. Bazı keçe türlerinde çabuk çözünen bağlayıcı % 3-6 arasında, bazı tür keçelerde geç çözünen bağlayıcı % 13-17 arasında kullanılır. Yüksek çözünürlüklü bağlayıcı kullanılan keçeler, kısa jelleşme süreli reçineyle, kısa zamanda iyi ıslanma gerektiği zaman kullanılır. Presle kalıplama prosesinde ve SMC hazırlanmasında, reçineyle fiberin akmasını önlemek için, geç çözünen bağlayıcılı keçe kullanılır.

Cam fiber genellikle tüm polyester reçinelerle uyuşabilir. Krom ve silan bağlayıcılar ile kaplanır. Bazı keçeler, epoksi reçine sistemleri içinde diğerlerine oranla daha iyi sonuç verir.

Bağlayıcıların epoksi reçine sistemleri içinde tamamen erimeleri çok nadirdir ve genellikle sertleşmiş laminatta fiber belirgindir.

Cam dokumalar fitillerden ve bükümlü ipliklerden hazırlanmış olarak iki sınıfa ayrılabilirler. Fitil dokuma, "E" camından üretilmiş cam fitillerin bükümsüz olarak dokunmasıyla oluşturulur. Fitiller önceden özel bağlayıcı uygulaması ile dokuma prosesine hazırlanmıştır. Katlar arasındaki iç gerilmeden dolayı, laminatın zayıf olmaması için dokuma, keçe katlar arasında kalıplanır.

Bükümlü iplik esaslı kumaşlar veya dokumalar, tekstil bağlayıcı uygulanmış ve bobin üzerine sarılmadan önce bükülmüş, devamlı cam fiberden dokunurlar. Bu bağlayıcı dokuma ipliğini dokuma sırasında korur ve kolay işlenmesini sağlar. Metrede 20-40 bükümlü cam fiber ile uniform bir kumaş dokuma mümkündür. Genellikle dokumalar "E" camından yapılır. Fakat özel olarak kimyasal dayanımı arttırmak amacı ile "C" camından da dokuma yapıldığına rastlanmıştır.

Bükümlü iplikle dokumadan sonra bu bağlayıcı yakılır veya yıkanır ve yerine, kullanılacak reçine sistemiyle uyuşabilen nitelikte nihai bağlayıcı uygulanır. Eğer sıcak temizleme nisbeten düşük sıcaklıkta yapılırsa, uygulanmış bağlayıcı bozulabilir ve dokumayı karartır. Ancak çok yüksek sıcaklık uygulaması ile tam beyaz kumaş elde edilebilir. Sıcak temizleme ile bağlayıcısı giderilmiş dokumaya , kullanılacak reçine sistemi ile uyum sağlamak amacı ile, değişik bağlayıcılar uygulanabilir. Bunların bazıları; krom, silan, vinil silan, epoksi silan ve amino silandır ve kullanım amacına göre sipariş edilmelidir.

Cam fiber ile bu bağlayıcıların kullanılmasının bir önemli etkisi, su içerisinde kalan laminatın su absorpsiyonunu azaltmasıdır. Sonuç olarak devamlı suda kalan laminatların performanslarını, ömürlerini arttırmaları, bükülme mukavemetindeki düşmeyi azaltırlar.

Dokuma için kullanılan bükümlü iplikler, tek kat, katlanmış veya çok kat olabilirler. Yalnızca bir bükme operasyonu uygulanmış tek kat bükümlü iplikler, dengesizdirler ve bükümlerini açarak orijinal şekillerine dönme eğiliminde olabilirler. Bunlar katlanmış, kablo şeklinde ve kat kat bükümlü ipliklerin hazırlanmasında kullanılırlar. Katlanmış bükümlü iplikler, tek kat bükümlü ipliklerin, iki veya daha fazla bükülmesiyle elde edilirler. Bunlar dengelidirler ve bükümlerini açma eğiliminde değildirler. Bunlar şerit üretiminde, dokumada, tel kaplama malzemelerinde kullanılırlar. Kablo şeklindeki bükümlü iplikler, iki veya daha fazla katlanmış bükümlü ipliğin beraber bükülmesiyle elde edilirler. Bunlar halat, şerit üretiminde kullanılırlar.

Cam kumaşlar, elektrik tesisatlarında, baskılı devrelerde, devre kesici tüplerde, taşıt gövdeleri, tank, tekne gibi bir çok alanlarda kullanılır. Keza cam dokumalarda bir çok alanda mukavemeti ve rijitliği arttırmak için kullanılır. Aynı zamanda maliyet düşürücü olarak da etkisi vardır (Ünal, 2001).

2.1.4 Dolgu Maddeleri ve Pigmentler

Her ne kadar fiber takviyeli malzemeler başlıca reçine sistemi ve fiber takviyesinden meydana gelmişlerse de, dekoratif görüntüyü elde etmek, kullanıma yardımcı olmak, kalıplama niteliklerini ve sertleşme özelliklerini geliştirmek amacı ile değişik bileşimler ilave edilebilir. Bu malzemeler, dolgu maddelerini, pigmentleri, viskozite arttırıcı katkı maddelerini ve alev geciktirici katkı maddelerini içerir.

Dolgu maddeleri sertleştirme prosesi esnasında veya sertleşmiş halde reçine sisteminin özelliklerini değiştirmek için kullanılır.

Genellikle dolgu maddeleri reçine sisteminin maliyetini düşürmek amacı ile kullanılır. Bununla birlikte diğer özellikler de değişir. Dolgu maddelerinin kullanımından azami faydayı sağlayabilmek için, kalıplama prosesini ve son kullanım amacını göz önüne alarak doğru tip ve gerekli miktar dikkatlice seçilmelidir.

Genelde toz haline getirilmiş herhangi bir madde dolgu maddesi olarak kullanılabilir. Kırılmış yumurta kabuğu veya öğütülmüş hindistan cevizi kabuğu gibi çok çeşitli maddeler dolgu maddesi olarak kullanılabilir. En çok kullanılan dolgu maddeleri, tebeşir, arduvaz, kuartz, kil gibi doğal kaynaklardan elde edilen maddelerdir. Uygun toz dolgu maddesi elde etmek için, bunlar kuru veya yaş prosesle öğütülebilir veya kimyasal işlemlerle saflaştırılabilirler.

Kullanılan diğer dolgu maddeleri arasında metal tozları, cam kürecikleri ve pulları bulunmaktadır. Son belirtilen dolgu malzemeleri doğal mineral dolgu malzemelerine oranla daha pahalıdır. Ancak bazı uygulamalarda önemli avantajlar kazandırabilirler. Dolgu maddelerinin çoğunda rastlanan dezavantaj, reçine sisteminde hava kabarcığı bırakması, dolayısı ile ürünün gözenekli olmasına neden olmasıdır. Bu problem özenli karıştırmayla giderilebilir.

Dolgu malzemesi seçiminde başlıca faktörler maliyet, yoğunluk, reçinenin dolgu maddesi tarafından absorpsiyonu, dolgu maddesi miktarı, partikül çapı dağılımıdır.

Dolgu maddelerinin sıvı veya sertleşmiş reçine sisteminin özellikleri üzerinde etkisi göz önünde bulundurulması gereken bir diğer faktördür. Bu etkilerin bazıları aşağıda sıralanmışsa da, tümü bütün dolgu maddeleri için geçerli değildir.

Dolgu maddesinin sıvı reçine sistemi üzerinde etkileri:

- Viskoziteyi artırır.
- Hacmi artırır.
- Tiksotropi özelliği oluşturur.
- Polyester reçinelerle sertleşmeyi çabuklaştırır veya geciktirir.
- Egzotermi düşürür.
- Aşındırıcı dolgu malzemeleri kalıplama prosesi esnasında kalıbın aşınmasına neden olur.

Dolgu maddesinin sertleşmiş reçine özellikleri üzerine etkisi:

- Maliyeti düşürür.
- Opaklaştırır (dolgu maddelerinin çoğu).
- Darbe mukavemetini artırır.

- Eğilme mukavemetini azaltır.
- Sertliği artırır.
- Çekmeyi azaltır.
- Su absorpsiyonunu artırır.
- Aşınma dayanımını artırır.
- Elektriksel ve termal özellikleri değiştirir.
- Alev almayı geciktirir.
- Yük altında deformasyon sıcaklığını artırır.
- Aşındırıcı özellikteki dolgu maddeleri işlemeyi zorlaştırır.

Genellikle dolgu maddelerinin partikül çapları $0.015\ \mu\text{m}$ 'den $80\ \mu\text{m}$ 'ye kadar değişmektedir. Hangi oranda dolgu maddesi kullanılırsa kullanılsın, partikül çapı küçüldükçe reçine sisteminin viskozitesinde artış görülür. Silikat aerogel ($0.015\ \mu\text{m}$) luk küçük partikül çaplı dolgu maddesinden viskoziteyi arttırmak için % 5 civarında kullanmak yeterlidir. Kaba dolgu malzemeleri % 600'e kadar kullanılabilir.

Laminal sistemlerinde, dolgu maddeleri kullanıldığında partikül çapının $10\ \mu\text{m}$ 'nin altında olması tercih edilir. Ancak proses esnasında dolgu maddeleri cam fiber arasından süzülmecek boyutta olmalıdır. Bu durum özellikle levha ve hamur hazır kalıplama bileşimlerinde ve reçine enjeksiyon sistemlerinde önem kazanır.

Yer döşemeleri gibi üzerine ayrıca tabakalar uygulanmayacak uygulamalarda dolgu maddesi olarak genellikle silikat kumu kullanılır. Burada partikül çapı dağılımı $53\ \mu\text{m}$ 'den $1-2\ \text{mm}$ 'ye kadar olabilir ve dolgu maddesi reçine oranı genellikle 7/1 olarak kullanılır. Bu tip bileşimler CTP kalıplarda ve maddelerde sert besleme malzemesi olarak kullanılabilir. Ayrıca beton yüzey kaplama işlemlerinde deliklerin kapatılması amacı ile kaplamadan önce kullanılabilir.

Dolgu maddelerinin değişik özellikleri karışımın viskozitesini etkiler. Bu özellikler partikül çaplarını ve biçimlerini, yağ absorblama ve dolgu maddesi miktarını kapsamaktadır. Herhangi bir dolgu maddesi yüklemesinde partikül çapı küçüldükçe viskozite yükselir. Yağ absorblama değeri yükseldikçe viskozite yükselir. Bazı killerin PH'ı hassastır ve epoksi reçine sistemlerinde amin sertleştirici ile kullanıldığı takdirde yüksek viskoziteye sahip olurlar (Ünal, 2001).

2.1.4.1 Mineral Dolgu Maddeleri

Termoset reçine sistemlerinde sertleşme özelliklerini değiştirmek için çok çeşitli mineral dolgu maddesi kullanılır. Bunlar genellikle doğal kaynaklardan çıkartılırlar. Mineraller öğütülüp, elenerek veya rafinasyon ile saflaştırılarak uygun dolgu maddesi haline getirilirler.

2.1.4.2 Karbonatlar

Kalsiyum, magnezyum veya kalsiyum magnezyum karbonat karışımları dünyanın çeşitli yörelerinde doğal olarak çok miktarda bulunurlar. Bunlar laminat ve döküm uygulamalarında yaygın şekilde dolgu maddesi olarak kullanılırlar.

Polyester reçine sistemleriyle birlikte en çok kullanılan dolgu maddesi kalsiyum karbonattır. Doğada tebeşir, kireç taşı ve mermer şeklinde bulunur ve az miktarda olmak kaydı ile de başka mineralleri içerebilir. Yüksek saflıkta kalsiyum karbonat eriyikten çöktürme yoluyla hazırlanır. Partikül çapları üretim metoduna bağlıdır. 0.05 µm partikül çaplı son derece ince zerrecikler çöktürme yoluyla hazırlanırlar. Kalsiyum karbonat dolgu maddeleri, normal olarak geniş yüzeyler nedeniyle yüksek reçine absorpsiyonu olduğu zaman kullanılırlar. Yarı amorf şekilde kalsiyum karbonat kalsit şeklindeki kalsiyum karbonatlar daha yüksek reçine emme özelliğine sahiptir. Kalsiyum karbonat çeşitleri, stearatlarla ve reçine emülsiyonları ile kaplamalarda dolgu maddesi olarak daha yüksek oranlarda kullanılabilirler.

2.1.4.3 Silika ve Silikatlar

Silika (SiO_2) yeryüzünde en çok rastlanan maddelerden biridir. Kuartz gibi kristal yapıda (gerçek saf silikat) ve daha az saflıkta kum ve çakıl şeklinde bulunur. Kum ve toz silikat yıkanmış kurutulmuş ve sınıflandırılmış kum silikat, polyester ve epoksi reçine sistemleri için dolgu malzemesi olarak kullanılır. Kalıplama döşeme kaplaması gibi uygulamalarda ve beton harcı olarak kullanılır.

Öğütülmüş silikat veya toz kuartz yüksek aşınma dayanımı gerektiği zaman dolgu maddesi olarak kullanılır. Düşük ısı genleşmesi ve iyi elektriksel yalıtkanlık özelliği gösterirler. Elektrik alanında uygulamalarda epoksi reçine sistemleri için dolgu malzemesi olarak çok kullanılır.

Silika çok aşındırıcı bir dolgu malzemesidir ve proses esnasında kalıp yüzeyine zarar verebilir. Bundan dolayı silika dolgu malzemeli ürünlerin işlenmesi çok zordur. İşlenebilmeleri için tungsten karbür veya elmas kesme aygıtları kullanmak gerekir.

Talk, sulu magnezyum silikattır ve çok yumuşak bir mineraldir. Termoset reçine sistemlerinde kullanıldığı zaman elektriksel yalıtkanlığı ve ısı rutubet dayanımı sağlar. Talk dolgu malzemeli sistem mekanik olarak, kolay işlenebilir. Levha ve hamur hazır kalıplama bileşimlerinde dolgu maddesi olarak kullanılabilir.

Kalsiyum silikat, doğada Wollastonit metasilikat olarak bulunur. Termoset reçine sistemlerinde değişik boyutlarda dolgu malzemesi olarak kullanılır. Genellikle boya bileşimlerinde kullanılan bu malzeme reçine sistemlerinde iyi elektrik ve ısı yalıtkanlığı sağlar.

Zirkon (veya zirkonyum) silikat çok yüksek aşındırma dayanımı gerektiği hallerde dolgu maddesi olarak kullanılabilir. Çünkü zirkonyum dolgulu sistem mekanik olarak son derece zor işlenir. Yüksek oranda dolgu kullanılabilmesi mümkündür.

2.1.4.4 Alüminyum Silikatlar ve Killer

Bu bölüm kaolen, bentonit, arduvaz, mika ve sünger taşı içerir. Hepsi termoset reçine sistemlerinde, akmayı kontrol etmek ve tiksotropi sağlamak için dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Arduvaz çoğunlukla CTP kalıp yüzeyinde dayanımı sağlamak için kullanılır.

Kaolen'in temel bileşimi alüminyum silikattır, içinde başka metal atomları da mevcuttur. Normal olarak termoset reçine sistemlerinde dolgu maddesi olarak kullanılan kaolen, ince beyaz tozudur. Yapısı nedeniyle düzgün, çok parlak yüzeyler gerektiğinde kullanılabilir. Son derece ince olarak, akmayı kontrol etmek ve tiksotropi sağlamak için katkı maddesi olarak kullanılabilir. Üstün elektriksel özellikler gerektiğinde kalsine edilmiş kaolen kullanılabilir.

Bentonit muhtelif metal atomları içeren bir tür kildir. Çok zayıf bağ yapısı nedeniyle kolayca parçalanabilir. Bentonit başlıca kaplama uygulamalarında kalınlaştırıcı malzeme olarak kullanılır. Bazı dolgu maddelerinin özellikleri Çizelge 2.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.4 Bazı dolgu maddelerinin özellikleri (Ünal, 2001).

Dolgu Maddesi	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Hacim Yoğunluğu (gr/ml)	Sertlik (moh)	Yağ Absorbsiyonu (gr/100gr)	Genleşme Katsayısı	pH	Genel Görünüm
(Al[OH] ₃)	2.4	0.4-1.3	2.5-3.5	20-40	-	8.5-9.5	Düzensiz
Al ₂ O ₃	3.7-4.0	1.3-1.6	9	10-50	7	3.6	Düzensiz
Al Silikat	2.6	0.6-1.6	-	-	2-20	-	Pul
Bentonit	2.6-2.7	-	-	30-55	-	8.5-10	Pul
Ca Al Silikat	2.65	-	6.0-6.5	-	-	-	-
CaCO ₃							
CaCO ₃ -(Toz)	2.7-2.8	0.8-0.9	3.0	5-15	0.5-0.9	9-10	Düzensiz
CaCO ₃ -(Çökelti)	2.6-2.7	0.8-0.9	3.0	15-60	0.5-0.9	9-10	Düzensiz
CaCO ₃ -(Kaplanmış)	2.6-2.8	0.8-1.0	3.0	5-15	0.5-0.9	9-10	Düzensiz
Dolomit	2.8-2.9	1.1-1.3	-	-	-	-	-
Ca Silikat	2.8-2.9	-	4.5-5.5	20-45	-	9-10	İğne Şekli
Ca Sülfat	2.4-2.9	0.6-1.0	2.0-3.5	5-10	-	3-5	Düzensiz
Kaolen	2.5-2.6	-	1-2	25-45	-	4-8	Pul

Çizelge 2.4 Bazı dolgu maddelerinin özellikleri (devamı).

Cam	2.48	1.5	5.8	-	8.5	-	Küresel
Cam-(Katı Kürecik)	2.48	1.5	5.8	-	8.5	-	Küresel
Cam-(Boş Kürecik)	0.15-0.38	-	-	-	-	-	Küresel
Cam -(Pul)	2.45	-	-	-	-	-	Pul
Grafit	2.2	-	-	-	0.6-0.4	-	Pul
FeO	3.4-5.1	-	-	-	0.6-0.4	-	Düzensiz
PbO	8.8-9.4	-	-	-	-	-	Düzensiz
Mg Al Silikat	1.8-2.5	0.3-0.6	-	30-50	-	-	Düzensiz
MgCO ₃	1.8-2.8	0.15-0.6	3.0	70-80	-	10.4	Düzensiz
MgO	2.7-3.7	-	-	55-70	-	10.5	Düzensiz
Mika	2.7-3.4	0.3-0.4	2.5-3.0	50-70	18-27	7-8	Pul
Fenolik Kürecik	0.2-0.25	0.1-0.15	-	-	-	-	Küresel
Silika	2.6-2.7	1.0-2.0	7	15-40	0.15-0.3	7-8	Düzensiz
Talk	2.4-3.0	1.0-2.0	1-2	20-45	7-9	9-10	Pul
TiO ₂	3.9-4.2	-	6-7	20-30	7.1-9.2	-	Pul

2.2 SMC Yöntemi ile Kompozit Üretiminin Avantajları

- Hafiflik ve yüksek mekanik dayanımı bir arada sağlayabilme,
- Yüksek darbe dayanımına sahip olma ve şok absorblama özelliği,
- Ürünün niteliklerine uygun bileşimi gerçekleştirme olanağı sunar. Formül yelpazesi zengindir,
- Kolayca laklanabilme / boyanabilme ve kalıp içinde yüzeyin kaplanabilmesi,
- Metal gömme parçaların kolayca yerleştirilmesi sayesinde montaj kolaylığı,
- Otomatik proseslere uygunluk,
- Geri dönüştürülebilme ve üretiminde geri dönüştürülmüş malzeme kullanabilme (Brooke, 1994; Torres vd., 2000),
- Çevre koşullarından (Toz, nem, güneş, korozyon ortam,...) etkilenmeme,
- 1.1-60 mm arasında çeşitli kalınlıklarda kalıplanabilme,
- Kalıp dizayn olanakları geniştir, bir çok eleman aynı üniteye birleştirilebilir,
- Preslenmesi kolay ve çabuktur (Pres süresi 1-3 dakika),
- Çekme uzaması değeri düşüktür (% 0.05-% 0.1),
- Üretilen parçalar sonradan çekmez,
- Plastikler arasında ısıya dayanıklılığı en yüksek malzemelerden biridir,
- Aleve dayanıklıdır. Çeşitli derecelerde yanmazlık verebilir,
- Elektriksel değerleri yüksektir, tam elektrik izolasyonu sağlar,
- İyi elektrik yalıtımı,
- Yüksek alev dayanımı (kendi kendini söndürür),
- Isı izolasyonu,
- Soğukta kırılgan olmama (darbe dayanımı yüksektir),
- Düzgün yüzey,
- Taşıyıcı konstrüksiyonlar için mekanik değerleri yüksektir,
- Dış etkenlere dayanıklıdır (dış etkenler; malzeme - ortam ikilisini etkilemeyen açık hava koşullarıdır) (Ünal, 2001).

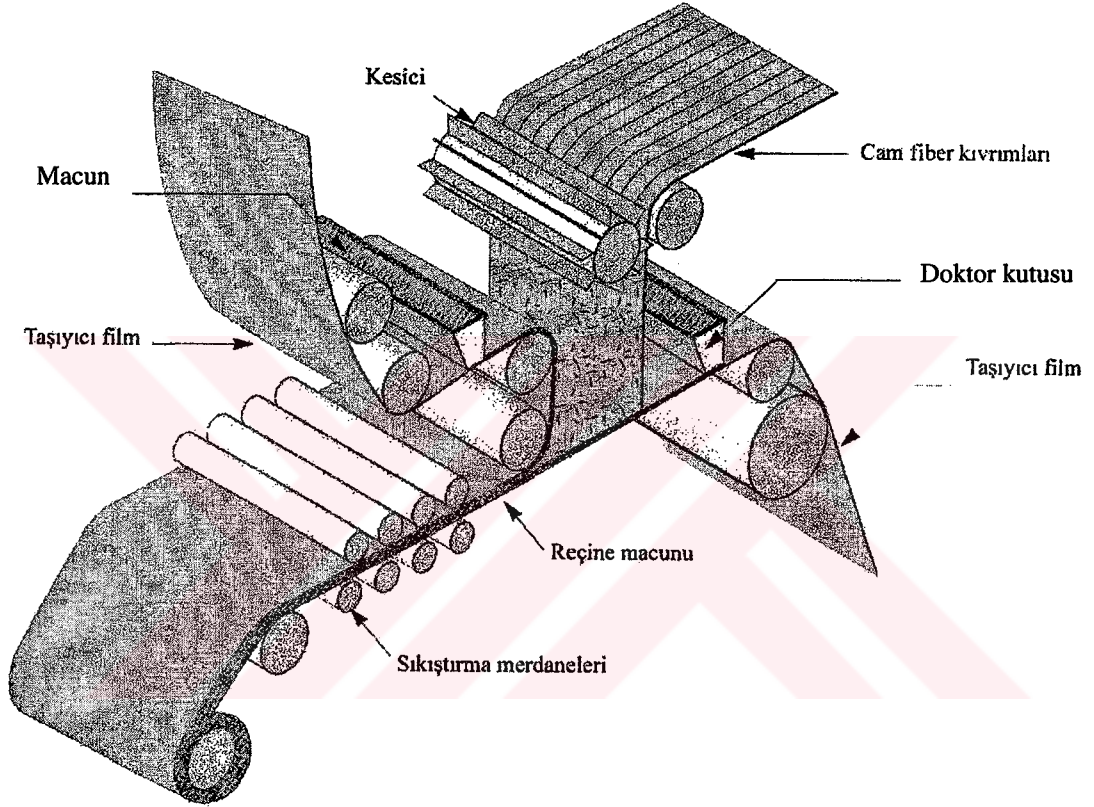
2.3 SMC Üretim Yöntemi

2.3.1 SMC Üretim İşlemi

SMC, termoset reçine, % 20-35 ağırlık oranında ve 12-50 mm uzunluğunda takviye edici cam fiber, dolgu ve katkı maddelerinin taşıyıcı bir film üzerine konularak sürekli proses ile

kalınlığı yaklaşık 6.5 mm olan levha formuna getirilerek üretilen kalıplanmaya hazır üç bileşenli kompozit bir malzemedir. Levhanın uzunluğu, kalıplayıcı tercihiyle belirlenir ve genellikle büyük kaplar içinde bir makarada ya da katlanmış olarak (bilgisayar kağıdına benzer) depo edilir.

SMC yapımı için kullanılan proses Şekil 2.1’de gösterilir. Cam hariç bütün içerikler bir reçine macunu oluşturmak için birlikte karıştırılır.



Şekil 2.1 SMC üretim prosesi (Ünal, 2001).

Reçine macunu, direkt olarak altından geçerek hareket eden taşıyıcı bir film üstünde depolandığı doktor kutusuna aktarılır. Doktor kutusu, uygulanan reçine macununun miktarını kontrol eder.

Üretim işleminde bu tip formülasyon için karışımdaki maddeler; iki farklı miktarlarda birlikte karıştırılır, çoğu yaygın bir şekilde A Tarafı ve B Tarafı olarak gönderilir (Çizelge 2.5).

Çizelge 2.5 Tipik SMC macun formülasyonu, A/B=15/1 (Kia, 1993).

A Tarafı		B Tarafı	
Karışımındaki Madde	% Ağırlık	Karışımındaki Madde	% Ağırlık
Polyester reçine	17	Stiren	15
Stiren	2	Düşük-profil katkısı	30
Düşük-profil katkısı	14	Yoğunlaştırıcı	8
İnhibitör (engelleyici)	Az miktar	Renk maddesi	1
İnisiyatör (başlatıcı)	0.5	Dolgu maddesi	46
Islatma maddesi	1	Toplam	100
Kalıp ayırıcı	1.5		
Dolgu maddesi	64		
Toplam	100		

B Tarafı birinci karışım maddesi olarak yoğunlaştırıcı içerir; düşük-profil katkısı ve dolgu maddesi taşıyıcı (katalitik madde) olarak rol oynar. A Tarafı cam fiberleri hariç tutarak geriye kalan karışım maddelerini içerir. A ve B Tarafları; önceden tayin edilen bir oranda ayrı ayrı pompalanır ve yönlendirici kutuya yüklemekten hemen önce son macuna şekil vermek için tamamen karıştırılır. Bu örnekte A/B oranı 15/1 dir. Bu oran; genellikle en iyi ölçümü elde etmek için 10/1-20/1 arasında muhafaza edilir (Kia, 1993).

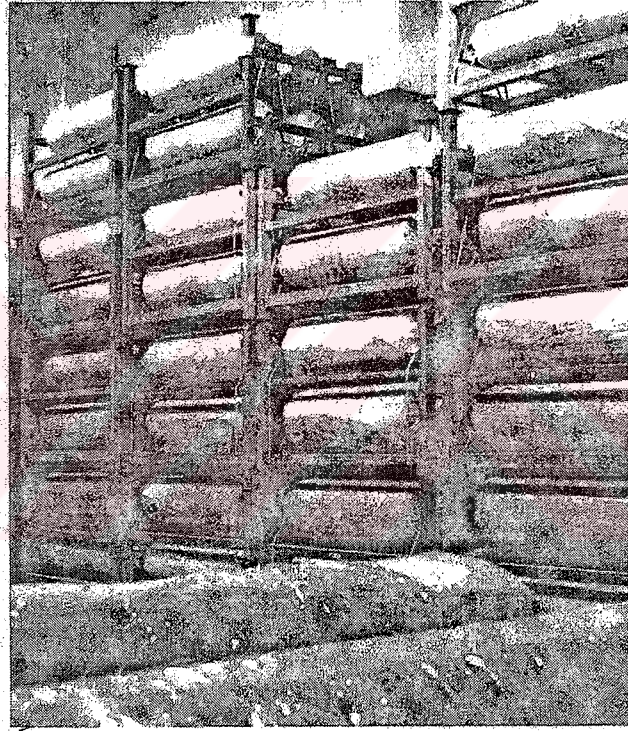
Aynı zamanda, cam fiber bükümleri, reçine kaplı taşıyıcı bir film üzerinde dönen kesici içine beslenir. Fiberler (genellikle 25 mm fakat uygulamaya bağlı olarak 12 mm'den 50 mm'ye kadar değişebilir) uzunlukta kesilir ve reçine macunu üzerine düşürülür. Fiberler rastgele biriktirilir fakat genellikle film hareket yönüne biraz paralel olarak kendilerini döndürürler. Camın miktarı taşıyıcı filmin hızıyla kontrol edilir. Kesme işleminden aşağı akış, ikinci bir taşıyıcı film, reçine macunu ile kaplanır ve kesilmiş fiberlerin en üstünde reçine kenarı aşağı yatırılır. Macun ortada cam fiberler ile bir sandviç tabakaya şekil vermek için iki taşıyıcı film (genellikle polietilen) arasına uygulanır. İşlemin bu aşaması, cam fiberlerin reçine macunu ile ıslandığı ve aşırı sıkıştırılmış hava ile levhanın dışında sıkıştırıldığı, sıkıştırma merdanelerinin bir serisi içinden geçirildiği bir reçine macunu ve cam fiberli "sandviç"i oluşturur.

Sıkıştırma merdanelerinin sonunda, SMC levhası depolama makarasına ya da katlı olarak bir kap içine alınır. Bu depolama şartlarında, makara ya da kap stiren buharlaşmasından kaçınmak için engelleyici bir film ile kaplanır.

SMC reçine macunu, doktor kutusundayken (şeker tortusu ya da balın yoğunluğunda) yaklaşık 20.000-40.000 mPa.s'lık bir viskoziteye sahiptir. SMC, kalıplama için kullanılmadan önce yaşlandırılmalı ya da olgunlaştırılmalıdır. Bu olgunlaştırma zamanı, kimyasal olarak yoğunlaştırmak için nispeten düşük viskoziteli reçineye izin vermesi gereklidir (Şekil 2.2).

Yoğunlaştırılmış SMC, kullanım için daha kolaydır ve cam fiber battaniye dışından sıkıştırıldığından reçine macunu engellenir. Tipik olarak SMC, istenen kalıplama viskozitesine ulaşması için yaklaşık 3-5 gün gerektirir. Bu noktada SMC levha (deriye benzer bir yoğunlukta) yaklaşık 40-100 milyon mPa.s'e ulaşır (Ünal, 2001).

SMC'de kalıplama viskozitesine ulaşıldıktan sonra da yoğunlaşma devam eder ve bu yüzden sınırlı raf ömrüne sahiptir. Genellikle SMC, üretim gününden haftalar ya da birkaç ay içinde kullanılmalıdır. Bu zaman çerçevesi, SMC fomülasyonuna ve depolama şartlarına bağlı olarak uzatılabilir ya da azaltılabilir.



Şekil 2.2 Olgunlaştırma askılarında SMC makaraları (Ünal, 2001).

2.3.2 Düşük Profil SMC Malzeme Özellikleri

SMC; basma kalıplanmış kısa fiber takviyeli termoset kompozittir. Otomobillerin dış gövde panelleri için yaygın olarak kullanılır. Malzemesi çelikten daha pahalı, fakat şekil verme (kalıplama) fiyatı daha düşüktür. SMC'de termoset matris, tipik olarak bir polyesterdir, kalıplama esnasında çeker ve fiberde görülen sonuçlar, zayıf yüzey kalitesi ve otomobil gövde panelleri için kabul edilemeyen eğrilmedir. Termoplastikler örneğin; poli- (vinil asetat), poli- (metil metakrilat), stiren-bütadien blok ortak polimer, poliüretan ve diğerleri; polyester çekme payını azaltmak ve ikinci bir işleme gerek kalmadan estetik yüzeyler üretmek için katkı

maddesi olarak kullanılırlar. Bunlara düşük-profil katkıları (LPA) denilir (Chan-Park ve McGarry, 1996).

SMC, özel özellikleri artırılabilir reçine ve takviye etme kombinasyonlarının geniş bir alanı ile formüle edilebilir. Sınıf “A” yüzey istekleri için ilaveler, polimerizasyon esnasında sistem içinde reçinenin çekme miktarını kontrol etmek için kullanılır.

2.3.2.1 Düşük Profil SMC

Polyester reçineler polimerize edilir ya da pişirilir. Çekme seviyesi düşük-profil katkılarının ilavesi ile kontrol edilebilir. SMC çekmesi, genellikle her ikisi de oda sıcaklığında alınan kalıp ve bir pişirilmiş kısmın ölçüsü arasında yüzde farkı gibi ölçülür. Tipik bir sınıf “A” dışı formülasyonu, % 0.05’ten daha büyük görünen çekmeye sahip olacaktır. Düşük profilli bir SMC ise % 0.05’ten daha az çekmeye sahip olacaktır. Bazı formülasyonlarda % 0.15’e kadar görünen bir genişleme olabilmektedir. Parça gerçekten genişlemez ve parça kalıplama sıcaklığından oda sıcaklığına kadar geçişte çelik kalıptan daha az çeker.

Aşağıdaki çizelge tipik düşük profilli SMC (UP GF 25) ve çok yapılı SMC (UP GF 50 ve UP GF 20/40C) için mekanik özelliklerin karşılaştırılmasını göstermektedir.

Çizelge 2.6 SMC mekanik özelliklerinin karşılaştırılması (Ünal, 2001).

Özellik	UP GF 25	UP GF 50	UP GF
Çekme Dayanımı, MPa	65-80	124-204	330.7
Çekme Modülü, GPa	8.5	12.2-19.1	206.7
Eğme Dayanımı, MPa	155-200	248-380	-
Eğme Modülü, GPa	8.5-14.0	11.6-16.4	-
Darbe Dayanımı, kJ/m ²	60-90	120-200	-
Yoğunluk, g/cm ³	1.7-2.0	1.85-2.00	7.86
Doğrusal Isıl Genleşme Katsayısı, 10 ⁻⁶ /K	14-18	13-17	12.1

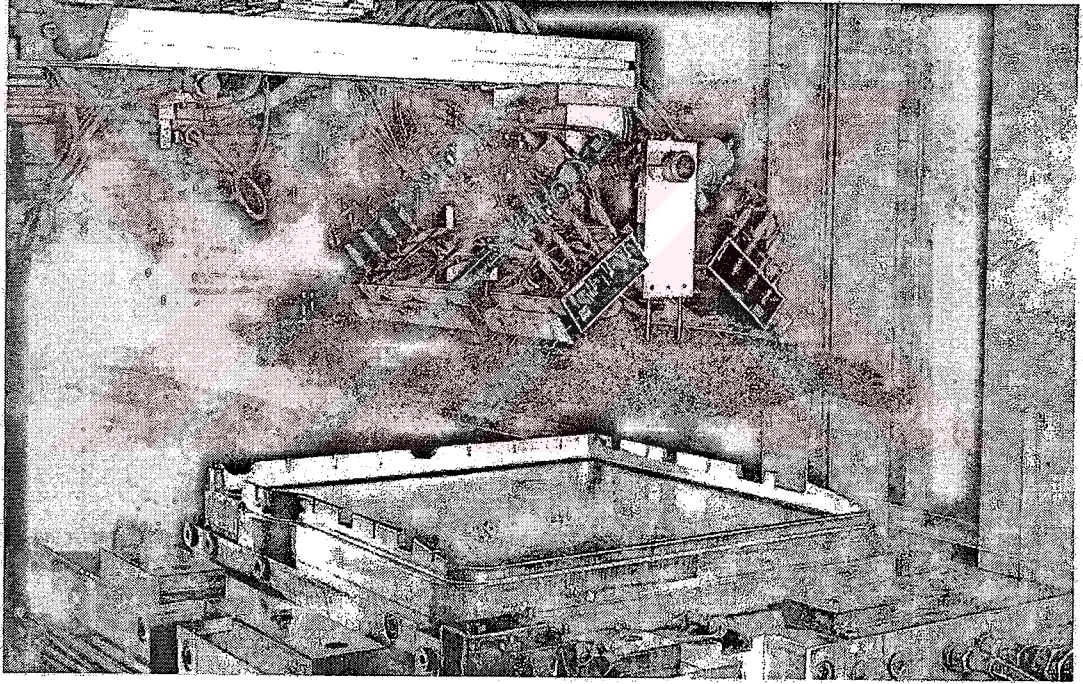
Görüldüğü gibi, düşük profilli SMC için mekanik özellikler her bir durumda daha düşüktür, fakat düşük profil SMC’nin yüzey görünüşünün, Sınıf “A” gövde panelleri için birincil amacı karşılayan levha çeliğinden bile daha iyi olduğu bazı durumlarda belgelenmiştir (Ünal, 2001).

2.3.3 SMC ve Basınçlı Kalıplama Prosesi

SMC basınçlı kalıplama prosesi 1) Malzeme hazırlama, 2) Yük modeli hazırlama, 3) Yük yerleştirme, 4) Kalıplama, 5) Kalıp açma adımlarından oluşmuştur ve aşağıda izah edilmiştir (Ünal, 2001).

2.3.3.1 Malzeme Hazırlama

SMC, kalıplama için hazır olduğu zaman, malzeme kesme masasına yayılır ve önceden belirlenmiş ölçü ve şekilde kesilir. Kesme masası, genellikle kalıba uygun yakındır. Kesme işlemi, bazı yüksek hacim uygulamaları otomatikleştirilmesine rağmen (Şekil 2.3) genellikle basma operatörü vasıtasıyla bir master ve math bıçağı ile elle yapılır.



Şekil 2.3 SMC'nin iğne manipülatörleri ile yerleştirilmesi (Ünal, 2001).

2.3.3.2 Yük Modeli Hazırlama

Kesilmiş parçalar, sonra yığılır ve kalıp boşluğunu doldurmak için uygun şekil ve hacim olarak belirlenmiş bir yük modelinin içinde birleştirilir. Yük modeli, normal olarak ön üretim kalıplama denemeleri esnasında fabrika işlem mühendisi tarafından geliştirilir.

Yük modeli sonra yük ağırlığının doğruluğunun onaylanması için tartılır ve bundan dolayı eğer gerekliyse malzeme ilave ederek ya da kaldırarak ayarlanır. Proses değişikliklerinden

kaçınmak için mümkün olduğu kadar tam ve sürekli olarak yük modelini dengelemek ve birleştirmek önemlidir.

2.3.3.3 Yük Yerleştirme

Önceden birleştirilmiş yük, sonra ön üretim kalıplama denemeleri esnasında ısıtılmış kalıp yüzeyine yerleştirilir. Büyük ya da karışık parçalar üzerinde yük, kısımlar içine yerleştirilebilir. Uygun yerleştirme, tekrarlayan yüksek kaliteli parçalar için kılavuzdur. Yük model yerleşiminde bir değişme, malzeme akış özelliklerinde bir değişmeye sebep olabilir. Sonuçta, fiber yönelmesi düşük gerilmeden yüksek gerilme alanlarına kadar örnek hatlarının tekrar yerleşimi ya da çeşitli yüzey hataları olabilir (Mei ve Piggott, 1996).

2.3.3.4 Kalıplama

Genel olarak, kalıp, aşınmayı azaltmak için kalıplanmış ya da yüzeyi işlenmiş dövme çelik kalıbının birbirine uygun takımıdır. Kalıp 130-170°C'ye yağ ya da buharla ısıtılır.

Kalıp içinde yük yerleştirildikten sonra, kalıp kapatılır ve SMC malzemesi sıkıştırılır. Düşük profil SMC için tipik kalıp basınçları 50-100 bar civarındadır. İleri pres kontrol teknolojisi ile gerçek basınçlar uygun yüzey kalitesini sağlamak için kalıplama çevrimi esnasında değişebilir.

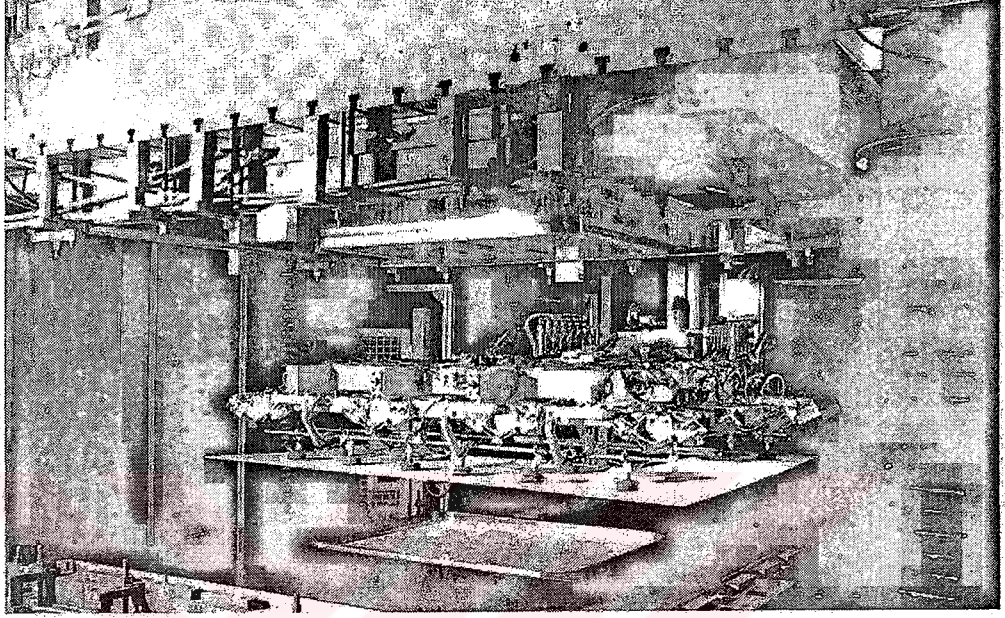
SMC, bir akışkanlaşabilir bileşiktir. Isı ve basınç altında, pürüzsüz kalitesinden çok düşük viskoziteli sıvıya kadar dönüştürülür. SMC akarak kalıp boşluğunu doldurur. Sınıf "A" yüzeyleri için akışkanlık istenir. Fakat akış hatları ve dalgacıkların olasılığını artırır. Bu sebepten bir Sınıf "A" parçası için yük modeli kalıp yüzeyinin % 20-40'ı (% 40-80 vakum yardımı ile) kaplanabilir. Yapısal parçalar için, bir yük modeli kalıp yüzeyinin % 90'ına kadar kaplanabilir.

2.3.3.5 Kalıp Açma

Pişirmeden sonra, kalıp açılır ve parça kalıp yüzeyinden dışarı çıkarılır. Basit parçalar için bazı kalıplar kullanılamaz. Bu parçalar emme kalıpları, kamalar ya da sıkıştırılmış hava ile uzaklaştırılır. Bunlar parçada gerilmelerden kaçınmak için parçanın kaldırılması esnasında kullanılmalıdır (Şekil 2.4).

Bazen sıcak parçalar dikkatlice elle işlenmelidir ve genellikle çevre sıcaklığında soğuması için destek askılar üstüne yerleştirilir. Genellikle, bu zamanda parçadan herhangi bir kenar

apağını kaldırmak avantajdır. apak, parça hala sıcakken bir bıçak ile kolayca kaldırılır fakat parça soğurken çok güç olur. Kalıplanan türün soğutulduktan sonra kenar düzeltme ve gerekiyorsa boyama işlemeleri yapılır.



şekil 2.4 Hazır SMC parçasının kalıptan çıkarılışı (nal, 2001).

2.3.4 SMC ve BMC'nin Mukayesesi

BMC (Bulk Molded Compound) kütlesel kalıp bileşimi, SMC'deki gibi esasen termoseting reçine, cam fiber takviyesi ve dolgu maddesinden oluşan fiberle güçlendirilmiş kompozit malzemesinin bir çeşididir. Düşük profil ilaveleri, macun başlatıcılar, yoğunlaştırıcılar, kalıp ayırma maddeleri gibi ilave içerikler malzemenin işlenme sırasındaki performansını artırmak için ilave edilir.

SMC'den daha az cam fiber ile yüklenilmiş olan BMC, genellikle 110-150 bar (11-15 MPa) arasında değişen başıncı ile hidrolik kalıplama makinaları ile türetim yapılır. SMC için 50-100 bar (5-10 MPa) kalıplama başıncı gereklidir.

BMC zelliklerinin birçoğu SMC zelliklerine benzerdir. SMC'den tek farkı fiber boyunun kısa olmasıdır. (fiber boyu 10 mm'ye kadar). Daha kısa fiber uzunluğundan dolayı, en küçük boşluklara kolaylıkla akar. Daha yüksek inorganik dolgu maddesi yükü, çok yüksek sıcaklık

direnci sayesinde projektör yansıtıcıları gibi iyi yüzey kalitesi aranan yerlerde BMC kullanılmasının başlıca nedenidir (Ünal,2001).

Çizelge 2.7’de düşük profil BMC’nin özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 2.7 Düşük profil BMC özellikleri (Ünal, 2001).

Yoğunluk, g/cm³	1.85-1.90	
Çekme Dayanımı, Mpa	50	ISO 527, EN61
Eğme Dayanımı, Gpa	160	ISO 178, EN63
Eğme Modülü, Mpa	12	ISO 178, EN63
Darbe Dayanımı, kJ/m²	50	ISO 179
HDT (Yük altında deformasyon sıc.), °C	250	ISO 75-2A
Genleşme Katsayısı	12x10 ⁻⁶	ISO 11359-2
Sertlik, Shore	85	

2.4 SMC Kompozit Üretim Yöntemi ile İlgili Önceki Çalışmalar ve Bulguları: Proses ve Malzeme Değişkenlerinin Etkileri

2.4.1 Proses (Yöntem) Değişkenlerinin Etkisi

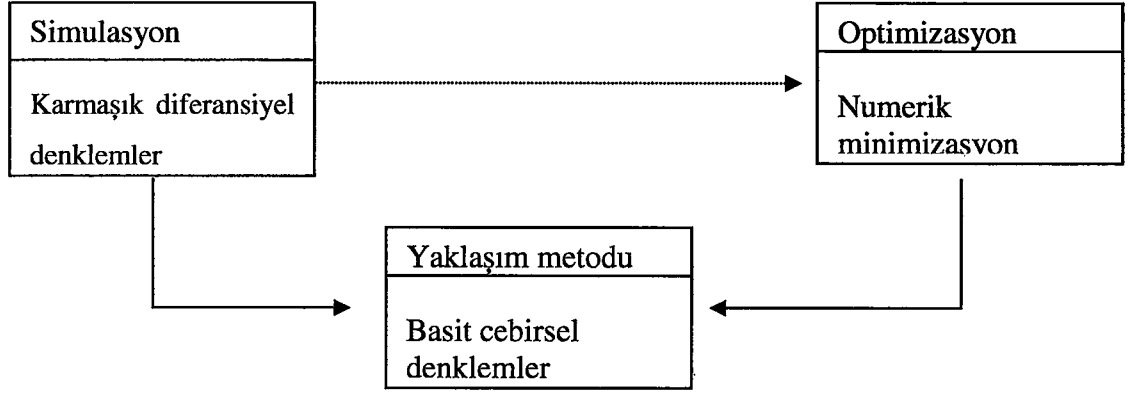
(Castro ve Tomlinson, 1990), izotermal (eşit ısıda) olmayan koşullarda, SMC basma kalıplama işleminde gerekli kuvvetin belirlenmesi için bir model geliştirmişlerdir. Model, materyalin iki reolojik parametresi üzerine kurulmuştur. Materyalin esnemeye olan direnci (η) ve sürtünme katsayısı (λ). Bu değerlerin ölçülmesinde basma reometresini kullanmışlardır. Ayrıca araştırmacılar, ön ısıtmanın kalıp kuvveti üzerine etkisini teorik olarak belirterek, beslemeye ön ısıtma uygulamasının, gerekli kalıplama kuvvetini düşürmeye yönelik cazip bir yol olduğunu ve yüksek kalıplama sıcaklığının düşük sürtünme ve buna bağlı olarak düşük kalıplama kuvveti doğurduğunu vurgulamışlardır.

Tipik SMC uygulamasında farklı sıcaklıklarda ölçülen η değerleri Çizelge 2.8’de, λ değerleri Çizelge 2.9’da, F değerleri Çizelge 2.10’da görülmektedir.

Çizelge 2.10 Deneysel ve basma reometresi ile belirlenen kalıplama kuvveti (Castro ve Tomlinson, 1990).

°C	Kapama Hızı (U) (inç/s) (cm/s)	F lb-f (kN)	
		Ölçülen	Reometre ile Belirlenen
37.8	0.023 (0.058)	13.500 (60.0)	13.677 (60.8)
	0.025 (0.064)	14.948 (66.5)	14.300 (63.6)
	0.024 (0.061)	19.657 (87.4)	18.334 (81.5)
	0.025 (0.064)	24.120 (107.3)	25.296 (113.9)
65.5	0.028 (0.071)	16.142 (71.8)	16.650 (74.1)
	0.027 (0.069)	16.895 (75.1)	16.677 (74.2)
	0.026 (0.066)	20.432 (90.9)	21.575 (96.0)
	0.018 (0.046)	37.040 (164.8)	38.432 (170.9)
93.3	0.033 (0.084)	8.338 (37.1)	7.454 (33.2)
	0.031 (0.079)	8.445 (37.6)	7.867 (35.0)
	0.032 (0.081)	8.703 (38.7)	8.363 (37.2)
	0.031 (0.079)	9.048 (40.2)	8.964 (39.9)
	0.031 (0.079)	9.846 (43.8)	10.600 (47.1)
121.1	0.035 (0.089)	6.080 (27.0)	6.690 (29.8)
	0.035 (0.089)	5.951 (26.5)	7.060 (31.4)
	0.035 (0.089)	5.898 (26.2)	7.505 (33.4)
	0.035 (0.089)	6.288 (28.0)	7.748 (34.5)
148.9	0.035 (0.089)	5.646 (25.1)	5.889 (26.2)
	0.036 (0.091)	5.572 (24.8)	5.935 (26.4)
	0.037 (0.094)	5.788 (25.7)	6.100 (27.1)
	0.036 (0.091)	5.785 (25.7)	6.198 (27.6)
	0.037 (0.094)	5.673 (25.2)	6.273 (27.9)
	0.031 (0.079)	6.713 (29.9)	6.405 (28.5)

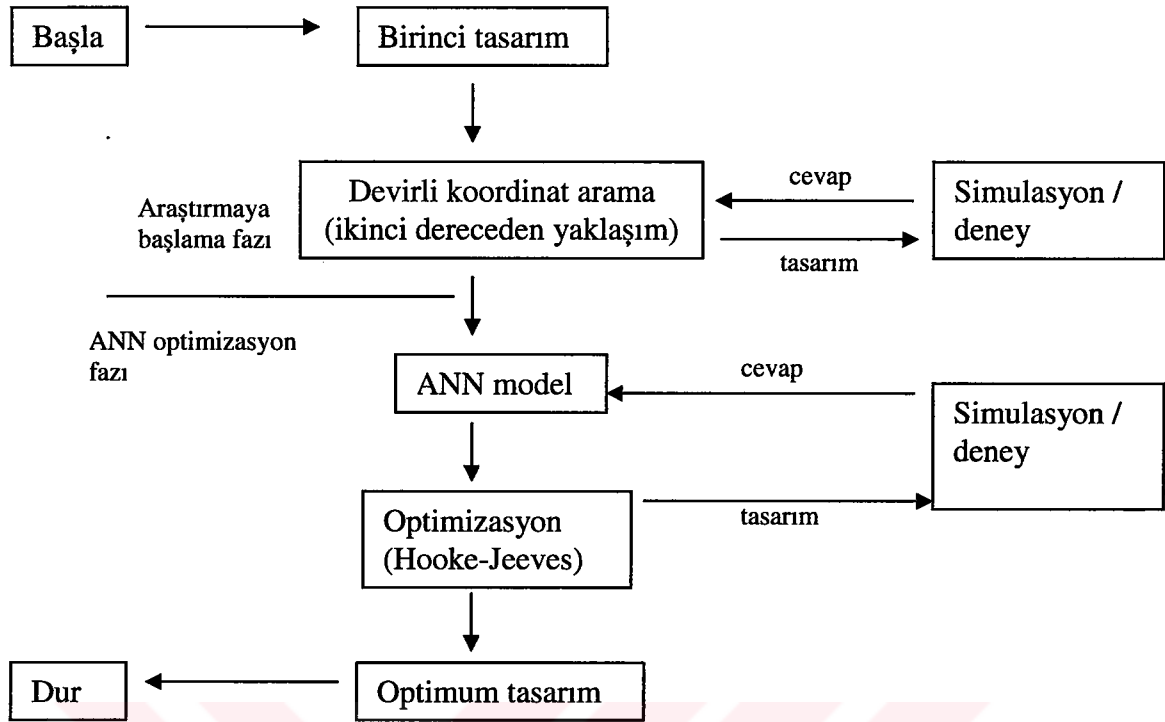
(Twu vd., 1994), bu çalışmada bilgisayar simulasyonu esaslı proses tasarımları için otomatik optimizasyon şemasını sunmuşlardır. Araştırmacılar, SMC'ler için kalıplama araçları ve kalıplama çevrimi tasarımının pahalı ve zaman alıcı olduğunu, basma kalıplaması prosesinin bilgisayar simulasyonunun deneysel prototipleri azaltacağından istenen bir yaklaşım olduğunu ve bu işin odak noktasının; malzeme akışı, ısı transferi ve pişmenin simulasyonunu yapabilen daha önce geliştirilmiş SMC prosesi simulasyon programından (Twu vd., 1993) yararlanarak bir otomatik optimizasyon şeması geliştirmek olduğunu vurgulamışlardır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Yaklaşım dayalı bir optimizasyon şeması (Twu vd., 1994).

İleri sürdükleri şemanın, optimizasyonu sağlamak için, gerçek simule cevaplar yerine yaklaşık cevapları kullanarak hesaplama zamanını azalttığını ve otomatik optimizasyon paketinin optimizasyon ve simulasyon prosedürleri arasında otomatik bir link yaratarak optimal tasarım boyunca kullanıcının müdahalesini minimum yaptığını belirtmişlerdir. Optimum yük tasarımı ve ısıtma kanalı tasarımları için iki örnek problemi bu çalışma ile test etmişlerdir. Sonuçlar, makul optimum tasarımları ve belli amaçlar için gözle görülür ilerlemeleri göstermiştir.

(Twu ve Lee, 1995), yapay şebeke ağlarına (ANN) dayalı zincirleme tasarım optimizasyon şemasını önermişlerdir. Bu; yapay şebeke ağları modeli ve lineer olmayan programlama algoritmasının bir kombinasyonudur. Önerdikleri şemayı, şebeke ağı prosedürü, Hooke Jeeves optimizasyon prosedürü ve daha önce geliştirilen otomatik tasarım paketindeki SMC proses simulasyon sonuçları ile tamamlamışlardır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Önerilen otomatik optimizasyon şemasının akış programı (Twu ve Lee, 1995).

Optimizasyon prosesini başlatmak, şebeke ağı modelinin çalışma verilerini toplamak ve tasarımın hassaslık analizinin ön çalışmasını yapmak için “devirli koordinat arama” tekniği kullanmışlardır. Daha önce geliştirilen istatistik yaklaşım ve şimdiki şemanın her ikisini de kullanarak elde edilen sonuçları karşılaştırmışlar ve sonuçların şimdiki optimizasyon metodunun daha etkili işlediğini gösterdiğini belirtmişlerdir. SMC basma kalıplama araçlarındaki ısıtma kanallarının tasarımına bağlı test sonuçlarının, diğer metotlardakinden daha az veri noktası kullanılarak, faktörel tasarımda olduğu gibi, optimum tasarımda başarı elde edildiğini göstermişlerdir. Sonuç olarak, araştırmacılar, bu araştırmadaki şebeke ağının seri hesaplayıcı iş istasyonu ve çalışma zamanının ağıdaki sayısına oranının düzenlenerek simülasyonunun yapıldığını, bununla birlikte, bu problemin şebeke ağı donanımlı paralel bilgisayarlar kullanılarak da çözülebileceğini vurgulamışlardır.

(Garmendia vd., 1995), çalışmalarını ticari SMC’lerin standart ve düşük-çekme paylı prepreglerinin iki sınıfı için basma-kalıplama devresini optimize etmek için yürütmüşlerdir. Cam fiberler ile takviye edilmiş polyesterlerden oluşan SMC malzemelerinin mekanik özellikleri üzerinde kalıplama parametreleri ve deney şartlarının etkisini incelemişlerdir.

Standart SMC APG 10-R ve düşük çekme paylı SMC APG 10-RS malzemelerini kullanmışlardır. Kullanılan SMC'nin bileşimi Çizelge 2.11'de listelenmiştir.

Çizelge 2.11 Kullanılan SMC'nin bileşimi (Garmendia vd., 1995).

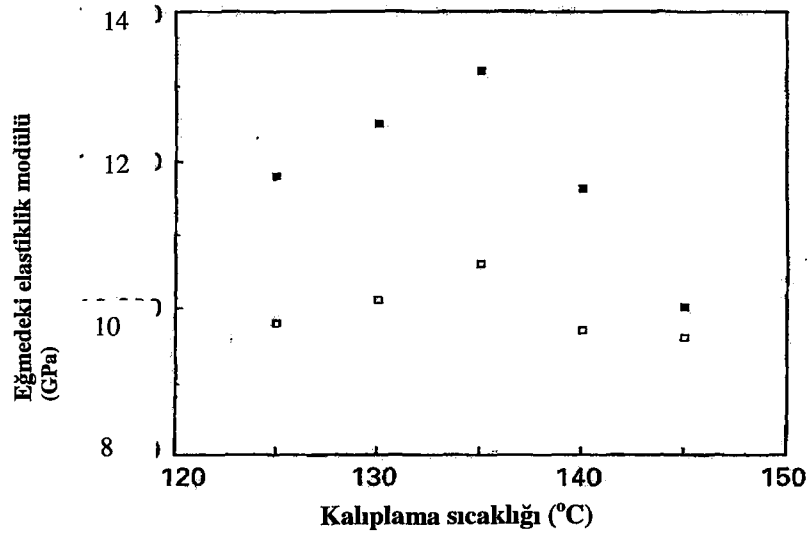
Malzeme	APG 10-R (Ağırlık %)	APG 10-RS (Ağırlık %)
Ortoftalik reçine	25	15
Düşük-çekme paylı katkı (yüksek-etkili polistiren)	-	10
Katalizör	0.25	0.25
Çinko stearat	1.25	1.25
İnorganik dolgu malzemeleri	42.5	42.5
Renklendirme pigmentleri	4.5	4.5
Kalınlaştırma maddesi, Mg(OH) ₂	1.5	1.5
Cam fiber	25	25

Araştırmacılar, plakaları değişik sıcaklık ve basınç şartları altında kalıplamışlar ve sonra mekanik davranışlarını çeşitli sıcaklıklar ve gerilme oranlarında eğme ve çekme deneyleri ile analiz etmişlerdir. Analiz edilen plakaların eğmedeki elastiklik modülü ve eğme dayanımının kalıplama işleminde kullanılan sıcaklık ve basıncın fonksiyonu olduğunu, bu özelliklerin optimum değerlerinin plakalar 135°C'de ve 14.7 MPa kalıplama basıncı altında kalıplandığı zaman elde edildiğini belirtmişlerdir.

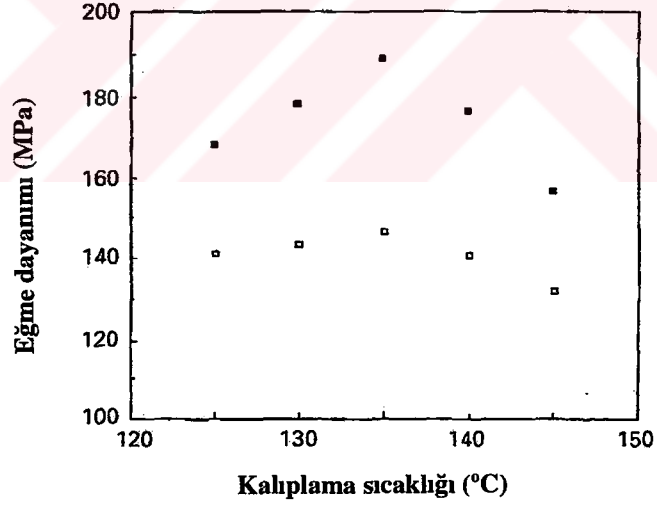
Mekanik özellikler üzerine kalıplama basıncının etkisinin kalıplama sıcaklığınınkinden daha düşük olmasına rağmen, basınç değiştiği zaman eğmedeki elastiklik modülü ve eğme dayanımında belli bir değişim görüldüğünü tespit etmişlerdir.

Araştırmacılar, fiber / matris ara yüzeyindeki değişmelerin bir sonucu olarak ve sertleşmiş reçinenin iç yapısındaki değişikliklerden dolayı düşük-çekme paylı plakaların mekanik özelliklerinin kullanılan bütün kalıplama sıcaklıkları ve basınçlarında standart plakaların mekanik özelliklerinden daha yüksek olduğunu göstermişlerdir.

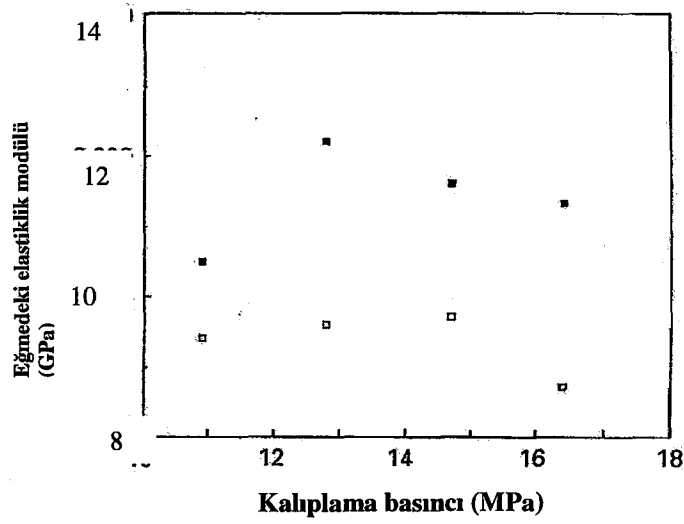
Kalıplama sıcaklığının ve kalıplama basıncının fonksiyonu olarak eğmedeki elastiklik modülü ve eğme dayanımının değişimi Şekil 2.7, Şekil 28, Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



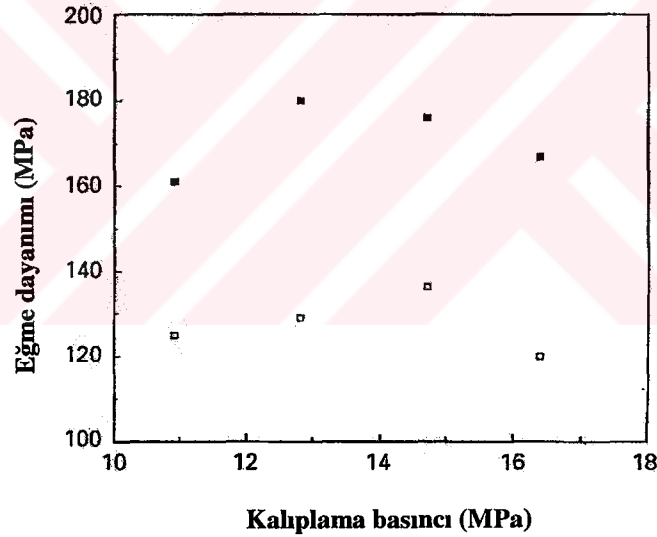
Şekil 2.7 Kalıplama sıcaklığının fonksiyonu olarak eğmedeki elastiklik modülünün değişimi (□) standart, (■) düşük-çekme paylı plakalar (Garmendia vd., 1995).



Şekil 2.8 Kalıplama sıcaklığının fonksiyonu olarak eğme dayanımı (□) standart, (■) düşük-çekme paylı plakalar (Garmendia vd., 1995).

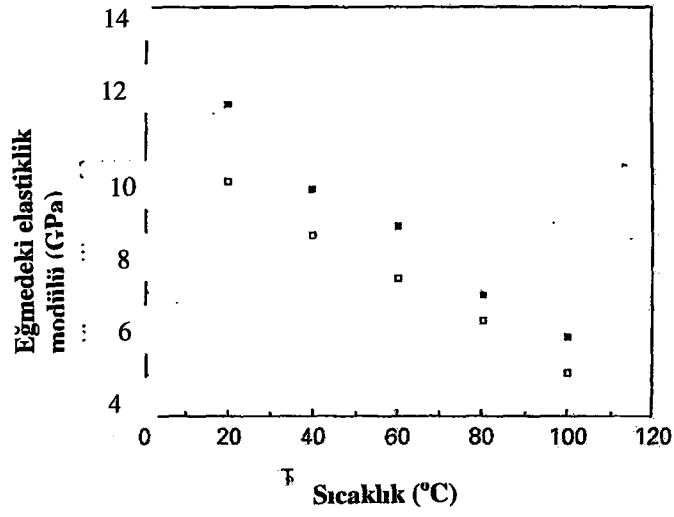


Şekil 2.9 Kalıplama basıncının fonksiyonu olarak eğmedeki elastiklik modülünün değişimi (□) standart, (■) düşük-çekme paylı plakalar (Garmendia vd., 1995).

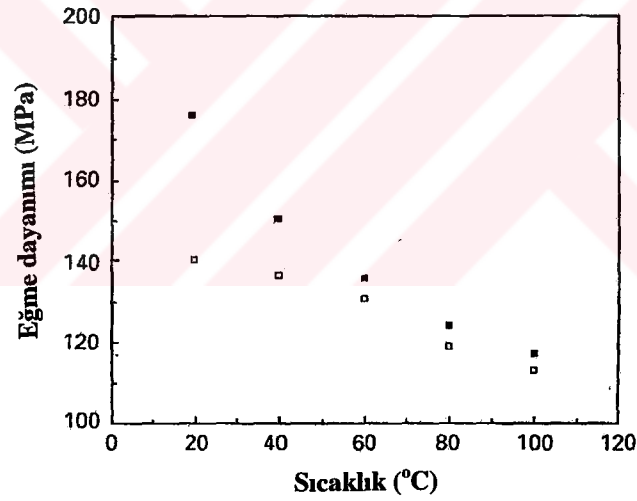


Şekil 2.10 Kalıplama basıncının fonksiyonu olarak eğme dayanımı (□) standart, (■) düşük-çekme paylı plakalar (Garmendia vd., 1995).

Araştırmacılar, eğmedeki elastiklik modülü ve eğme dayanımının deney sıcaklığı arttığı zaman belli bir azalma gösterdiğini, bununla birlikte her iki özelliğin de test edilmiş bütün sıcaklıklarda standart plakalar için olandan düşük-çekme paylı plakalar için daha yüksek olduğunu kanıtlamışlardır. Deney sıcaklığının fonksiyonu olarak eğmedeki elastiklik modülü ve eğme dayanımının değişimi Şekil 2.11 ve Şekil 2.12 'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11 Deney sıcaklığının fonksiyonu olarak eğmedeki elastiklik modülünün değişimi (□) standart, (■) düşük-çekme paylı plakalar (Garmendia vd., 1995).



Şekil 2.12 Deney sıcaklığının fonksiyonu olarak eğme dayanımı (□) standart, (■) düşük-çekme paylı plakalar (Garmendia vd., 1995).

(Uddin vd., 1997), excimer laser ışını ile SMC yüzeylerinin işlenmesini araştırmışlardır. SMC yüzeylerinin yüzey hazırlaması işlemlerinin şu safhalardan oluştuğunu açıklamışlardır: yüzey pisliklerinin alınması, SMC'den kalsiyum karbonatın (dolgu maddesinin) ayrılarak alınması ve polyester reçinenin kaldırılması. Yapışkan ile birleştirilmiş SMC numunelerinin birleştirme dayanımlarının karşılaştırılması ile, XeCl ve KrF laser yüzey hazırlama metotlarının SMC birleştirme uygulamaları için çok etkili olduğunu göstermişlerdir. Çizelge 2.12'de XeCl laser yüzey hazırlama metodu kullanarak hazırlanan numunelerin birleştirme dayanımları, Çizelge 2.13'de KrF laser yüzey hazırlama metodu kullanıldığında alınan sonuçlar gösterilmiştir.

Çizelge 2.12 Birleştirme dayanımı karşılaştırması, poliüretan yapışkan, XeCl laser yüzey hazırlama (Uddin vd., 1997).

Yüzey Durumu	Birleştirme Dayanımı, MPa	
	82°C'de	54°C'de
Kontrol(Poliüretan yapışkan)	2.26	2.33
XeCl, 600 MJ/2 pulses	2.43	2.48
XeCl, 1000 MJ/2 pulses	2.55	2.72
Birleşme kalınlığı: 0.76 mm; birleşen levhaların toplam kalınlığı: 25.4 mm Kontrol numunesi metilen klorid ile temizlenerek hazırlanmış.		

Çizelge 2.13 Birleştirme dayanımı karşılaştırması, abanoz yapışkan sistemi, KrF laser yüzey hazırlama (Uddin vd., 1997).

Yüzey	Birleştirme Dayanımı, MPa	
	Oda Sıcaklığı	Fırın Sıcaklığı
Kontrol(Abanoz yapışkan)	1.23	1.23
KrF, 400 MJ/cm ² (2 pulses)	2.06	2.24
KrF, 600 MJ/cm ²	3.57	3.19

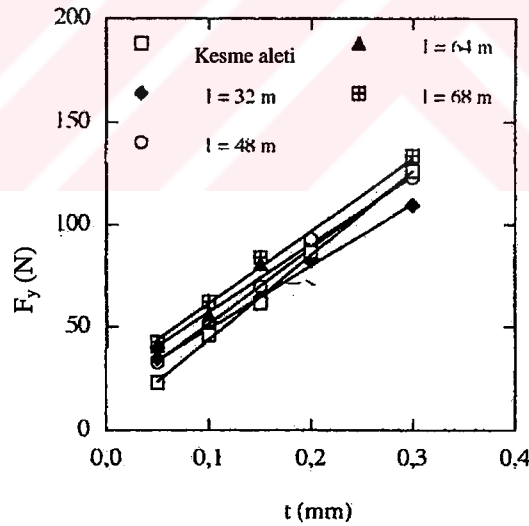
KrF durumunda, laser prosesinin alışlagelmiş birleşme yönteminden önemli bir şekilde daha iyi olduğunu saptamışlardır. Sonuç olarak, laser prosesinin laboratuvarında düz numunelerin yüzey işlemi için uygun bir metot olduğunu ispat etmişler, bununla birlikte, bu proses teknolojisini gerçek uygulamalara tatbik etmek için laser prosesinin önemli alanlarının daha çok araştırılması gerektiğini vurgulamışlardır.

SMC levhalarını birleştirmede yeni bir yöntem de, Malaczynski ve Cinpinski (1996) tarafından radyo frekansı ısıtması ile Tyrite 7525 üretan ve epoksi 320 yapışkan sistemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

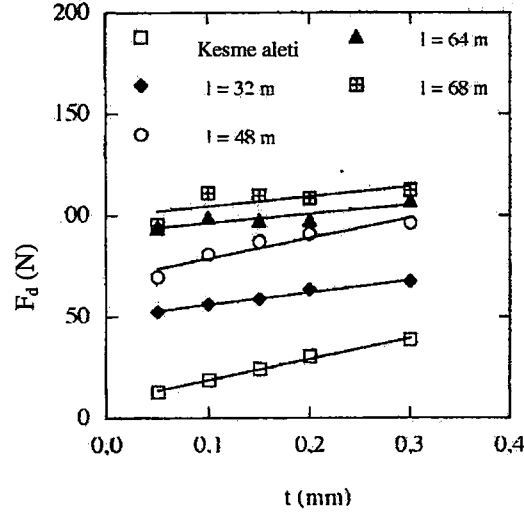
(Caprino ve Santo, 1998), yaptıkları araştırmada uzun dönem dikgen kesme testlerini; 0° meyil, 5° rölyef açısı ve sabit bir kesme derinliği ile yüksek hız çeliği (HSS) takımlarını kullanarak, kesme kuvvetleri üzerinde takım aşınmasının etkisini doğrulamak için SMC üzerinde uygulamışlardır. Testleri periyodik olarak yapmışlar ve aşınmanın farklı derecelerinde kesme derinliğinin bir fonksiyonu olarak kesme kuvvetlerinin değişmesini ölçmüşlerdir. Ana itme kuvvetinden aşınmaya daha fazla hassas olduğunu gözlemişlerdir. Takım aşınma özelliklerinin; takım yüzeyine karşı çentiğin ihmal edilebilir kaymasını ve takımın yan tarafı boyunca şiddetli sürtünmesini, tek yönlü karbon-fiber takviyeli plastiklerin makina ile şekil verilmesiyle ilgili önceki sonuçlar ile uzlaşmayı gösterdiğini saptamışlardır. Bundan dolayı, tek yönlü kompozitler için önceden önerilen kuvvet modelini kesme bilgisine uygulamışlardır.

Araştırmacılar aşağıdaki ana bulgulara ulaşmışlardır:

1. Yatay ve düşey kuvvet her ikisi de artan takım aşınması ile sürekli olarak artar; bununla birlikte, yatay kuvvet aşınmaya düşey kuvvetten daha hassastır, daha yüksek bir oranda artmaktadır (Şekil 2.13 ve Şekil 2.14).



Şekil 2.13 Farklı kesme uzunlukları (l) için, kesme derinliğine karşı yatay kuvvetin (F_y) değişimi (Caprino ve Santo, 1998).



Şekil 2.14 Farklı kesme uzunlukları (l) için, kesme derinliğine karşı düşey kuvvetin (F_d) değişimi (Caprino ve Santo, 1998).

2. Takım aşınması esasen yan tarafa toplanır, bir aşınma yerinin oluşumu gözlenir; tersine, yüzey geometrisi esas olarak artan kesme uzunluğu ile değişmeden kalır.
3. “Birim kesme kuvveti” kavramı; kompozit malzemenin makina ile şekillendirilmesinde faydalı olarak uygulanabilir, takım yüzeyinde gelişen yatay kuvvetin bir kısmının (toplam yatay kuvvetten ziyade), çentik enine kesit alanına oranı olarak tarif edilir.
4. Eğer meydana gelen kesme kuvvetleri içinde yan taraf ile oynadığı rolün sebebi izah edilirse ve takım yüzeyindeki kuvvet kendi yüzeyine dikey olarak farzedilirse, birim kesme kuvveti; kesme derinliği ve takım aşınmasının her ikisinden de bağımsızdır; benzeri dinamik sürtünme katsayısı için olur.

2.4.2 Malzeme (Bileşim) Değişkenlerinin Etkisi

(Vina vd., 1994), çalışmalarında kısa E-camı fiberleri ile takviye edilmiş doymamış polyester reçineden şekillendirilmiş, belli bir miktar dolgu maddesi (CaCO_3) ve az miktarlarda katkıları içeren SMC-35 kompozit malzemesini kullanmışlardır. Bu malzemenin düşey preste basma altında kalıplanması ile boyutları 200x200 mm, kalınlığı 3 mm olan levhalar elde etmişlerdir. Çizelge 2.14 de test edilen malzemenin hacim fraksiyonları gösterilmiştir.

Çizelge 2.14 Test edilen malzemenin hacim fraksiyonları (Vina vd., 1994).

Doymamış polyester reçine, V_r (%)	58.6
CaCO_3 dolgu maddesi, V_p (%)	6.4
Kısa cam fiberler (20 mm uzunluğunda), gelişigüzel dağılmış, V_f (%)	35.0

Araştırmacılar, SMC-35 levhalarını İspanya'nın kuzeyinde, kıyıya yakın Gijon Endüstri Mühendisliği Teknik Okulu'nun çatısında yer alan bir yapı üstünde fırtınalı havaya maruz bırakmışlardır. Atmosfer, bu yüzden, yüksek derecede nemli kıyusal ve endüstriyel türdendi. Levhaların mekanik özelliklerini, atmosfere maruz bırakmadan önce ölçmüşler ve 6, 12, 18 ve 24 aylık sürelerde atmosfere maruz bıraktıktan sonra tekrar ölçmüşlerdir. Atmosferde doğal bir şekilde yaşlanmış levhalar üzerinde uygulanan termomekanik analiz ve mekanik deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 2.15, Çizelge 2.16, Çizelge 2.17 ve Çizelge 2.18'de sunulmuştur.

Çizelge 2.15 Çekme deneylerinin sonuçları; parantez içindekiler standart sapma (Vina vd., 1994).

	Başlangıç	6 Ay	12 Ay	18 Ay	24 Ay
Elastiklik Modülü, E_t (GPa)	13.8 (2.6)	12.6 (2.1)	12.6 (0.7)	12.9 (1.9)	11.4 (1.5)
Poisson Oranı, V_t	0.39 (0.07)	0.32 (0.05)	0.31 (0.02)	0.37 (0.04)	0.31 (0.02)
Uzama, e_t (%)	1.4 (0.12)	0.95 (0.21)	1.1 (0.25)	0.95 (0.12)	0.98 (0.13)
Çekme dayanımı, X_t (MPa)	120 (15.3)	89 (5.6)	83 (10.5)	87 (11.5)	86 (9.3)

Çizelgede gösterildiği gibi, elastiklik modülünde sürekli bir azalma görülmektedir, ilk 6 aylık süre esnasında Poisson oranı, çekme dayanımı ve uzamada küçük bir azalma olduğu, daha sonra sabit kaldığı görülmektedir. Araştırmacılar, 2 yıl sonra çekme dayanımının %30 civarında bir azalma ile çok etkilenen özellik olduğunu vurgulamışlardır.

Çizelge 2.16 Basma deneylerinin sonuçları; parantez içindekiler standart sapma (Vina vd., 1994).

	Başlangıç	6 Ay	12 Ay	18 Ay	24 Ay
Elastiklik Modülü, E_c (GPa)	10.1 (1.7)	11.3 (1.7)	12.2 (1.7)	12.2 (0.7)	13.6 (1.0)
Poisson Oranı, V_c	0.26 (0.07)	0.26 (0.04)	0.26 (0.002)	0.30 (0.01)	0.40 (0.02)
Uzama, e_c (%)	2.0 (0.33)	1.2 (0.22)	1.7 (0.21)	1.8 (0.19)	1.4 (0.23)
Basma dayanımı, X_c (MPa)	187 (14.2)	99 (1.9)	178 (13.4)	211 (8.4)	185 (10.2)

Basma elastik sabitlerinin olaya maruz kalma ile önemli artış gösterdiği Çizelge 2.16'da görülmektedir. Araştırmacılar, basma dayanımının, 6 aylık süre sonundaki deney sonucu haricinde değişmediğini gözlemişlerdir.

Çizelge 2.17 Eğme deneylerinin sonuçları; parantez içindekiler standart sapma (Vina vd., 1994).

	Başlangıç	6 Ay	12 Ay	18 Ay	24 Ay
Eğme dayanımı, X_s (MPa)	21.1 (2.8)	24.4 (2.4)	28.7 (4.6)	33.7 (3.6)	34.7 (2.6)

Eğme dayanımının, 18 aylık maruz kalmadan sonra zaman ile %50'nin üzerinde bir artış gösterdiği Çizelge 2.17'den görülmektedir.

Çizelge 2.18 30°C'de 7.8 ve 125 Hz frekanslarında ölçülmüş gerçek modül (E') ve kayıp faktörü ($\tan \delta$) değerleri; parantez içindekiler standart sapma (Vina vd., 1994).

	Başlangıç	6 Ay	12 Ay	18 Ay	24 Ay
Gerçek Modül E' (7.8 Hz/30°C) (GPa)	16.0 (1.5)	13.2 (1.2)	15.4 (1.1)	14.2 (0.8)	12.3 (1.3)
$\tan \delta$ (7.8 Hz/30°C)	0.071 (0.002)	0.045 (0.002)	0.031 (0.001)	0.031 (0.002)	0.038 (0.001)
Gerçek Modül, E' (125 Hz/30°C) (GPa)	16.9 (1.5)	14.1 (1.3)	16.9 (1.0)	15.1 (1.0)	12.8 (1.1)
$\tan \delta$ (125 Hz/30°C)	0.095 (0.004)	0.074 (0.003)	0.039 (0.004)	0.047 (0.002)	0.048 (0.003)

Atmosfere 2 yıl maruz kalmadan sonra, nemlendirme faktöründe ($\tan \delta$) fazla oranda düşüş görüldüğü kadar gerçek modülde (E') de önemli bir düşüş gözlemlendiği Çizelge 2.18'de görülmektedir.

Araştırmacılar, nemlendirme faktöründeki ($\tan \delta$) önemli azalmanın (%50'den daha büyük) malzemenin içten akışkanlığında (özellikle kompozitin matrisini oluşturan makromoleküllerde) bir azalmayı gösterdiğini, bu etkinin aynı zamanda, esasen matrise bağlı olan özelliklerdeki örneğin, eğme dayanımı ve basma elastiklik modülü gibi özelliklerdeki artışı açıkladığını vurgulamışlardır. Bu gözlemlerin sebebinin de polyester reçinedeki iyileşmenin tamamlanması olduğunu düşündüklerini belirtmişlerdir.

Araştırmacılar, atmosfere maruz bırakılan levhaların; matrisin içine yayılan, fiber/matris ara yüzeyine ulaşmaya son vererek kimyasal olarak cam fiberlere hücum eden suyu sürekli olarak absorbe ettiğini, bu şekilde takviye edici fiberlerin zayıflamasına sebep olduğunu ve dolayısıyla direkt olarak fiberlere bağlı olan özelliklerde örneğin çekme özellikleri ve elastiklik modülü gibi özelliklerde bir azalma gözlemlendiğini vurgulamışlardır.

(Chan-Park ve Mc Garry, 1996), yaptıkları çalışmada; düzeltilmiş matris kırılma enerjisi ve SMC dayanımı ile mükemmel düşük profil etkisi veren alternatif düşük profil katkılarını araştırmışlardır. Bir SMC'de termoset polyester; %7-%10 oranında çeker, fiberin baştan başa görünmesine ve yüzey kalitesinin zayıf olmasına sebep olur. Belli termoplastikleri ilave ederek sıfır çekme payı ve düzgün yüzeyler meydana getiren bu maddelere düşük-profil katkıları (LPA) denilir. Polivinil asetat (PVAc), yüksek etkili LPA'dır, PVAc'nin dayanıklı olduğu düşüncesi olsa bile, matrisin %14 gibi ağırlığı mevcut olduğu zaman darbe dayanımı 66.3 J/m^2 'den 35.1 J/m^2 'ye düşer. SMC polyestere polivinil asetatın ilavesi; mükemmel bir düşük profil etkisi fakat zayıf mekanik özellikler üretir.

Araştırmacılar; ticari olarak piyasada bulunan stiren-bütadien (SB) bloğu veya en iyi ortak polimerleri incelemişlerdir. Bunlar daha fazla dayanıklı matrisler üretirler, fakat düşük profil etkileri zayıftır. Bunun çaresini bulmak için, onlar; bütadien yapıştırmanın epoksi ile olması gerektiğini ve en uygun katkı olduğunu araştırmışlardır. En uygun katkı ile epoksi-SB ortak polimerlerin iyi düşük profil etkisi ve düzelmiş matris darbe dayanımı ve SMC'nin eğme özelliklerindeki sonuçlarını PVAc ile karşılaştırmışlardır. En uygun katkı Ricon 131MA137 (maleik anhidrit polibütadien) ile Epoksili %10 Kraton D1300X'in; matris darbe dayanımının PVAc ile karşılaştırılmasında %100 düzelme sonucunu verdiğini bulmuşlardır. SMC'nin oda sıcaklığı eğme dayanımının %13 arttığını tespit etmişlerdir. Benzer düzelmeleri; değiştirilmiş Stereon 840A ile bulmuşlar ve SB kauçuklar ile dayanıklılığın çatlak bağlantıları içinde oluştuğunu saptamışlardır. Sonuçlar Çizelge 2.19 ve Çizelge 2.20'de sunulmuştur.

Çizelge 2.19 Epoksili Kraton D1300X ile SMC'nin eğme özellikleri (Chan-Park ve Mc Garry, 1996).

LPA	%	Eğme Dayanımı (MPa)	Eğme Modülü (GPa)	Eğme Uzaması (%)	Kırılma Enerjisi (J)
PVAc (kontrol)	14.0	144±31	7.10±1.03	2.39±0.40	1.192±0.337
K1300 (değiştirilmemiş)	7.0	138±30	6.90±0.83	2.32±0.36	1.017±0.315
K1300 (E1 %)	7.0	150±43	6.97±1.45	2.53±0.35	1.456±0.477
K1300 (E5 %)	7.0	163±25	7.38±1.17	2.40±0.20	1.213±0.235
K1300 (E10 %)	7.0	160±19	7.31±0.83	2.55±0.32	1.220±0.172

Çizelge 2.20 Epoksili Stereon 840A ile SMC'nin eğme özellikleri (Chan-Park ve Mc Garry, 1996)

LPA	%	Eğme Dayanımı (MPa)	Eğme Modülü (GPa)	Eğme Uzaması (%)	Kırılma Enerjisi (J)
PVAc (kontrol)	14.0	144±31	7.10±1.03	2.39±0.40	1.192±0.337
S 840 (değiştirilmemiş)	7.0	149±27	7.24±0.90	2.30±0.22	0.977±0.186
S 840 (E1 %)	7.0	174±39	7.86±1.66	2.54±0.33	1.675±0.474
S 840 (E5 %)	7.0	161±36	8.00±1.38	2.39±0.28	1.206±0.357
S 840 (E10 %)	7.0	159±21	7.31±1.31	2.62±0.40	1.295±0.306

(Smith ve Good, 1996), yaptıkları araştırmada yeniden kullanışlı hale getirilmiş (recycled) PET (Polietilen teraftalat) den yapılan doymamış polyesterlerin; üretim için SMC formülasyonlarında, tipik işlem yapma şartları altında, mükemmel mekanik ve görünüş özelliklerine sahip olan parçalarda kullanıldığını deneysel olarak ispatlamışlardır.

Doymamış polyester reçineler içerisine yeniden işleyip kullanışlı hale getirilmiş PET'i birleştirme, yeniden işlenme seviyesi çok düşük olmadıkça sıfır çekmeli SMC parçalarda, kozmetik nitelikte üretim için beklenmemiştir. %25 - %30 yeniden işlenen PET içeren reçineleri; termoplastik düşük profil katkılarının (LPA) geniş bir alanı (poliüretanlar, doymuş polyesterler ve polivinil asetat) ile mükemmel sonuçlar ile test etmişlerdir. Yüzey kalitesi ve mekanik özellikleri içeren bütün ölçülmüş özellikleri; Class-A kozmetik SMC sisteminin (propilen maleik reçine esaslı) standartı ile karşılaştırmışlardır.

PET- ana matris reçine LPA'lardan biri ile birleştirilmiştir. İlave stiren monomer ve inhibitörler ile tamamlanan SMC formülasyonu aşağıda gösterilmektedir.

<u>Bileşen</u>	<u>%</u>
Ana reçine	39.4
LPA	15.8
Stiren	44.8
Butil hidroxitolun	0.1
t-Butil perbenzoat	1.5
Çinko stearat	4.5
Kalsiyum karbonat	180.0
B-tarafı	6.0
Cam	29-31

Poliüretan (PUR) ve doymuş polyester düşük profil katkıları için Ashland İndeksleri 85'den 90'a kadar olan alanda kontrol için benzer olduğunu belirtmişlerdir. Çekme ve eğme özelliklerinin aynı seviyede veya kontrol edilenden daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Başlangıç viskozitesi ve olgunlaşma gibi işlem parametrelerinin; PET-reçine yapısının yapımda, depolamada veya SMC kalıplamasında herhangi bir değişikliği gerektirmeyeceğini gösterdiğini saptamışlardır.

Her sistem için çekme özellikleri (ASTM D-638), eğme özellikleri (ASTM D-790) ve su absorpsiyonu (ASTM D-570) Çizelge 2.21'de görülmektedir.

Araştırmacılar; yeniden işlenmiş malzemeler içeren otomotiv kompozitlerini geliştirmek için, Ashland A.Ş. den PET-doymamış polyester reçinenin çoğu uygulamalar için örneğin Class-A otomotiv gövde panelleri, çeşitli kamyon gövde panelleri ve iç paneller gibi yüksek kaliteli SMC parçalar üretmek için uygun bir bileşim olduğunu belirtmişlerdir. Reçine esaslı-PET içeren malzemenin işlem kabiliyetinin; yüksek seviyede yeniden ezilmiş SMC içeren bir bileşiminkine göre daha üstün olduğunu saptamışlardır. Yeniden işlenmiş PET ile doymamış polyester sentezinin mevcut bir tüketim hizmeti olan gıda stoğu için de mükemmel bir kullanım olduğunu belirtmişlerdir.

Çizelge 2.21 Standart Class-A SMC sistemi ve PET-Esaslı SMC sistemleri (Smith ve Good, 1996).

Özellik	PET Recine 1				PET Recine 2		
	Standart	A	B	C	A	B	C
Çekme dayanımı, psi (MPa)	10.470 (72.180)	12.500 (86.175)	15.700 (108.235)	14.700 (101.341)	13.960 (96.240)	13.120 (90.449)	-
Çekme uzaması, %	1.51	1.429	1.61	1.60	1.438	1.337	-
Çekme modülü, ksi (GPa)	1450 (9.996)	2025 (13.960)	1800 (12.409)	1820 (12.547)	2175 (14.994)	1719 (11.850)	-
Eğme dayanımı, psi (MPa)	21.740 (149.875)	34.568 (238.311)	26.850 (185.103)	28.800 (198.547)	30.384 (209.467)	23.210 (160.009)	-
Eğme modülü, ksi (GPa)	1070 (7.376)	1864 (12.850)	1342 (9.251)	1844 (12.712)	1744 (12.023)	1283 (8.845)	-
Cam içeriği, %	28	31	29	29-31	28.5	29	-
Su absorpsiyonu, %	0.5	0.55	0.43	0.55	0.61	0.65	-
Çekme payı, inç/ft (m/m)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.002 (1.66x10 ⁻⁴)	0.003 (2.49x10 ⁻⁴)	0.001 (8.3x10 ⁻⁵)	0.002 (1.66x10 ⁻⁴)	0.005 (4.15x10 ⁻⁴)
Ashland Index	80-90	110-115	84-90	84-91	120	80-82	80-90

A: Polivinil asetat LPA; B: Doymuş polyester LPA; C: Poliüretan LPA

(1 psi = 6.894 MPa, 1 ksi=10⁻³psi, inç/ft = 0.0254 m / 0.3048 m = 0.083 m/m)

(Duwyer vd., 1996), araştırmacılar bileşiği meydana getiren malzemelerin (cam fiber, kireç taşı tozu ve polyester reçine) özelliklerine dayanarak bir SMC kompozitinin yoğunluk (d), özgül ısı (c), ısı genleşme katsayısı (α) ve termoelastik sabiti (K_c) ve onların kendi hacim-fraksiyonları için tanımlanan prosedürlerden çıkartılmış özellik bilgisini; SMC bileşimlerinin tam alanını kapsayan üçgen şeklindeki düzey planları formunda sunmuşlardır. Çizelge 2.22’de malzeme özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.22 Malzeme özellikleri (Duwyer vd., 1996).

	Yoğunluk d (kgm ⁻³ x10 ⁻³)	Özgül ısı c (J kg ⁻¹ K ⁻¹ x10 ⁻³)	Isıl genleşme katsayısı α (K ⁻¹ x10 ⁵)	Elastiklik modülü E (MPax10 ⁻³)
Cam	2.59	0.80	0.54	70.0
Polyester	1.12	1.5	8.5	4.0
Kireç taşı	2.85	0.84	0.65	53.0

Farklı cam içerikleri ile, SMC malzemesinin bir grup numunelerinin termoelastik tepkisini SPATE 9000 sistemini kullanarak deneysel olarak belirlemişlerdir. Bu çalışmada, SPATE termoelastik gerilme analizi tekniğinin SMC kompozit malzemeler için başarıyla uygulanabildiğini göstermişlerdir. Sonuç olarak, SMC malzemesinin termoelastik davranışının malzeme hasarına hassas olduğunu vurgulamışlardır.

(Camino vd., 1997), polyester reçine-cam fiber SMC kompozit malzemelerinde su absorpsiyonunun kinetik analizini, su nüfuziyetinin neden olduğu kimyasal değişikliklerin teşhisini ve malzemelerin mekanik özelliklerinin analizini kapsayan metodolojik bir yaklaşım

geliştirmişlerdir. Yaklaşımın; kompozit malzemelerin fiziko-kimyasal özelliklerine cevap veren özgül su absorpsiyonunu ve su yaşlanması yüzünden bu özelliklerin gelişmesini tanımlayan bir modele dayalı olduğunu belirtmişlerdir. SMC malzemelerinde su absorpsiyonunu tanımlamak için geliştirilmiş olan bu modelde, hidroliz, şişme ve plastikleşmeyi, bunun yanı sıra malzemenin mekanik özelliklerini değiştirmesini, şekillendirme yüzünden malzeme içindeki suda erime kabiliyeti değişikliklerini ve düşük-moleküler ağırlıkta erir maddenin filtre edilmesini dikkate almışlardır. Modeli, ticari malzemelerin uygun fiziksel kimyasal özelliklerini ortaya çıkarmak için uygulamışlardır. Su absorpsiyonunun, malzemelerin yapısının ve reaksiyona girme kabiliyetinin kimyasal ve fiziksel tanımlaması için bir moleküler reaktif araştırma olarak suya dayalı malzeme karakterizasyonu için uygun basit bir araç olduğunu vurgulamışlardır. Çizelge 2.23’de SMC kompozitlerinin fiziko-kimyasal parametrelerinin karşılaştırılması gösterilmiştir.

Çizelge 2.23 SMC kompozitlerinin fiziko-kimyasal parametrelerini karşılaştırma (Camino vd., 1997)

Malzeme	Su yükseltme dengesi C _{wo} /(kg/kg)	Su difüzyon katsayısı D _w /(10 ⁻¹¹ m ² /s)			Elastiklik modülünde azalma oranı (E _{oo} /E _o) %
		Başlangıç	Max.	Sonuç	
SMC-1	0.039	0.8	2.3	1.4	10
SMC-2	0.042	0.9	3.8	2.0	30
SMC-3	0.035	1.0	3.8	1.8	35
SMC-4	0.061	0.7	9.7	6.0	25
SMC-5	0.059	0.8	7.2	7.2	35 ^a

^aSu emmenin ilk aşamasından sonra ölçülmüş

(C_{wt} = 0.040 su konsantrasyonu, C_{wo} = 0.68 su yükseltme dengesi)

(Merle vd., 1998), araştırmalarını SMC’de gözenekliliğin nicel bir morfolojik analizini özellikle çekme payının karşılanmasından sonuçlanan mikroboşluklar için görüntü yöntemini kullanarak yapmışlardır.

Bu çalışmada kullanılan SMC’nin bileşimi; %27-28 cam fiber, %43-44 CaCO₃ dolgu malzemesi, %10-11 doymamış polyester (maleik esaslı), %11 stiren, düşük profil katkısı olarak %3.6-4 polivinil asetat (PVAc) ve %3-4 diğer bileşikler, inhibitör (engelleyici), initiatör (başlatıcı), kalıp ayırıcı ve kalınlaştırma maddesi olarak magnezyum hidroksit içermiştir. 253 mm x 456 mm, kalınlık 3 mm boyutlarında konvansiyonel bir preste kalıplanmıştır. Kalıplama şartları; sıcaklık 155 ± 3°C, basınç 8 MPa ve süre 3 dakikadır.

SMC’nin özelliklerinin bağlı olduğu geniş bir ölçü alanının üstünde kompleks bir morfolojiye sahip olduğunu, mikroskopik ölçüde, çekme payının karşılanmasından sonuçlanan

mikroboşlukların SMC'nin yüzey görünüşünde anahtar rol oynadığını, bununla birlikte gözenekliliğin (örneğin, eğer yüzey boyama ile bitirilirse) arzu edilmediğini açıklamışlardır. İşlem yapıldığı zaman kendi kabuğunu üretebilen bu malzemenin kabuk etkisini nicel morfoloji analizini kullanarak ölçmüşlerdir.

İlk sonuç olarak; kullanılmamış SMC için mikrogözenekliliğin parçanın dış kabuğunda %5-8, çekirdeğinde ~ %24 olduğunu, çekirdeğindeki mikroboşlukların hidrotermal işlem sonucu yaşlanmadan sonra ~%5'e azaltılan toplam gözenekliliğin kısmen tekrar kapatıldığını ve kabukta mikrogözenekliliğin etkilenmemiş kaldığını bulmuşlardır.

Mikrogözenekliliğin diğer ters etkisinin, onun malzemenin su hassas kısmına geçmesine izin vermesinden dolayı, suyun daha fazla çekilmesini ilerletmek olduğunu, suyun etkisinin genelde malzemenin şişmesi olduğu, nadiren de içten gözeneklilik miktarının azalması olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, en geniş mikroboşlukların daha küçüklere tekrar bölünmesi ile hacim dağılımının değiştirildiğini bulmuşlardır. İlaveten, mikroboşlukların morfolojisini onların kırılma davranışı vasıtasıyla incelemişler ve kullanılmamış malzeme için onların kompleks biçiminin karakteristik kırılma boyutunun (çapının) $D = 1.35$, yaşlanmadan sonra $D = 1$ (öklit geometrisi) olduğunu belirlemişlerdir.

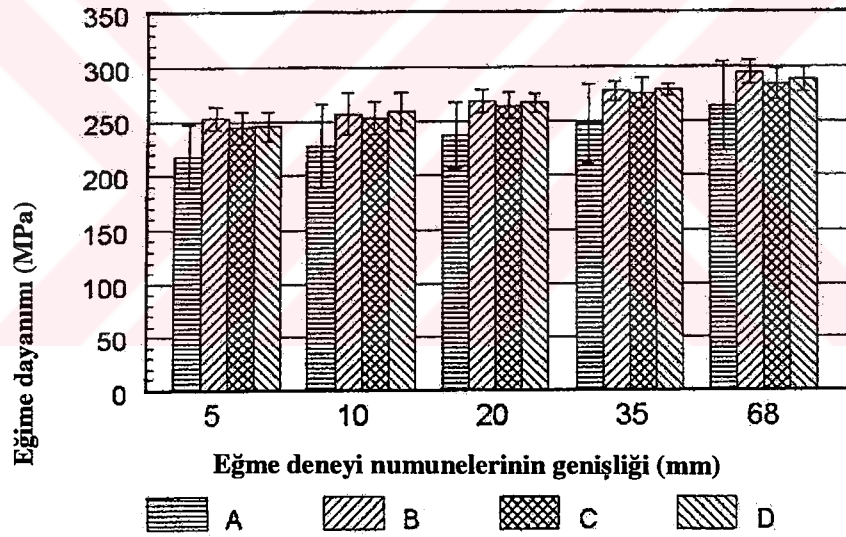
Özet olarak, su yüzünden malzemenin içinde şişme oluştuğunu ve mikroboşlukların düzensiz biçiminin düzeltildiğini, SMC'nin kendi kendini koruyabilen akıllı bir malzeme gibi davrandığını bulmuşlardır.

(Fitoussi vd., 1998), çalışmalarında; SMC kompozitleri için bütün çekme dayanımı eğrilerini ve hasar ile sertlik kaybını tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Mori ve Tanaka modelinin yardımı ile istatistiksel olarak mikro-makro ilişkiyi geliştirerek bunu başarmışlardır.

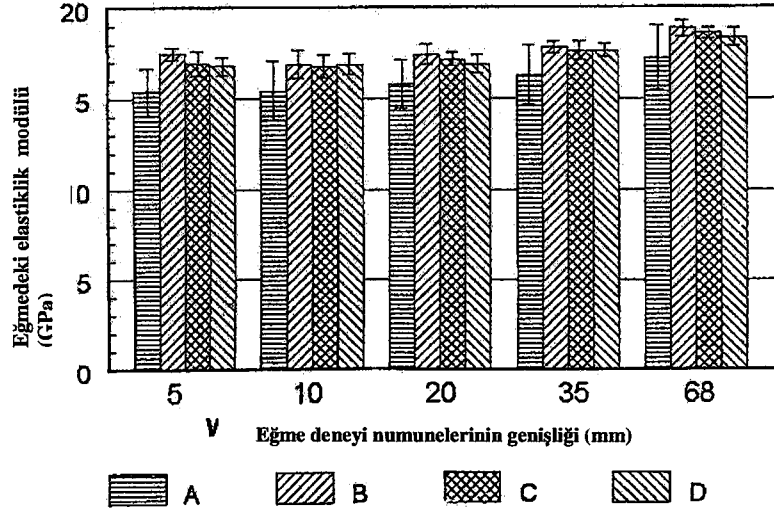
SMC kompozitleri için; mikroyapının çok kompleks ve bileşenlerinin geometrik dağılımının homojen olmadığını belirtmişlerdir. Ortalama çekme dayanımının kullanımı yüzünden klasik modellerin, mikroyapının bölgesel değişiminin hesabına katmanın mümkün olmadığını ifade etmişlerdir. Sonuç olarak, makroskopik sertlik vektörünün iyi tahmin edilebildiğini, fakat bir bölgedeki dayanım değerlerinin bölgesel düzensiz değişimlerinin göz önüne alınmadığını ve bir bölgede hesaplanmış dayanım değerlerinin ortalamaya dayanarak düzeltildiğini açıklamışlardır.

(Marissen ve Linsen, 1999), araştırmaları için doymamış polyester reçine, %45 hacim oranında gelişigüzel dağılmiş cam fiberler ve dolgu malzemeleri içeren ticari yüksek performanslı SMC malzemesini seçmişlerdir. Araştırmacılar SMC levhasının 4 farklı bölgesinden aldıkları numunelerin 4 noktada eğme deneyi sonucunda inceledikleri SMC malzemesinin eğme dayanımının, numune genişliğinin en az 68 mm genişliğe kadar artması ile bir artış gösterdiğini tespit etmişlerdir. Son zamanlarda artırılmış cam fiber oranı ile daha iyi mekanik özellikler gösteren yeni SMC kompozit tipleri geliştirildiğini ve yük taşıyan yapılar da büyük lde kullanılmakta olduğunu açıklamışlardır.

şekil 2.15 ve şekil 2.16’da SMC levhasının 4 farklı bölgesinden alınan çeşitli numuneler için 4 noktada eğme testleri uygulanarak elde edilen eğme dayanımı ve eğmedeki elastiklik modülünün ortalama değerleri sunulmuştur.



şekil 2.15 SMC levhasının 4 farklı bölgesinden (A, B, C, D) alınan çeşitli numuneler için eğme dayanımının deney numunelerinin genişliğine göre değişimi (Marissen ve Linsen, 1999).



Şekil 2.16 SMC levhasının 4 farklı bölgesinden (A, B, C, D) alınan çeşitli numuneler için eğmedeki elastiklik modülünün deney numunelerinin genişliğine göre değişimi (Marissen ve Linsen, 1999).

(Fernberg ve Berglund, 2001), bu çalışmada kısa-fiber takviyeli üç farklı kompozitin [kesikli örgülü hasır gibi örülmüş elyaftan elde edilen (CSM) ve iki adet levha kalıp bileşimi (SMC) malzemelerinin] kırılma özelliklerini deneylerle incelemişlerdir. Sadece eğme momentleri ile yüklü iki kat serbest kiriş (DCB) numuneleri üzerinde kırılma testleri uygulamışlar ve 3 farklı kompozite ait kritik darbe dayanımlarını, J_c , belirlemişlerdir. Çalışmalarında DCB numunesinin yüksekliğinin kırılma süreci üzerine yapmış olduğu etkiyi inceleyerek, deneylerle belirlenen J (darbe dayanımı) ile Δ (çatlak açıklığı mesafesi) ilişkilerinde numune yüksekliğinin önemli bir rol oynamadığını belirlemişlerdir.

Bu yüzden, bu çalışmada belirlenen köprü yapma kanunlarının malzeme özellikleri olarak kabul edilebileceğini vurgulamışlardır. Ölçülen köprü yapma kanunları yardımıyla mikroyapı ve kırılma davranışı arasındaki ilişkiyi tartışmışlardır. Fiberleri yüksek hacme sahip olan kısımların darbe dayanımı üzerinde faydalı etki yaptığının doğrulandığını ve fiberin çekilme eğilimi çok daha fazla olduğu için, Flex-SMC'nin Std-SMC adı verilen standart bir SMC'ye oranla daha yüksek darbe dayanımının olduğunu gözlemlendiğini belirtmişlerdir (Std-SMC için $J_c = 25.9 \text{ kJ/m}^2$, Flex-SMC için $J_c = 56.0 \text{ kJ/m}^2$). SMC malzemelerindeki cam fiberleri (E-camı) arasındaki tek farkın düşük profil katkısı tipinde (Std-SMC için polivinil asetat, Flex-SMC için poliüretan) görüldüğünden dolayı, daha zayıf ara yüz bağının, düşük yoğunluk-

yüksek eğmeli Flex-SMC’de enerjinin artmasına neden olduğunu düşünmüşlerdir. Test edilen malzemelerin özellikleri Çizelge 2.24’de görülmektedir.

Çizelge 2.24 Test edilen malzeme özellikleri (Fernberg ve Berglund, 2001).

	CSM	Std-SMC	Flex-SMC
Young modülü, E (GPa)	16.4	11.5	8.3
Fiber uzunluğu, l_f (mm)	25	25	25
Fiber hacim kısmı, V_f (%)	40	~22 ^a	~20 ^a
Fiber ağırlık kısmı, W_f (%)	60	30 ^a	34 ^a
Filler ağırlık kısmı, W_{filler} (%)	-	44 ^a	35 ^a
Cam-küre ağırlık kısmı, $W_{LD-küre}$ (%)	-	-	~5 ^a
Kompozit yoğunluğu, d_c (gr/cm ³)	-	1.9 ^a	1.58 ^a

^a İmalatçının bilgisine dayalı.

Test edilen farklı malzemelerin kırılma özellikleri Çizelge 2.25’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.25 DCB testlerinden elde edilen farklı malzemeler için ortalama kırılma özellikleri (Fernberg ve Berglund, 2001).

	CSM	Std-SMC	Flex-SMC
Numune numaraları	10	8	5
J_c (kJ/m ²)	76.9 (10.6)	25.9 (1.7)	56.0 (7.1)
σ_b^{max} (MPa)	185 (73)	75 (11)	86 (14)
Δ_m (mm)	0.16 (0.05)	0.13 (0.03)	0.19 (0.03)

(Parantez içindeki sayılar standart sapmayı belirtir).

Araştırmacılar; belirlenen köprü yapma kanunlarının tüm malzemeler için aynı karakteristik şekil gösterdiğini bulmuşlardır. Küçük Δ ’de fiberlerin tümü bozulmamış halde iken, Δ arttıkça köprü yapma gerilmesinin (σ_b^{max}) arttığını, kırılmadan yada matristen tam olarak geri çekilmeden dolayı köprü yapan fiberler azalmaya başladığı zaman, köprü yapma gerilmesinin max. düzeye ulaştığını ve Δ ’nın daha da artması ile köprü yapan fiberler hızla kaybolduğu için köprü yapma gerilmesinin azalmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir. Flex-SMC’de daha büyük ölçüde fiber çekilmesi olduğundan köprü yapma kanunun daha büyük Δ ’e doğru hareket etmesine sebep olduğunu belirlemişlerdir.

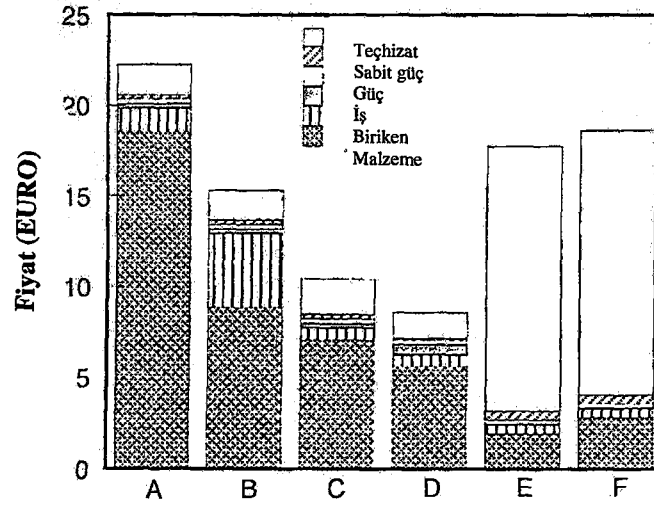
Ayrıca, köprü yapma kanunun, mikroyapı parametreleri ve malzeme kırılma davranışı arasındaki ilişki ile ilgili önemli ve ilginç bilgiler içerdiğini gözlemişlerdir. Böyle bir bilginin klasik bir lineer elastik kırılma mekaniği (LEFM) yaklaşımı kullanıldığı zaman elde edilen darbe dayanımı değerlerinde mevcut olmadığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak, araştırmacılar; köprü yapma kanunları açısından kırılma davranışının karakteristik özelliklerini belirleme

kavramını çekici bulduklarını, çünkü bu kavramın malzeme bileşimi ve mikroyapının arzu edilen kırılma davranışı doğrultusunda hazırlanmasında bir araç olarak kullanılabileceğini söylemişlerdir.

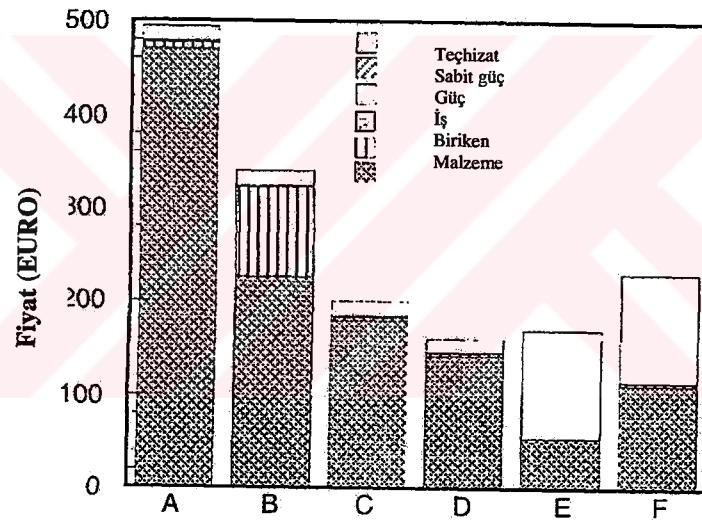
(Akermo ve Astrom, 2000), yaptıkları araştırmada basma kalıplanmış termoplastik kompozit ve sandviç parçaların fiyat modeli için bir program geliştirmişlerdir. Programı; termoplastik kompozit ve sandviç malzemelerin çelik parçalar ile fiyat rekabetinde gösterdiği parça büyüklüğü, karmaşıklığı ve serilerin uzunluğu hakkındaki bağımlılıkları içine alan genel eğilimleri araştırmak için kullanmışlardır. Düşündükleri kompozit malzemeler; cam dokuma takviyeli poliamid 12 (PA 12), tek yönlü cam takviyeli polipropilen (PP), gelişigüzel cam takviyeli polipropilen (PP) ve gelişigüzel cam takviyeli doymamış polyester SMC'yi kapsar. Kompozit yüzey malzemeleri ile bileşimde düşündükleri dört farklı çekirdek malzeme; polimetakraylimid (PMI) köpük, polipropilen (PP) bal peteği, polipropilen (PP) köpük ve son-tane balsa.

Araştırmacılar; kompozit parçaların basma kalıplamasında, düşük üretim hacimlerinde bile, ham malzeme fiyatının parça fiyatına baskın olduğunu bulmuşlardır. SMC alternatifinin; parça büyüklüğü ve karmaşıklığı bağımsızlığının ekonomik bir şekilde avantajı olduğunu , onu, gelişigüzel cam / polipropilen (PP) malzemesinin izlediğini ispatlamışlardır. Küçük boyutlarda ($0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$ tarzında) nispeten uzun üretim serileri (yıllık 70 000-200 000 parça) ve geometrik olarak basit kompozit parçaların düşünülmüş olan kompozit malzemeleri kullanarak çelik ile fiyat rekabeti yapılabilirdiğini bulmuşlardır. Bununla birlikte, SMC ve gelişigüzel cam / PP nin yıllık 80 000 parçaya kadar olan üretim serilerinde orta büyüklükteki parçalar için de ($0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ tarzında) düşük fiyat alternatifleri meydana getirdiğini ve çelik preslemenin basit geometriye sahip geniş parçalar için en ekonomik alternatif olarak görüldüğünü bulmuşlardır.

Araştırmacılar; metal presleme için sabit teçhizat fiyatlarının, kompozit ve sandviç parçaların basma kalıplaması için olandan önemli ölçüde daha yüksek olduğunu ve farkın parça karmaşıklığı ile arttığını bulmuşlardır. Geniş ve geometrik olarak basit kompozit parçaların çok kısa üretim serileri için metal parçalar ile rekabet edebildiğini, bununla birlikte, geniş ve geometrik olarak karmaşık kompozit parçaların yıllık 30 000 parçaya çıkan üretim serileri için çelik parçalarla karşılaştırıldığında ekonomik olduğunu göstermişlerdir (Şekil 2.17 ve Şekil 2.18).

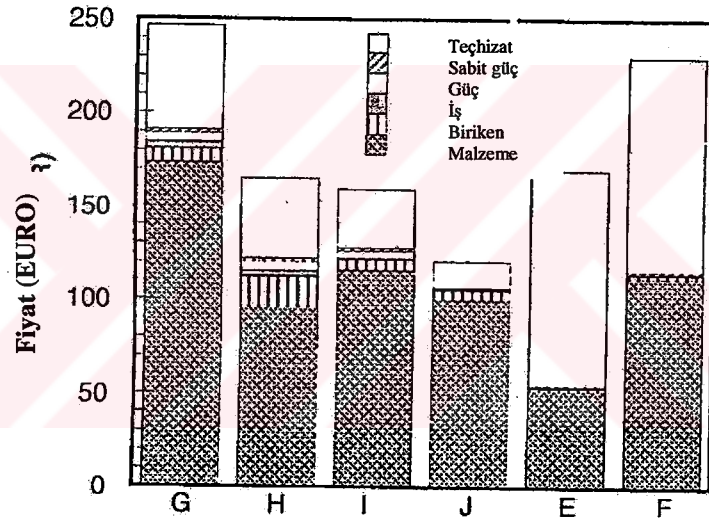


Şekil 2.17 Basit ve orta büyüklükte parça için yıllık seri üretim miktarı 30 000 parçada iken toplam parça fiyatına farklı fiyat kategorilerinin katkısı (A: cam/PA12, B: tek yönlü cam/PP, C: gelişigüzel cam/PP, D: SMC, E: çelik, F: alüminyum) (Akermo ve Astrom, 2000).



Şekil 2.18 Karmaşık parça için yıllık seri üretim miktarı 30 000 parçada iken toplam parça fiyatına farklı fiyat kategorilerinin katkısı (A: cam/PA12, B: tek yönlü cam/PP, C: gelişigüzel cam/PP, D: SMC, E: çelik, F: alüminyum) (Akermo ve Astrom, 2000).

Araştırmacılar; yaptıkları çalışmada sandviç kavramı kullanımının tek-kat kompozitlerle karşılaştırıldığında ham malzeme fiyatlarının etkisinin azaldığını, sabit teçhizat fiyatlarının kompozit imalatı ile karşılaştırıldığında sandviç imalatı için az artmasına rağmen, ayrıntılı parça fiyatının bütün düşünülen sandviç kombinasyonları için azaldığını bulmuşlardır. Kar ve zararı eşit noktada düşünülen cam / PP-PP köpük çekirdek sandviç alternatifi için yıllık 50 000 parçada iken, SMC-balsa ve gelişigüzel cam / PP-balsa alternatiflerinin yıllık 70 000 parçaya kadar çıkan üretim serileri için ekonomik olarak avantajlı olduğunu göstermişlerdir. Burada düşünülen bütün durumlarda SMC alternatiflerinin ürün en düşük fiyatlarına meyilli olması nedeniyle ekonomik olduğunu açıklamışlardır. Sandviç kavramının ham malzeme fiyatlarının etkisini önemli bir şekilde azaltma olanağı sunduğunu, böylece termoplastik esaslı malzemelerin daha fazla fiyat rekabeti yapabildiğini belirtmişlerdir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19 Sandviç parça için yıllık seri üretim miktarı 30 000 parçada iken toplam parça fiyatına farklı fiyat kategorilerinin katkısı (G: cam/PA12-PMI, H: tek yönlü cam/PP-PP bal peteği, I: gelişigüzel cam/PP-PP köpük, J: SMC-balsa, E: çelik, F: alüminyum) (Akermo ve Astrom, 2000).

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Üretim Yöntemi

SMC (Sheet Molding Compound) hazır kalıp bileşimi, 3 bileşenli melez bir kompozit olup, son 12 yılın en güncel üretim yöntemidir. Bu çalışmada bileşenlerin oranları değiştirilerek optimizasyonu yapılmış ve endüstriyel destekli bilimsel bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmadaki SMC kompozit malzemesi; matris malzemesi olarak ortoftalik polyester reçine, fiber takviyesi olarak gelişigüzel dağılmış süreksiz fiber yapısındaki E-camı (13.9 μm çapında, 50 mm uzunluğunda), filler (dolgu maddesi) olarak 3-10 μm çapında kalsit (CaCO_3) ve diğer katkı maddeleri (termoplastik, katalizör, inhibitör, kalıp ayırıcı, viskozite yükseltici kimyasal maddeler) içermektedir. Çalışmadaki SMC bileşimi Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Deneyisel çalışmalarda kullanılan SMC bileşimleri.

Levha No	Tip (E-camı, % hacim oranı cinsinden)	Bileşim (5 kg’lık şarj için % ağırlık)			
		Polyester	Dolgu Maddesi Kalsit (CaCO_3)	E-camı	Diğer
1	% 7.86	1.20 (%24) (% 40.95)	3.00 (%60) (%40.95)	0.50 (%10) (%7,86)	0.30 (%6) (%10.24)
2	%11.74	1.20 (%24) (%40.74)	2.75 (%55) (%37.34)	0.75 (%15) (%11.74)	0.30 (%6) (%10.18)
3	%15.57	1.20 (%24) (40.53)	2.50 (%50) (%33.77)	1.00 (%20) (%15.57)	0.30 (%6) (% 10.13)
4	%19.36	1.20 (%24) (%40.32)	2.25 (%45) (%30.24)	1.25 (%25) (%19.36)	0.30 (%6) (%10.08)
5	%23.11	1.20 (%24) (%40.11)	2.00 (%40) (%26.74)	1.50 (%30) (%23.11)	0.30 (%6) (%10.03)

(1. Parantez içindekiler % ağırlık oranları, 2. parantez içindekiler % hacim oranları).

SMC’nin 3 bileşeninden ortoftalik polyester matris hacim oranı sabit tutularak, filler (CaCO_3) ve fiber (E-camı) hacim oranları değiştirilerek, 5 ayrı tür levha bileşimi denenmek üzere belirlenmiştir. Levhalar sırası ile cam hacim oranları cinsinden:

No 1 %7,86 E-Camı

No 2 %11.74 E-Camı

No 3 %15.57 E-Camı

No 4 %19.36 E-Camı

No 5 %23.11 E-Camı içermektedir.

SMC karışımının kalıp içindeki hareketi ve pişme (curing) süresi içinde cam fiberlerin kalıp içindeki hareketini incelemek amacı ile kalınlığı 4 mm, boyu ve genişliği 295x375 mm olan kalıp tasarlanmış ve imal edilmiştir.

İmalat aşamasında, Kimelsan LTD Şirketi ile yürütülen ortaklaşa çalışmalarda 5 kg lık karışım için, mikserlere yapılacak şarj oranları hesaplanmış ve 5 ayrı tür için Çizelge 3.1’de verilen karışımlar elde edilmiştir. Karışımlar SMC makinasında, polietilen filmler arasından geçirilerek pestil haline getirilmiştir. Pestiller proses aşamaları için kesilip, SMC son ürünü elde edilmiştir. Bu amaçla kalıp ön deneylerinin, ısıtma ve bekleme gibi parametrelerinin değiştirilmesi ile yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda kalıp sıcaklığı 200°C ve bekleme süresi 4 dakika 30 saniye olarak optimize edilmiştir. Son aşama olarak levhalar basılarak elde edilmiş ve YTÜ Metalurji Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında deney aşaması için hazırlanmak üzere markalanmıştır.

Cam fiber dağılımının incelenmesi için, özellikle karmaşık şekilli parçalarda görülen önemli bir problemde “yetersiz fiber erişimi”dir. Bu durumu saptamak amacı ile kalınlık yönünde etek oluşturacak biçimde kalıp tasarlandığından, anılan bölgelerden elde edilecek numunelerde inceleme yapılma olanağı oluşturulmuştur. Diğer yandan, 4 mm kalınlık ISO, DIN ve benzeri TS ile, ASTM standartlarının fiber takviyeli plastikler için tavsiye ettiği deney kalınlığı olduğundan, tüm numunelerde eşdeğerlik elde edilmiştir.

3.2 Numunelerin Hazırlanması

Plakalar (levhalar) artan cam hacim oranına göre;

%7.86 Hacim oranlar DP1

%11.74 Hacim oranlar DP2

%15.57 Hacim oranlar DP3

%19.36 Hacim oranlar DP4

%23.11 Hacim oranlar DP5 olarak simgelenmiştir.

Her deney grubu için Şekil 3.1’de gösterilen plakalardan üçer adet kullanılmıştır. Plakaların gösterimi örneğin, DP1-2 şeklinde 1. grup deney numunelerinden 2. plaka şeklinde yapılmıştır.

Şekil 3.1’de kalıptan çıkmış parçanın teknik resmi üzerinde deney numunelerinin yerleri gösterilmiştir. Boyuna doğrultuda çekme deneyi numuneleri L, enine doğrultuda çekme

deneyi numuneleri T olarak simgelenmiştir. Fiber ilerlemesinin analizi için eteklerde L_S ve T_S olarak isimlendirilmiştir.

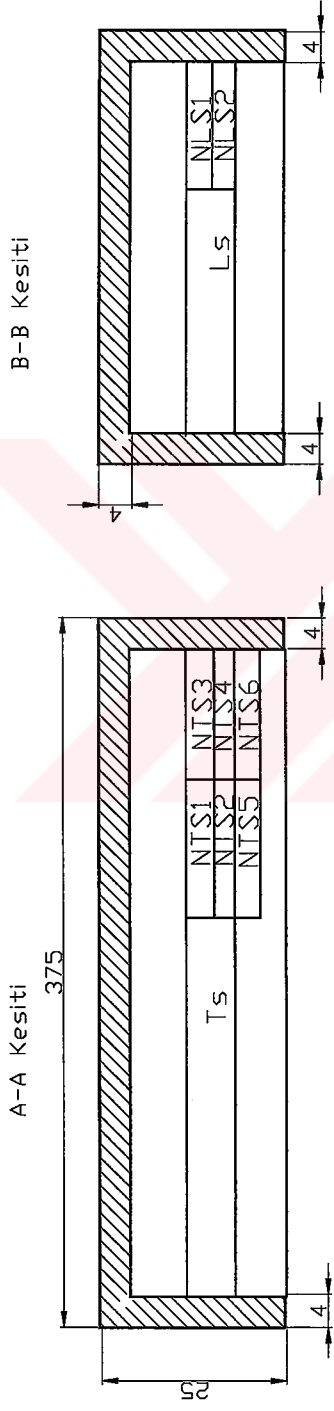
Eğme deneyi ve darbe deneyi numuneleri yüzeyde N ile, eteklerde N_{LS} ve N_{TS} ile isimlendirilmiştir.

Yoğunluk deneyi ve su absorpsiyonu deneyi numuneleri yüzeyde M ile, eteklerde M_S ile isimlendirilmiştir.

Şekil 3.1' de gösterildiği gibi boyuna doğrultudaki etek boyutları 375 x 25 mm, enine doğrultudaki etek boyutları 295 x 25 mm, kalınlık 4mm dir. Boyuna doğrultudaki etek bölgesinden L_S çekme deneyi numunesi, N_{LS} eğme deneyi ve darbe deneyi numuneleri, M_S yoğunluk deneyi ve su absorpsiyonu deneyi numuneleri alınmıştır. Enine doğrultudaki etek bölgesinden T_S çekme deneyi numunesi, N_{TS} eğme deneyi ve darbe deneyi numuneleri, M_S yoğunluk deneyi ve su absorpsiyonu deneyi numuneleri alınmıştır.

Numuneler standartlara göre plakalardan kesilerek çıkarılmıştır. Çekme deneyi numuneleri; TS 3860, ASTM D 638 M-89 ve DIN 53455 standartlarına göre, eğme deneyi numuneleri; TS 4650-2, ASTM D 790-86 ve DIN 53452 standartlarına göre, darbe deneyi numuneleri; ASTM D 256-90b ve DIN 53453 standartlarına göre, su absorpsiyonu deneyi numuneleri; TS 702 ve ASTM D 570-81 standartlarına göre, yoğunluk deneyi numuneleri; ASTM D 792-86 ve DIN 53479 standartlarına göre hazırlanmıştır. Numunelerin kesme işlemleri ERDEMİR-Metalurji Laboratuvarında yapılmıştır. Son işlem olarak 600 No'lu su zımparası ile kesilen kenarlar zımparalanarak, boyut kararlılığı ve numunenin geometrik form düzgünlüğü sağlanmıştır.

Deneylere başlamadan önce tüm numuneler $50 \pm 1^\circ\text{C}$ deki etüvde 1 saat kurutulmuştur. Daha sonra boyutlar ± 0.01 mm hassasiyetindeki digital boyut ölçücü ile ölçülmüştür.



N1.....N12										B																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
M1	M2									M9	M10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		</

3.3 Deneylerin Yapılışı

3.3.1 Yoğunluk Deneyleri

Yoğunluk deneyleri ASTM D 792 ve DIN 53479 standartlarına göre yapılmıştır. Her iki standartta yöntem ve malzeme olarak birbirinin benzeridir. Deney numuneleri; SMC üretim yöntemine göre 4 mm kalınlıkta kalıplanmış levhalardan, kenarları $20 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ uzunlukta ve kare şeklinde kesilerek hazırlanmıştır. 600 No' lu su zımparası ile kesilen kenarlar zımparalanarak kesme yüzeylerinin pürüzsüz olması sağlanmıştır. Plakaların anizotropisi ile ilgili araştırmalar için, SMC hamurunun kalıba yerleştirildiği nokta merkez veya orta nokta, göreceli olarak diğer noktalarda numuneler yüzeyde M ve eteklerde M_s ile simgelenmiştir. Numune boyutları $\pm 0.01 \text{ mm}$ hassasiyetinde digital boyut ölçücü ile, ağırlıkları ise $\pm 0.001 \text{ gr}$ hassasiyetindeki digital terazi ile tartılarak belirlenmiştir.

DP1, DP2, DP3, DP4 ve DP5 olarak simgelendirilen ve her deney grubu için üçer adet kullanılan plakalardan çıkarılan yüzey ve etek numuneleri üzerindeki ölçümler sonucu yoğunluk değerleri (d) gr/cm^3 cinsinden aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$d = \frac{m}{a.b.h} \quad 3.1$$

d : Yoğunluk, gr/cm^3

m : Deney numunesinin ağırlığı, gr

a, b : Deney numunesinin uzunluğu, genişliği, mm

h : Deney numunesinin kalınlığı, mm

Ayrıca DP1, DP2, DP3, DP4 ve DP5 deney grupları için ayrı ayrı teorik yoğunluk (d_t) değerleri aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$d_t = \eta_o \cdot \eta_L \cdot \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m + \rho_p \cdot V_p + \rho_d \cdot V_d \quad 3.2$$

d_t : Teorik yoğunluk, gr/cm^3

η_o : Fiberin dizilimdeki yön faktörü ($\eta_o = 3/8$)

η_L : Fiberin boy faktörü ($\eta_L = 0.99$, 10 mm fiber boyundan sonra)

ρ_f : Fiberin (E-camı) özgül ağırlığı, ($\rho_f = 2.56 \text{ gr/cm}^3$)

V_f : Fiberin (E-camı) hacim oranı, %

ρ_m : Matrisin (polyester) özgül ağırlığı, ($\rho_m = 1.18 \text{ gr/cm}^3$)

V_m : Matrisin (polyester) hacim oranı, %

ρ_p : Dolgu maddesinin (kalsit) özgül ağırlığı, ($\rho_p = 2.95 \text{ gr/cm}^3$)

V_p : Dolgu maddesinin (kalsit) hacim oranı, %

ρ_d : Diğer katkıların özgül ağırlığı, ($\rho_d = 1.18 \text{ gr/cm}^3$)

V_d : Diğer katkıların hacim oranı

Diğer katkıları termoplastikler gibi polyester türü yani plastik yapıları malzemeler olduğu için özgül ağırlığı olarak polyesterin özgül ağırlığı kabul edilmiştir ve varsayıma dayalı olarak teorik yoğunluk değerleri

DP1 için $d_{t1} = 1.89 \text{ gr/cm}^3$

DP2 için $d_{t2} = 1.81 \text{ gr/cm}^3$

DP3 için $d_{t3} = 1.74 \text{ gr/cm}^3$

DP4 için $d_{t4} = 1.67 \text{ gr/cm}^3$

DP5 için $d_{t5} = 1.60 \text{ gr/cm}^3$ bulunmuştur.

3.3.2 Darbe Deneyleri

YTÜ Metalurji Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında kullanılan Zwick marka, maksimum kapasitesi 50 J olan darbe cihazı deneyler için kullanılmıştır. Darbe deneyi cihazı Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.2 Araştırmada kullanılan darbe deneyi cihazı.

Darbe deneyi ASTM D 256-90b ve DIN 53453 standartlarına göre yapılmıştır. Bu standartlardaki test metodu cam takviyeli plastik malzemelerin ani darbelere karşı gösterdiği dayanımı ölçmek amacıyla yapılmaktadır.

Deney numuneleri, 4 mm kalınlığındaki plakalardan 80 x 10 mm boyutlarında ve dikdörtgen şeklinde kesilerek çıkartılmıştır. Daha sonra kesilen yüzeyler 600 No' lu su zımparası ile zımparalanarak kesme yüzeylerinin düzgünlüğü sağlanmıştır. Numuneler yüzeyde N, etekte N_{LS} ve N_{TS} ile simgelenmiştir. Numuneler $50 \pm 1^\circ\text{C}$ deki etüvde 1 saat kurutulduktan sonra boyutları ± 0.01 mm hassasiyetindeki digital boyut ölçücü ile ölçülmüştür.

Darbe deneyinde numune, cihaza iki ucu sabitlenmiş biçimde yatay olarak yerleştirilerek cihazın sarkaç çekicinin çarptırılması yoluyla tam ortasından kırılmaya zorlanmıştır. Cihazın

göstergesinden kırma enerjisi okunarak darbe dayanımı değerleri (a_{ou}) kJ/m^2 cinsinden aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$a_{ou} = \frac{W}{A} \quad 3.3$$

a_{ou} : Darbe dayanımı, kJ/m^2

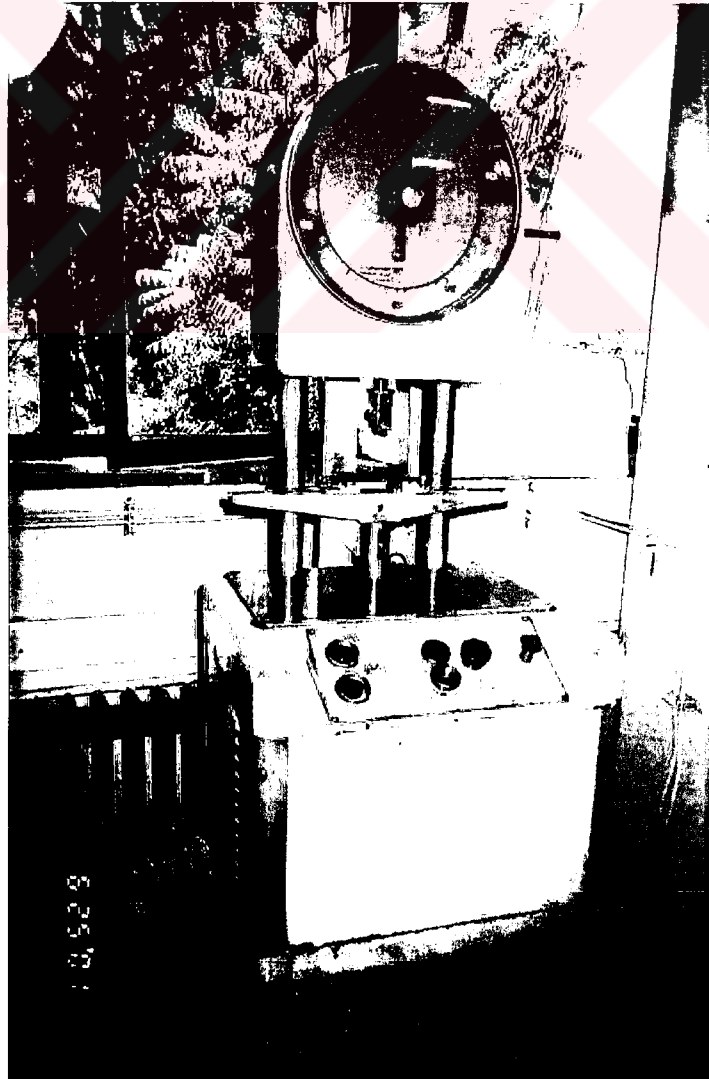
W: Kırma enerjisi, J

A: Kesit alan ($A = b \times h$), m^2

b, h: Numunenin genişliği, kalınlığı, mm

3.3.3 Eğme Deneyleri

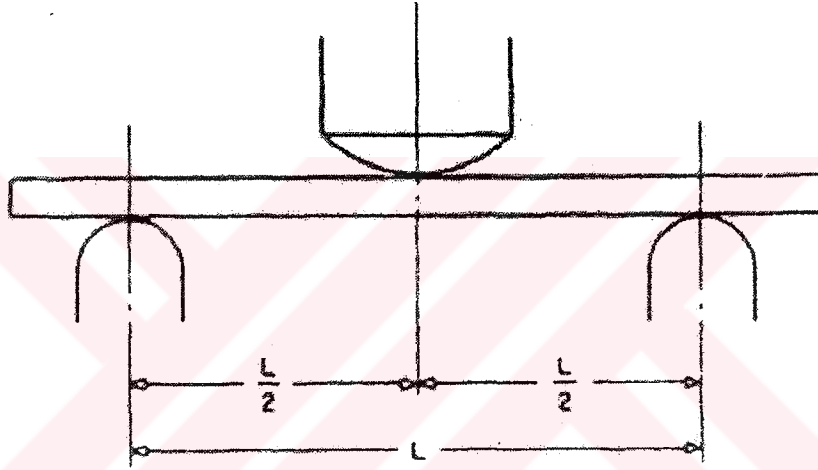
YTÜ Metalurji Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında kullanılan markası AVK BUDAPEST (MADE IN HUNGARY) olan MH-1 tipinde, maksimum kapasitesi 50 kgf olan eğme cihazı deneyler için kullanılmıştır. Eğme deneyi cihazı Şekil 3.3’de görülmektedir.



Şekil 3.3 Araştırmada kullanılan eğme deneyi cihazı.

Eğme deneyi TS 4650-2 / ISO 3597-2, ASTM D 790-86 ve DIN 53452 standartlarına göre yapılmıştır. Deney numuneleri, 4 mm kalınlığında kalıplanmış plakalardan 80 x 10 mm boyutlarında ve dikdörtgen şeklinde kesilerek çıkartılmıştır. Daha sonra kesilen kenarlar 600 No' lu su zımparası ile zımparalanarak düzgünlüğü sağlanmıştır. Numuneler yüzeyde N, etekte N_{LS} ve N_{TS} ile isimlendirilmiştir. Numuneler $50 \pm 1^\circ\text{C}$ deki etüvde 1 saat kurutulduktan sonra boyutları ± 0.01 mm hassasiyetindeki digital boyut ölçücü ile ölçülmüştür.

Eğme deneyinde numune, 60 mm açıklığındaki destekler arasına yatay olarak yerleştirilerek 4 mm/dak yükleme hızıyla giderek artan yüke maruz bırakılmış ve Şekil 3.4'de görüldüğü gibi 3 noktalı yükleme şeklinde eğmeye zorlanmıştır.



Şekil 3.4 Yükleme uygulayıcısı ve destek diyagramı (3 noktalı yükleme).

Cihazın göstergesinden maksimum yük değeri okunarak eğme dayanımı (σ_f) MPa cinsinden aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$\sigma_f = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{\max} \cdot L}{b \cdot h^2} \quad 3.4$$

$F_{\max}$: Max. yük, kgf (= 9.81 N)

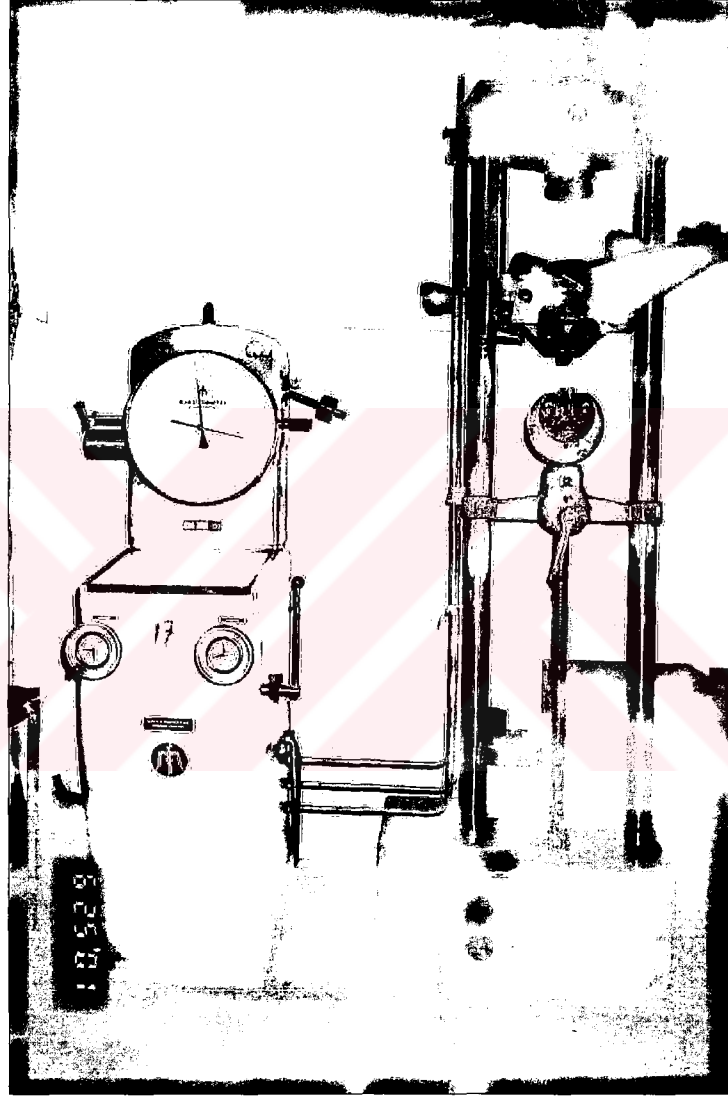
L: Mesnetler arası uzaklık, mm (L = 60 mm)

b: Deney numunesinin genişliği, mm

h: Deney numunesinin kalınlığı, mm

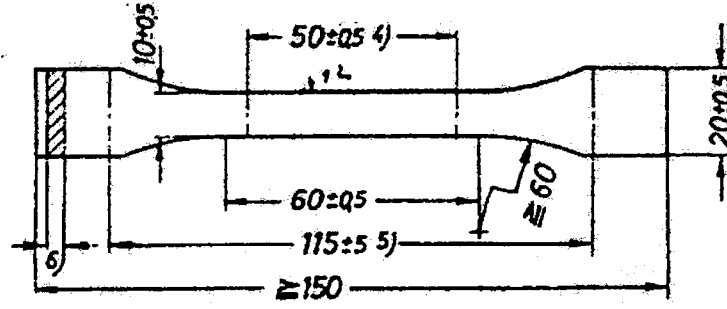
3.3.4 Çekme Deneyleri

YTÜ Metalurji Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında kullanılan markası MOHR & FEDERHAFF AG (MANNHEIM-GERMANY), maksimum kapasitesi 10 000 kgf olan ve skalası 500 kgf-10 000 kgf arasında ayarlanabilen çekme deneyi cihazı deneyler için kullanılmıştır. Çekme deneyi cihazı Şekil 3.5’de görülmektedir.



Şekil 3.5 Araştırmada kullanılan çekme deneyi cihazı.

Çekme deneyi TS 3860, ASTM D 638M-89 ve DIN 53455 standartlarına göre yapılmıştır. Bu standartlar, cam lifle kuvvetlendirilmiş plastiklerin belirli çekme özelliklerinin tayininde uygulanmaktadır. Çekme deneyi numuneleri DIN 53455 standardına göre Şekil 3.6’da görüldüğü biçimde hazırlanmıştır. Daha sonra kesilen yüzeyler 600 No’ lu su zımparası ile zımparalanarak düzgünlüğü sağlanmıştır.



Şekil 3.6 Çekme deneyi numunesi, 4) ölçü uzunluğu, 5) çeneler arasındaki mesafe, 6) deney numunesinin kalınlığı = 4 mm.

Cam fiberle kuvvetlendirilmiş plastikler genellikle anizotropik (fiziksel özellikleri her ölçüm yönünde farklı) özellik gösterirler. Bundan dolayı deney parçalarının en az iki yönüne veya daha önceden belirtilmiş yönler (örneğin levhanın boyuna veya enine) uygun olarak kesilmesi istenir.

Çekme deneyi numuneleri, yüzeyde boyuna doğrultuda L, enine doğrultuda T ile simgelenmiştir. Fiber ilerlemesinin analizi için eteklerde L_S ve T_S olarak isimlendirilmiştir. Çekme deneyi numuneleri de 50 ± 1°C deki etüvde 1 saat kurutulduktan sonra boyutları ± 0.01 mm hassasiyetindeki digital boyut ölçücü ile ölçülmüştür.

Standartlara göre, deney hızı uzamanın ölçüldüğü ve gerilmeye elastiklik modülünün tayin edildiği deneyler (nitelendirme deneyleri) için dakikada 2 mm, rutin kalite kontrol deneyleri için dakikada 5 mm'dir.

Çekme deneyinde, max. yük kapasitesi 500 kgf'e ayarlanmış olan cihazın çeneleri arasına yerleştirilen numune sabit çekme hızıyla giderek artan yüklemeye maruz bırakılarak kopuncaya kadar çekmeye zorlanmıştır. Kopma sonunda cihazın göstergesinden maksimum yük değeri okunarak çekme dayanımı ($\sigma_{\max}$) kgf/cm² (= 0.1 MPa) cinsinden aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır.

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

3.5

F_{max}: Maksimum çekme kuvveti, kgf (= 9.81 N)

b: Deney parçasının başlangıçtaki ortalama genişliği, cm

h: Deney parçasının başlangıçtaki ortalama kalınlığı, cm

3.3.5 Su Absorbsiyonu Deneyi

ZKÜ Kimya Bölümü Laboratuvarında bulunan ve aşağıda ayrıntıları belirtilen cihazlar kullanılmıştır.

- Terazı (0.001 gr hassasiyetinde digital terazı)
- Etüv (sıcaklığı $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ da tutabilen)
- Su banyosu (damıtık sulu ve sıcaklığı $23 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ da tutabilen)
- Desikatör (etüvden çıkarılan numuneleri soğutma amacıyla kullanılmıştır)

Deney numuneleri; SMC üretim yöntemine göre 4 mm kalınlıkta kalıplanmış levhalardan, kenarları 10 ± 1 mm uzunlukta ve kare şeklinde kesilerek hazırlanmıştır. 600 No' lu su zımparası ile kesilen kenarlar zımparalanarak kesme yüzeylerinin pürüzsüz olması sağlanmıştır.

Su absorbsiyonu deneyi TS 702 ve ASTM D 570 standartlarına göre yapılmıştır. Her iki standartta yöntem ve malzeme olarak birbirinin benzeridir. Yüzeyde M ve etekte M_s ile simgelenen numunelerden her bir bileşim için dört adet deney numunesi alınmıştır. Dört adet deney numunesi, $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ da tutulan etüvde, 24 ± 1 saat bekletilerek kurutulmuş ve desikatörde soğutulduktan sonra, 0.001 gr hassasiyetindeki digital terazı ile her birisinin ayrı ayrı m_1 ağırlığı tartılmıştır. Numuneler tartım işleminden sonra $23 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ da tutulan ve içerisinde damıtık su bulunan banyoya daldırılmıştır. 24 ± 1 saatlik daldırma süresinden sonra banyodan çıkarılan numunelerin yüzeylerindeki su bir bez parçası ile kurulandıktan sonra digital terazı de numunelerin her birisinin ayrı ayrı m_2 ağırlığı tartılmıştır.

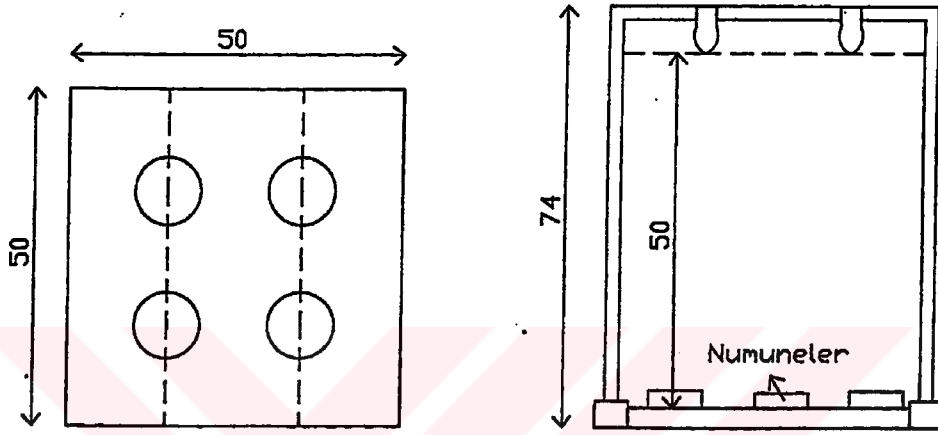
Su absorbsiyonu = $m_2 - m_1$ olup, gram olarak gösterilmiştir. Analizi yapılan maddenin su absorbsiyon değeri, deneyi yapılan numunelerden elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması olarak verilmiştir.

Numunede suda çözünebilen madde miktarını tespit edebilmek için deney numuneleri tekrar $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ da etüvde 24 ± 1 saat kurutulup desikatörde soğutulduktan sonra, tekrar digital terazide her bir numunenin m_3 ağırlığı tartılmıştır.

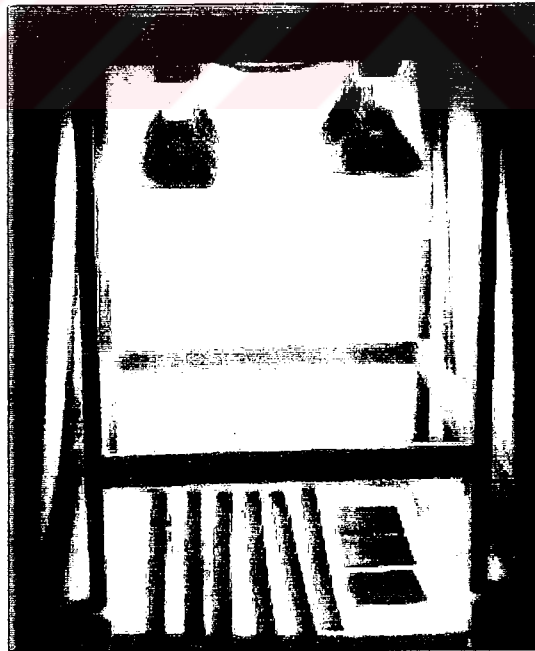
Çözünen madde miktarı = $m_3 - m_1$ olup, gram olarak gösterilmiştir ve deneyi yapılan numunelerden elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması olarak verilmiştir.

3.3.6 Ultraviyole (UV) Deneyi

YTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan DIN 50010 standartlarına uygun olarak hazırlanmış olan ultraviyole deney düzeneği kullanılmıştır. Planı ve kesiti Şekil 3.7’de verilen deney düzeneğinde 4 adet ultraviyole lambası kullanılmıştır. Lambaların taşıyıcı sistemi 50x50x74 cm boyutundadır. Ultraviyole lambaları 300 watt gücündedir. DIN 50010 standartlarına göre ultraviyole lambaları numune yüzünden 50 cm yukarıya konulmuştur. Ultraviyole deney düzeneği Şekil 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3.7 Ultraviyole deney düzeneğinin planı ve kesiti.



Şekil 3.8 Araştırmada kullanılan ultraviyole deney düzeneği.

UV deneyi ile kontrollü ultraviyole etkisinde kalan SMC kompozit malzemesinin, belli bir süre sonunda çekme, eğme, darbe dayanımları ve renk değişimleri incelenmiştir.

Ultraviyole çalışmasında, polimer malzemesi için hasar etkeni sayılan güneş radyasyonu hasar etkeni laboratuvar ortamında sağlanmıştır. Dalga boyu büyük olan güneş ışınları, taşıdıkları enerji nedeniyle malzeme bünyesinde ısınmaya neden olmaktadır. Dalga boyu küçük olan ışınlar ise polimer malzeme üzerinde yapısal değişiklikler meydana getirmektedirler. Bu deneyde olayların mekanizması değil sonuçları incelenmiştir.

Ultraviyole deney düzeneğine 175, 350 ve 700 saat sonunda çekme, eğme ve darbe deneyleri yapılmak üzere üçer adet çekme, eğme ve darbe deneyi numuneleri yerleştirilmiştir. Numuneler günde ortalama 8 saat ve toplamda 700 saat ultraviyole etkisinde kalmıştır. Ultraviyole etkisi tekrarlı uygulanmış, lambalar akşamları kapatılmış ve sabahları tekrar yakılmıştır. Ayrıca ultraviyole etkisindeki numunelerin, lambaların sabah açılış ve akşam kapanış saatlerinde, sıcaklıkları 0.1°C hassasiyetli digital termometre ile ölçülmüştür (Şekil 3.9). Deney sonunda sıcaklıkların ortalama değerleri sabahları lambaların açılış saatinde 21.3°C ve akşamları kapanış saatlerinde ortalama 52.0°C olmuştur. Deney çalışmasında ayrıca ortamın nemi de ölçülmüştür. Deney sonunda ortamın ortalama nemi 65 olmuştur.

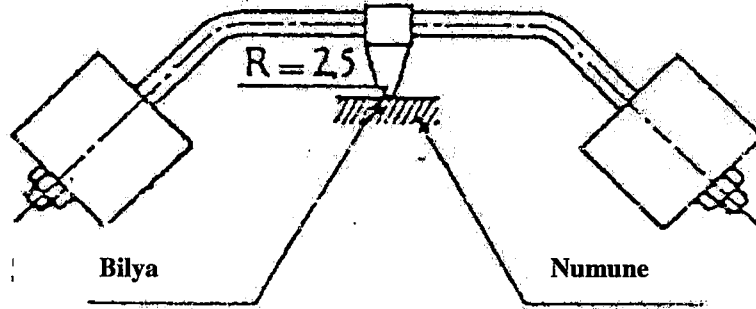
175 saat, 350 saat ve 700 saat sonunda numuneler cihazdan alınıp çekme, eğme ve darbe deneyleri yapılmış ve dayanım değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 3.9 Numune sıcaklığının ölçülmesi.

3.3.7 Bilya-Basınç Deneyi

YTÜ Metalurji Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında mevcut Şekil 3.10'da gösterilen bilya-basınç deneyi cihazı kullanılmıştır.

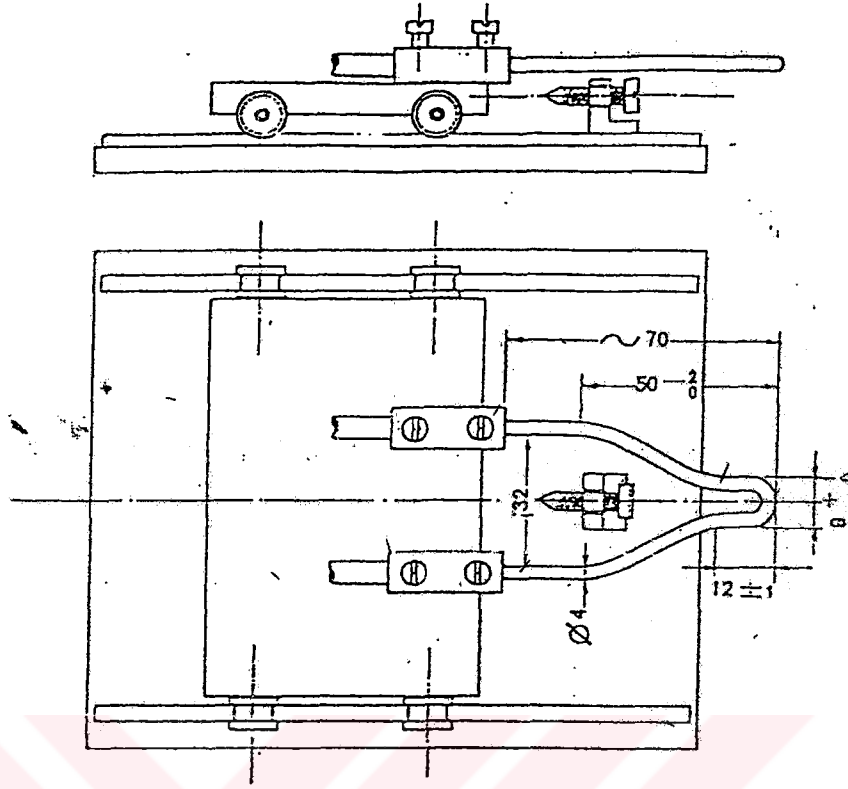


Şekil 3.10 Araştırmada kullanılan bilya-basınç deneyi cihazı (bilya yarıçapı $R = 2.5$ mm).

Bilya-basınç deneyi HN-S-15 (ELECTRICITE DE FRANCE / CENTRE DE NORMALISATION) standardına göre yapılmıştır. Plakalardan çıkarılmış olan 30x30x4.5 mm boyutundaki numuneler $125 \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıkta bir etüvde, üzerine çelikten yapılmış 5 mm çapında bir bilya ile 20 N'luk bir yükü bastırılarak 1 saat beklenmiştir. 5 dakika sonra oluşan iz çapları 0.01 mm hassasiyetinde ölçme mikroskobu kullanılarak ölçülmüştür.

3.3.8 Alev Deneyi

YTÜ Metalurji Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan Şekil 3.11'de gösterilen alev deneyi cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.11 Araştırmada kullanılan alev deneyi cihazı.

Alev deneyi HN-S-15 (ELECTRICITE DE FRANCE / CENTRE DE NORMALISATION) standardına göre yapılmıştır. Numuneler, plakalardan 30x30x4.5 mm boyutunda kesilerek çıkartılmıştır. 960°C'ye elektrik direnci ile ısıtılmış 4 mm çapında ve ucu 8 mm'ye bükülmüş yatay konumda bulunan tel, bu sıcaklıkta kendisi dikey konumda bulunan numuneye 30 saniye süre ile 2 N'luk bir kuvvetle değdirilmiştir. Deney sonunda telin battığı malzeme 90° kesilerek, 0.01 mm hassasiyetinde digital kumpasla ölçüm sonucu kalınlık farkından iz derinlikleri bulunmuştur.

3.3.9 Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) ile Kırık Yüzey Analizi

YTÜ Metalurji Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında kullanılan JEOL JSM-5410 LV Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) ile darbe deneyi yapılmış numunelerin kırık yüzeylerine bakılarak görüntüleri alınmıştır.

3.3.10 Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) ile Mikroyapısal Muayene

Fiberlerin dağılımı, yönlenmesi ve hacim oranları incelenmiştir. Erdemir AR-GE laboratuvarında kullanılan Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) ile levhanın merkez, kenar ve etek bölgelerinden alınan numunelerin yüzeylerine alından bakılarak mikroyapısal görüntüleri alınmıştır.

L_8 (merkez), L_1 (kenar) ve L_s (etek) ile simgelendirilmiş olan boyuna doğrultudaki çekme numunelerinin ortalarından alınan 10x20 mm boyutlarında 4 mm kalınlığındaki numunelerin yüzeyleri 600 numaralı zımpara ile yüzeyden 1 mm derinlikte yüzeye paralel zımparalandıktan sonra numunelerin yüzeylerine altın kaplama yapılmıştır. Daha sonra elektron mikroskobuna yerleştirilen numunelerin mikroyapısal görüntüleri tespit edilmiştir.

Mikroyapısal görüntüler üzerinde;

- 1) Fiberler arası ortalama mesafe (λ_{ort}),
- 2) Yatay eksen ile fiberler arasındaki ortalama açı (θ_{ort}),
- 3) Fiber hacim oranı ($\%V_f$)

Metalografik yöntemle hesaplanarak belirlenmiştir. Bu yöntemde, önce asetat kağıdına eşit ağırlıklı düşey ve yatay çizgiler çizilerek fotoğraf üzerine çakıştırılmış ve mikroyapıdaki fiberlerin düşey ve yatay çizgileri kestiği noktaların sayısı belirlenmiştir. Ayrıca asetat kağıdına çizilen karelerin köşelerinin fiberleri kestiği noktaların sayısı belirlenmiştir. Aşağıda belirtilen formüllerden fiberlere ait λ_{ort} , θ_{ort} ve $\%V_f$ hesaplanmıştır.

$$\lambda_d = \frac{L_d}{a} \quad 3.6$$

λ_d : Fiberler arası düşey mesafe (μm)

L_d : Düşey çizgilerin toplam uzunluğu (μm)

a: Fiberlerin düşey çizgileri kestiği nokta sayısı

$$\lambda_y = \frac{L_y}{b} \quad 3.7$$

λ_y : Fiberler arası yatay mesafe (μm)

L_y : Yatay çizgilerin toplam uzunluğu (μm)

b: Fiberlerin yatay çizgileri kestiği nokta sayısı

Fiberler arası ortalama mesafe:

$$\lambda_{\text{ort}} = \frac{\lambda_d + \lambda_y}{2} \quad 3.8$$

Fiberlerin yatay eksenle yaptığı ortalama açısı:

$$\text{tg}\theta_{\text{ort}} = \frac{\lambda_d}{\lambda_y} \quad 3.9$$

% Fiber hacim oranı:

$$\%V_f = \frac{c}{y \cdot x} \cdot 100 \quad 3.10$$

c: Fiberlerin karelerin köşelerini kestiği nokta sayısı

y: Fotoğraf içindeki düşey çizgilerin sayısı

x: Fotoğraf içindeki yatay çizgilerin sayısı

4 DENEYSEL SONUÇLAR

4.1 Yoğunluk Değerleri

DP1 (%7.86 E-camı), DP2 (%11.74 E-camı), DP3 (%15.57 E-camı), DP4 (%19.36 E-camı) ve DP5 (%23.11 E-camı) grubu deney numuneleri için yapılan yoğunluk deneyi sonuçları Çizelge 4.1, Çizelge 4.2, Çizelge 4.3, Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Bu değerler grafik olarak sırası ile yoğunluğun cam fiber hacim oranları ile değişimi Şekil 4.1'de, yoğunluğun merkezden kenara doğru değişimi Şekil 4.2'de gösterilmiştir. DP1, DP2, DP3, DP4 ve DP5 grubu deney numunelerinin plakanın merkez ve etek bölgeleri için ayrı ayrı hesaplanan yoğunluk değerleri her bir grup için hesaplanan teorik yoğunluk değerleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi cam fiberin hacim oranı (%V) artışı ile tüm deney grupları için yoğunluk değerlerinin merkezde $1.8228 \text{ gr/cm}^3 - 1.6580 \text{ gr/cm}^3$ arasında, etekte $1.7553 \text{ gr/cm}^3 - 1.5920 \text{ gr/cm}^3$ arasında azaldığı gözlenmiştir. Her bir deney grubu için hesaplanan teorik yoğunluk değerlerinin de $1.89 \text{ gr/cm}^3 - 1.60 \text{ gr/cm}^3$ arasında değiştiği tespit edilmiştir. Şekil 4.2'de bütün deney grupları için yoğunluğun plakanın merkezindeki numunelerde fazla olduğu ($1.8064 \text{ gr/cm}^3 - 1.6580 \text{ gr/cm}^3$) kenara doğru gittikçe yoğunluğun azaldığı ($1.7553 \text{ gr/cm}^3 - 1.6009 \text{ gr/cm}^3$) görülmektedir.

Çizelge 4.1 DP1-1, DP1-2, DP1-3 plakalar için yoğunluk deneyi sonuçları (merkez ve kenar).

Yüzey Numune No			Boyutlar (mm)			Ağırlık m (gr)	Yoğunluk d (gr/cm ³)	Standart Sapma
			a	b	h			
DP1-1	M ₁	Kenar	16.56	16.64	3.68	1.7658	1.7413	(0.0207)
	M ₂		16.52	16.60	3.88	1.8836	1.7702	
	M ₃		17.04	17.16	4.06	2.0772	1.7497	
	M ₄		15.70	16.54	3.70	1.7178	1.7878	
	M ₉	Merkez	16.52	16.56	3.78	1.8796	1.8176	(0.0185)
	M ₁₀		16.90	17.13	3.95	2.0844	1.8228	
DP1-2	M ₁	Kenar	16.15	16.16	3.97	1.7868	1.7245	(0.0207)
	M ₂		16.55	16.65	3.51	1.6967	1.7542	
	M ₃		16.59	16.61	3.69	1.7544	1.7253	
	M ₄		16.46	16.65	3.75	1.7960	1.7475	
	M ₆		16.52	16.66	3.93	1.8984	1.7552	
	M ₉	Merkez	16.61	16.65	3.45	1.7068	1.7888	(0.0185)
	M ₁₀		16.56	16.63	4.02	2.0479	1.8498	
DP1-3	M ₂	Kenar	18.07	18.12	3.43	2.0122	1.7916	(0.0207)
	M ₃		18.06	18.12	3.50	2.0105	1.7553	
	M ₆		17.83	18.25	3.61	2.0682	1.7607	
	M ₉	Merkez	17.79	18.28	3.65	2.1382	1.8013	(0.0185)
	M ₁₀		18.10	18.11	3.37	1.9955	1.8064	
	M ₁₁		18.13	18.15	3.53	2.0964	1.8047	
	M ₁₂		17.97	18.35	4.19	2.4945	1.8055	

Parantez içindekiler kenar ve merkezdeki yoğunluk değerleri için standart sapmadır.

Standart sapma $S = \sqrt{\frac{\sum d^2 - \frac{(\sum d)^2}{n}}{n-1}}$ formülü ile hesaplanmıştır.

Çizelge 4.2 DP2-1, DP2-2, DP2-3 plakalar için yoğunluk deneyi sonuçları (merkez ve kenar).

Yüzey Numune No			Boyutlar (mm)			Ağırlık m (gr)	Yoğunluk d (gr/cm ³)	Standart Sapma
			a	b	h			
DP2-1	M ₇	Kenar	17.68	17.78	3.37	1.8648	1.7603	(0.0218)
	M ₉	Merkez	17.60	17.65	3.34	1.8686	1.8009	(0.0144)
	M ₁₀		17.64	17.65	3.33	1.8824	1.8156	
	M ₁₁		17.77	17.78	3.27	1.8487	1.7893	
	M ₁₂		17.66	17.69	3.33	1.8886	1.8154	
	M ₁₃		17.69	17.69	3.34	1.8751	1.7939	
DP2-2	M ₁	Kenar	15.13	15.39	3.96	1.5810	1.7145	(0.0218)
	M ₂		17.74	18.09	3.63	2.0110	1.7263	
	M ₃		16.62	17.22	3.34	1.6950	1.7732	
	M ₄		17.04	17.10	4.32	2.1744	1.7274	
	M ₅		17.05	17.05	3.72	1.9041	1.7607	
	M ₆		17.06	17.19	3.76	1.9420	1.7612	
	M ₉	Merkez	15.04	15.07	3.35	1.3654	1.7982	(0.0144)
	M ₁₀		19.00	20.03	3.41	2.3534	1.8134	
	M ₁₁		17.05	17.07	3.60	1.8565	1.7718	
	M ₁₂		15.03	15.05	3.42	1.3926	1.8001	
	M ₁₃		17.00	17.14	4.21	2.1797	1.7769	
	M ₁₄		14.99	15.17	3.44	1.4158	1.8099	
	M ₁₅		18.07	18.12	3.43	2.0122	1.7916	
	M ₁₆		15.07	15.08	3.48	1.4221	1.7982	
DP2-3	M ₁	Kenar	17.74	18.09	3.63	1.9832	1.7025	(0.0218)
	M ₂		17.02	20.77	3.47	2.1176	1.7263	
	M ₃		17.23	17.37	3.69	1.9140	1.7331	
	M ₄		17.10	17.30	3.46	1.7960	1.7546	
	M ₅		17.16	17.20	3.58	1.8355	1.7371	
	M ₉	Merkez	17.21	17.23	3.59	1.8995	1.7843	(0.0144)
	M ₁₀		17.10	17.23	3.58	1.9038	1.8049	
	M ₁₂		17.13	17.28	3.41	1.8340	1.8169	
	M ₁₄		17.12	17.23	3.44	1.8486	1.8217	

Parantez içindekiler kenar ve merkezdeki yoğunluk değerleri için standart sapmadır.

Çizelge 4.3 DP3-1, DP3-2, DP3-3 plakalar için yoğunluk deneyi sonuçları (merkez ve kenar).

Yüzey No	Numune		Boyutlar (mm)			Ağırlık m (gr)	Yoğunluk d (gr/cm ³)	Standart Sapma
			a	b	h			
DP3-1	M ₁	Kenar	17.10	17.18	3.04	1.5018	1.6815	(0.0222)
	M ₂		17.16	17.27	2.98	1.5079	1.7074	
	M ₃		17.05	17.23	3.07	1.5293	1.6956	
	M ₄		16.78	17.17	3.23	1.5894	1.7079	
	M ₅		17.13	17.17	3.22	1.5999	1.6893	
	M ₆		17.14	17.26	3.05	1.5510	1.7189	
	M ₇		16.28	19.93	3.04	1.6570	1.6799	
	M ₈		17.14	17.33	3.23	1.6219	1.6904	
	M ₉	Merkez	16.18	21.92	3.07	1.9125	1.7564	(0.0177)
	M ₁₀		17.05	17.07	3.00	1.5450	1.7694	
	M ₁₁		17.15	17.16	3.18	1.6190	1.7299	
	M ₁₂		17.15	17.15	2.99	1.5245	1.7335	
	M ₁₃		17.09	17.16	3.16	1.6058	1.7327	
	M ₁₄		17.10	17.15	3.20	1.6570	1.7656	
	M ₁₅		16.91	16.98	3.20	1.6189	1.7620	
	M ₁₆		16.96	17.11	3.32	1.7297	1.7953	
DP3-2	M ₁	Kenar	18.14	18.20	3.05	1.6730	1.6614	(0.0222)
	M ₂		17.70	18.27	3.27	1.8112	1.7128	
	M ₃		18.18	18.22	3.34	1.8709	1.6910	
	M ₄		18.13	18.18	3.31	1.8789	1.7222	
	M ₅		18.14	18.17	3.30	1.8416	1.6931	
	M ₆		18.04	18.17	3.26	1.8442	1.7258	
	M ₉	Merkez	18.16	18.16	3.02	1.7240	1.7310	(0.0177)
	M ₁₀		18.06	18.21	3.03	1.7472	1.7533	
	M ₁₁		18.21	18.24	3.29	1.8938	1.7330	
	M ₁₂		18.10	18.15	3.04	1.7350	1.7372	
	M ₁₃		18.12	18.20	3.06	1.7517	1.7358	
	M ₁₄		18.12	18.20	3.08	1.7652	1.7378	
DP3-3	M ₁	Kenar	17.20	17.20	3.62	1.7902	1.6716	(0.0222)
	M ₂		18.14	18.23	3.96	2.2554	1.7222	
	M ₃		16.87	17.07	3.59	1.7719	1.7139	
	M ₄		17.05	17.16	3.62	1.8368	1.7342	
	M ₆		17.15	17.16	3.62	1.8483	1.7349	
	M ₈		18.07	18.11	3.83	2.1800	1.7393	
	M ₉		18.14	18.25	3.91	2.2666	1.7510	
	M ₁₀	Merkez	17.06	17.15	3.59	1.8635	1.7741	(0.0177)
	M ₁₁		17.06	17.07	3.90	1.9922	1.7541	
	M ₁₂		17.07	17.19	3.56	1.8419	1.7632	
	M ₁₃		18.07	18.19	3.86	2.2314	1.7587	
	M ₁₄		18.12	18.20	3.88	2.2546	1.7620	

Parantez içindekiler kenar ve merkezdeki yoğunluk değerleri için standart sapmadır.

Çizelge 4.4 DP4-1, DP4-2, DP4-3 plakalar için yoğunluk deneyi sonuçları (merkez ve kenar).

Yüzey Numune No			Boyutlar (mm)			Ağırlık m (gr)	Yoğunluk d (gr/cm ³)	Standart Sapma
			a	b	h			
DP4-1	M ₁	Kenar	17.15	17.21	3.27	1.5778	1.6347	(0.0103)
	M ₂		17.12	17.23	4.34	2.1203	1.6563	
	M ₃		17.10	17.20	3.24	1.5599	1.6369	
	M ₉	Merkez	17.11	17.22	3.19	1.5835	1.6847	(0.0133)
	M ₁₀		17.12	17.16	3.17	1.5914	1.7088	
	M ₁₁		16.91	17.08	3.42	1.6693	1.6899	
	M ₁₂		17.20	17.22	3.43	1.7485	1.7211	
	M ₁₄		17.03	17.10	3.42	1.7174	1.7243	
DP4-2	M ₆	Kenar	17.57	17.70	3.51	1.8086	1.6569	(0.0103)
	M ₉	Merkez	17.12	17.15	3.32	1.6393	1.6817	(0.0133)
	M ₁₀		17.54	17.60	3.52	1.8450	1.6978	
DP4-3	M ₁	Kenar	17.67	17.73	3.36	1.7430	1.6559	(0.0103)
	M ₃		17.66	17.68	3.20	1.6538	1.6552	
	M ₉		14.98	21.95	3.24	1.8123	1.7011	
	M ₁₀	Merkez	17.66	17.74	3.27	1.7533	1.7114	(0.0133)
	M ₁₂		17.02	17.06	3.60	1.7820	1.7047	
	M ₁₃		17.66	17.67	3.12	1.6491	1.6938	
	M ₁₄		17.17	17.20	3.34	1.6840	1.7072	

Parantez içindekiler kenar ve merkezdeki yoğunluk değerleri için standart sapmadır.

Çizelge 4.5 DP5-1, DP5-2, DP5-3 plakalar için yoğunluk deneyi sonuçları (merkez ve kenar).

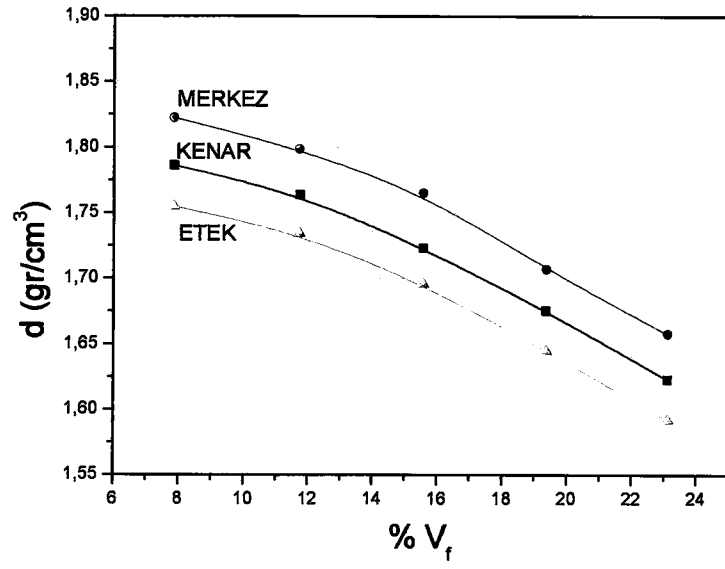
Yüzey Numune No			Boyutlar (mm)			Ağırlık m (gr)	Yoğunluk d (gr/cm ³)	Standart Sapma
			a	B	h			
DP5-1	M ₁	Kenar	16.86	16.93	4.05	1.8503	1.6006	(0.0044)
	M ₂		16.55	16.94	3.70	1.6640	1.6041	
	M ₉	Merkez	16.96	16.96	3.63	1.7236	1.6508	(0.0073)
	M ₁₀		17.20	17.43	3.81	1.8854	1.6507	
	M ₁₁		16.29	17.00	3.89	1.7779	1.6504	
DP5-2	M ₂	Kenar	17.48	17.50	3.90	1.9202	1.6096	(0.0044)
	M ₉	Merkez	17.52	17.53	3.73	1.8928	1.6523	(0.0073)
	M ₁₀		17.50	17.52	3.58	1.8243	1.6621	
	M ₁₂		17.42	17.52	3.66	1.8652	1.6698	
	M ₁₄		17.49	17.50	3.70	1.8814	1.6614	
DP5-3	M ₃	Kenar	17.64	17.78	3.91	1.9633	1.6009	(0.0044)
	M ₄		14.47	17.80	3.86	1.5957	1.6050	
	M ₉	Merkez	17.40	17.45	3.94	1.9767	1.6523	(0.0073)
	M ₁₀		17.38	17.40	3.97	1.9906	1.6580	
	M ₁₁		17.53	17.55	3.84	1.9529	1.6530	
	M ₁₂		17.37	17.39	4.00	2.0117	1.6649	
	M ₁₃		17.42	17.60	4.52	2.2944	1.6557	
	M ₁₄		17.45	17.58	3.81	1.9510	1.6692	

Parantez içindekiler kenar ve merkezdeki yoğunluk değerleri için standart sapmadır.

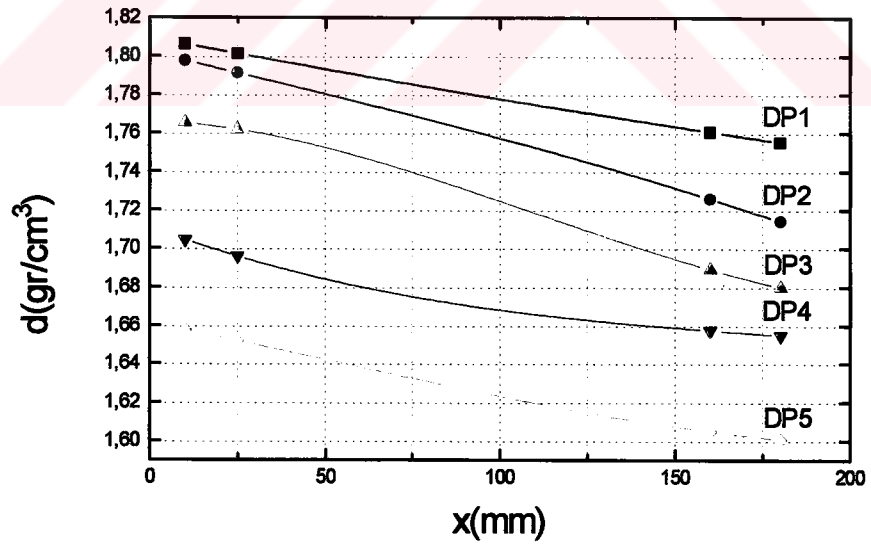
Çizelge 4.6 DP1, DP2, DP3, DP4, DP5 için yoğunluk deneyi sonuçları (etek).

Etek Numune No		Boyutları (mm)			Ağırlık m (gr)	Yoğunluk d (gr/cm ³)	Standart Sapma
		a	b	h			
DP1-2	M_{s_7}	9.90	10.22	4.13	0.7610	1.8211	(0.0359)
	M_{s_8}	9.06	10.32	4.12	0.7067	1.8345	
	$M_{s_{10}}$	9.85	10.42	4.16	0.7626	1.7860	
	$M_{s_{11}}$	8.93	10.21	4.18	0.6689	1.7553	
DP2-2	M_{s_4}	9.85	10.42	4.16	0.7626	1.7860	(0.0285)
	M_{s_5}	8.93	10.21	4.18	0.6722	1.7637	
	M_{s_6}	10.02	10.28	3.67	0.6556	1.7345	
	M_{s_7}	10.14	10.33	3.82	0.6895	1.7231	
DP3-1	M_{s_5}	9.99	10.47	3.81	0.6820	1.7113	(0.0145)
	M_{s_6}	10.02	10.28	3.67	0.6538	1.7294	
	M_{s_7}	10.07	10.10	3.82	0.6588	1.6959	
	M_{s_8}	10.14	10.33	3.82	0.6895	1.7231	
DP4-2	M_{s_3}	9.00	10.69	3.88	0.6316	1.6919	(0.0201)
	M_{s_4}	9.02	10.64	3.88	0.6255	1.6797	
	M_{s_5}	9.58	10.44	3.88	0.6384	1.6452	
	M_{s_6}	9.49	10.25	3.92	0.6415	1.6823	
DP5-2	M_{s_5}	9.26	10.73	4.19	0.6627	1.5920	(0.0320)
	M_{s_6}	9.20	10.77	3.88	0.6348	1.6512	
	M_{s_8}	9.22	10.31	4.17	0.6432	1.6228	
	M_{s_9}	9.23	10.36	4.15	0.6605	1.6644	

Parantez içindekiler etekteki yoğunluk değerleri için standart sapmadır.



Şekil 4.1 Yoğunluğun cam fiber hacim oranları ile değişimi.



Şekil 4.2 Yoğunluğun merkezden kenara doğru değişimi.

4.2 Mekanik Özellikler

4.2.1 Darbe Dayanımı

DP1 (%7.86 E-camı), DP2 (%11.74 E-camı), DP3 (%15.57 E-camı), DP4 (%19.36 E-camı) ve DP5 (%23.11 E-camı) grubu deney numuneleri için yapılan darbe deneyi sonuçları Çizelge 4.7, Çizelge 4.8, Çizelge 4.9, Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Bu değerler grafik olarak sırası ile tokluğun cam fiber hacim oranları ile değişimi Şekil 4.3’de, darbe deneyi sonuçlarının yoğunluk deneyi sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Plakaların merkez, kenar ve etek bölgelerinden alınan numuneler için ayrı ayrı hesaplanan darbe dayanımı değerlerinin cam fiber hacim oranı artışı ile artmakta olduğu Şekil 4.3’de görülmektedir. Ayrıca, tüm deney grupları için darbe dayanımının merkezde (24.8864 kJ/m^2 - 60.37 kJ/m^2) yüksek, kenarda (21.5628 kJ/m^2 - 48.6123 kJ/m^2) ve etekte (17.8041 kJ/m^2 - 36.6458 kJ/m^2) düşük olduğu gözlenmiştir.

Merkez, kenar ve etek bölgeleri için elde edilen darbe dayanımının cam fiber hacim oranı ile değişimini gösteren grafiğin eğrileri ile yine merkez, kenar ve etek bölgeleri için elde edilen yoğunluğun cam fiber hacim oranı ile değişimini gösteren grafiğin eğrileri aynı grafik üzerinde çakıştırılarak Şekil 4.4’de görüldüğü gibi iki deneyin sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Merkez, kenar ve etek bölgesindeki darbe dayanımı ve yoğunluk eğrilerinin kesişme noktalarının %18.5-19.5’lik cam fiber hacim oranını geçmediği gözlenmiştir. Bu şekilde sonuçların kontrolü sağlanmıştır.

Çizelge 4.7 DP1-1 için darbe deneyi sonuçları (merkez, kenar, etek).

Numune No			Boyutlar (mm)		Kırma Enerjisi W (J)	Darbe Dayanımı a_{ou} (kJ/m ²)	Standart Sapma
			b	h			
DP1-1	N ₁	Kenar	8.90	3.81	0.70	20.6434	(0.3738)
	N ₂		8.60	3.91	0.72	21.4120	
	N ₃		9.04	3.91	0.75	21.2185	
	N ₄		8.94	3.91	0.75	21.4559	
	N ₉	Merkez	8.95	4.00	0.80	22.3463	(2.0859)
	N ₁₀		8.93	3.70	0.80	24.2123	
	N ₁₁		8.95	3.73	0.82	24.5630	
	N ₁₂		8.34	3.72	0.85	27.3974	
	N _{LS₁}	Etek	8.99	3.83	0.62	18.0066	(0.5068)
	N _{LS₂}		8.91	3.78	0.62	18.4086	
	N _{LS₃}		9.25	3.39	0.55	17.5396	
	N _{LS₄}		8.94	3.24	0.50	17.2618	
	N _{TS₁}		8.91	3.64	0.60	18.5000	
	N _{TS₂}		8.32	3.74	0.40	12.8547	
	N _{TS₃}		8.91	3.90	0.70	20.1444	
	N _{TS₄}		8.29	3.92	0.50	15.3861	
	N _{TS₅}		8.92	3.82	0.65	19.0759	
	N _{TS₆}		8.97	3.93	0.70	19.8569	
	N _{TS₇}		8.61	4.19	0.80	22.1754	
	N _{TS₈}		8.61	4.23	0.75	20.5929	
	N _{TS₉}		8.61	4.31	0.85	22.9054	
	N _{TS₁₀}		8.14	4.42	0.75	20.8456	
	N _{TS₁₁}		8.15	4.21	0.70	20.4013	
	N _{TS₁₂}		8.08	4.18	0.80	23.6865	

Parantez içindekiler kenar, merkez ve etekteki darbe dayanımı değerleri için standart sapmadır. (boyuna doğrultuda)

Standart Sapma $S = \sqrt{\frac{\sum a_{ou}^2 - \frac{(\sum a_{ou})^2}{n}}{n-1}}$ formülü ile hesaplanmıştır.

Çizelge 4.8 DP2-1 için darbe deneyi sonuçları (merkez, kenar, etek).

Numune No			Boyutlar (mm)		Kırma Enerjisi W (J)	Darbe Dayanımı a_{0u} (kJ/m ²)	Standart Sapma
			b	h			
DP2-1	N ₁	Kenar	8.45	3.51	0.60	20.2296	(2.3120)
	N ₂		7.78	3.47	0.63	23.3362	
	N ₃		8.46	3.48	0.72	24.4558	
	N ₅		8.08	3.48	0.72	25.6060	
	N ₉	Merkez	8.42	3.68	0.72	25.4592	(0.5818)
	N ₁₀		8.50	3.45	0.75	25.5754	
	N ₁₁		8.15	3.47	0.75	26.5200	
	N _{LS1}	Etek	8.49	3.36	0.55	19.2803	(0.7282)
	N _{LS2}		8.52	3.24	0.55	19.9240	
	N _{LS3}		8.25	3.80	0.65	20.7336	
	N _{TS1}		8.98	3.70	0.75	22.5726	
	N _{TS2}		8.99	3.86	0.70	20.1720	
	N _{TS3}		8.99	3.96	0.37	10.3931	
	N _{TS4}		8.95	3.94	0.60	17.0150	
	N _{TS5}		8.99	3.88	0.70	20.0681	
	N _{TS6}		9.01	3.92	0.80	22.6505	
	N _{TS7}		8.45	4.17	0.55	15.6088	
	N _{TS8}		8.36	4.24	0.80	22.5692	
	N _{TS9}		8.49	4.13	0.75	21.3896	
	N _{TS10}		8.50	4.22	0.70	19.5149	
	N _{TS11}		7.55	4.16	0.45	14.3275	
	N _{TS12}		8.50	4.13	0.42	11.9641	

Parantez içindekiler kenar, merkez ve etekteki darbe dayanımı değerleri için standart sapmadır.
(boyuna doğrultuda)

Çizelge 4.9 DP3-1 için darbe deneyi sonuçları (merkez, kenar, etek).

Numune No			Boyutlar (mm)		Kırma Enerjisi W (J)	Darbe Dayanımı a_{0u} (kJ/m ²)	Standart Sapma
			b	h			
DP3-1	N ₁	Kenar	9.14	3.00	0.72	26.2582	(1.3807)
	N ₂		9.14	3.12	0.75	26.3002	
	N ₃		9.16	3.08	0.80	28.3559	
	N ₄		9.10	3.04	0.80	28.9184	
	N ₉	Merkez	9.15	3.11	0.90	31.6272	(1.9676)
	N ₁₀		9.09	3.02	0.92	33.5132	
	N ₁₁		9.13	3.08	1.00	35.5613	
	N _{LS₁}	Etek	8.60	3.95	0.80	23.5501	((0.3385))
	N _{LS₂}		8.60	3.78	0.75	23.0712	
	N _{TS₁}		9.14	3.82	1.00	28.6411	
	N _{TS₂}		9.13	3.99	0.90	24.7057	
	N _{TS₃}		9.12	3.90	0.90	25.3036	
	N _{TS₄}		8.59	4.08	0.80	22.8263	
	N _{TS₅}		8.65	3.84	0.90	27.0953	
	N _{TS₆}		8.45	3.65	0.70	22.6959	

Parantez içindekiler kenar, merkez ve etekdeki darbe dayanımı değerleri için standart sapmadır.

boyuna doğrultuda

Çizelge 4.10 DP4-1 için darbe deneyi sonuçları (merkez, kenar, etek).

Numune No			Boyutlar (mm)		Kırma Enerjisi W (J)	Darbe Dayanımı a_{0u} (kJ/m ²)	Standart Sapma
			b	h			
DP4-1	N ₁	Kenar	8.52	3.41	1.05	36.1405	(1.7097)
	N ₄		8.46	3.42	1.10	38.0186	
	N ₅		8.46	3.28	1.10	39.6413	
	N ₆		8.55	3.19	1.10	40.3307	
	N ₇		8.54	3.22	1.10	40.0017	
	N ₈		8.56	3.17	1.10	40.5377	
	N ₉	Merkez	8.58	3.35	1.30	45.2284	(0.4901)
	N ₁₀		8.54	3.35	1.30	45.4402	
	N ₁₁		8.54	3.41	1.35	46.3576	
	N _{LS₁}	Etek	9.58	3.41	0.90	27.5500	(0.8327)
	N _{LS₄}		9.61	3.26	0.90	28.7277	
	N _{TS₁}		9.05	3.69	0.90	26.9505	
	N _{TS₂}		9.02	3.82	0.85	24.6688	
	N _{TS₃}		9.06	3.94	1.00	28.0140	
	N _{TS₄}		9.61	4.00	1.00	26.0145	
	N _{TS₅}		9.58	3.89	1.00	26.8339	
	N _{TS₆}		9.62	3.88	1.00	26.7912	
	N _{TS₇}		9.00	4.17	1.00	26.6453	
	N _{TS₈}		8.98	4.16	1.10	29.4457	
	N _{TS₉}		8.98	4.20	1.05	27.8396	
	N _{TS₁₀}		9.10	4.19	1.05	27.5380	
	N _{TS₁₁}		9.08	4.12	1.10	29.4042	
	N _{TS₁₂}		8.22	4.20	0.90	26.0688	

Parantez içindekiler kenar, merkez ve etekteki darbe dayanımı değerleri için standart sapmadır.

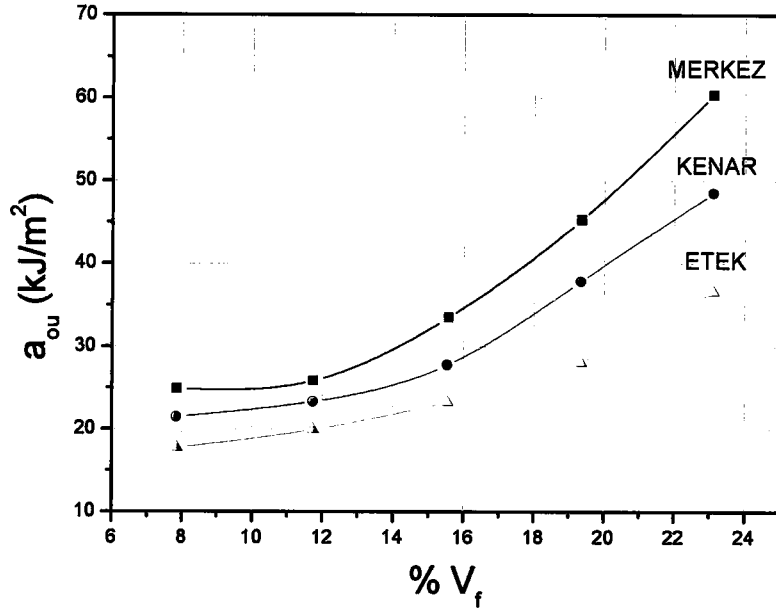
boyuna doğrultuda

Çizelge 4.11 DP5-1 için darbe deneyi sonuçları (merkez, kenar, etek).

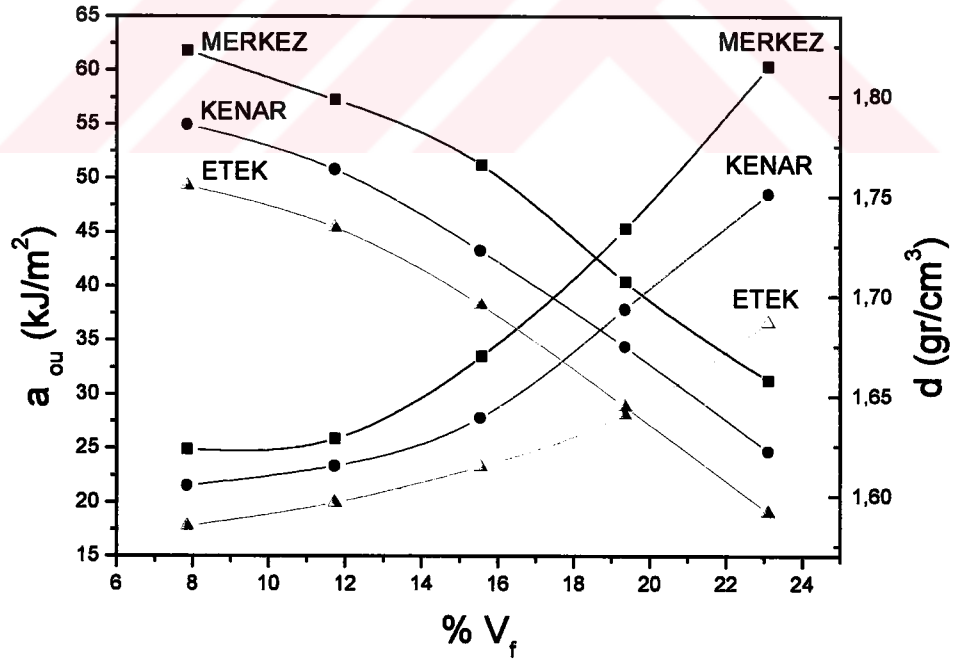
Numune No			Boyutlar (mm)		Kırma Enerjisi W (J)	Darbe Dayanımı a_{0u} (kJ/m ²)	Standart Sapma
			b	h			
DP5-1	N ₁	Kenar	9.50	3.61	1.60	46.6540	(1.9957)
	N ₂		9.16	4.02	1.80	48.8822	
	N ₃		9.19	4.00	1.80	48.9662	
	N ₄		8.91	3.82	1.70	49.9468	
	N ₅		9.54	3.87	1.85	50.1086	
	N ₆		9.19	3.98	1.90	51.9463	
	N ₇		9.17	3.94	1.90	52.5881	
	N ₁₀	Merkez	9.19	3.91	2.10	58.4422	(2.7263)
	N ₁₂		9.56	3.61	2.15	62.2978	
	N _{LS₁}	Etek	9.20	3.83	1.30	36.8940	(2.2829)
	N _{LS₂}		9.20	3.82	1.30	36.9906	
	N _{LS₃}		9.19	3.32	1.10	36.0528	
	N _{LS₄}		9.20	3.38	1.00	32.1584	
	N _{TS₁}		9.22	3.85	1.15	32.3971	
	N _{TS₂}		9.20	3.83	1.15	32.6370	
	N _{TS₃}		8.95	3.94	1.15	32.6120	
	N _{TS₄}		9.18	3.97	1.30	35.6705	
	N _{TS₅}		9.20	3.87	1.20	33.7040	
	N _{TS₆}		9.18	3.93	1.30	36.0336	
	N _{TS₇}		9.68	4.22	1.40	34.2720	
	N _{TS₈}		9.19	4.16	1.30	34.0043	
	N _{TS₉}		9.65	4.25	1.35	32.9167	
	N _{TS₁₀}		9.18	4.25	1.30	33.3205	
	N _{TS₁₁}		9.21	4.17	1.40	36.4529	
	N _{TS₁₂}		9.20	4.16	1.25	32.6609	

Parantez içindekiler kenar, merkez ve etekteki darbe dayanımı değerleri için standart sapmadır.

boyuna doğrultuda



Şekil 4.3 Darbe dayanımının cam fiber hacim oranları ile değişimi.



Şekil 4.4 Darbe deneyi sonuçlarının yoğunluk deneyi sonuçları ile karşılaştırılması.

4.2.2 Eğme Dayanımı

DP1 (%7.86 E-camı), DP2 (%11.74 E-camı), DP3 (%15.57 E-camı), DP4 (%19.36 E-camı) ve DP5 (%23.11 E-camı) grubu deney numuneleri için yapılan eğme deneyi sonuçları Çizelge 4.12, Çizelge 4.13, Çizelge 4.14, Çizelge 4.15 ve Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Bu değerler grafik olarak sırası ile eğme dayanımının cam fiber hacim oranları ile değişimi Şekil 4.5'de, eğme deneyi sonuçlarının yoğunluk deneyi sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Plakaların merkez, kenar ve etek bölgelerinden alınan numuneler için ayrı ayrı hesaplanan eğme dayanımı değerlerinin cam fiber hacim oranı artışı ile artmakta olduğu Şekil 4.5'de görülmektedir. Ayrıca, tüm deney grupları için eğme dayanımının merkezde (65.6963 MPa-155.9327 MPa) yüksek, etekte (60.7472 MPa-132.8951 MPa) ve kenarda (54.3363 MPa-114.0826 MPa) düşük olduğu gözlenmiştir.

Merkez, kenar ve etek bölgeleri için elde edilen eğme dayanımının cam fiber hacim oranı ile değişimini gösteren grafiğin eğrileri ile yine merkez, kenar ve etek bölgeleri için elde edilen yoğunluğun cam fiber hacim oranı ile değişimini gösteren grafiğin eğrileri aynı grafik üzerinde çakıştırılarak Şekil 4.6'da görüldüğü gibi iki deneyin sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Merkez, kenar ve etek bölgesindeki eğme dayanımının ve yoğunluk eğrilerinin kesişme noktalarının %16.5-19'luk cam fiber hacim oranını geçmediği gözlenmiştir. Bu şekilde sonuçların kontrolü sağlanmıştır.

Çizelge 4.12 DP1-2 için eğme deneyi sonuçları (merkez, kenar, etek).

Numune No			Boyutlar (mm)		Destekler Arası Açıklık l (mm)	Max. Yük. F_{max} (N)	Eğme Dayanımı σ_f (MPa)	Standart Sapma
			b	h				
DP1-2	KENAR	N ₁	8.89	3.49	60	62	51.5325	(2.7934)
		N ₂	8.92	3.44	60	62	52.8630	
		N ₃	8.94	3.70	60	72	52.9461	
		N ₄	8.91	3.84	60	82	56.1715	
		N ₅	8.94	3.53	60	72	58.1685	
	MERKEZ	N ₉	8.59	3.58	60	78	63.7643	(2.2572)
		N ₁₀	8.94	3.50	60	78	64.1008	
		N ₁₁	8.77	3.79	60	90	64.2994	
		N ₁₂	9.18	3.52	60	86	68.0476	
		N ₁₃	8.90	3.81	60	98	68.2697	
	ETEK	N _{LS₁}	8.95	3.89	60	118	78.4155	(15.0514)
		N _{LS₂}	8.99	3.82	60	60	41.1630	
		N _{LS₃}	8.95	3.39	60	74	64.7517	
		N _{LS₄}	8.99	3.20	60	60	58.6589	
		N _{TS₁}	8.97	3.91	60	80	52.5032	
		N _{TS₂}	8.86	4.06	60	120	73.9499	
		N _{TS₃}	8.88	3.93	60	120	78.7454	
		N _{TS₄}	9.03	4.08	60	60	35.9240	
		N _{TS₅}	8.89	3.97	60	140	89.9265	
		N _{TS₆}	9.19	3.94	60	140	88.3207	
		N _{TS₇}	9.92	4.31	60	80	39.0720	
		N _{TS₈}	8.80	4.15	60	100	59.3832	
		N _{TS₉}	9.94	4.25	60	160	80.2044	
		N _{TS₁₀}	8.77	4.37	60	120	64.4853	
		N _{TS₁₁}	9.10	4.34	60	120	63.0090	
		N _{TS₁₂}	8.88	4.30	60	120	65.7769	

Parantez içindekiler kenar, merkez ve etekteki eğme dayanımı değerleri için standart sapmadır.

$$\text{Standart Sapma } S = \sqrt{\frac{\sum \sigma_f^2 - \frac{(\sum \sigma_f)^2}{n}}{n-1}}$$

formülü ile hesaplanmıştır.

Çizelge 4.13 DP 2-2 için eğme deneyi sonuçları (merkez, kenar, etek).

Numune No			Boyutlar (mm)		Destekler Arası Açıklık l (mm)	Max. Yük. F_{max} (N)	Eğme Dayanımı σ_f (MPa)	Standart Sapma
			b	h				
DP2-2	KENAR	N ₁	8.85	3.34	60	60	54.6962	(6.9106)
		N ₂	8.87	3.75	60	78	56.2795	
		N ₃	8.84	3.38	60	68	60.5990	
		N ₄	8.82	3.62	60	90	70.0808	
	MERKEZ	N ₉	8.84	3.70	60	100	74.3681	(12.1228)
		N ₁₀	8.87	3.38	60	86	76.3807	
		N ₁₁	8.84	3.53	60	100	81.7035	
		N ₁₂	8.82	3.55	60	110	89.0655	
		N ₁₃	8.86	3.56	60	112	89.7690	
		N ₁₄	8.80	3.53	60	116	95.2068	
		N _{TS₁}	7.20	3.68	60	52	47.9974	(13.1054)
	ETEK	N _{TS₂}	9.04	3.74	60	60	42.7053	
		N _{TS₃}	9.05	3.88	60	100	66.0587	
		N _{TS₄}	9.02	3.95	60	108	69.0661	
		N _{TS₅}	9.06	4.03	60	108	66.0583	
		N _{TS₆}	9.02	3.97	60	106	67.1059	
		N _{TS₇}	8.56	4.17	60	108	65.3010	
		N _{TS₈}	8.56	4.16	60	140	85.0570	
		N _{TS₉}	8.56	4.17	60	138	83.4402	
		N _{TS₁₀}	8.52	4.26	60	116	67.5214	
		N _{TS₁₁}	8.58	4.14	60	130	79.5605	
		N _{TS₁₂}	8.50	4.12	60	130	81.0909	

Parantez içindekiler kenar, merkez ve etekdeki eğme dayanımı değerleri için standart sapmadır.

Çizelge 4.14 DP3-2 için eğme deneyi sonuçları (merkez, kenar, etek).

Numune No			Boyutlar (mm)		Destekler Arası Açıklık l (mm)	Max. Yük. F_{max} (N)	Eğme Dayanımı σ_f (MPa)	Standart Sapma
			b	h				
DP3-2	KENAR	N ₃	9.08	3.19	60	76	74.0267	(5.3086)
		N ₄	9.11	3.21	60	86	82.4541	
		N ₅	9.13	3.18	60	86	83.8331	
	MERKEZ	N ₉	9.11	3.07	60	90	94.3387	(4.3426)
		N ₁₀	9.11	3.13	60	100	100.8406	
		N ₁₁	9.13	3.10	60	100	102.5766	
	ETEK	N _{LS1}	10.10	3.93	60	172	99.2349	(13.0232)
		N _{LS2}	10.12	3.84	60	134	80.8173	
		N _{TS1}	9.13	3.80	60	128	87.3804	
		N _{TS2}	9.14	4.00	60	210	129.2390	
		N _{TS3}	9.10	3.88	60	200	131.3910	
		N _{TS4}	9.16	4.06	60	150	89.4100	
		N _{TS5}	10.15	3.82	60	160	97.2231	
		N _{TS6}	10.07	3.95	60	240	137.4770	
		N _{TS7}	10.10	3.87	60	60	35.6985	
		N _{TS8}	10.02	4.06	60	96	52.3111	

Parantez içindekiler kenar, merkez ve etekteki eğme dayanımı değerleri için standart sapmadır.

boyutlara doğrultuda

Çizelge 4.15 DP4-2 için eğme deneyi sonuçları (merkez, kenar, etek).

Numune No			Boyutlar (mm)		Destekler Arası Açıklık l (mm)	Max. Yük. F_{max} (N)	Eğme Dayanımı σ_f (MPa)	Standart Sapma
			b	h				
DP4-2	KENAR	N ₃	8.41	3.37	60	98	92.3448	(6.0959)
		N ₄	8.38	3.55	60	110	93.7420	
		N ₅	8.37	3.38	60	110	103.5324	
	MERKEZ	N ₉	8.42	3.31	60	124	120.9751	(5.2596)
		N ₁₀	8.23	3.36	60	130	125.9236	
		N ₁₁	8.35	3.55	60	154	131.7103	
		N ₁₂	8.41	3.82	60	180	132.0055	
	ETEK	N _{LS₁}	10.10	3.78	60	194	120.9871	(12.6113)
		N _{LS₂}	10.08	3.80	60	194	119.9544	
		N _{LS₃}	10.06	3.36	60	120	95.0927	
		N _{LS₄}	10.05	3.24	60	122	104.0749	
		N _{TS₁}	9.40	3.69	60	72	50.6284	
		N _{TS₂}	9.42	3.83	60	122	79.4609	
		N _{TS₃}	9.38	3.98	60	156	94.4926	
		N _{TS₄}	9.61	3.91	60	116	71.0597	
		N _{TS₅}	9.58	3.87	60	280	175.6358	
		N _{TS₆}	9.59	3.90	60	280	172.7637	
		N _{TS₇}	9.60	4.15	60	164	89.2727	
		N _{TS₈}	9.60	4.17	60	280	150.9583	
		N _{TS₉}	9.58	4.20	60	200	106.5144	
		N _{TS₁₀}	9.00	4.00	60	180	112.5000	
		N _{TS₁₁}	8.98	4.12	60	194	114.5442	
		N _{TS₁₂}	8.99	4.17	60	200	115.1438	

Parantez içindekiler kenar, merkez ve etekteki eğme dayanımı değerleri için standart sapmadır.

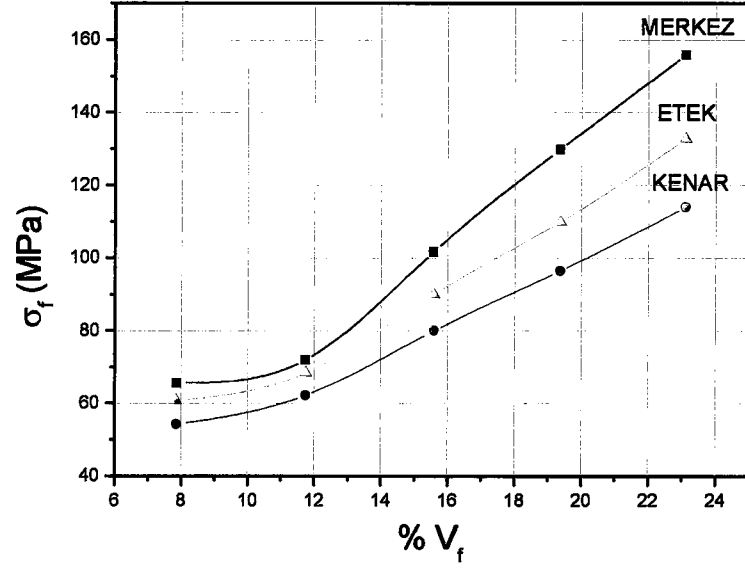
boyuna doğrultuda

Çizelge 4.16 DP5-2 için eğme deneyi sonuçları (merkez, kenar, etek).

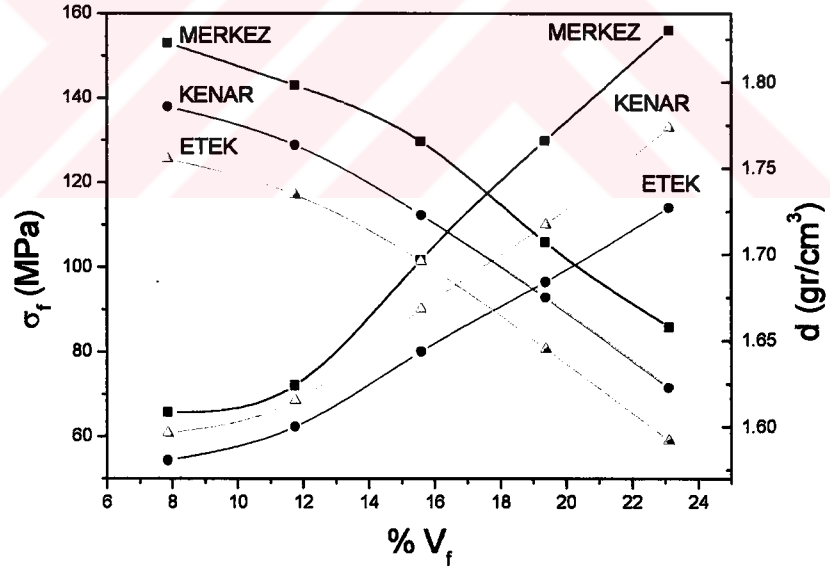
Numune No			Boyutlar (mm)		Destekler Arası Açıklık l (mm)	Max. Yük. F_{max} (N)	Eğme Dayanımı σ_f (MPa)	Standart Sapma
			b	h				
DP5-2	KENAR	N ₁	8.67	3.98	60	160	104.8520	(8.0067)
		N ₂	9.18	3.56	60	138	106.7520	
		N ₃	9.06	3.57	60	150	116.9140	
		N ₄	9.20	3.50	60	148	118.1890	
		N ₅	9.16	3.76	60	178	123.7060	
	MERKEZ	N ₉	9.19	3.63	60	196	145.6690	(7.4173)
		N ₁₀	8.45	3.74	60	198	150.7670	
		N ₁₁	8.48	3.74	60	210	159.3390	
		N ₁₂	9.06	3.74	60	226	160.5016	
		N ₁₃	8.90	3.74	60	226	163.3870	
	ETEK	N _{LS₁}	9.25	3.34	60	96	83.7296	(30.1751)
		N _{LS₂}	9.20	3.46	60	206	168.3330	
		N _{TS₁}	9.26	3.74	60	142	98.6680	
		N _{TS₂}	9.18	3.80	60	172	116.7780	
		N _{TS₃}	9.23	3.89	60	186	119.8540	
		N _{TS₄}	9.14	3.92	60	242	155.0740	
		N _{TS₅}	9.14	3.90	60	278	179.9740	
		N _{TS₆}	9.25	4.23	60	248	134.8560	
		N _{TS₇}	9.18	4.12	60	316	182.5124	
		N _{TS₈}	9.22	4.16	60	266	150.0390	

Parantez içindekiler kenar, merkez ve etekteki eğme dayanımı değerleri için standart sapmadır.

enine doğrultuda



Şekil 4.5 Eğme dayanımının cam fiber hacim oranları ile değişimi.



Şekil 4.6 Eğme deneyi sonuçlarının yoğunluk deneyi sonuçları ile karşılaştırılması.

4.2.3 Çekme Dayanımı

DP1 (%7.86 E-camı), DP2 (%11.74 E-camı), DP3 (%15.57 E-camı), DP4 (%19.36 E-camı) ve DP5 (%23.11 E-camı) grubu deney numuneleri için yapılan çekme deneyi sonuçları Çizelge 4.17, Çizelge 4.18, Çizelge 4.19, Çizelge 4.20 ve Çizelge 4.21’de verilmiştir.

Çekme dayanımının cam fiber hacim oranları ile değişimi grafik olarak Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Plakaların yüzeyinde enine ve boyuna doğrultularda alınan çekme numuneleri ile etek bölgelerinden alınan çekme numuneleri için ayrı ayrı hesaplanan çekme dayanımı değerlerinin cam fiber hacim oranı artışı ile arttığı gözlenmiştir. Ayrıca, Şekil 4.7’de tüm deney grupları için çekme dayanımının değerlerinin etekte (22.5297 MPa-56.8135 MPa) ve enine doğrultuda (19.1745 MPa-54.9804 MPa) yüksek, boyuna doğrultuda (15.9955 MPa-46.6743 MPa) düşük olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.17 DP1-1 için çekme deneyi sonuçları (enine, boyuna, etek).

Numune No			Boyutlar (mm)		Max. Yük F_{max} (N)	Çekme Dayanımı σ_{max} (Mpa)	Standart Sapma
			b	h			
DP1-1	ENİNE	T ₁	10.04	3.72	790	21.1519	(1.8784)
		T ₂	10.27	3.77	700	18.0794	
		T ₃	10.23	3.71	700	18.4437	
		T ₅	10.12	3.62	760	20.7455	
		T ₆	10.30	3.52	720	19.8587	
		T ₇	10.22	3.65	800	21.4459	
		T ₉	10.10	3.55	600	16.7340	
		T ₁₀	10.08	3.69	630	16.9376	
	BOYUNA	L ₂	10.23	3.35	400	11.6718	(3.3363)
		L ₃	10.23	3.53	620	17.1688	
		L ₅	10.43	3.86	790	19.6225	
		L ₇	10.32	3.94	680	16.7237	
	ETEK	T _{S1}	10.38	3.91	900	22.1752	(0.3923)
		T _{S2}	10.45	4.21	1000	22.7301	

Parantez içindekiler enine, boyuna ve etekteki çekme dayanımı değerleri için standart sapmadır.

$$\text{Standart Sapma } S = \sqrt{\frac{\sum \sigma_{max}^2 - \frac{(\sum \sigma_{max})^2}{n}}{n-1}}$$

formülü ile hesaplanmıştır.

Çizelge 4.18 DP2-1 için çekme deneyi sonuçları (enine, boyuna, etek).

Numune No			Boyutlar (mm)		Max. Yük F_{max} (N)	Çekme Dayanımı σ_{max} (MPa)	Standart Sapma
			b	h			
DP2-1	ENİNE	T ₁	10.12	3.34	990	29.2892	(3.6926)
		T ₂	10.34	3.31	860	25.1275	
		T ₃	10.31	3.30	840	24.6891	
		T ₅	10.40	3.31	790	23.6307	
		T ₆	10.25	3.36	960	27.8745	
		T ₇	10.28	3.27	700	20.8236	
		T ₈	10.27	3.24	740	22.2390	
		T ₉	10.26	3.27	600	17.8836	
	BOYUNA	L ₂	10.25	3.37	820	23.7388	(5.0588)
		L ₃	10.46	3.56	630	16.9183	
		L ₄	10.25	3.56	550	15.0726	
		L ₅	10.30	3.57	620	16.8611	
		L ₆	10.25	3.54	980	27.0084	
		L ₇	10.32	3.57	920	24.9712	
	ETEK	T _{s1}	10.28	3.55	900	24.6615	

Parantez içindekiler enine, boyuna ve etekteki çekme dayanımı değerleri için standart sapmadır.

Çizelge 4.19 DP3-1 için çekme deneyi sonuçları (enine, boyuna, etek).

Numune No			Boyutlar (mm)		Max. Yük F_{max} (N)	Çekme Dayanımı σ_{max} (MPa)	Standart Sapma
			b	h			
DP3-1	ENİNE	T ₁	10.35	3.40	1280	36.3739	(2.7640)
		T ₃	10.37	3.40	1100	31.1985	
		T ₄	10.27	3.44	1100	31.1360	
		T ₅	10.45	3.48	1100	30.2480	
		T ₆	10.33	3.46	1180	33.0145	
		T ₇	10.43	3.58	1190	31.8698	
		T ₉	10.28	3.43	1100	31.1964	
		T ₁₁	10.40	3.35	1280	36.7393	
	BOYUNA	T ₁₂	10.37	3.41	1000	28.2791	(1.4633)
		L ₁	10.21	3.88	1050	26.5052	
		L ₂	10.22	3.79	1100	28.3989	
		L ₃	10.20	3.94	1200	29.8596	
		L ₄	10.21	3.90	1180	29.6340	
		L ₆	10.17	3.70	1100	29.2327	
		L ₈	10.17	3.31	900	26.7358	
	ETEK	T _{s1}	10.08	3.81	1300	33.8499	(0.0363)
		T _{s2}	10.09	3.90	1330	33.7983	

Parantez içindekiler enine, boyuna ve etekteki çekme dayanımı değerleri için standart sapmadır.

Çizelge 4.20 DP4-1 için çekme deneyi sonuçları (enine, boyuna, etek).

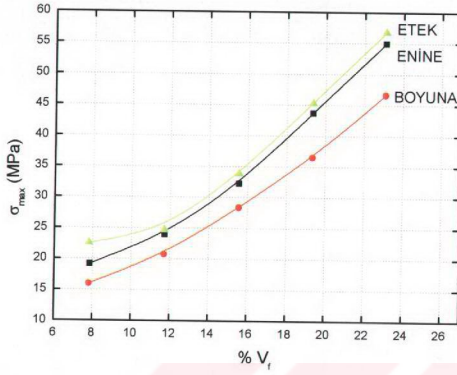
Numune No			Boyutlar (mm)		Max. Yük	Çekme Dayanımı	Standart Sapma
			b	h	F_{max} (N)	σ_{max} (MPa)	
DP4-1	ENİNE	T ₁	10.53	3.17	1390	41.6415	(6.6071)
		T ₂	10.53	3.21	1250	36.9808	
		T ₃	10.52	3.22	1680	49.5949	
		T ₄	10.56	3.20	960	28.4090	
		T ₅	10.55	3.16	1580	47.3933	
		T ₆	10.52	3.21	1540	45.6036	
		T ₇	10.60	3.35	1400	39.4255	
		T ₈	10.45	3.15	1600	48.6063	
		T ₉	10.48	3.14	1580	48.0138	
		T ₁₀	10.50	3.21	1540	45.6905	
		T ₁₁	10.54	3.27	1800	52.2256	
		T ₁₂	10.49	3.21	1380	40.9825	
	BOYUNA	L ₃	10.30	3.55	1300	35.5531	(2.7290)
		L ₄	10.32	3.47	1380	38.5362	
		L ₅	10.40	3.37	1400	39.9452	
		L ₆	10.41	3.49	1200	33.0297	
		L ₇	10.32	3.54	1300	35.5844	
	ETEK	T _{S1}	10.28	4.08	1900	45.3002	

Parantez içindekiler enine, boyuna ve etekteki çekme dayanımı değerleri için standart sapmadır.

Çizelge 4.21 DP5-1 için çekme deneyi sonuçları (enine, boyuna, etek).

Numune No			Boyutlar (mm)		Max. Yük	Çekme Dayanımı	Standart Sapma
			b	h	F_{max} (N)	σ_{max} (MPa)	
DP5-1	ENİNE	T ₁	10.41	3.71	2520	65.2493	(5.8372)
		T ₃	10.26	3.76	2200	57.0279	
		T ₄	10.34	3.70	2270	59.3339	
		T ₅	10.24	3.80	2000	51.3980	
		T ₆	10.25	3.77	1880	48.6510	
		T ₇	10.18	3.79	2000	51.8373	
		T ₉	10.23	3.73	1960	51.3655	
	BOYUNA	L ₁	9.71	3.69	1800	50.2373	(6.5948)
		L ₂	9.67	3.67	1700	47.9023	
		L ₄	9.66	3.85	2000	53.7764	
		L ₅	9.85	4.05	1800	45.1212	
		L ₆	9.73	3.96	1400	36.3345	
	ETEK	T _{S1}	9.62	3.33	1820	56.8135	

Parantez içindekiler enine, boyuna ve etekteki çekme dayanımı değerleri için standart sapmadır.



Şekil 4.7 Çekme dayanımının cam fiber hacim oranları ile değişimi.

4.3.1 Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) ile Kırık Yüzeylerin Analiz Sonuçları

DP1 grubu deney numunelerinden kenardan (N_5) ve merkezden (N_{10}) alınan, darbe deneyi yapılmış numunelerin kırık yüzeylerinin tarama elektron mikroskobu görüntüleri (SEM) Şekil 4.8 ve 4.9'da verilmiştir.

SMC kompozitinin tarama elektron mikroskobunda bileşimsel görüntüsü: Cam fiberler ve dolgu maddesi (CaCO_3) parçacıkları beyaz, matris (polyester) gri ve boşluklar (odaklanmış yerlerdeki boşluklar; kalsitin yada fiberin sıyrılarak çıkmasından oluşan boşluklardır, diğer boşluklarda fiberlerin eteğe doğru geldikçe kenar yığılması oluşturduğu krater yığılma boşluklarıdır) siyah renkli görünür.

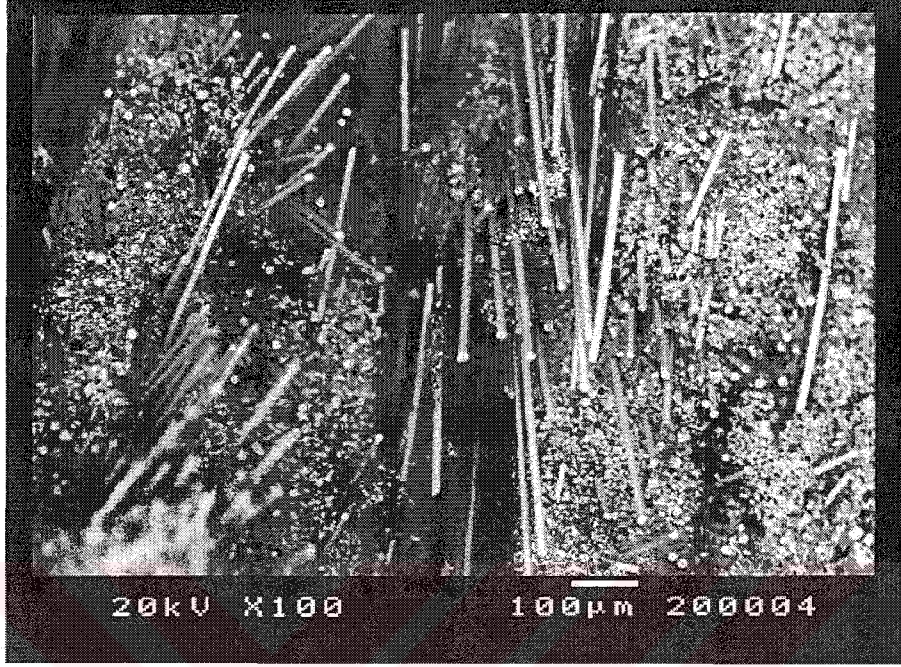


Şekil 4.8 DP1-N₅ (kenar) No'lu numunenin kırık yüzeyinin görünümü (SEM).

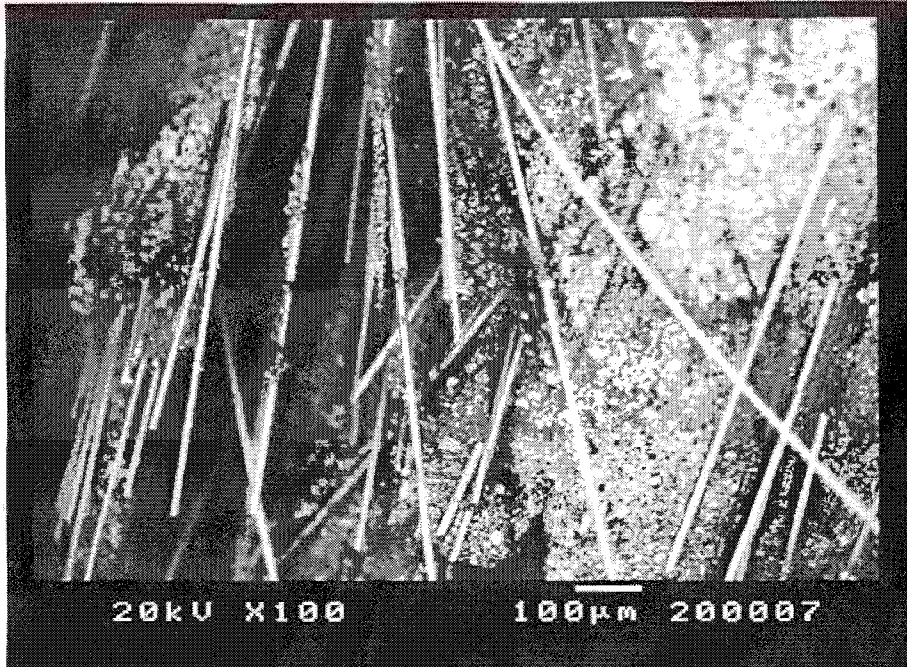


Şekil 4.9 DP1-N₁₀ (merkez) No'lu numunenin kırık yüzeyinin görünümü (SEM).

DP2 grubu deney numunelerinden kenardan (N_4) ve merkezden (N_7) alınan, darbe deneyi yapılmış numunelerin kırık yüzeylerinin tarama elektron mikroskobu görüntüleri (SEM) Şekil 4.10 ve 4.11’de verilmiştir.

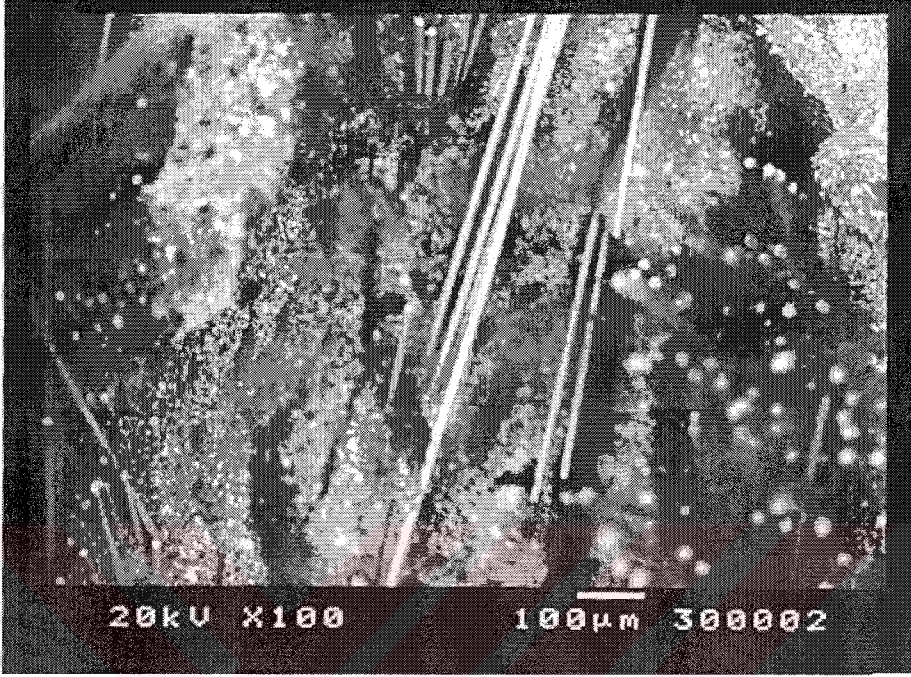


Şekil 4.10 DP2- N_7 (merkez) No’lu numunenin kırık yüzeyinin görünümü (SEM).

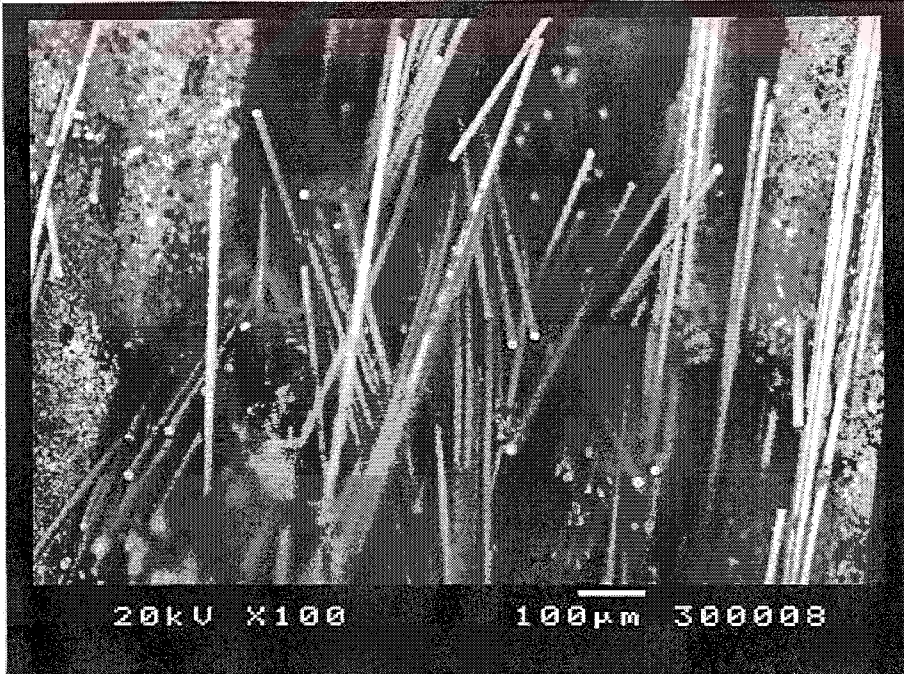


Şekil 4.11 DP2- N_4 (kenar) No’lu numunenin kırık yüzeyinin görünümü (SEM).

DP3 grubu deney numunelerinden kenardan (N_2) ve merkezden (N_8) alınan, darbe deneyi yapılmış numunelerin kırık yüzeylerinin tarama elektron mikroskobu görüntüleri (SEM) Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de verilmiştir.

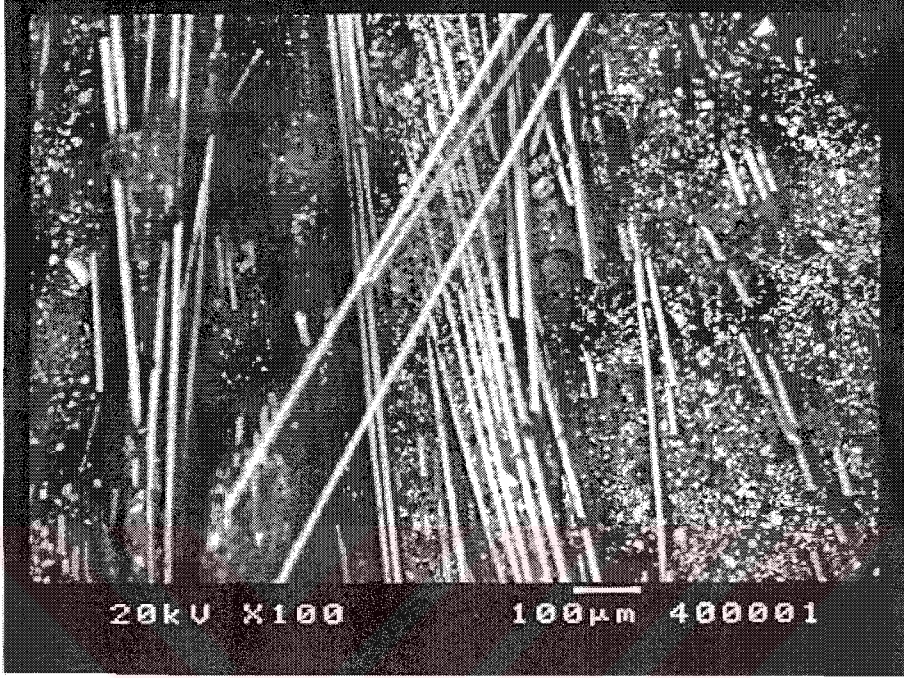


Şekil 4.12 DP3- N_2 (kenar) No’lu numunenin kırık yüzeyinin görünümü(SEM).

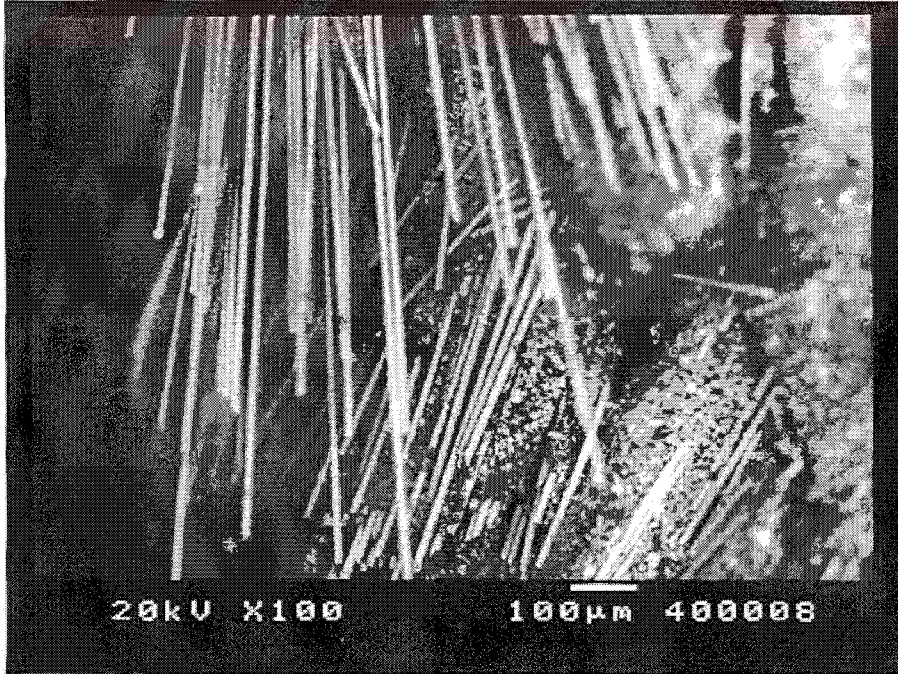


Şekil 4.13 DP3- N_8 (merkez) No’lu numunenin kırık yüzeyinin görünümü (SEM).

DP4 grubu deney numunelerinden kenardan (N_1) ve merkezden (N_8) alınan, darbe deneyi yapılmış numunelerin kırık yüzeylerinin tarama elektron mikroskobu görüntüleri (SEM) Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de verilmiştir.

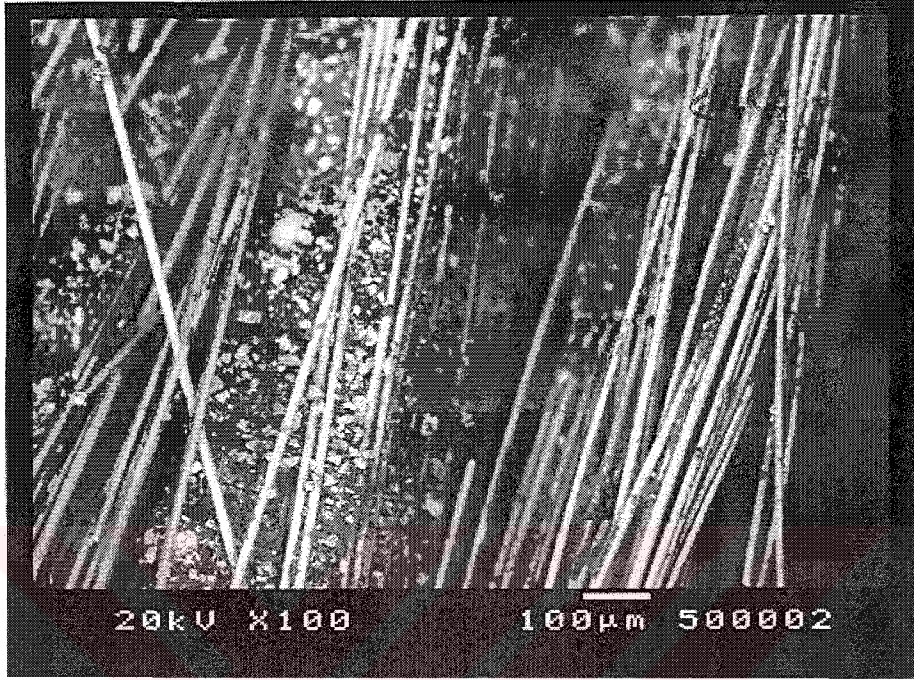


Şekil 4.14 DP4- N_1 (kenar) No’lu numunenin kırık yüzeyinin görünümü(SEM).

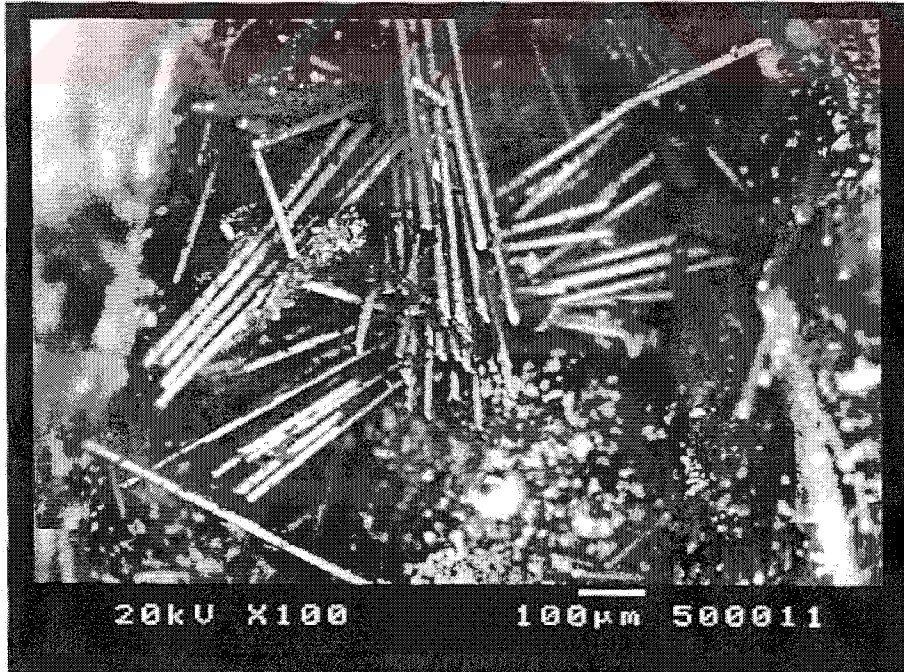


Şekil 4.15 DP4- N_8 (merkez) No’lu numunenin kırık yüzeyinin görünümü (SEM).

DP5 grubu deney numunelerinden kenardan (N_2) ve merkezden (N_{11}) alınan, darbe deneyi yapılmış numunelerin kırık yüzeylerinin tarama elektron mikroskobu görüntüleri (SEM) Şekil 4.16 ve 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.16 DP5- N_2 (kenar) No’lu numunenin kırık yüzeyinin görünümü(SEM).

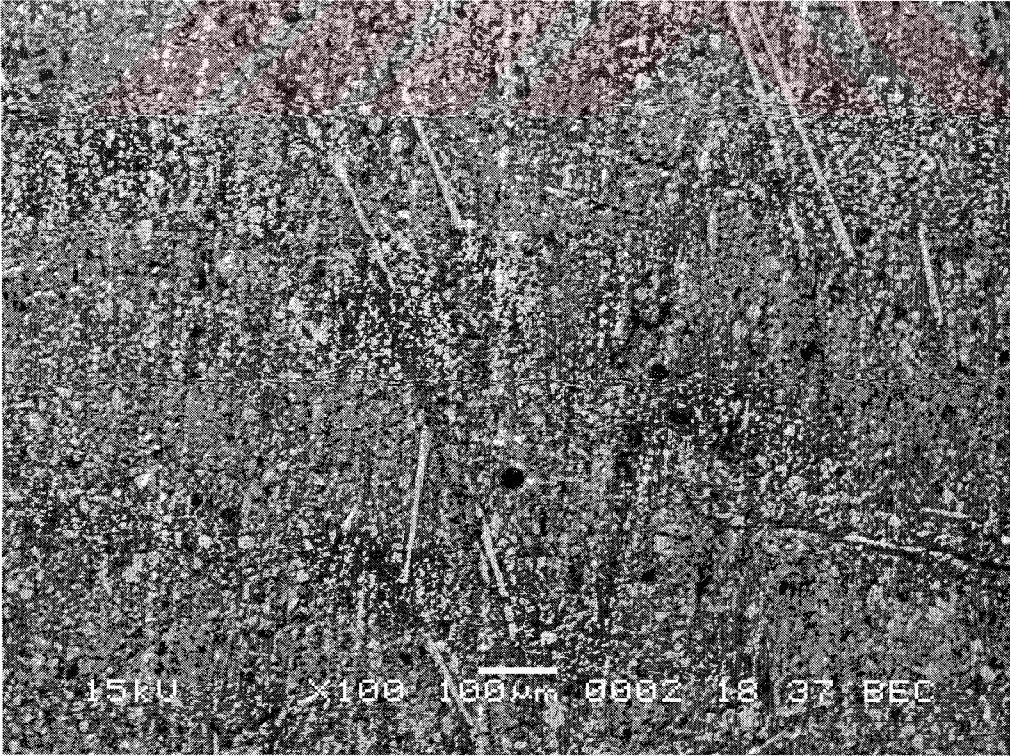


Şekil 4.17 DP5- N_{11} (merkez) No’lu numunenin kırık yüzeyinin görünümü (SEM).

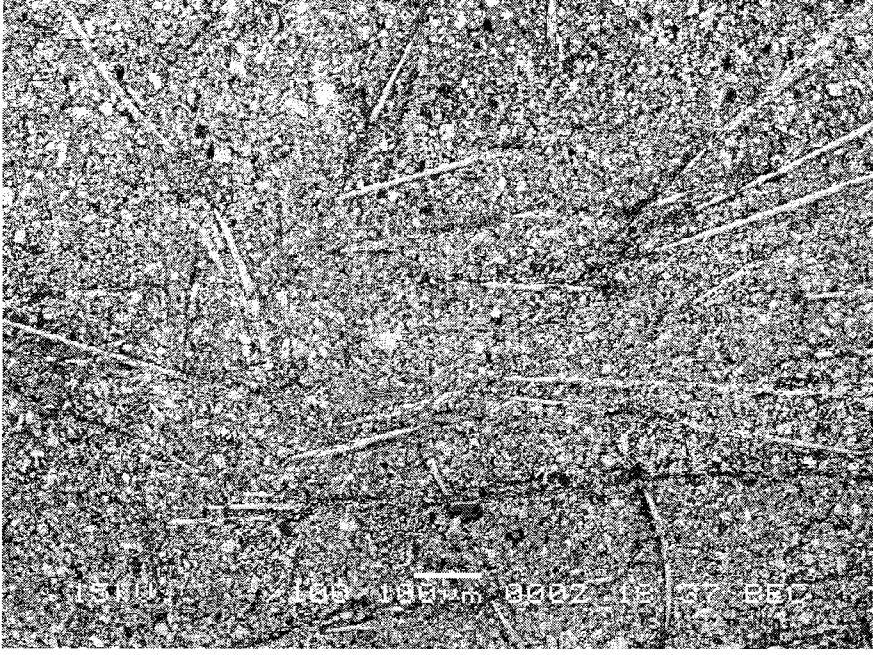
4.3.2 Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) ile Mikroyapısal Muayene Sonuçları



Şekil 4.18 DP1-L₈ (merkez) nolu numunenin mikroyapısı (SEM)



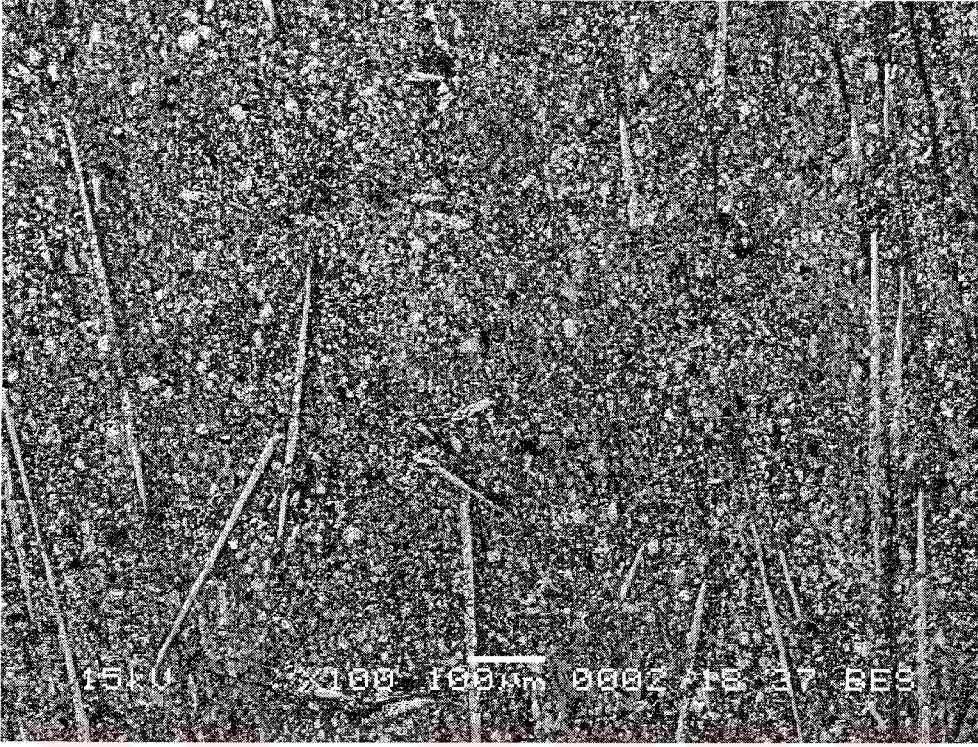
Şekil 4.19 DP1-L₁ (kenar) nolu numunenin mikroyapısı (SEM)



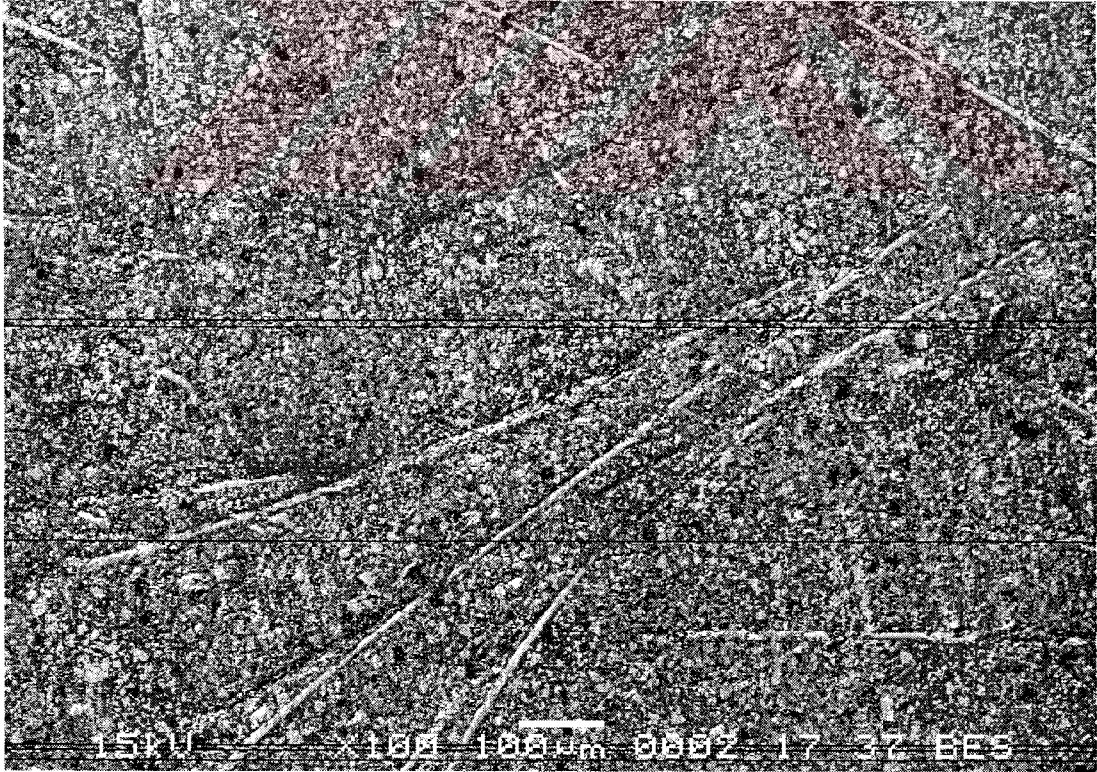
Şekil 4.20 DP1-L_s (etek) nolu numunenin mikroyapısı (SEM)



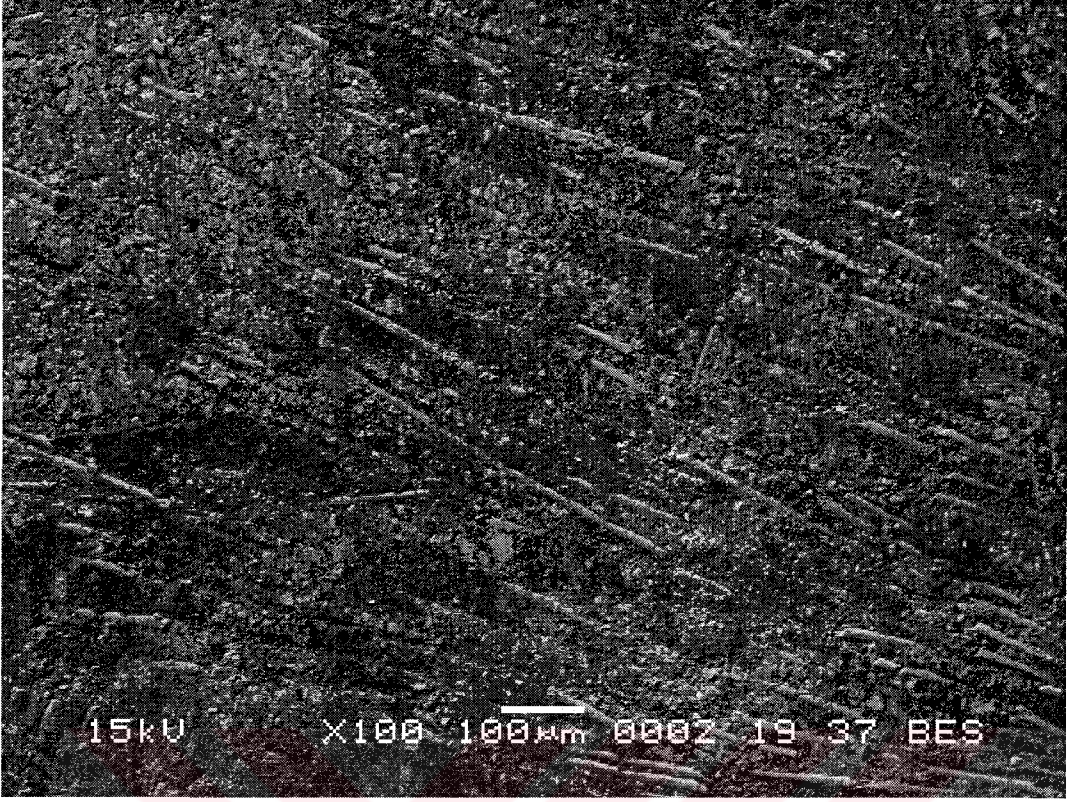
Şekil 4.21 DP2-L₈ (merkez) nolu numunenin mikroyapısı (SEM)



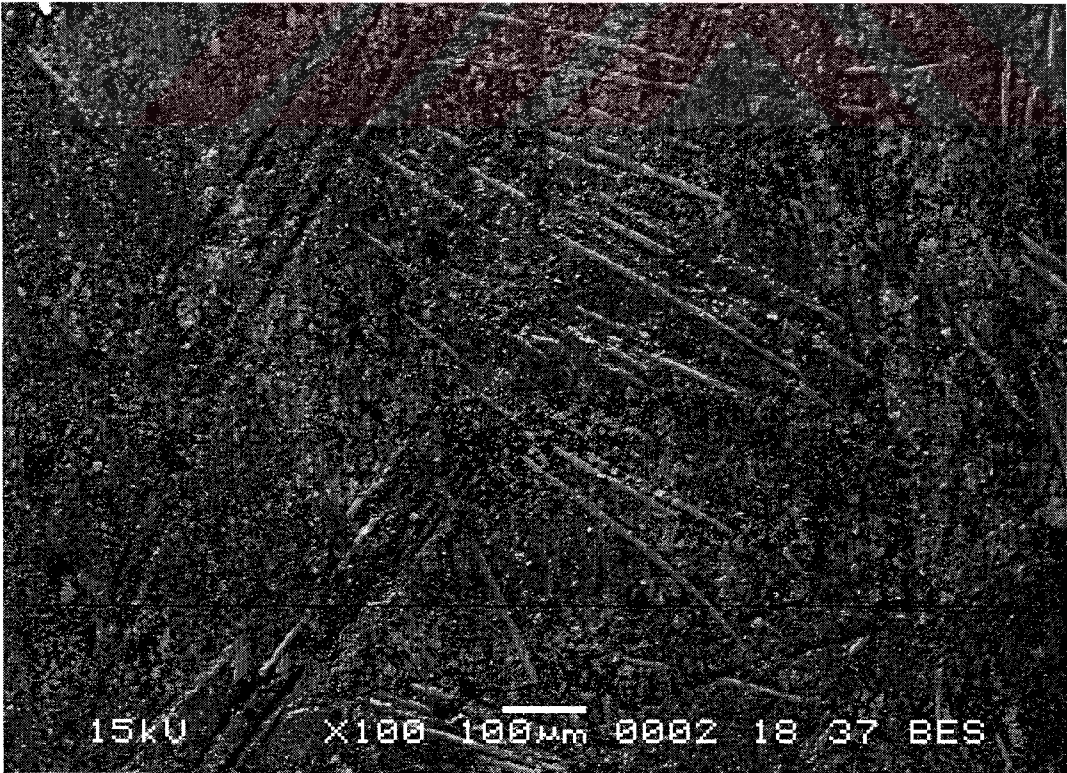
Şekil 4.22 DP2-L₁ (kenar) nolu numunenin mikroyapısı (SEM)



Şekil 4.23 DP2-L_s (etek) nolu numunenin mikroyapısı (SEM)



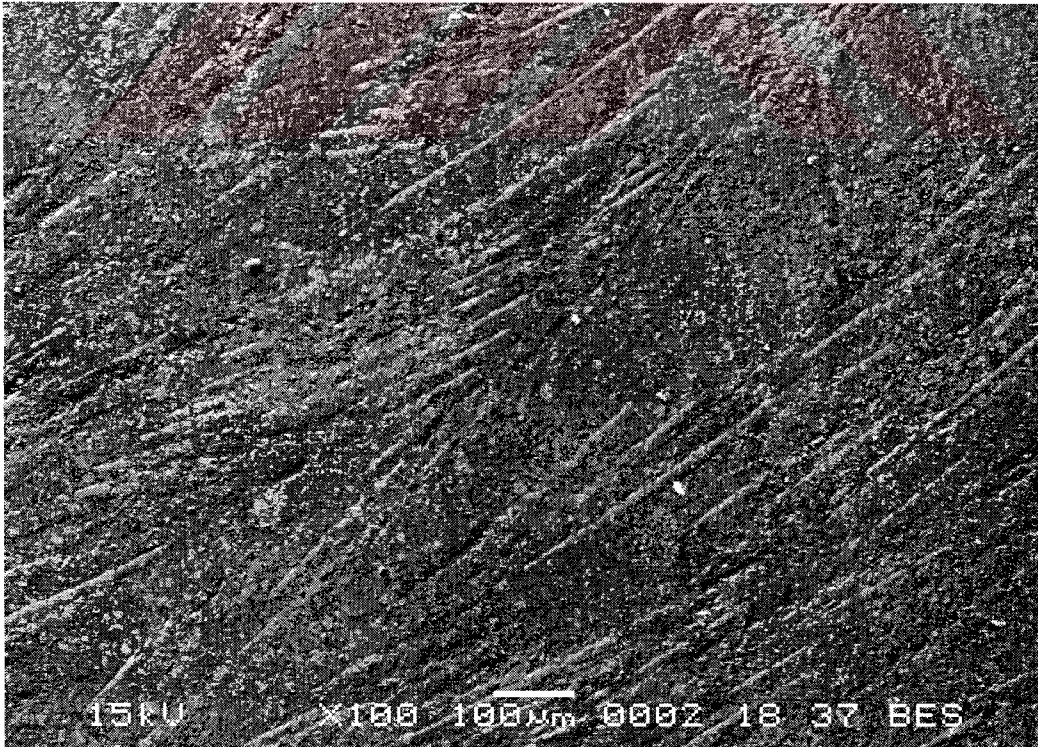
Şekil 4.24 DP3-L₈ (merkez) nolu numunenin mikroyapısı (SEM)



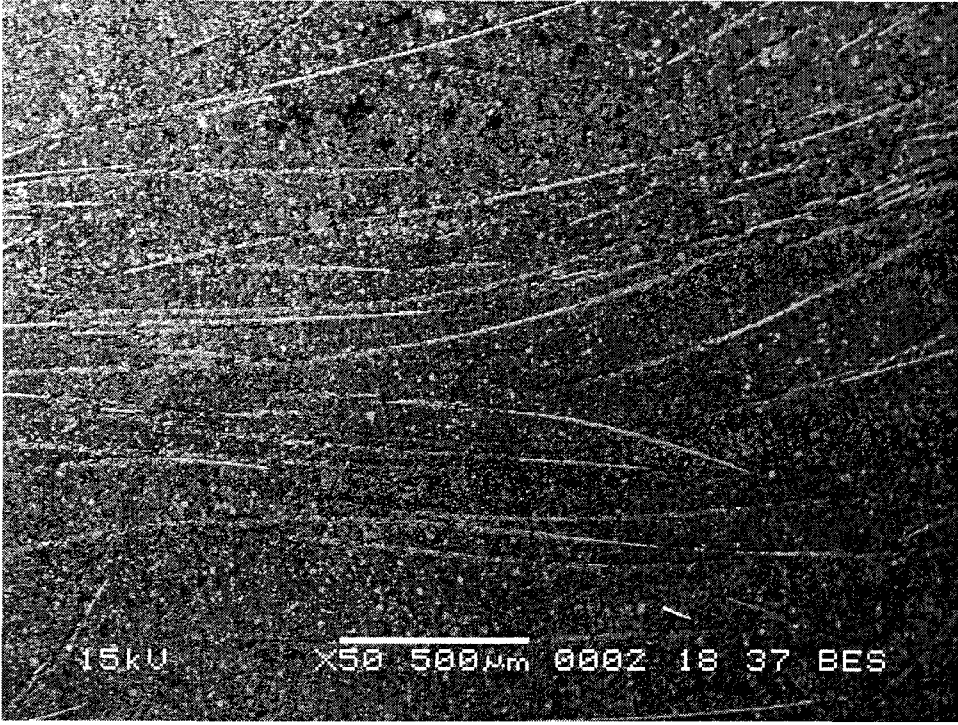
Şekil 4.25 DP3-L₁ (kenar) nolu numunenin mikroyapısı (SEM)



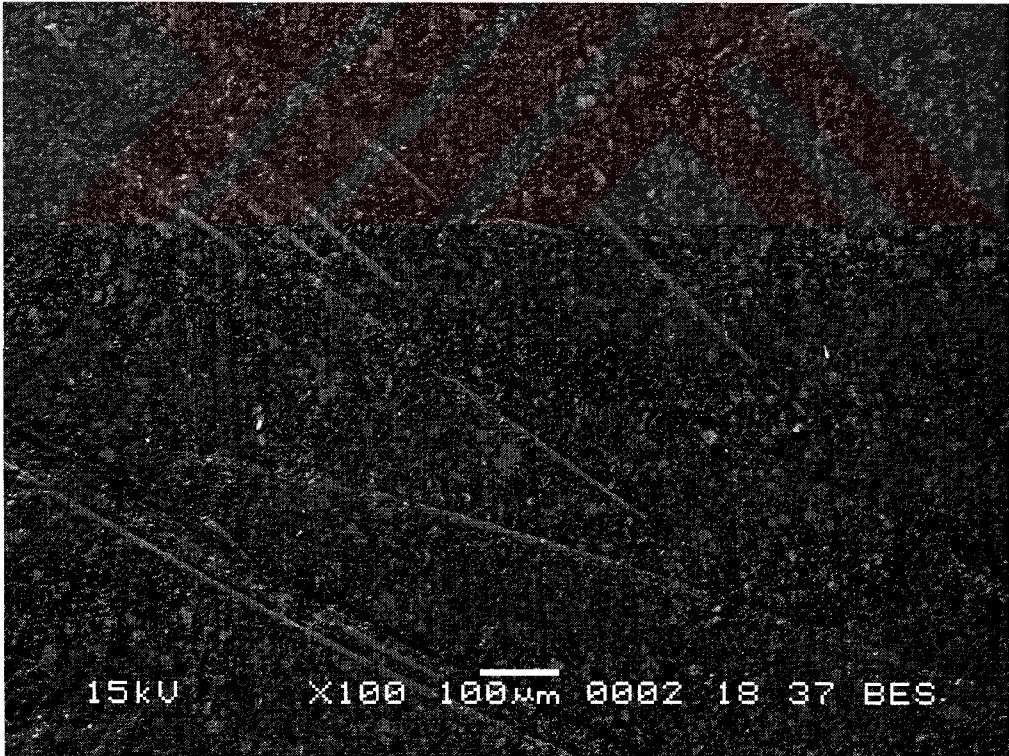
Şekil 4.26 DP3-Ls (etek) nolu numunenin mikroyapısı (SEM)



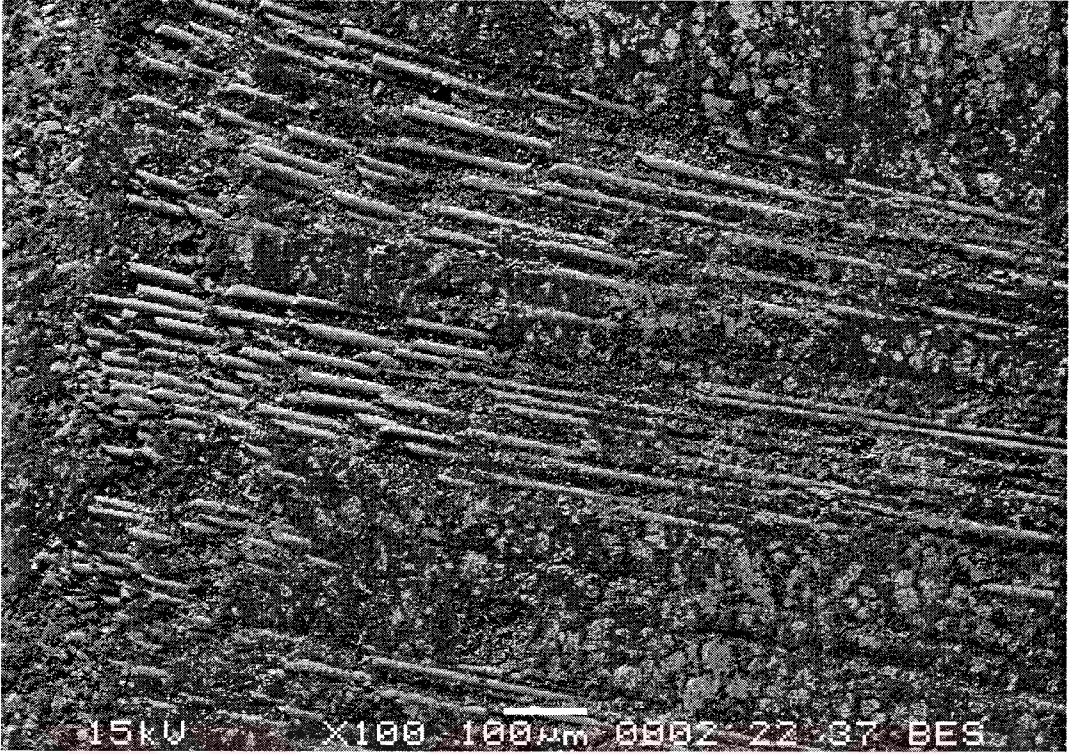
Şekil 4.27 DP4-L₈ (merkez) nolu numunenin mikroyapısı (SEM)



Şekil 4.28 DP4-L₁ (kenar) nolu numunenin mikroyapısı (SEM)



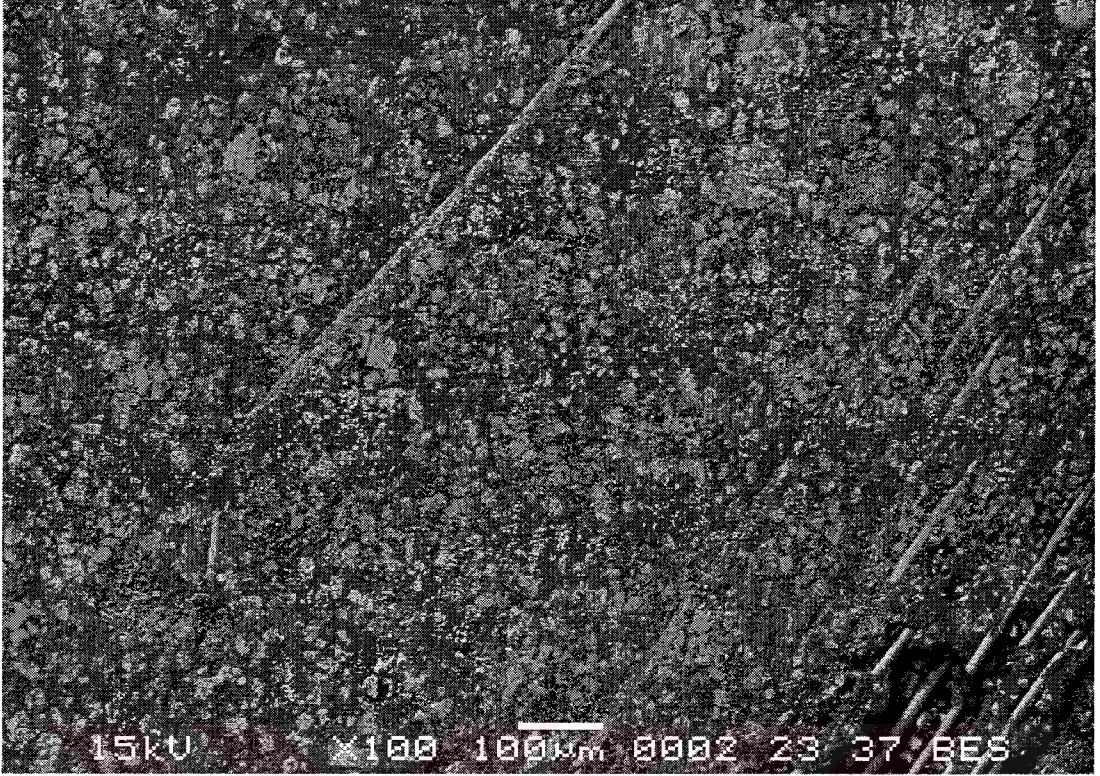
Şekil 4.29 DP4-L_s (etek) nolu numunenin mikroyapısı (SEM)



Şekil 4.30 DP5-L₈ (merkez) nolu numunenin mikroyapısı (SEM)



Şekil 4.31 DP5-L₁ (kenar) nolu numunenin mikroyapısı (SEM)



Şekil 4.32 DP5-L_s (etek) nolu numunenin mikroyapısı (SEM)

Mikroyapı görüntüleri üzerinde metalografik yöntemle belirlenen fiberlere ait sonuçlar Çizelge 4.22’de verilmiştir.

Çizelge 4.22 Mikroyapı görüntüleri üzerinde belirlenen fiberlere ait sonuçlar

Levha No	Numune No	Fiberler Arası Ortalama Mesafe $\lambda_{ort}(\mu m)$	Fiberler Yatayla Yaptığı Ortalama Açısı $\theta_{ort}(^{\circ})$	Fiberlerin % Hacim Oranı V_f (%)
DP1	L ₈ (Merkez)	283	45	9.48
	L ₁ (Kenar)	892	67	5.40
	L _s (Etek)	392	30	7.10
DP2	L ₈ (Merkez)	250	30	13.33
	L ₁ (Kenar)	550	77	9.76
	L _s (Etek)	358	35	10.61
DP3	L ₈ (Merkez)	217	27	25.16
	L ₁ (Kenar)	325	39	10.20
	L _s (Etek)	475	60	11.90
DP4	L ₈ (Merkez)	200	57	29.50
	L ₁ (Kenar)	308	10	15.85
	L _s (Etek)	375	37	11.90
DP5	L ₈ (Merkez)	175	15	42.00
	L ₁ (Kenar)	775	11	14.45
	L _s (Etek)	417	60	14.45

4.4 Çevresel Etkilere Dayanım Test Sonuçları

4.4.1 Su Absorbsiyonu Değerleri

DP1 (%7.86 E-camı), DP2 (%11.74 E-camı), DP3 (%15.57 E-camı), DP4 (%19.36 E-camı) ve DP5 (%23.11 E-camı) grubu deney numuneleri için yapılan su absorpsiyonu deneyi sonuçları Çizelge 4.23 ve Çizelge 4.24’de verilmiştir.

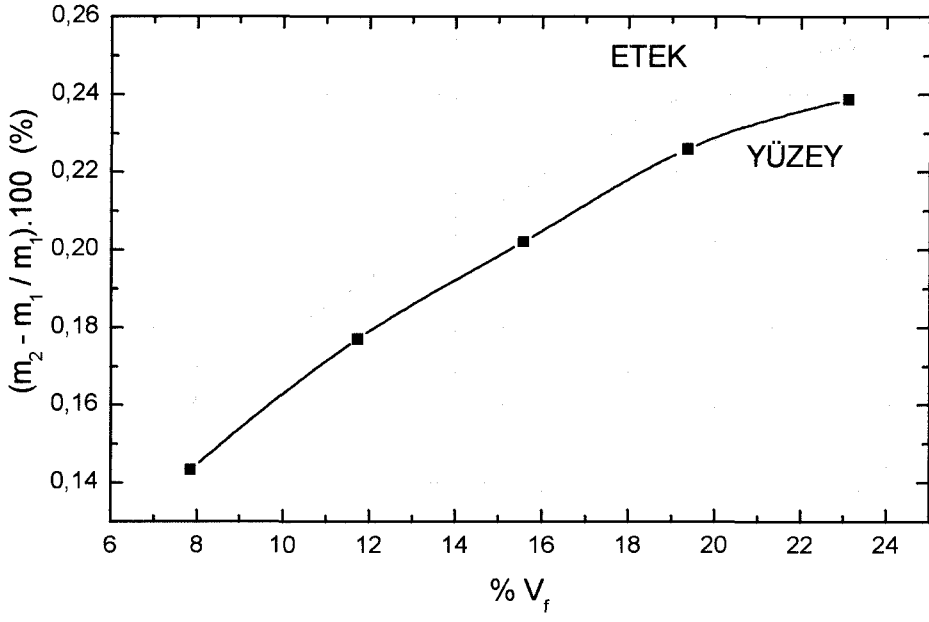
Bu değerler grafik olarak sırası ile su absorpsiyonu değerinin cam fiber hacim oranları ile değişimi Şekil 4.33’de, çözünen madde miktarı değerinin cam fiber hacim oranları ile değişimi Şekil 4.34’de gösterilmiştir.

Plakaların yüzeyinden ve etekten alınan numuneler için ayrı ayrı hesaplanan su absorpsiyonu değerlerinin cam fiber hacim oranı artışı ile arttığı Şekil 4.33’de görülmektedir. Cam fiber hacim oranı arttıkça cam fiberlerin biraz oynaması ile boşluk yapmakta ve su absorpsiyonu artmaktadır. Cam fiber hacim oranı azaldığında ise dolgu maddesi olarak kullanılan kalsit’in hacim oranı artmakta ve su absorpsiyonu değerleri düşmektedir. Çünkü kalsitin su absorpsiyonunu artırıcı etkisi uygun bir reçine seçilerek minimize edilmiştir. Ayrıca, tüm deney grupları için su absorpsiyonu değerinin etekte biraz daha yüksek (%0.1617-%0.2527), yüzeyde biraz daha düşük (%0.1434-%0.2387) olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni etekte cam fiber oranının az olmasıdır.

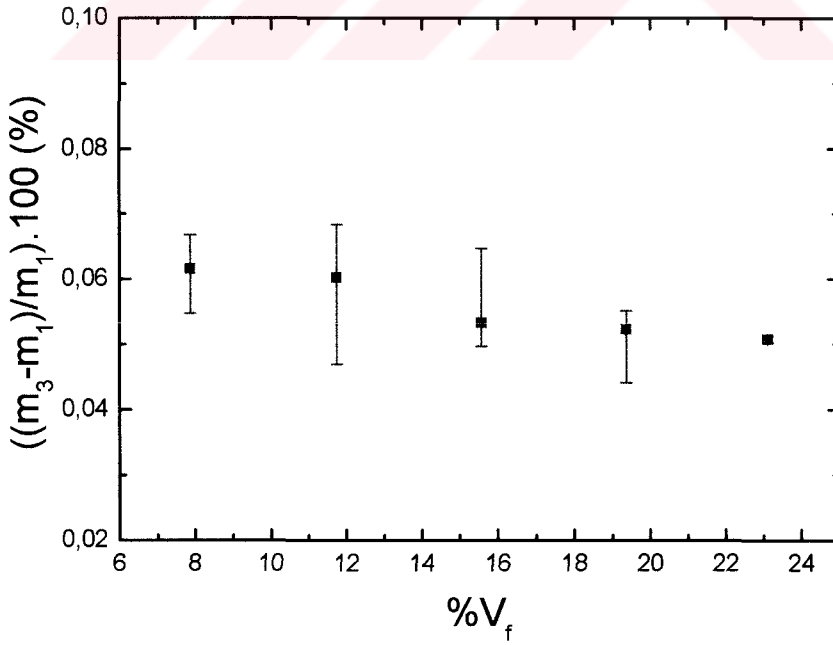
Yüzey ve etek numuneleri için ayrı ayrı hesaplanan çözünen madde miktarı değerlerinin cam fiber hacim oranlarına göre %0.0508-%0.0658 arasında yok denecek kadar az bir değişim gösterdiği Şekil 4.34’den görülmektedir.

Çizelge 4.23 Yüzey numuneleri için su absorpsiyonu deneyi sonuçları.

Yüzey Numune No	Boyutlar (mm)			Ağırlıklar (gr)		m ₂ -m ₁ (gr)	m ₃ (gr)	m ₃ -m ₁ (gr)	$\frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100$ (%)	$\frac{m_3 - m_1}{m_1} \cdot 100$ (%)
	a	B	h	m ₁	m ₂					
DP1-3 M ₁ M ₂ M ₃ M ₄	18.10	18.11	3.37	1.9928	1.9956	0.0028	1.9915	0.0013	0.1405	0.0652
	18.06	18.12	3.50	2.0072	2.0108	0.0036	2.0061	0.0011	0.1793	0.0548
	18.07	18.12	3.43	2.0092	2.0120	0.0028	2.0080	0.0012	0.1393	0.0597
	18.13	18.15	3.53	2.0938	2.0962	0.0024	2.0924	0.0014	0.1146	0.0668
DP2-3 M ₂ M ₆ M ₈ M ₁₃	17.13	17.28	3.41	1.9038	1.9072	0.0034	1.9025	0.0013	0.1785	0.0682
	17.12	17.23	3.44	1.9040	1.9070	0.0030	1.9029	0.0011	0.1575	0.0577
	17.21	17.23	3.59	1.9140	1.9174	0.0034	1.9131	0.0009	0.1776	0.0470
	17.10	17.23	3.58	1.9004	1.9041	0.0037	1.8991	0.0013	0.1946	0.0684
DP3-3 M ₉ M ₁₀ M ₁₁ M ₁₃	18.14	18.23	3.96	2.0090	2.0127	0.0037	2.0080	0.0010	0.1941	0.0497
	18.07	18.11	3.83	2.0072	2.0110	0.0038	2.0059	0.0013	0.1993	0.0647
	18.14	18.25	3.91	2.0092	2.0131	0.0039	2.0082	0.0010	0.2041	0.0497
	18.12	18.20	3.88	2.0080	2.0119	0.0039	2.0070	0.0010	0.2042	0.0498
DP4-3 M ₁ M ₂ M ₃ M ₉	17.66	17.67	3.12	1.8104	1.8143	0.0039	1.8094	0.0010	0.2254	0.0552
	17.66	17.68	3.20	1.8123	1.8162	0.0039	1.8113	0.0010	0.2251	0.0551
	17.67	17.73	3.36	1.8152	1.8190	0.0038	1.8142	0.0010	0.2193	0.0550
	17.17	17.20	3.34	1.8125	1.8167	0.0042	1.8117	0.0008	0.2317	0.0441
DP5-3 M ₁ M ₃ M ₉ M ₁₁	17.45	17.58	3.81	1.9481	1.9526	0.0045	1.9471	0.0010	0.2259	0.0523
	17.53	17.55	3.84	1.9498	1.9543	0.0045	1.9488	0.0010	0.2309	0.0513
	17.38	17.40	3.97	1.9876	1.9922	0.0046	1.9866	0.0010	0.2314	0.0503
	17.40	17.45	3.94	1.9735	1.9779	0.0044	1.9725	0.0010	0.2295	0.0506
						0.0045		0.0010	0.2387	0.0508



Şekil 4.33 Su absorpsiyonu değerinin cam fiber hacim oranları ile değişimi.



Şekil 4.34 Çözünen madde miktarı değerinin cam fiber hacim oranları ile değişimi.

4.4.2 Ultraviyole Işınlarnının Mekanik Özelliklere Etkisi

DP1 (%7.86 E-camı), DP2 (%11.74 E-camı), DP3 (%15.57 E-camı), DP4 (%19.36 E-camı) ve DP5 (%23.11 E-camı) grubu çekme deneyi numunelerine uygulanan UV deneyi sonuçları Çizelge 4.25, Çizelge 4.26, Çizelge 4.27 ve Çizelge 4.28’de, darbe deneyi numunelerine uygulanan UV deneyi sonuçları Çizelge 4.29, Çizelge 4.30, Çizelge 4.31 ve Çizelge 4.32’de, eğme deneyi numunelerine uygulanan UV deneyi sonuçları Çizelge 4.33, Çizelge 4.34, Çizelge 4.35 ve Çizelge 4.36’da verilmiştir.

Bu değerler grafik olarak sırası ile UV deneyi uygulanan numuneler için çekme dayanımının cam fiber hacim oranları ile değişimi Şekil 4.35’de, UV deneyi uygulanan numuneler için darbe dayanımının cam fiber hacim oranları ile değişimi Şekil 4.36’da, UV deneyi uygulanan numuneler için eğme dayanımının cam fiber hacim oranları ile değişimi Şekil 4.37’de gösterilmiştir.

Ultraviyole ışınlarına maruz bırakılan çekme numunelerinin 175 saat, 350 saat ve 700 saat sonunda çekme deneyleri yapılarak çekme dayanımı (σ_{max}) değerleri MPa cinsinden hesaplanmıştır. Şekil 4.35’de görüldüğü gibi toplam 700 saat sonunda çekme dayanımı değerlerinde yaklaşık %20-%33 arasında düşme gözlenmiştir.

Ultraviyole ışınlarına maruz bırakılan darbe numunelerinin 175, 350 ve 700 saat sonunda darbe deneyleri yapılarak darbe dayanımı (a_{ou}) değerleri kJ/m^2 cinsinden hesaplanmıştır. Şekil 4.36’da görüldüğü gibi toplam 700 saat sonunda darbe dayanımı değerlerinde yaklaşık %16-%46 arasında düşme gözlenmiştir. Ultraviyole ışınlarına maruz bırakılan eğme numunelerinin de 175, 350 ve 700 saat sonunda eğme deneyleri yapılarak eğme dayanımı (σ_f) değerleri MPa cinsinden hesaplanmıştır. Şekil 4.37’de görüldüğü gibi toplam 700 saat sonunda eğme dayanımı değerlerinde yaklaşık %9-%21 arasında düşme gözlenmiştir. Ayrıca bütün numunelerde renk değişimi gözlenmemiştir.

Dayanım değerlerindeki düşme güneş ışınlarının polimer malzemeler üzerindeki hasar etkisinden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.25 UV deneyi uygulanan numunelerin çekme deneyi sonuçları (kontrol grubu için).

Numune No	Boyutlar (mm)		Max. Yük. F_{max} (N)	Çekme Dayanımı σ_{max} (MPa)
	b	h		
DP ₁	10.20	3.30	740	21.9845
DP ₂	10.20	3.30	830	24.6583
DP ₃	10.20	3.30	930	27.6292
DP ₄	10.20	3.30	1500	44.5632
DP ₅	10.20	3.30	2450	72.7866

Çizelge 4.26 175 saat için çekme deneyi sonuçları.

Numune No	Boyutlar (mm)		Max. Yük. F_{max} (N)	Çekme Dayanımı σ_{max} (MPa)
	b	h		
DP ₁	10.38	3.50	700	19.2678
DP ₂	10.45	3.72	850	21.8655
DP ₃	10.35	3.62	950	25.3556
DP ₄	10.32	3.24	1400	41.8700
DP ₅	10.08	3.96	2680	67.1396

Çizelge 4.27 350 saat için çekme deneyi sonuçları.

Numune No	Boyutlar (mm)		Max. Yük. F_{max} (N)	Çekme Dayanımı σ_{max} (MPa)
	B	h		
DP ₁	10.28	3.35	580	16.8418
DP ₂	10.30	3.35	650	18.8378
DP ₃	10.35	3.14	750	23.0776
DP ₄	10.10	2.86	1100	38.0807
DP ₅	9.97	3.81	2300	60.5491

Çizelge 4.28 700 saat için çekme deneyi sonuçları.

Numune No	Boyutlar (mm)		Max. Yük. F_{max} (N)	Çekme Dayanımı σ_{max} (MPa)
	B	h		
DP ₁	10.19	3.83	550	14.0925
DP ₂	10.40	3.60	615	16.4262
DP ₃	10.10	3.43	745	21.5050
DP ₄	10.26	3.56	1280	35.0439
DP ₅	10.23	3.74	2150	56.1941

Çizelge 4.29 UV deneyi uygulanan numunelerin darbe deneyi sonuçları (kontrol grubu için).

Numune No	Boyutlar (mm)		Kırma Enerjisi W(J)	Darbe Dayanımı a_{ou} (kJ/m ²)
	b	h		
DP ₁	9.10	3.50	0.422	13.2496
DP ₂	8.20	3.50	0.525	18.2926
DP ₃	8.30	3.10	0.658	25.5732
DP ₄	8.50	3.60	1.259	41.1437
DP ₅	9.20	3.80	1.961	56.0926

Çizelge 4.30 175 saat için darbe deneyi sonuçları.

Numune No	Boyutlar (mm)		Kırma Enerjisi W(J)	Darbe Dayanımı a_{ou} (kJ/m ²)
	B	h		
DP ₁	9.16	3.33	0.362	11.8677
DP ₂	8.09	3.34	0.405	14.9885
DP ₃	8.51	3.64	0.728	23.5017
DP ₄	8.30	3.28	1.081	39.7076
DP ₅	9.20	3.80	1.873	53.5755

Çizelge 4.31 350 saat için darbe deneyi sonuçları.

Numune No	Boyutlar (mm)		Kırma Enerjisi W(J)	Darbe Dayanımı a_{ou} (kJ/m ²)
	B	h		
DP ₁	9.27	3.53	0.298	9.1067
DP ₂	8.21	3.57	0.375	12.7943
DP ₃	8.36	3.07	0.510	19.8712
DP ₄	8.50	3.66	1.141	36.6763
DP ₅	9.21	3.85	1.760	49.6354

Çizelge 4.32 700 saat için darbe deneyi sonuçları.

Numune No	Boyutlar (mm)		Kırma Enerjisi W(J)	Darbe Dayanımı a_{ou} (kJ/m ²)
	B	h		
DP ₁	9.19	3.34	0.215	7.0044
DP ₂	8.26	3.57	0.285	10.1183
DP ₃	8.50	3.60	0.520	16.9934
DP ₄	8.40	3.81	1.088	33.9957
DP ₅	9.18	3.76	1.650	47.8028

Çizelge 4.33 UV deneyi uygulanan numunelerin eğme deneyi sonuçları (kontrol grubu için).

Numune No	Boyutlar (mm)		Destekler Arası Açıklık (l)	Max. Yük. F_{max} (N)	Eğme Dayanımı σ_f (MPa)
	b	h			
DP ₁	10.30	3.50	60	113	80.6023
DP ₂	10.40	3.70	60	140	88.4980
DP ₃	10.30	3.20	60	118	100.6902
DP ₄	10.30	3.60	60	174	117.3139
DP ₅	10.10	3.90	60	300	175.7572

Çizelge 4.34 175 saat için eğme deneyi sonuçları.

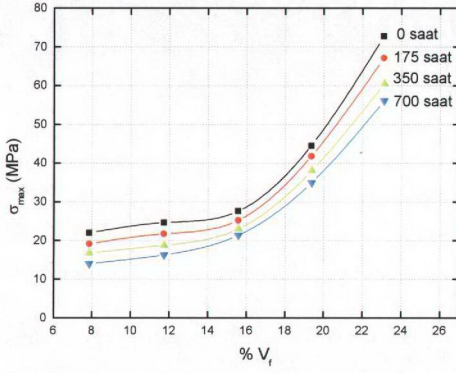
Numune No	Boyutlar (mm)		Destekler Arası Açıklık (l)	Max. Yük. F_{max} (N)	Eğme Dayanımı σ_f (MPa)
	b	h			
DP ₁	10.38	3.50	60	105	74.3187
DP ₂	10.45	3.72	60	134	83.3959
DP ₃	10.32	3.24	60	116	96.3675
DP ₄	10.35	3.62	60	166	110.1521
DP ₅	10.00	3.96	60	298	171.0284

Çizelge 4.35 350 saat için eğme deneyi sonuçları.

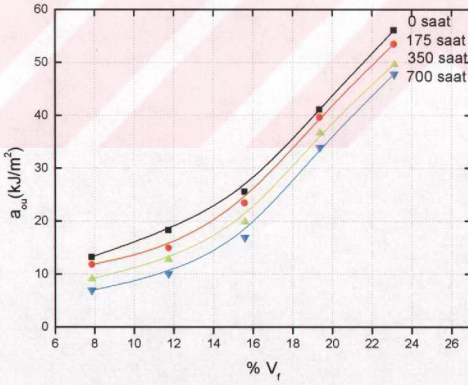
Numune No	Boyutlar (mm)		Destekler Arası Açıklık (l)	Max. Yük. F_{max} (N)	Eğme Dayanımı σ_f (MPa)
	b	h			
DP ₁	9.18	3.27	60	76	69.6815
DP ₂	8.09	3.55	60	90	79.4474
DP ₃	8.37	3.27	60	93	93.5199
DP ₄	8.48	3.61	60	127	103.4274
DP ₅	8.16	3.98	60	237	165.0192

Çizelge 4.36 700 saat için eğme deneyi sonuçları.

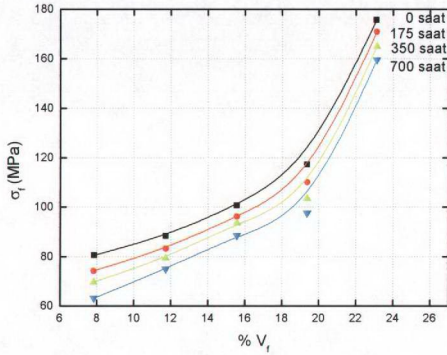
Numune No	Boyutlar (mm)		Destekler Arası Açıklık (l)	Max. Yük. F_{max} (N)	Eğme Dayanımı σ_f (MPa)
	b	h			
DP ₁	9.18	3.52	60	80	63.3001
DP ₂	8.23	3.62	60	90	75.1048
DP ₃	8.44	3.83	60	122	88.6874
DP ₄	8.22	4.07	60	148	97.8235
DP ₅	9.18	4.01	60	262	159.7395



Şekil 4.35 UV deneyi uygulanan numuneler için çekme dayanımının cam fiber hacim oranları ile değişimi.



Şekil 4.36 UV deneyi uygulanan numuneler için darbe dayanımının cam fiber hacim oranları ile değişimi.



Şekil 4.37 UV deneyi uygulanan numuneler için eğme dayanımının cam fiber hacim oranları ile değişimi.

4.4.3 Yüksek Sıcaklık Özellikleri

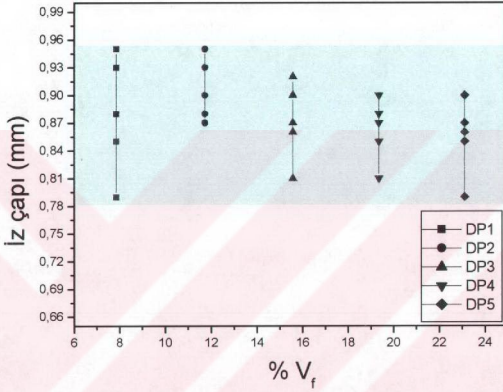
Yüksek sıcaklık özellikleri; alev almaya karşı dayanıklılık ve formunu koruyabilecek sıcaklıklardır.

4.4.3.1 Bilya-Basınç Deneyi Sonuçları:

DP1 (%7.86 E-camı), DP2 (%11.74 E-camı), DP3 (%15.57 E-camı), DP4 (%19.36 E-camı) ve DP5 (%23.11 E-camı) grubu deney numuneleri için $125 \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıkta uygulanan bilya-basınç deneyi sonucu ölçülen iz çapı değerleri Çizelge 4.37'de verilmiştir. İz çapının cam fiber hacim oranları ile değişimi grafik olarak Şekil 4.38'de gösterilmiştir. İz çapı değerlerinin tüm deney grupları için 0.79 mm ile 0.95 mm arasında çok az değişim gösterdiği gözlenmiştir. Merkez, kenar ve etekte farklılık görülmemiştir. Sonuçlar SMC kompozitinin ısıya dayanıklılığının yüksek olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.37 Bilya-basınç deneyi sonucu ölçülen iz çapı değerleri.

Numune No	İz Çapı (mm)				
DP1	0.88	0.93	0.79	0.85	0.95
DP2	0.90	0.87	0.95	0.88	0.93
DP3	0.81	0.87	0.86	0.90	0.92
DP4	0.88	0.85	0.81	0.87	0.90
DP5	0.90	0.86	0.87	0.79	0.85



Şekil 4.38 İz çapının cam fiber hacim oranları ile değişimi ((□: DP1 için iz çapı, ○: DP2 için iz çapı, △: DP3 için iz çapı, ▽: DP4 için iz çapı, ◇: DP5 için iz çapı).

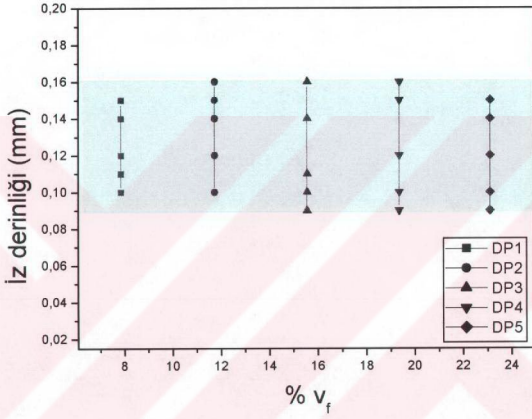
4.4.3.2 Alev Deneyi Sonuçları:

DP1 (%7.86 E-camı), DP2 (%11.74 E-camı), DP3 (%15.57 E-camı), DP4 (%19.36 E-camı) ve DP5 (%23.11 E-camı) grubu deney numuneleri için yapılan alev deneyi sonucu ölçülen iz derinliği değerleri Çizelge 4.38’de verilmiştir.

İz derinliğinin cam fiber hacim oranları ile değişimi grafik olarak Şekil 4.39’da gösterilmiştir. İz derinliği değerlerinin tüm deney grupları için 0.09 mm ile 0.16 mm arasında çok az değişim gösterdiği gözlenmiştir. Merkez, kenar ve etekte farklılık görülmemiştir. Bu deneyin sonuçları da SMC kompozitinin ısıya dayanıklılığının yüksek olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.38 Alev deneyi sonucu ölçülen iz derinliği değerleri.

Numune No	İz Derinliği (mm)				
DP1	0.10	0.14	0.11	0.15	0.12
DP2	0.12	0.10	0.15	0.16	0.14
DP3	0.09	0.14	0.16	0.10	0.11
DP4	0.10	0.12	0.15	0.09	0.16
DP5	0.12	0.09	0.15	0.10	0.14



Şekil 4.39 İz derinliğinin cam fiber hacim oranları ile değişimi (□: DP1 için iz derinliği, ○: DP2 için iz derinliği, △: DP3 için iz derinliği, ▽: DP4 için iz derinliği, ◇: DP5 için iz derinliği).

5. SONUÇLARIN İRDELENMESİ

Bu çalışmada SMC kompozit üretim yöntemi ile imal edilen 5 ayrı bileşimdeki kompozit plakalar yoğunluk, mekanik özellikler ve çevresel etkilere dayanım açısından incelenmiştir. Optimum SMC levha kalıp bileşimini belirleyebilmek için, SMC'nin üç bileşeninden matris olarak kullanılan ortoftalik polyester reçine hacim oranı sabit tutularak, dolgu maddesi olarak kullanılan CaCO_3 (kalsit) ve fiber olarak kullanılan E-camının hacim oranları değiştirilmiş ve E-camı cinsinden %7.86, %11.74, %15.57, %19.36 ve %23.11 E-camı içeren 5 ayrı bileşimde plaka imal edilerek deneyler yapılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular aşağıda irdelenmiştir.

5.1 Yoğunluk Özellikleri

SMC kompozit plakaları yoğunluk açısından incelendiğinde; bileşimdeki cam fiber hacim oranının artışı ile SMC kompozit malzemesinin yoğunluğunun azaldığı saptanmıştır. Bunun nedeni camın özgül ağırlığının düşük olmasıdır. Bu sonuç aynı zamanda cam fiber takviyesi hacim oranı arttıkça daha hafif SMC kompozit parça üretilebileceğini göstermektedir. SMC kompoziti anizotropik yani fiziksel özellikleri her ölçüm yönünde farklı bir malzeme olduğundan yoğunluğun plakanın merkezinde daha fazla (%7.86-%23.11 E-camına göre $1.8228 \text{ gr/cm}^3 - 1.6580 \text{ gr/cm}^3$), kenarda (%7.86-%23.11 E-camına göre $1.7553 \text{ gr/cm}^3 - 1.6009 \text{ gr/cm}^3$) ve etekte (%7.86-%23.11 E-camına göre $1.7553 \text{ gr/cm}^3 - 1.5920 \text{ gr/cm}^3$) daha az olduğu belirlenmiştir. Bu farklılığın nedeni, cam fiber dağılımının plakanın merkezinde daha fazla yoğunlukta, kenar ve etek bölgelerinde daha az yoğunlukta olması yani plaka içinde E-camı dağılımındaki heterojenliktir.

5.2 Mekanik Özellikler

Bu çalışma kapsamında, mekanik dayanım açısından darbe dayanımı, eğme dayanımı, çekme dayanımı değerleri incelenmiştir. Cam fiber hacim oranı arttıkça darbe dayanımı, eğme dayanımı ve çekme dayanımının arttığı görülmüştür. Darbe dayanımı ve eğme dayanımı değerleri fiber dağılımının yoğun olduğu plakanın merkezinde daha yüksek, fiber erişiminin yetersiz olduğu kenar ve etekte daha düşük çıkmıştır. Darbe dayanımının merkezde (%7.86-%23.11 E-camına göre $24.8864 \text{ kJ/m}^2 - 60.37 \text{ kJ/m}^2$) yüksek, kenarda (%7.86-%23.11 E-camına göre $21.5628 \text{ kJ/m}^2 - 48.6123 \text{ kJ/m}^2$) ve etekte (%7.86-%23.11 E-camına göre $17.8041 \text{ kJ/m}^2 - 36.6458 \text{ kJ/m}^2$) düşük olduğu saptanmıştır. Eğme dayanımının merkezde (%7.86-%23.11 E-camına göre $65.6963 \text{ MPa} - 155.9327 \text{ MPa}$) yüksek, etekte (%7.86-%23.11 E-camına göre $60.7472 \text{ MPa} - 132.8951 \text{ MPa}$) ve kenarda (%7.86-%23.11 E-camına

göre 54.3363 MPa - 114.0826 MPa) düşük olduğu saptanmıştır. Çekme dayanımının ise yine anizotropik malzeme özelliğinden dolayı, etekte (%7.86-%23.11 E-camına göre 22.5297 MPa – 56.8135 MPa) ve enine doğrultuda (%7.86-%23.11 E-camına göre 19.1745 MPa – 54.9804 MPa) daha yüksek, boyuna doğrultuda (%7.86-%23.11 E-camına göre 15.9955 MPa – 46.6743 MPa) daha düşük olduğu görülmüştür.

Marissen ve Linsen (1999) araştırmaları için doymamış polyester reçine, %45 hacim oranında gelişigüzel dağılmış cam fiberler ve dolgu malzemeleri içeren ticari yüksek performanslı SMC malzemesini seçmişlerdir. Araştırmacılar SMC levhasının 4 farklı bölgesinden aldıkları numunelerin 4 noktada eğme deneyi sonucunda inceledikleri SMC malzemesinin eğme dayanımının, numune genişliğinin en az 68 mm genişliğe kadar artması ile bir artış gösterdiğini tespit etmişlerdir. 10 mm genişliğindeki eğme numuneleri için ortalama eğme dayanımı değerlerini 275 MPa – 180 MPa arasında elde etmişlerdir ve son zamanlarda artırılmış cam fiber oranı ile daha iyi mekanik özellikler gösteren yeni SMC kompozit tipleri geliştirildiğini ve yük taşıyan yapılarda büyük ölçüde kullanılmakta olduğunu açıklamışlardır. Bu çalışmada ise, %23.11 cam fiber içeren SMC malzemesinin merkez ve kenar bölgelerden alınan 10 mm genişliğindeki eğme numunelerinin eğme deneyi sonucundaki ortalama eğme gerilmesi değerleri 155 MPa – 114 MPa arasındadır. Aradaki farkın nedeni bileşimdeki cam fiber hacim oranının bizim çalışmamızda daha az olmasıdır.

Ünal (2001) Sınıf A yüzeyi gibi özel uygulamalarda kullanılan SMC bileşimini %33-42 hacim oranında polyester reçine, %18-30 hacim oranında cam fiber, %29-39 hacim oranında dolgu maddesi ve %6-8 hacim oranında diğer katkıları olarak vermiştir. Polyesterin çekme payını azaltmak ve estetik yüzeyler üretmek için polivinil asetat, poliüretan, doymuş polyester gibi termoplastiklerin ilave edildiği düşük profil katkıları, %25 cam fiber içeren Sınıf A bileşimindeki SMC (UP GF 25) mekanik özelliklerini; çekme dayanımı 65 – 80 MPa, eğme dayanımı 155 – 200 MPa, darbe dayanımı 60 – 90 kJ/m² olarak belirtmiştir. Bizim çalışmamızdaki SMC bileşiminde polyester hacim oranı %40 olarak sabit tutulurken cam fiber %7.86-%23.11 arasında, dolgu maddesi %40.95-%26.74 arasında değiştirilmiş ve diğer katkıları %10 hacim oranında ilave edilmiştir. Bu çalışmada, %19.36 cam fiber içeren SMC'nin mekanik özellikleri; ortalama çekme dayanımı 37-43 MPa, ortalama eğme dayanımı 98-130 MPa, ortalama darbe dayanımı 38-45 kJ/m² olarak elde edilmiştir. SMC malzemesinin bileşimi, ürünün niteliklerine ve kullanım yerine uyacak şekilde değiştirilebilmektedir. Buna bağlı olarak mekanik özellikler, işlenebilirlik ve yüzey kalitesi değişir. Mekanik özellikler arasında biraz fark olması bu nedenledir.

Fernberg ve Berglund (2001) çalışmalarında %20 hacim oranında E-camı takviyeli iki SMC malzemesinin ortalama kırılma özelliklerini standart SMC için 25.9 kJ/m^2 ve düşük yoğunluk-yüksek eğmeli SMC için 56 kJ/m^2 olarak elde etmişlerdir. Bizim çalışmamızda %19.36 E-camına göre ortalama darbe dayanımı değerleri levhanın merkezinde 45.33 kJ/m^2 , kenar bölgesinde 37.93 kJ/m^2 olarak elde edilmiştir.

Smith ve Good (1996) araştırmalarında %39.4 yeniden işlenmiş polietilen teraftalat ile birleştirilmiş doymamış polyester, %29-31 cam fiber, %15.8 düşük profil katkısı içeren yüksek kaliteli SMC sistemlerinin mekanik dayanımlarını matris malzemesi propilen maleik reçine olan standart Class-A kozmetik SMC sistemi ile karşılaştırmışlardır. Çekme dayanımlarını birinci malzemede düşük profil katkısı polivinil asetat olduğunda 86.175 MPa , doymuş polyester olduğunda 108.235 MPa , poliüretan olduğunda 101.341 MPa elde etmişlerdir. Standart Class-A SMC sisteminde çekme dayanımının 72.180 MPa olduğunu belirtmişlerdir. Eğme dayanımlarının birinci malzemede yine düşük profil katkısına göre sırası ile 238.311 MPa , 185.103 MPa , 198.547 MPa elde etmişlerdir. Standart Class-A SMC sisteminde eğme dayanımının 149.875 MPa olduğunu belirtmişlerdir. Bizim çalışmamızda ortalama çekme dayanımı değerleri %23.11 E-camına göre enine doğrultuda 59.9804 MPa , boyuna doğrultuda 46.6743 MPa , ortalama eğme dayanımı değerleri %23.11 E-camına göre merkezde 155.9327 MPa , kenarda 114.0826 MPa olarak elde edilmiştir. Daha önce belirtildiği gibi, SMC kompozit bileşimini oluşturan bileşenlerin türleri ve oranları değiştikçe mekanik özellikleri, işlenebilirliği ve yüzey kalitesi de değişmektedir. Sonuçların biraz farklı olması bu nedenledir.

5.3 Mikroyapısal Karakteristikler

Bütün deney grupları için deney yapılmış numunelerin kırık yüzeyleri ve düzgün yüzeyleri tarama elektron mikroskobu ile incelendiğinde; SMC kompozit bileşimindeki cam fiber ve kalsit beyaz, polyester gri, boşluklar yani kalsitin yada fiberin kırılma esnasında yerinden sıyrılarak çıkmasından oluşan yada fiberlerin kenara doğru geldikçe yığılmasından oluşan boşluklar siyah renkli olarak görünmüştür. Cam fiber dağılımının levhanın merkezinde daha fazla oranda, kenar bölgelerde ise daha az oranda olduğu gözlenmiştir. Bu durum SMC kompozitinin anizotropik malzeme olmasından kaynaklanmaktadır ve levhanın her bölgesi için malzeme özellikleri ile ilgili farklı deney sonuçları alınmasına sebep olmaktadır. Mekanik özellikler ile ilgili elde ettiğimiz sonuçlara göre darbe ve eğme dayanımının levhanın merkezinde yüksek, kenar ve etek bölgelerinde düşük olması, çekme dayanımının da enine

doğrultuda yüksek, boyuna doğrultuda düşük olması levha içinde E-camı dağılımındaki heterojenlik yüzündendir.

Yoğunluk özellikleri ile ilgili elde ettiğimiz sonuçlara göre cam fiber hacim oranı arttıkça yoğunluğun düştüğü, bununla birlikte merkezde cam fiber hacim oranının fazla ve yoğunluğun yüksek olduğu tespit edilmiştir. Merkezde böyle olmasının nedeni; mikroyapı görüntülerinden gözlemlendiği gibi kalsit oranının da fazla olması ve polyester matris oranının düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Polyester akıcılığı fazla olduğu için kenar bölgelere doğru akmaktadır. Kenarlarda polyester hacim oranı fazla, cam fiber ve kalsit oranı az olduğu için kenarlarda yoğunluk değerleri düşük çıkmıştır.

SMC kompozitinde polyester akıcı özellikte olduğundan boşluk oluşamaz. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde boşluk oranının çok az olduğu, bazı bölgelerde hiç olmadığı görülmektedir. Ancak fiber hacim oranı çok artarsa fiberlerin duruş pozisyonuna göre biraz boşluk oluşabilmektedir.

Mikroyapı görüntüleri üzerinde fiberlere ait olarak elde edilen sonuçlara göre fiberler arası mesafe ve fiberlerin yatay eksenle yaptığı açıların farklılık gösterdiği yani fiberlerin gelişigüzel dağılmış olduğu görünmektedir.

Fitoussi vd. (1998) SMC kompozitleri için mikroyapının çok kompleks ve bileşenlerinin geometrik dağılımının homojen olmadığını belirtmişlerdir. Çekme deneyleri sonuçlarının eğrilerini çıkarırken, bir bölgedeki dayanım değerlerinin bölgesel düzensiz değişimlerinin göz önüne alınmadığını ve hesaplanmış dayanım değerlerinin ortalamasının alındığını açıklamışlardır. Aynı şekilde bizim çalışmamızda da dayanım değerlerinin grafikleri çıkartılırken örneğin çekme deneyleri sonuçları için levhanın enine ve boyuna doğrultudaki bölgeler ile etek bölgelerinden alınan numunelerin hesaplanan çekme dayanımlarının ortalamaları alınmıştır.

5.4 Çevresel Etkilere Dayanım Kriterleri

Çevresel etkilere dayanım açısından ise, su absorpsiyonunun etkisi ve ultraviyole ışınlarının etkisi incelenmiştir. Cam fiber hacim oranı arttıkça su absorpsiyonunun arttığı belirlenmiştir. Vina vd. (1994) atmosfere maruz bırakılan SMC kompozit levhaların; matrisin içine yayılan, fiber/matris ara yüzeyine ulaşmaya son vererek kimyasal olarak cam fiberlere hücum eden suyu sürekli olarak absorbe ettiğini, bu şekilde polyester matrisin şişmesine ve plastikleşmesine, takviye edici fiberlerin zayıflamasına sebep olduğunun dolayısıyla direkt olarak fiberlere bağlı olan özelliklerde örneğin çekme özellikleri gibi mekanik özelliklerde bir

azalma gözlemlendiğini vurgulamışlardır. Camino vd. (1997) polyester reçine-cam fiber SMC kompozitlerinde su absorpsiyonunun, çekme özelliklerinden elastiklik modülünde %10-%35 arasında azalmaya sebep olduğunu saptamışlardır. Elde ettiğimiz deney sonuçlarına göre su absorpsiyonu değerleri etekte %7.86-%23.11 E-camina göre %0.1617-%0.2527 arasında ve yüzeyde %7.86-%23.11 E-camina göre %0.1434-%0.2387 arasında çok küçük oranlarda tespit edilmiştir. Bunun nedeni, CaCO_3 (kalsit) bileşeninin su absorpsiyonunu artırıcı etkisinin uygun bir reçine seçilerek azaltılmasıdır. Smith ve Good (1996) %39.4 yeniden işlenmiş polietilen teraftalat ile birleştirilmiş doymamış polyester, %29-31 cam fiber, %15.8 düşük profil katkısı içeren ve yüksek kaliteli otomotiv kompozitleri için uygun bir bileşim olduğu belirtilen SMC sistemlerinde 0.43-0.55 arasında değişen su absorpsiyon değerleri tespit etmişlerdir. Buna göre bizim elde ettiğimiz su absorpsiyonu değerleri SMC kompoziti için en uygun sonucu vermiştir.

Ultraviyole ışınlarına maruz bırakılan SMC kompozit numunelerinin mekanik dayanımlarında toplam 700 saat (5 ay) sonunda düşme görülmüştür. Çekme dayanımı değerlerinde %7.86-%23.11 E-camina göre %20-%33 arasında, darbe dayanımı değerlerinde %7.86-%23.11 E-camina göre %16-%46 arasında, eğme dayanımı değerlerinde %7.86-%23.11 E-camina göre %9-%21 arasında daha az oranda düşme tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar; cam fiber hacim oranı arttıkça mekanik dayanım değerlerinde daha fazla düşme olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni ultraviyole ışınlarının polimer malzemeler üzerindeki hasar etkisidir. Vina vd. (1994) yaptıkları çalışmada benzer sonuçlara ulaşmışlardır ve güneş radyasyonunun plastikler ve diğer organik cisimlerdeki ana polimer bağlarının makromoleküllerinin ester gruplarını koparmak için ve havadaki oksijenle reaksiyona girmek için yeterli enerji olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar, %58.6 hacim oranında doymamış polyester reçine, %6.4 hacim oranında CaCO_3 dolgu maddesi, %35 hacim oranında gelişigüzel dağılmış kısa E-cami fiberleri içeren SMC-35 levhalarının mekanik özelliklerini başlangıçta ve atmosfere maruz bıraktıktan sonra belirli sürelerde ölçmüşler ve 6 ay sonunda çekme dayanımının 120 MPa'dan 89 MPa değerine %26 oranında düştüğünü ve çekme dayanımının çok etkilenen bir mekanik özellik olduğunu vurgulamışlardır. Bizim çalışmamızda ise 700 saat (5 ay) ultraviyole ışınlarına maruz bırakmadan sonra %23.11 E-camina göre çekme dayanımında %33 oranında bir azalma görülmüştür. Sonuçlar arasında biraz farklılık olması, malzeme bileşimindeki oranların farklılığından kaynaklanmaktadır.

Literatürlere göre, ultraviyolenin zararlı etkilerinden yıpranma derecesi ultraviyole ışınların dalga uzunluğu, radyasyon şiddeti, polimerin yapısı gibi faktörlere bağlıdır. Polimerlerin

yüksek sıcaklıkta ultraviyole ışınlarına tabi tutulması fotoliz (ışık ile çözünme) denilen depolimerizasyon olayına neden olmaktadır. Güneşten gelen değişik dalga boylu ışınlardan dalga boyu büyük olanlar, taşıdıkları enerji nedeniyle, malzeme bünyesinde ısınmaya neden olmaktadır. Dalga boyu küçük olanlar ise polimer malzeme üzerinde yapısal değişiklikler meydana getirmektedirler.

5.5 Yüksek Sıcaklık Özellikleri

Yüksek sıcaklık özellikleri; alev almaya karşı dayanıklılık ve formunu koruyabilecek sıcaklıklardır. SMC kompozit plakalar üzerinde uygulanan $125 \pm 5^\circ\text{C}$ gibi yüksek sıcaklıkta, çelik bir bilya ile 20 N'luk bir kuvvet etkisi altında 1 saat beklenerek yapılan bilya-basınç deneyi sonucunda çok küçük boyutlarda (%7.86-%23.11 E-camına göre 0.79 mm - 0.95 mm) iz çapı olduğu görülmüştür. Ayrıca, 960°C sıcaklığa kadar elektrik direnci ile ısıtılmış bir tel ile 30 saniye 2 N'luk bir kuvvet etkisi altında yapılan alev deneyi sonucunda da çok küçük boyutlarda (%7.86-%23.11 E-camına göre 0.09 mm – 0.16 mm) iz derinliği olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre literatürlerde belirtildiği gibi SMC kompozitinin plastikler arasında ısıya dayanıklılığı en yüksek malzemelerden birisi olduğu doğrulanmaktadır.

6. GENEL SONUÇ

1. SMC kompozit plakaların üretiminde optimum hazır kalıp bileşimini belirleyerek, ürünün niteliklerine ve kullanım yerine uyacak şekilde bileşimi değiştirme olanağı vardır.
 2. Mukavemet artırıcı özelliğe sahip olan takviye edici cam fiberlerin hacim oranı artışı ile SMC kompozitinin yoğunluğunun azalması ve mekanik dayanımlarının artması, hafiflik ve yüksek mekanik dayanımı bir arada sağlayabilmektedir.
 3. Takviye malzemesi cam fiberlerin dağılımının SMC kompozit plakaların merkezinde daha fazla olması ve kenarlara doğru gidildikçe azalması; yoğunluk ve mekanik özelliklerin merkezde yüksek, kenarlarda düşük çıkmasına sebep olmaktadır. Bu da anizotropik malzeme özelliğidir.
 4. Dış ortamda kullanılan malzemeler; yağış, güneş, bağıl nem ve sıcaklık gibi atmosferik olayların sonucunda zaman içinde bir hasara uğrayabilirler. Ultraviyole ışınlarına maruz kalan SMC kompozit malzemesinin takviye edici cam fiber hacim oranı arttıkça mekanik dayanım değerlerinde düşme görülmektedir. Dayanım değerlerindeki düşme güneş ışınlarının polimer malzemeler üzerindeki hasar etkisinden kaynaklanmaktadır.
- SMC kompozit malzemesinin cam fiber hacim oranı arttıkça cam fiberlerin biraz oynaması ile boşluk yapmakta ve su absorpsiyonu değeri de artmaktadır. Su absorpsiyonu değerinin fazla olması halinde polyester matris malzemesi plastikleşmekte ve takviye edici cam fiberler zayıflamaktadır. Dolgu maddesi olarak kullanılan kalsit bileşeninin suyu emmesi nedeni ile kompozitin su absorpsiyonunu artırıcı bir etkisi vardır. Dolgu maddesinin bu olumsuz etkisi, uygun bir reçine seçilerek minimize edilmekte ve SMC kompozitinin su absorpsiyonunun fazla oranda artışı engellenmektedir.
5. Yüksek sıcaklıkta ve belirli bir kuvvet etkisi altında yapılan deney sonuçlarına göre SMC kompoziti plastikler arasında ısıya dayanıklılığı yüksek malzemelerden birisidir.
 6. Literatürlere göre son 12 yıldır dünyada başarılı uygulamaları olan ve bu çalışmada incelenen SMC kompozit ürününün hafiflik, mekanik, çevresel etkilere dayanım ve termik özellikleri, bileşimini üretilcek ürünün niteliklerine uyacak şekilde değiştirme olanağı gibi üstün özellikleri SMC'nin birçok sanayi dalında özellikle, elektrik sanayinde (şalterler, izolatörler, bara tutucuları ve çeşitli alet gövdeleri, kaideleri), otomotiv sanayinde (çeşitli karoser parçaları, far yuvaları, distribütör kapağı vs.), elektrikli ev aletleri (ütü, çamaşır makinası ve elektrik süpürgesi parçaları), büro makinaları (telex, yazı makinası, hesap

makinası parçaları ve gövdeleri) yapımında tercih edilmesini ve hızla yayılmasını sağlamıştır. SMC kompozit üretim yöntemi ile ilgili endüstriyel destekli böyle bir bilimsel çalışma, Türkiye’de ilk defa bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiş ve elde edilen deney sonuçlarının dünyada şimdiye kadar yapılmış çalışmalardan elde edilmiş bulgular ile uyum gösterdiği görülmüştür.

7. Sonuç olarak, Kimelsan LTD Şirketi ile ortaklaşa çalışmalar sonucu optimum bileşimi ve kalıplama koşulları belirlenerek üretilen SMC kompoziti, bu güne kadar kullanılmış olan klasik malzemelerden özellikle alüminyum yerine kullanılabilecek nitelikte bir malzeme olup öncelikle birim ağırlıktaki dayanımı alüminyumdan daha yüksektir. (alüminyumun yoğunluğu $d= 2.70 \text{ gr/cm}^3$, SMC kompozitinin yoğunluğu $d= 1.82 \text{ gr/cm}^3 - 1.60 \text{ gr/cm}^3$).

SMC’nin toplam parça maliyeti de alüminyumdan daha düşüktür. Daha önce yapılan çalışmalarda, Akermo ve Astrom (2000) basit ve orta büyüklükte parça üretimi için: SMC’nin toplam parça fiyatını 8 EURO, alüminyumun ise 18 EURO; karmaşık parça üretimi için: SMC’nin toplam parça fiyatını 160 EURO, alüminyumun ise 240 EURO; sandviç parça üretimi için: SMC-balsa kompozitinin toplam parça fiyatını 120 EURO, alüminyumun ise 230 EURO olarak belirtmişlerdir.

Ayrıca, Türkiye de ilk çalışma olması nedeniyle de Kimelsan LTD Şirketi tarafından patenti alınmıştır.

KAYNAKLAR

Akerm, M. ve Astrom, B. T., (2000), "Modelling Component Cost in Compression Moulding of Thermoplastic Composite and Sandwich Components", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31 (4): 319-333.

ASTM Designation: D 792-86, (1986), *Standart Test Methods for Specific Gravity (Relative Density) and Density of Plastics by Displacement*, July, 291-294.

ASTM Designation: D 638 M-89 Metric, (1989), *Standart Test Methods for Tensile Properties of Plastics (Metric)*, March, 169-177.

ASTM Designation: D 790 M-89 Metric, (1986), *Standart Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials (Metric)*, September, 282-290.

ASTM Designation: D 256-90 b, (1991), *Standart Test Methods for Impact Resistance of Plastics and Electrical Insulating Materials*, February, 58-74.

ASTM Designation: D 570-81 (Reapproved 1988), (1981), *Standart Test Method for Water Absorption of Plastics*, December, 139-141.

Brooke, L., (1994), "Arise, SMC Recycling", *Automotive Industries*, September, 64-66.

Camino, G., Polishchuk, A. Ya., Luda, M. P., Revellino, M., Blacan, R. ve Martinez-Vega, J. J., (1998), "Water Ageing of SMC Composite Materials: a Tool for Material Characterisation", *Polymer Degradation and Stability*, 61: 53-63.

Caprino, G. ve Santo, L., (1998), "Interpretation of Size Effect in Orthogonal Machining of Composite Materials. Part II. Sheet Moulding Compound", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29 (8): 893-897.

Castro, J. M. ve Tomlinson, G., (1990), "Predicting Molding Forces in SMC Compression Molding", *Polymer Engineering and Science*, 30 (24): 1568-1573.

Chan-Park, B. ve Mc Garry, J., (1996), "Tough Low Profile Additives in Sheet Molding Compound", *Polymer Composites*, 17 (4): 537-547.

DIN 53455, (1954), *Prüfung Von Kunststoffen Bestimmung Der Rohdicke*, September, 288-290.

DIN 53455, (1968), *Testing of Plastics Tensile Test*, April, 1-6.

DIN 53452, (1952), *Testing of Plastics Bending Test*, February, 1-3.

DIN 53453, (1965), *Testing of Plastics Impact Test*, October, 1-4.

Dwyer, J. F., Dulieu, Smith J. ve Stanley, P., (1996), "Predicting The Thermoelastic Response and Relevant Material Properties of SMC", *Journal of Materials Processing Technology*, 56 (1-4): 655-667.

ELECTRICITE DE FRANCE / CENTRE DE NORMALISATION, (1972), Electricity or gas meter boxes for individual houses, August, HN 62-S-15.

Fernberg, S. P. ve Berglund, L. A., (2001), "Bridging Law and Toughness Characterisation of CSM and SMC Composites", Composites Science and Technology, 61: 2445-2454.

Fitoussi, J., Guo, G. ve Baptiste, D., (1998), "A Statistical Micromechanical Model of Anisotropic Damage for SMC Composites", Composites Science and Technology, 58 (5): 759-763.

Garmendia, J., Olaizola, M., Etxeberria, I., Franco, J. C. ve Mondragon, I., (1995), "Influence of Processing and Testing Conditions on The Mechanical Behaviour of Sheet – Moulding Compound Laminates", Journal of Materials Science, 30 (20): 5287-5294.

Kia, Hamid G., (1993), Sheet Molding Compounds Science and Technology, Hanser Publishers, Munich, Vienna, New York, Barcelona.

Malaczynski, Gerard W. ve Cinpinski, Gerald J., (1996), "Selection of Adhesive System for Radio – Frequency Heating of Structural Sheet Molding Compound Components", Polymer Engineering and Science, 36 (1): 106-116.

Marissen, R. ve Linsen, J., (1999), "Variability of The Flexural Strength of Sheet Moulding Compound", Composites Science and Technology, 59 (14): 2093-2100.

Mei, T. ve Piggott M. R., (1996), "Mesostructure Development During Molding of Sheet Molding Compounds", Polymer Composites, 17 (14): 548-555.

Merle, G., Allemand, J., Camino, G., Luda, M. P., Revellino, M. ve Blancon R., (1998), "Morphology Analysis of Microvoids in SMC: Ageing Effect", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 29 A (12): 1535-1543.

Smith, Cynthia L. ve Good, Fred J., (1996), "Class A, Zero – Shrink SMC With Post – Consumer PET", Plastics Engineering, 52 (1): 27-28.

Torres, A., de Marco, I., Caballero, B. M., Laresgoiti, M. F., Legarreta, J. A., Cabrero, B. M., Gonzales, A., Chomon, M. J. ve Gondra, K., (2000), "Recycling by Pyrolysis of Thermoset Composites Characteristics of The Liquid and Gaseous Fuels Obtained", Fuel, 79 (8): 897-902.

TS 3860, (1983), Plastikler – Cam Lifle Pekiştirilmiş Malzemelerde Çekme Özelliklerinin Tayini, Türk Standartları, Temmuz, 1-7.

TS 4650 – 2, ISO 3597 – 2, (1997), Plastikler Cam Elyaf Takviyeli – Filtre Takviye Edilmiş Reçine Çubukların Mekanik Özelliklerinin Tayini – Bölüm 2: Eğilme Mukavemetinin Tayini, Türk Standardı, Şubat, 1-3.

TS 702, (1969), Plastikler Su Absorpsiyonu Tayini, Türk Standartları, Şubat, 1-2.

Twu, J. T., Hill, R. R., Wang, T. J. ve Lee, L. James, (1993), "Numerical Simulation of Non – Isothermal SMC Molding", Polymer Composites, 14 (6): 503-514.

Twu, J. T. ve Lee, L. James, (1994), "Simulation – Based Desing of SMC Compression Molding", Polymer Composites, 15 (5): 313-326.

Twu, J. T. ve Lee, L. James, (1995), "Application of Artificial Neural Networks for The Optimal Desing of SMC Compression Molding", Polymer Composites, 16 (5): 400-408.

Uddin, M. Nasim, Mohiuddin, Gulam ve Duley, Walter W., (1997), "Laser Surface Engineering of Automotive Components", Plastics Engineering, 35-37.

Ünal, A., (2001), SMC Yöntemi ile Kompozit Üretimi, YTÜ Lisans Ders Notları, İstanbul.

Vina, J., Belzunce, F. J., Arguelles, A., Vina, I. ve Canteli, A. F., (1994), "Mechanical Properties of SMC – 35 After Prolonged Exposure to The Atmosphere", Composites, 25 (9): 891-894.



ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 09.08.1962

Doğum yeri Zonguldak

Lise 1976-1979 Zonguldak Uzun Mehmet Lisesi

Lisans 1980-1984 Hacettepe Üniversitesi
Zonguldak Mühendislik Fakültesi
Makina Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 1985-1987 Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
Zonguldak Makina Müh. Anabilim Dalı

Doktora 1996-2003 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
Metalurji Müh. Anabilim Dalı, Malzeme Programı

Çalıştığı kurum(lar)

1985-Devam ediyor Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Müh. Fakültesi
Makina Müh. Bölümü Araştırma Görevlisi