



**BASINÇ ALTINDA ÜRETİLEN POLİMER
KOMPOZİTLERDE GELENEKSEL VE İLERİ
ELYAFLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

MAHMUT BİNGÖL



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BASINÇ ALTINDA ÜRETİLEN POLİMER KOMPOZİTLERDE
GELENEKSEL VE İLERİ ELYAFLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

MAHMUT BİNGÖL

Doç.Dr. Kadir ÇAVDAR
(Danışman)


DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2017

TEZ ONAYI

Mahmut BİNGÖL tarafından hazırlanan “Basınç Altında Üretilen Polimer Kompozitlerde Geleneksel ve İleri Elyafların Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Kadir ÇAVDAR

Başkan :	Doç. Dr. Kadir ÇAVDAR Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği A.B.D.	İmza 
Üye :	Prof.Dr. Agah UĞUZ Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği A.B.D.	İmza 
Üye :	Doç. Dr. Ali DURMUŞ Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği A.B.D.	İmza 
Üye :	Doç. Dr. M. Atilla TAŞDELEN Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Polimer Mühendisliği A.B.D.	İmza 
Üye :	Yrd.Doç.Dr. Raif SAKİN Balıkesir Üniversitesi Edremit MYO. Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü A.B.D.	İmza 

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali BAYRAM
Enstitü Müdürü
25/01/2017



U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

25/01/2017

Mahmut BİNGÖL

ÖZET

Doktora Tezi

BASINÇ ALTINDA ÜRETİLEN POLİMER KOMPOZİTLERDE GELENEKSEL VE İLERİ ELYAFLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mahmut BİNGÖL

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Kadir ÇAVDAR

Teknolojik ilerlemeler beraberinde daha üstün özellikli malzemelere ihtiyaç duymaktadır. Geleneksel malzemelerin karşılayamadığı bu özellikler kompozit olarak isimlendirilen malzemelerle karşılanabilmektedir. Kompozitlerde mukavemeti sağlayan malzemeler elyaflardır ve mekanik özellikleri iyileştirmek için genellikle elyaf takviye malzemeler modifiye edilmektedir. Kompozitlerin en önemli dezavantajları uzun sürede ve yüksek maliyette üretilmeleridir. Otomotiv gibi zamana duyarlı endüstriler için kısa çevrim süresi ve üstün nihai ürün özelliklerinden dolayı SMC (Sheet moulding compound) kompozit üretim yöntemi avantaj sağlamaktadır. Klasik SMC yönteminde düşük oranda kısa rasgele elyaf ve polye ester reçine kullanımı sonucu malzemede istenildiği kadar rijitlik sağlanamaz. Yeni malzemelerin ortaya çıkışı ve karbon elyaf gibi mevcut malzemelerin ucuzlaması, bu yeni üstün performanslı elyaf malzemelerin SMC yönteminde kullanımını arttırmıştır.

Bu çalışmada; daha üstün mekanik özellikler kazandırmak için farklı tipte (kesikli, sürekli, dokuma gibi) ve farklı (cam, bazalt, aramit, karbon gibi) elyaflar ve bu elyaflara uygun reçine malzemeler kullanılmıştır. Bazalt, aramit elyafların farklı tipleri ilk kez bu çalışmada SMC yönteminde denenmiştir. Dokuma elyaflarla üretilen SMC kompozitlerde, bazalt elyafı diğer elyaflara göre en iyi çekme gerilmesi ve eğilme gerilmesi sonucu alınmıştır. Aynı ağırlık oranında SMC ile ilk kez cam dokuma elyaf kullanılmış, klasik SMC'deki kesikli rasgele elyafa göre yaklaşık %103 daha yüksek çekme gerilmesi değeri elde edilmiştir. Bu elyaflarda polye ester yerine vinil ester reçine kullanımının mekanik özelliklere çok ciddi bir katkısının olmadığı da görülmüştür. Bunların dışında cam, bazalt, karbon aramit, elyafların farklı tipleri kullanılarak elde edilen sonuçlar birbiri ile ve kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Sürekli elyaf takviyeli SMC kompozitlerde numunelerin ortalama değerleri incelendiğinde 69,64 MPa ile bazalt elyaf en düşük değerde çıkarken 260,54 MPa değer ile karbon elyaf en yüksek değerde çıkmıştır. Aynı üretim koşulları ve formülasyon kullanılmasına rağmen farklı elyafların kullanımı ile çekme dayanımı yaklaşık %376 artmıştır. Kompozit malzemelerde hasar matris çatlakları ile başlar. Matrisin dayanımını ve dolayısıyla kompozitin dayanımını artırmak için CaCO₃ dolgu maddesi yerine bazalt partikül kullanılarak kompozit malzemenin çekme dayanımı yaklaşık %15, eğilme dayanımı ise yaklaşık %8 arttırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Polimer kompozit, Sheet moulding compound (SMC), Mekanik özellikler, Cam elyaf, Bazalt elyaf, Aramit elyaf, Karbon elyaf

2017, xii + 166 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF TRADITIONAL AND ADVANCED FIBERS IN POLYMER COMPOSITES PRODUCED UNDER PRESSURE

Mahmut BİNGÖL

Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Kadir ÇAVDAR

The development of technology needs novel functional materials (e.g. lightweight, high temperature resistance and high-strength materials) that can be used in many applications. The traditional materials, like metals, plastics and ceramics do not fulfill these requirements. Polymer composites are composed of an inorganic reinforcement material and a polymeric matrix, providing the desired combination of mechanical, chemical and thermal resistance features. The major disadvantages of composites may be produced in a long time and high cost. The sheet moulding compound (SMC) is one composite preparation method which is preferred due to its distinct advantages such as short cycle time, design flexibility, dimensional stability, consolidation of parts, high strength, light weight, moderate tooling and finishing costs and corrosion resistance. Generally the SMC method consists of polyester or vinyl ester resin, chopped glass fibers, inorganic fillers, additives, and other materials. The ratio of distribution of the fibers in the prepreg materials and maturation are the factors affecting the mechanical properties.

In this study; to gain superior mechanical properties, different types (discontinuous, continuous or woven, glass, basalt, aramid and carbon fibers) fibers are used in vinyl ester and polyester resins. The composite produced from woven glass fiber showed approximately 103% tensile strength (137.29 MPa) value compared to randomly distributed glass fiber composites (67.58 MPa), in which all fibers were feed with same weight percentage. Compared to the woven fibers, the composite produced from basalt fiber displayed highest tensile and flexure stress results. The type of resin either polyester or vinyl ester did not bring significant enhancements on the mechanical properties. In addition, type of fibers (discontinuous or woven) are investigated for all fibers (glass, basalt, carbon and aramid). The composite produced from continuous fibers showed approximately 376% higher tensile strength (260.54 MPa) value compared to continuously distributed fiber composites (69.65 MPa), in which all fibers were feed with same weight percentage. Moreover, basalt particles have been investigated as a novel additive for the production of glass fiber reinforced composite in SMC method. Compared to the calcium carbonate (calcite, CaCO_3) that are widely used as filler in the SMC composite, the resulting composites exhibit improved mechanical properties (tensile strength increased by approximately 15%, whereas the flexural strength enhanced 8%).

Key Words: Polymer composite, sheet moulding compound (SMC), Mechanical properties, Glass fiber, Basalt fiber, Aramid fiber, Carbon fiber

2017, xii + 166 pages.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında değerli katkılarından dolayı başta danışman hocam Doç. Dr. Kadir ÇAVDAR'a, SANTEZ projesi kapsamında (01019.STZ.2011-2) beraber çalışma yürüttüğümüz MARTUR firmasına ve çalışma ile alakalı her konuda yardımcı olan firmanın Ar-Ge yöneticisi Dr. Recep KURT beyefendiye, projedeki çalışma arkadaşım Dr.Yavuz Emre Yağcı'ya, çalışmalarımızda değerli zamanlarını bize ayırıp her zaman samimi bir şekilde destek olan firmadaki tüm çalışma arkadaşlarımıza sonsuz teşekkürler.

Tez çalışmamızı UAP(M) 2011-29 No' lu proje kapsamında destekleyen Uludağ Üniversitesi Rektörlüğü ve Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarımızda desteğini esirgemeyen Poliya firması yönetim kurulu başkanı İsmet ÇAKAR ve Tongün grup yönetim kurulu başkanı Semih TONGÜN beyefendilere teşekkürlerimizi sunarız.

Karbon elyaf malzeme temininde yardımcı olan DowAksa firmasına teşekkür ederiz.

Değerli katkılarından dolayı Yalova Üniversitesinde öğretim üyesi olan Doç.Dr. M. Atilla Taşdelen hocamıza teşekkür ederiz.

Manevi destekleri ile her zaman yanımda olan Anneme, Babama, Eşime ve Kızıma Kardeşlerime, Amcama ve Ailesine isimlerini tek tek sayamadığım tüm yakınlarıma ve dostlarıma teşekkürler.

Mahmut BİNGÖL
25/01/2017

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Mekanik Özellikler.....	5
2.2. Yüzey Kalitesi ve Hatalar	20
2.3. Simülasyonlar ve Modelleme.....	28
2.4. Kalıp Ön Yükleme (Precharge).....	33
2.5. Akış Özellikleri (Reoloji).....	35
2.6. Kürleşme	41
2.7. Geri Dönüşüm İşlemi (Recycling)	43
2.8. Diğer Çalışmalar	50
3. MATERYAL VE YÖNTEM	57
3.1. Materyaller	57
3.1.1. Reçineler	57
3.1.2. Takviye malzemeleri.....	59
3.1.3. Dolgu maddeleri.....	66
3.1.4. Diğer katkıları	67
3.2. Yöntem.....	69
3.3. SMC Kompozit Üretim Yöntemi	69
3.3.1. SMC Pestillerinin (Prepregs) Üretimi.....	69
3.3.2. Pestillerin sıcak preste kalıplanması	77
3.4. SMC Kompozit Malzemelerin Mekanik Karakterizasyonu.....	79
3.4.1. Çekme deneyi.....	79
3.4.2. Eğilme deneyi.....	82
3.5. SMC Kompozit Malzemelerin Yüzey Karakterizasyonu	83
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	84
4.1. Kesikli (Kırılmış) Rasgele Elyaf Dağılımlı SMC kompozitler.....	86
4.1.1. Kesikli (kırılmış) rasgele elyaf dağılımlı SMC kompozitlerin çekme deney sonuçları	86

4.1.2. Kesikli (kırpılmış) rasgele elyaf dağılımlı SMC kompozitlerin eğilme deney sonuçları	96
4.1.3. Kesikli (kırpılmış) rasgele elyaf dağılımlı SMC kompozitlerin yüzey karakterizasyonu	100
4.2. Sürekli Elyaf Takviyeli SMC Kompozitler	103
4.2.1. Sürekli elyaf takviyeli SMC kompozitlerin çekme deney sonuçları.....	103
4.2.2. Sürekli elyaf takviyeli SMC kompozitlerin eğilme deney sonuçları	108
4.3. Dokuma Elyaf Takviyeli SMC Kompozitler	110
4.3.1. Dokuma elyaf takviyeli SMC kompozitlerin çekme deney sonuçları	110
4.3.2. Dokuma elyaf takviyeli SMC kompozitlerin eğilme deney sonuçları.....	118
4.3.3. Dokuma elyaf takviyeli SMC kompozitlerin yüzey karakterizasyonu	122
4.4. Cam Elyaf Takviyeli SMC Kompozitler	124
4.4.1. Cam elyaf takviyeli SMC kompozitlerin çekme deney sonuçları.....	124
4.4.2. Cam elyaf takviyeli SMC kompozitlerin eğilme deney sonuçları	127
4.5. Bazalt Elyaf Takviyeli SMC Kompozitler.....	129
4.5.1. Bazalt elyaf takviyeli SMC kompozitlerin çekme deney sonuçları	130
4.5.2. Bazalt elyaf takviyeli SMC kompozitlerin eğilme deney sonuçları.....	133
4.6. Aramit Elyaf Takviyeli SMC Kompozitler.....	135
4.6.1. Aramit elyaf takviyeli SMC kompozitlerin çekme deney sonuçları	135
4.6.2. Aramit elyaf takviyeli SMC kompozitlerin eğilme deney sonuçları	137
4.7. Karbon Elyaf Takviyeli SMC Kompozitler	139
4.7.1. Karbon elyaf takviyeli SMC kompozitlerin çekme deney sonuçları	139
4.7.2. Karbon elyaf takviyeli SMC kompozitlerin eğilme deney sonuçları.....	142
4.8. Farklı Dolgu Maddesi Kullanılarak Yapılan SMC Kompozit Malzemeler	144
4.8.1. Farklı dolgu maddesi kullanılarak yapılan SMC kompozitin çekme deney sonuçları	145
4.8.2. Farklı dolgu maddesi kullanılarak yapılan SMC kompozitin eğilme deney sonuçları	148
4.8.3. Farklı dolgu maddesi kullanılarak yapılan SMC kompozitin yüzey karakterizasyonu	150
5. SONUÇ	152
KAYNAKLAR	160
ÖZGEÇMİŞ	168

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

E	Elastisite modül
σ	Normal gerilme
τ	Kayma gerilmesi
CaCO ₃	Kalsiyum karbonat
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit

Açıklama

Kısaltmalar

A-SMC	Advanced (İleri) SMC
BMC	Bulk Moulding Compound
C-SMC	Carbon (Karbon) Elyafı SMC
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastics (Karbon Elyafı Takviye edilen Plastikler)
CNC	Cellulose Nanocrystals (Selüloz Nanokristaller)
FFSMC	Flax Fibre (Keten Elyafı) SMC
GA	Genetik Algoritma
GFRC	Glass Fibre Reinforced Composites (Cam Elyafı Takviye edilen Kompozitler)
GMT	Glass Mat Thermoplastic
LP-UP	Düşük Profilli Doymamış Polyester
NFRC	Natural Fibre Reinforced Composites (Doğal Elyafı Takviye edilen Kompozitler)
PTP®	Trigliseritler ve Polikarbon Asit Anhidritlerden Yapılmış Polimer Malzeme
RTM	Resin Transfer Molding (Reçine transfer kalıplama)
SEM	Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SMC	Sheet Moulding Compound
UACS	Unidirectionally Arrayed Chopped Strands (Tekyönlü Kırılmış Filamentler)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. a) Enine yönlene elyaf yığınlarının içinde başlayan matris kırılması. Bu ilk olarak Esnek-SMC B'de görülmüştür ve buradaki uzama %0,35' tir. Çatlak durduğunda yığın matris dışına ulaşmıştır. b) a'daki çatlak büyümesi	6
Şekil 2.2. a) Şekil 2.2. a ve b'de verilen çatlaktır fakat uzama şimdi % 0,44. Enine yönlene elyaf yığınlarında çatlak matris etrafında büyümeye başlamıştır. b) CaCO ₃ partikülün ayrılması ve mikro çatlak büyümesi $\epsilon = \% 0,35$	7
Şekil 2.3. Tabakadan kesilen eğilme numunelerinin şeması.....	8
Şekil 2.4. Çeşitli numunelerin eğilme dayanımı ve E-modülü	8
Şekil 2.5. SMC'de karbon ve cam elyafı karıştırmanın iki farklı yolu	10
Şekil 2.6. a) Deneylerden elde edilen nihai çekme gerilmesi/numune ağırlığı, b) Elastisite modülleri.....	11
Şekil 2.7. Elyaf-matris ara yüzey kırılması a) Normal gerilme etkisi (σ), b) kayma gerilmesi etkisi (τ),	13
Şekil 2.8. FFSMC'nin çekme özellikleri: Soldaki sütun E-modülü, sağdaki çekme dayanımları.....	16
Şekil 2.9. FFSMC'nin eğilme özellikleri: Soldaki sütun E-modüller, sağdaki eğilme dayanımları.....	16
Şekil 2.10. Elyaf matris ara yüzeyinde ayrılma a) 0° (100 s ⁻¹ civarında) b) 45° (100 s ⁻¹ civarında) c) yaklaşık 90 ° sanki-statik.	17
Şekil 2.11. CNC içeriğinin etkisi a) CNC-epoksi ve b) ağırlıkça %35 cam elyaf/epoksi kompozitlerin çekme ve eğilme özellikleri	19
Şekil 2.12. Karbon elyaf içeriklerine göre gerilme-birim uzama eğrileri a) %53, b) %5	20
Şekil 2.13. SMC morfolojisine örnek- saf SMC'den 0,5 mm. kenardan kesilmiş parlatılmış taramalı elektron mikroskobunda görüntülenmiştir (5 kV, 22,5 μm \times 30 μm boyutlarda)	21
Şekil 2.14. 3D örneklerden alınan mikroskopik örnekler a) ve c), deforme olmayan örnek, 0 mm < x3 < 10 mm) ve b) ve d), basınçlı kalıplamadan sonra, 0 mm < x3 < 6,5 mm), gözenek görünüyor, a) ve b) ve demetler, c) ve d), X-ray mikrotomografi faz kontrast modu ile elde edildiler.....	24
Şekil 2.15. Deforme olmayan 2D mikro grafik örnekler (a ve b) ve basınçlı kalıplanan örnek (c ve d), kabuğa yakın (a ve c), x3 = 0,02 mm) ve örneklerin ortasında ((b ve d), x3 = h/2)	25
Şekil 2.16. Kromatik odak tarafından görüntülerin saptantığı SMC-alt tabaka kaplama kusurları; (6mm \times 6mm); a) yükselme, örneğin gaz çıkışı tarafından, b) krater, iğne deliği veya kabarcık tarafından	27
Şekil 2.17. Modifiye edilmiş SMC tamponda maksimum von-Mises gerilme dağılımı	32
Şekil 2.18. Ön yükleme merkez ve ızgaralar için alan tanımlaması (a) kalıp ve ön yükleme, (b) merkezi ön yükleme alanı ve (c) ön yüklemenin merkez ızgarası	34
Şekil 2.19. Şematik SMC basınçlı kalıplama prosesi	35
Şekil 2.20. Geometrik olarak benzer şekilde şematik ideal uzama diyagramı	36
Şekil 2.21. SMC'nin 30 °C'de ve 70 °C'de sıkıştırılmalı akış süresince çeşitli plakala dağılımları için, deformasyon hızına karşı sıkıştırma basıncının logaritmik grafiği	37

Şekil 2.22. 1 mm/s sıkıştırma hızı için üst sınır teorisi analizlerinden (katı hat) elde edilen X parametreleri ile P* basıncının değişimi	38
Şekil 2.23. Elyaf hacim içeriği üzerine a) boyutsal oranlar ve b) gerilme oranı.....	40
Şekil 2.24. 3D görüntü gösteren resimlerin gösteriminin ayarlanması ve başlangıç durumunda (kürlenme yokken) dört SMC tabaka içine hapsolmuş porozitenin (beyaz) üç enine kesiti (resimlerdeki sınırlar renklendirilmiş). Toplam porozite yaklaşık %15 ölçülmüştür.....	41
Şekil 2.25. Termoset kompozit malzemelerin geri dönüşümü	43
Şekil 2.26. Ağırlıkça ve hacimce %20 karbon elyaf (KE) birleştirilerek yapılan SMC panellerin a) Eğilme dayanımı, b) Eğilme modülü	45
Şekil 2.27. Bileşenlerin CATIA çizimi a) önden ve b) arkadan görünümü c) cam elyaf/polyester ve doğal elyaf/ PTP®-otobüs parçasındaki üretim sistemleri	48
Şekil 2.28. Çekme dayanımı (a) ve Young modülleri (b) doğal elyaf/ PTP® ile cam/polyester parçaların karşılaştırılması. Referans değer “fabrika standart” (ortalama değer ve standart sapma)	49
Şekil 2.29. Doğal elyaf/PTP® ile cam/polyester parçaların eğilme dayanımının karşılaştırılması. Referans değer (ortalama değer ve standart sapma).....	50
Şekil 2.30 (a) Yüzey, ve (b) aşınmış yan yüzeyler	51
Şekil 2.31. Başlatma topolojileri a) Yivli tabaka yüzeyli panel b) oluklu panel	56
Şekil 3.1. Kompozit, elyaf, matris arasındaki çekme gerilmesi ilişkisi	60
Şekil 3.2. Öğütülmüş bazalt partikül katkısı	65
Şekil 3.3. Tipik SMC dolgular a) CaCO ₃ , b) İçi boş cam küre c) Al ₂ O ₃	67
Şekil 3.4. Tipik bir SMC formülasyonu.....	70
Şekil 3.5. SMC pestil bileşiminin üretim hattı.....	71
Şekil 3.6. Kesikli rasgele cam elyaf dağılımlı SMC pestiller	72
Şekil 3.7. a) Kesikli rasgele dağılımlı karbon ve b) bazalt elyaf takviyeli SMC pestiller	73
Şekil 3.8. a) Cam, b) karbon, c) aramit ve d) bazalt sürekli elyaf dokuma.....	75
Şekil 3.9. Dokuma SMC pestillerin hazırlanması.....	76
Şekil 3.10. Farklı elyaf dokumalar.....	76
Şekil 3.11. a) Özel olarak yaptırılan SMC kalıbı b) sıcaklık kontrolü sağlayan elektrik panosu	78
Şekil 3.12. a) Kalıbın prese bağlanması b) Sıcaklık kontrolü için elektrik panosu	78
Şekil 3.13. Üretilen SMC plakalar. Solda kırılmış cam elyaf plaka sağda kırılmış karbon elyaf plaka.....	79
Şekil 3.14. SMC plakaların elmas testere ile kesilmesi	80
Şekil 3.15. ISO 527 standardına uygun olarak hazırlanan çekme deney numunesi.	80
Şekil 3.16. Numunenin çekme cihazında teste tabi tutulması a) Numunenin test cihazına bağlanması, b) Kırılan çekme deneyi numunesi.....	81
Şekil 3.17. ISO 178 standardına uygun olarak hazırlanan eğilme deney numunesi.....	82
Şekil 3.18. Numunenin eğilme cihazında teste tabi tutulması	83
Şekil 3.19. Numunelerin SEM cihazında görüntülenmesi.....	83
Şekil 4.1. Kesikli rasgele cam elyaf SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları.....	87
Şekil 4.2. Kesikli rasgele cam elyaf SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları.....	88

Şekil 4.3. Hasara uğramış çekme deneyi numuneleri, kesikli rasgele cam elyaf SMC'nin a) ön ve b) arka görünümü, Kesikli rasgele karbon elyaf SMC'nin c) önden ve d) arkadan görünümü.....	89
Şekil 4.4. Kesikli rasgele cam elyaf SMC numunelerin çekme gerilmesi-birim deformasyon eğrileri	90
Şekil 4.5. Elyaf matrisin arasındaki zayıf yapışmayı gösteren kesikli rasgele karbon elyaf numune.....	92
Şekil 4.6. a) Kesikli cam elyaf, b) Karbon elyaf.....	93
Şekil 4.7. Kesikli rasgele ileri elyaf ile üretilen SMC kompozitlerin ortalama çekme gerilmesi değerleri.....	94
Şekil 4.8. Kesikli rasgele ileri elyaf ile üretilen SMC kompozitlerin ortalama çekme gerilmesi değerleri.....	95
Şekil 4.9. Kesikli rasgele ileri elyaf ile üretilen SMC kompozitlerin çekme gerilmesi-birim deformasyon eğrileri.....	96
Şekil 4.10. Kesikli rasgele cam elyaf SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları	97
Şekil 4.11. Kesikli rasgele cam elyaf SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları	98
Şekil 4.12. Kesikli rasgele ileri elyaf ile üretilen SMC kompozitlerin ortalama eğilme gerilmesi sonuçları	99
Şekil 4.13. Kesikli rasgele ileri elyaf ile üretilen SMC kompozitlerin ortalama eğilme gerilmesi sonuçları	100
Şekil 4.14. Rasgele kesikli 65 mm uzunluğundaki cam elyaf (CF-R65) üretilen SMC malzemenin belli oranlarda büyütülmüş SEM görüntüleri	102
Şekil 4.15. Sürekli elyaf takviyeli SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları	104
Şekil 4.16. Sürekli cam elyaf SMC kompozitin hasara uğramış çekme deney numunesi a) ön ve b) arka görünümü	105
Şekil 4.17. Sürekli elyaf takviyeli SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları	106
Şekil 4.18. Sürekli elyaf takviyeli SMC numunelerin çekme gerilmesi-birim deformasyon eğrileri	107
Şekil 4.19. Sürekli elyaf takviyeli SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları	108
Şekil 4.20. Sürekli elyaf takviyeli SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları	109
Şekil 4.21. Farklı katlardaki dokuma cam elyaf SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları	110
Şekil 4.22. Farklı katlardaki dokuma cam elyaf SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları	112
Şekil 4.23. Elyaf oranı düşük olan 2 kat cam dokumalı SMC plakada oluşan porozite	113
Şekil 4.24. Farklı katlardaki dokuma cam elyaf SMC numunelerin çekme gerilmesi-birim deformasyon eğrileri.....	113
Şekil 4.25. Hasara uğramış çekme deneyi numuneleri, dokuma cam elyaf SMC'nin a) ön ve b) arka görünümü	114
Şekil 4.26. Farklı tipte dokuma elyaf SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları	115

Şekil 4.27. Dokuma elyafı SMC kompozitlerin hasara uğramış çekme deneyi numuneleri; a) Karbon dokuma b) Bazalt dokuma c) Aramit dokuma d) Cam dokuma	116
Şekil 4.28. Farklı tipte dokuma elyafı SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları	117
Şekil 4.29. Farklı tipte dokuma elyafı SMC numunelerin çekme gerilmesi-birim deformasyon eğrileri	118
Şekil 4.30. Farklı katlardaki dokuma cam elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları	119
Şekil 4.31. Farklı katlardaki dokuma cam elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları	120
Şekil 4.32. Farklı tipte dokuma elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları	121
Şekil 4.33. Farklı tipte dokuma elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları	122
Şekil 4.34. Altı kat dokuma cam elyafı SMC malzemenin belli oranlarda büyütülmüş SEM görüntüleri	124
Şekil 4.35. Farklı cam elyafı SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları	125
Şekil 4.36. Farklı cam elyafı SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları	126
Şekil 4.37. Farklı cam elyafı SMC numunelerin çekme gerilmesi-birim deformasyon eğrileri	127
Şekil 4.38. Farklı cam elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları	128
Şekil 4.39. Farklı cam elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları	129
Şekil 4.40. Farklı bazalt elyafı SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları	131
Şekil 4.41. Farklı bazalt elyafı SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları	132
Şekil 4.42. Farklı bazalt elyafı SMC numunelerin gerilme-birim deformasyon eğrileri	132
Şekil 4.43. Farklı bazalt elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları	134
Şekil 4.44. Farklı bazalt elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları	134
Şekil 4.45. Farklı aramit elyafı SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları	136
Şekil 4.46. Farklı aramit elyafı SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları	136
Şekil 4.47. Farklı aramit elyafı SMC numunelerin çekme gerilmesi-birim deformasyon eğrileri	137
Şekil 4.48. Farklı aramit elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları	138
Şekil 4.49. Farklı aramit elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları	139
Şekil 4.50. Farklı karbon elyafı SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları	140
Şekil 4.51. Farklı karbon elyafı SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları	141
Şekil 4.52. Farklı karbon elyafı SMC numunelerin çekme gerilmesi-birim deformasyon değerleri	142
Şekil 4.53. Farklı karbon elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları	143
Şekil 4.54. Farklı karbon elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları	144
Şekil 4.55. Test sonucu kırılan çekme numuneleri a) CaCO ₃ katkılı, b) bazalt katkılı test numunesi	146
Şekil 4.56. CaCO ₃ ve bazalt katkılı kompozitlerin ortalama çekme gerilmesi sonuçları	147

Şekil 4.57. CaCO ₃ ve bazalt katkılı kompozitlerin ortalama çekme gerilmesi sonuçları	147
Şekil 4.58. CaCO ₃ ve bazalt katkılı kompozitlerin çekme gerilmesi-birim deformasyon eğrileri	148
Şekil 4.59. CaCO ₃ ve bazalt katkılı kompozitlerin ortalama eğilme gerilmesi sonuçları	149
Şekil 4.60. CaCO ₃ ve bazalt katkılı kompozitlerin ortalama eğilme gerilmesi sonuçları	150
Şekil 4.61. Bazalt partikül katkılı SMC kompozit malzemelerin belli oranlarda büyütülmüş SEM görüntüleri	151
Şekil 4.62. CaCO ₃ dolgu maddeli SMC kompozitin belli oranlarda büyütülmüş SEM görüntüsü	151
Şekil 5.1. Farklı elyaflarla üretilen SMC kompozit numunelerin ortalama çekme deney sonuçlarının minimum ve maksimum değerleri	158
Şekil 5.2.. Farklı elyaflarla üretilen SMC kompozit numunelerin ortalama eğilme deney sonuçlarının minimum ve maksimum değerleri	159

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Çekme testlerinden elde edilen malzeme özellikleri	6
Çizelge 2.2. SMC piroliz ürünleri (ağırlıkça %)	46
Çizelge 2.3. BMC'nin mekanik özellikleri	47
Çizelge 2.4. Ekipman maliyetleri ve gereksinimleri	53
Çizelge 2.5. Malzeme maliyetleri	53
Çizelge 2.6. Ulaşılan yüzde ağırlık azaltma ve nihai parça ağırlığı ile düşünülen malzeme ve proses senaryoları.....	54
Çizelge 3.1. Polipol-347 doymamış polyesterin özellikleri	58
Çizelge 3.2. Polives 701 vinil- ester reçinenin özellikleri	59
Çizelge 3.3. Bazı elyafların özellikleri.....	60
Çizelge 3.4. SMC-3 cam elyafların özellikleri.....	61
Çizelge 3.5. Karbon elyaf bobinin özellikleri	62
Çizelge 3.6. Aramit elyafların özellikleri.....	63
Çizelge 3.7. Bazalt elyafların kimyasal bileşimi.....	64
Çizelge 3.8. Bazalt elyaf bobinlerin özellikleri.....	64
Çizelge 3.9. Bazalt partikül katkısının özellikleri.....	66
Çizelge 3.10. Kesikli cam elyaf pestil için kullanılan formülasyon	72
Çizelge 3.11. İleri takviye malzemeli pestil için kullanılan formülasyon.....	74
Çizelge 3.12. Çekme deney numunesi boyutları (ölçüler mm'dir).....	81
Çizelge 3.13. Eğilme deney numunesi boyutları (ölçüler mm'dir).....	82
Çizelge 4.1. SMC plaka notasyonları.....	85
Çizelge 4.2. Kesikli rasgele cam elyaflı SMC numunelerin çekme deneyi sonuçları	88
Çizelge 4.3. Kesikli rasgele ileri elyaflı SMC numunelerin çekme deneyi sonuçları.....	91
Çizelge 4.4. Kesikli rasgele cam elyaflı SMC numunelerin eğilme deneyi sonuçları	97
Çizelge 4.5. Kesikli rasgele ileri elyaflı SMC numunelerin eğilme deneyi sonuçları	99
Çizelge 4.6. Sürekli elyaf takviyeli SMC numunelerin çekme deneyi sonuçları.....	105
Çizelge 4.7. Sürekli elyaf takviyeli SMC numunelerin eğilme deneyi sonuçları	108
Çizelge 4.8. Farklı katlardaki dokuma cam elyaflı SMC numunelerin çekme deneyi sonuçları	111
Çizelge 4.9. Farklı tipte dokuma elyaflı SMC numunelerin çekme deneyi sonuçları ..	116
Çizelge 4.10. Farklı katlardaki dokuma cam elyaflı SMC numunelerin eğilme deneyi sonuçları	119
Çizelge 4.11 Farklı tipte dokuma elyaflı SMC numunelerin eğilme deneyi sonuçları .	121
Çizelge 4.12. Farklı cam elyaflı SMC numunelerin çekme deneyi sonuçları.....	125
Çizelge 4.13. Farklı cam elyaflı SMC numunelerin eğilme deneyi sonuçları	128
Çizelge 4.14. Farklı bazalt elyaflı SMC numunelerin çekme deneyi sonuçları.....	130
Çizelge 4.15. Farklı bazalt elyaflı SMC numunelerin eğilme deneyi sonuçları	133
Çizelge 4.16. Farklı aramit elyaflı SMC numunelerin çekme deneyi sonuçları	135
Çizelge 4.17. Farklı aramit elyaflı SMC numunelerin eğilme deneyi sonuçları.....	138
Çizelge 4.18. Farklı karbon elyaflı SMC numunelerin çekme deneyi sonuçları	140
Çizelge 4.19. Farklı karbon elyaflı SMC numunelerin eğilme deneyi sonuçları.....	142
Çizelge 4.20. CaCO ₃ ve bazalt katkılı SMC numunelerin çekme deneyi sonuçları.....	146
Çizelge 4.21. CaCO ₃ ve bazalt katkılı SMC numunelerin eğilme deneyi sonuçları.	149

1. GİRİŞ

Malzeme bilimi ile teknoloji birbirine paralel biçimde ilerlemektedir. Teknolojik gelişmeler beraberinde yeni malzemelerin ortaya çıkmasını sağlarken, yeni malzemelerin bulunması da bilim ve teknoloji de yeni keşiflerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu yeni keşifler sayesinde son birkaç yüzyılda bu gelişim çok hızlı bir şekilde devam etmektedir. Yeni tasarımlarda kullanılmak istenen malzemenin dayanım, korozyona dayanıklılık, yalıtım, hafiflik gibi birkaç özelliğinin bir arada olmasının istendiği durumlarda, bu ihtiyaca konvansiyonel malzemeler cevap verememiştir. Örneğin araçlarda, yüksek karbon emisyonu gibi çevre sorunları ve ekonomik sebepler dolayısıyla; daha düşük dayanım/ağırlık oranına sahip, hafif ama yüksek mukavemetli malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun sonucunda birkaç geleneksel malzemenin bir araya getirilerek onların üstün özelliklerinin tek bir malzemede toplandığı kompozit (karma) malzemeler geliştirilmeye başlanmış ve hızlı bir şekilde devam etmektedir.

1930 yıllarda kullanılmaya başlayan plastik malzemeler korozyona dayanımı, hafiflik, kolay şekillendirilme gibi üstün özelliklerinin yanında sert ve düşük dayanıma sahip olması gibi zayıf özelliklere sahipti. Bu sebeple 1950'li yıllarda bu malzeme içerisine elyaf ve katkı maddeleri katılarak mekanik özellikleri iyileştirilmiş kompozit malzemeler üretilmiştir. Kompozit malzeme teknolojilerinin iyileştirilmesi gelişmiş ülkelerde hızla devam ederken bu gelişime ayak uydurmak zorunda olan ülkemizde de Bilim ve Teknoloji Kurulu'nun 2005/4-EK 2 kararlarında bu malzemelerin araştırılması ve geliştirilmesi "öncelikli alanlar" kategorinde değerlendirilmiştir (Anonim 2015a). Ayrıca kalkınma bakanlığı tarafından onuncu kalkınma paketinde (2014-2018) kompozit ve ileri malzemelerin üretiminin ve yatırımlarının destekleneceği açıklanmıştır (Anonim 2015b). Bu açıdan bakıldığında geleceğin malzemesi olan kompozitler geliştirildikçe yeni keşifler ve icatlar ortaya çıkacak böylelikle yeni rekabet alanları oluşacak, ülkemizin rekabet edebilmesi için ise bu teknolojiye gereken desteği verip altyapı oluşturması kaçınılmaz olacaktır.

Kompozit malzemelerin yapımında kullanılan çok sayıda üretim metodu vardır. Bunlardan biri ise 1960'lı yıllarda geliştirilen ve günümüzde halen başta otomotiv olmak üzere birçok sektörde tercih edilen basınçlı kalıplama yöntemlerinden birisi olan

“sheet molding compound” (SMC) kompozit üretim yöntemidir. Seri üretime uygun olan bu yöntem özellikle dayanım/hafiflik istenen durumlarda avantaj sağlamaktadır. SMC yöntemi ile üretilen parçalar daha ucuz olduğu için takviye malzemesi olarak genellikle cam elyaf kullanılırken reçine olarak ise doymamış polyeester kullanılmaktadır. Bazı durumlarda bu malzemeler istenen özellikleri sağlayamamaktadır. İleri takviye malzemelerinin ve reçinelerin ucuzlaşmasının yanı sıra bazalt gibi yeni elyafların üretimi dahası üretim teknolojilerinin geliştirilmesi sonucunda farklı takviye malzemesi ve reçinelerin kullanımını gündeme getirmiştir.

Bu çalışma kapsamında bu gelişmeler göz önüne alınarak farklı takviye malzemelerin kullanımı ve bu malzemelerin mekanik özelliklere etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Bunun için yukarıda bahsedilen üstün özelliklerinden dolayı SMC yöntemi tercih edilmiştir. Takviye malzemesi olarak cam elyafla beraber karbon, aramit ve son yıllarda yeni yeni kullanılmaya başlanan bazalt elyaf ilk defa bu yöntemle denenmiş mekanik özellikleri elde edilmiştir. Cam elyaf takviyesi ile yapılmış SMC kompozitlerin literatürdeki çalışmalarda mekanik özelliklerini birçok kaynakta bulmak mümkün olmasına rağmen, cam elyafla olan çalışmalar da yeniden yapılmıştır. Bunun sebebi daha önce yapılan çalışmalarda SMC'nin malzeme formülasyonunun ve üretim koşullarının yazarlar tarafından tam olarak verilmemesidir. Formülasyon ve üretim koşullarının aynı olması ile tüm sonuçların daha gerçekçi ve doğru bir şekilde karşılaştırılabileceği düşünülmüştür. Bu sebeplerden dolayı yeni kullanılan malzemeler ile geleneksel malzemelerin hepsi yeniden üretilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Polimer kompozit malzeme üretmek için kullanılan ve geliştirilmekte olan birçok yöntem vardır. Üretim yöntemleri genellikle kullanılan matris malzemesine göre termosetler ve termoplastikler olarak iki ana başlık altında incelenir (Mazumdar 2002). SMC kompozit üretim yöntemi uzun yıllardan beri başta otomotiv olmak üzere birçok endüstri alanında geniş bir biçimde kullanılan termoset bir üretim yöntemidir. Basınçlı kalıplama sistemleri arasında en büyük alana sahip olan bu proses ile birkaç gramdan birkaç kiloya kadar geniş bir ölçekte üretim yapılabilir. 1960 yıllarında ilk olarak, kablo dağıtım kabinleri, ev için elektrik uygulamaları SMC kullanılarak üretilmiştir. Etkili bir kalıplama tekniği olduğu için dizel motorların silindir kapağı, karter gibi daha yüksek yükler taşıyan bileşenlerin yapımı takip etti. 1970'lerde düşük profilli doymamış polyesterin (LP-UP) gelişimine neden olan doymamış polyester reçinelerde, stirenin çözünmesinin termoplastik etkisi çalışıldı. İlk zamanlar bu malzeme, kabul edilebilir bitmiş yüzey kalitesi ile otomobil gövde panellerinin üretiminde başarılı bir şekilde kullanıldı. 1980'lerin başında, tek yönlü cam elyaf fitiller, rasgele elyafların birleşimi ile %60 ağırlık oranında elyaf kullanımı ile yüksek dayanımlı SMC malzemeler geliştirildi ve yeni model otomobillerin tamponlarının kullanımı ile sonuçlandı (Peterson ve ark. 2001). SMC temel olarak, termoset reçine, takviye malzemeleri (elyaflar), dolgular ve katkı maddeleri olmak üzere 4 ana malzemedir (Kia 1993). İki aşamada üretilen bu yöntemin birinci adımında özel olarak hazırlanan reçine, elyaf, dolgu ve katkı maddeleri bir araya getirilip karıştırılarak pestil (prepreg) biçiminde malzemeler hazırlanır. Yani elyaflar üretimden önce reçine ile ıslatılır. Bu pestillere "prepreg" denmesinin sebebi İngilizce pre-impregnated (ön-emdirilmiş) kelimesinden gelmektedir (Mazumdar 2002). İkinci adımda da olgunlaşması için bir süre bekletilen pestiller yüksek basınçlı ısıtmalı kalıplarda istenen şekle getirilir (Rosato ve Rosato 2004, van Voorn ve ark. 2001).

SMC üretim aşamalarını başarılı bir şekilde tamamlamak için prosesin hem kimyasal hem de mekanik olarak kontrolünün sağlanması gerekmektedir. Bu da ancak üretim süreci hakkında çok iyi bilgi birikimi olduğunda mümkündür. Örneğin üretim süreci esnasındaki hatalardan dolayı malzeme yüzeyinde ya da içerisinde boşluk oluşursa bu

hem yüzey kalitesini düşürecek aynı zamanda mekanik özelliklerini olumsuz etkileyecektir (Merle ve ark. 1998, Le ve ark. 2008). Yine matris ve elyaf arasındaki etkileşimler ile elyaf oranı ve homojen dağılımı düzgün sağlanamazsa mekanik özellikler ve yüzey kalitesi olumsuz etkilenecektir (Le ve ark. 2008, Feuillade ve ark. 2006a, Jendli ve ark. 2004, Kim ve ark. 2011). Üretim süreci uygun şekilde gerçekleştirildiğinde ise üstün nitelikli malzemeler elde edilir. Daha iyi mekanik özellikler, kısa çevrim süresi, mükemmel yüzey kalitesi, estetik, korozyon dayanımı, düşük maliyet gibi özellikler SMC ile üretimin tercih edilmesinin nedenlerinden yalnızca bir kaçıdır. Bu özelliklerinden dolayı özellikle otomotiv sanayiinde saç malzeme yerine kullanımı giderek artmaktadır (Merle ve ark. 1998, Tataro 2011, Abrams ve ark. 2003, Akermo ve Astrom 2000).

Otomotiv üreticileri kısa dönemde mümkün olan en düşük maliyetle, en iyi ürünü üretmek isterler. Yakıt miktarındaki aşırı tüketim sonucu araç satan üreticilere bazı ülkelerde ek vergi sorumlulukları yüklenmiş, emisyon seviyesinin düşürülmesi ile ilgili kanunlar çıkartılmıştır. Yakıt emisyonu ve tüketimini azaltmanın birçok yolu vardır. Ancak en etkili yöntem aracın kütlesinin azaltılmasıdır. Kütleyi azaltmak için, yüksek dayanımlı çelik, alüminyum ve magnezyum alaşımları dahil bir çok metale dayanan çözümler düşünülmüştür ve uygulamaya sokulmuştur. Bu malzemelerin dışında polimer kompozit uygulamaları da farklı alternatifler sunmaktadır (Akermo ve Astrom 2000). SMC, çeliğe göre %60 daha düşük yoğunluğa sahip olduğundan yakıt tasarrufu sağlar ve egzoz emisyonlarını düşürür (Le ve ark. 2008, Hosseinzadeh ve ark. 2005). SMC ile karmaşık şekillerin üretilebilmesi, metal parçaların bünye içine gömülebilmesi, farklı cidar kalınlıklarında çalışabilme mümkündür. Ayrıca ürünün iki yüzü de kalıp ile şekillenmektedir ve ıskarta oranı düşüktür (Massardier-Nageotte ve ark. 2004).

Çalışmanın başlangıcından itibaren çok kapsamlı bir literatür araştırması yapılmış ve literatür sürekli güncellenmiştir. Literatürde SMC kompozit üretim yöntemi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır ve bu çalışmalar aşağıda özetlenmeye çalışılmıştır. Araştırma sonucunda bulunan ilgili kaynaklar sekiz ana başlık altında toplanmıştır: Mekanik özellikler, Yüzey kalitesi ve hatalar, Simülasyonlar ve Modelleme, Kalıp ön yükleme, Akış özellikleri, Kürleşme, Geri dönüşüm ve Diğer çalışmalar.

2.1. Mekanik Özellikler

SMC uzun zamandır otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır. SMC'nin kullanılmasının avantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Çelik ile karşılaştırıldığında, eşit mukavemetli SMC'den yapılan parçalar %30'a kadar ağırlık tasarrufu sağlar.
- SMC parçaların maliyeti düşük hacimli üretilen metallere göre daha azdır. Örneğin talaşlı imalat maliyeti veya kalıp maliyetleri bu avantajı sağlar.
- SMC malzemeler metal levhalar ile karşılaştırıldığında, daha küçük pres yarıçapları mümkün olduğu için daha serbest tasarım imkanı sağlar.
- SMC malzemenin sahip olduğu elektro-manyetik özellikleri elektrik panellerindeki izolasyon için kullanımına izin verir

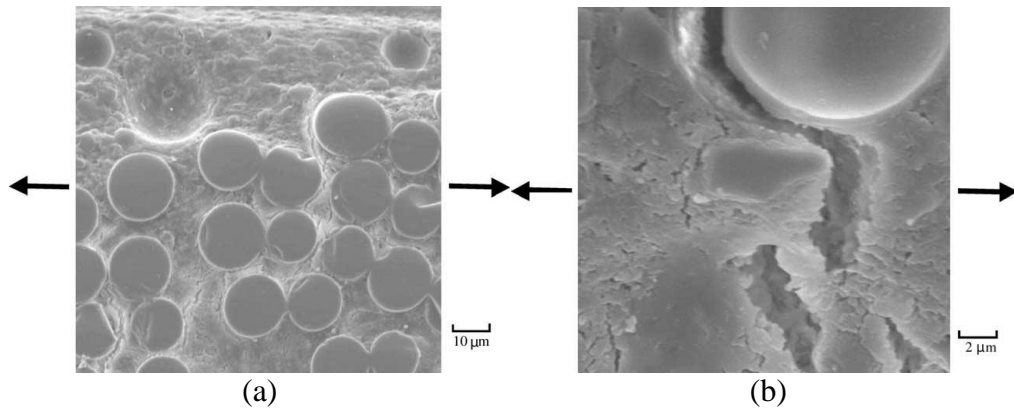
Bu avantajlarının yanı sıra örneğin otomotiv gövde panellerinde kullanılan SMC'nin bazı dezavantajları vardır. Örneğin park ederken küçük darbelerde, panellerde kırıklara sebep olabilir. Oldenbo ve ark. (2003) otomotiv dış gövde panelleri için yeni bir tip SMC (Esnek-SMC) geliştirmişlerdir. Esnek-SMC malzemeler dikey otomotiv gövde panellerinde uygulamalarda kullanılabilir. Esnek-SMC termoplastik katkı maddesi ve içi boş mikro-küreler içermektedir. Geleneksel SMC'yi (Standart-SMC) referans malzeme olarak kullanmışlardır. Malzemelere çekme ve basınç testleri uygulamışlardır. Kırılma tokluğunun yanı sıra uzama ile sertlik derecesi tanımlamışlardır. Esnek-SMC Standart-SMC'den neredeyse %20 daha düşük yoğunluğa ve daha yüksek darbe dayanımına sahiptir. Esnek SMC'nin hasar uzama eşiği Standart-SMC'den daha yüksektir ve kırılma tokluğu da iki kat daha yüksektir. Çizelge 2.1'de çekme testlerinden elde edilen sonuçlara göre; tüm malzemelerin kısmi derecede anizotropi derecesi olduğunu göstermişlerdir. Endüstriyel pratikte, sıklıkla izotropik olduğu varsayılan malzeme tedarikçileri tarafından sağlanan levhalar olduğu için bu bilgi önemlidir. Esnek-SMC'nin elastisite modülü Standart-SMC'den daha azdır. Bunun nedeni daha düşük inorganik dolgu içeriği ve daha yumuşak içi boş cam küre katkı etkisidir. Kısa elyaf kompozit dayanımına ilişkin, ortalama cam elyaf dayanımı önemli bir faktördür.

Çizelge 2.1. Çekme testlerinden elde edilen malzeme özellikleri (Oldenbo ve ark. 2003)

	Esnek-SMC A	Esnek-SMC B	Standart-SMC
	10±0,4 ^a	9,1±0,7 boyuna	Değer yok ^a boyuna
E-modülü (GPa)	7,5±0,5 ^a	7,5±0,9 enine	11,1±0,8 enine
	8,6±1,4 ^a	8,3±1,2 ortalama	11,7±0,8 ^a ortalama
	100±8 boyuna	85±13 boyuna	84±13 boyuna
Dayanım (MPa)	38±9 enine	73±2 enine	73±7 enine
	69±34 ortalama	79±11 ortalama	79±11 ortalama
	1,3±0,1 boyuna	1,1±0,2 boyuna	1,4±0,2 boyuna
Kopma uzaması (%)	0,8±0,3 enine	1,5±0,1 enine	1,1±0,2 enine
	1,1±0,3 ortalama	1,3±0,2 ortalama	1,2±0,2 ortalama

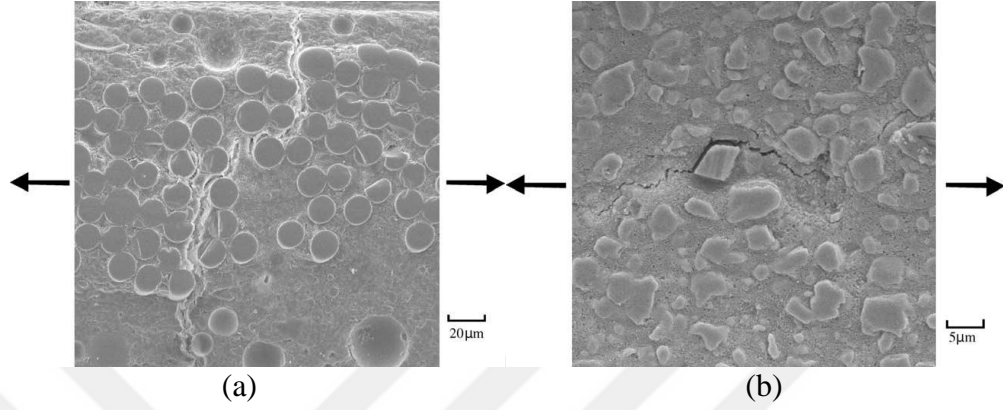
^a Teknik problemlerden dolayı birkaç değerde kayıp oluşmuştur.

SMC'nin non-linear davranışı, çoklu çatlak ve gerilmenin artması ile artan çatlak yoğunluğuyla ilişkilidir. İlk hasar durumu Şekil 2.1. a)'da görülen enine düzenlenen elyaf demetlerinin içindeki matrise yayılan ve %0,35 uzamada Esnek-SMC B'de gözlenmiştir. Şekil 2.1. b)'de ise Şekil 2.1. a)'dan elde edilen çatlak büyütülmüştür. Çatlak, şeklin üstünde elyaf etrafında ilerlemektedir, ortasında ise CaCO₃ dolgu partikülü vardır.



Şekil 2.1. a) Enine yönlene elyaf yığınlarının içinde başlayan matris kırılması. Bu ilk olarak Esnek-SMC B'de görülmüştür ve buradaki uzama %0,35' tir. Çatlak durduğunda yığın matris dışına ulaşmıştır. b) a)'daki çatlakın büyütülmesi (Oldenbo ve ark. 2003)

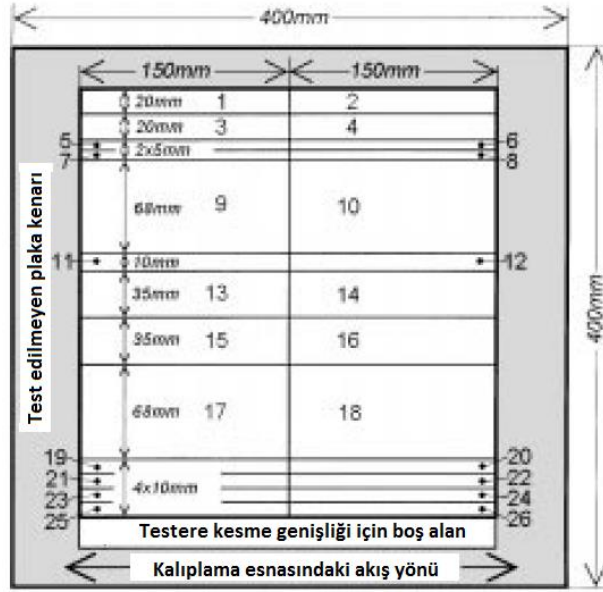
Optik mikroskopla geniş matris çatlakları %0,4 uzama ve enine yüklenen Esnek-SMC gözlemlenmiştir. Çatlaklar %0,4 üzerinde uzayan genişlemeler, %0,4 ve % 0,6 arasında uzamada numuneler hasara uğramaktadır (Şekil 2.2. a, b) (Oldenbo ve ark. 2003).



Şekil 2.2. a) Şekil 2.2. a ve b’de verilen çatlaktır fakat uzama şimdi % 0,44. Enine yönlene elyaf yığınlarında çatlak matris etrafında büyümeye başlamıştır. b) CaCO₃ partikülün ayrılması ve mikro çatlak büyümesi $\epsilon = \% 0,35$ (Oldenbo ve ark. 2003)

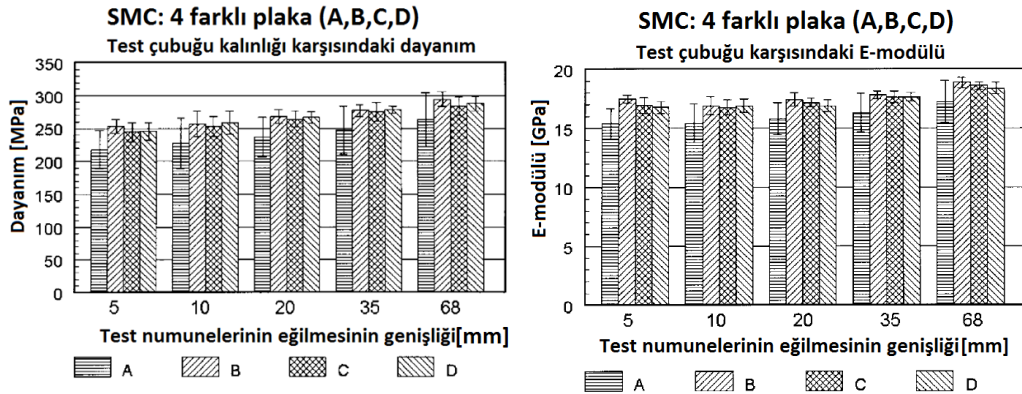
Mikron-altı boşluklar, düşük profilli katkılardan dolayıdır. Bir kaç gözleme esnasında çatlak yayılımının genişlemesi, sabit tutulan uzama olmasına rağmen açıktır. Kompozitlerde çatlak başlangıcı elyaf/matris ayrılması, matris/dolgu ayrılması ve elyafların uçlarında ortaya çıkar. Standart-SMC’de hasar başlangıcı CaCO₃ dolgu partikülü/matris ara yüzey ayrılmasını takip eden mikro çatlakların ilerlemesinden dolayıdır. Yavaşça daha yüksek uzamalar, daha geniş matris çatlakları, enine yönde elyaf demetlerinde oluşmaktadır. Esnek-SMC’de, hasar enine elyaf demetlerinde ve enine çatlakların makro-ölçekte genişlemesi ile başlar (Oldenbo ve ark. 2003).

Marissen ve Linsen (1999) çalışmalarında aynı plaka üzerinde farklı boyutlarda deney numunesi hazırlayarak bu numunelerin eğilme mukavemetindeki değişkenliği incelemişlerdir. Numuneler için ağırlıkça %45 oranında 25 mm uzunluğunda cam elyaf kullanılmıştır. Endüstriye uygun benzer tarzda üretilen plakalar Şekil 2.3’de gösterildiği gibi farklı genişlikteki boyutlarda kesilmiş ve 4 noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Yaptıkları bu deneysel araştırmada farklı deney numune boyutlarının eğilme mukavemetinin farklı sonuçlar verdiğini göstermişlerdir.



Şekil 2.3. Tabakadan kesilen eğilme numunelerinin şeması (Marissen ve Linsen 1999)

Genişliği az olan numunelerin kenarlarında elyaf dağılımı daha azdır ve daha fazla elyaf kesilmektedir. Bu yüzden ortalama elyaf uzunluğu daha azdır ve sonuç olarak daha az takviye sağlamaktadır; bu da küçük numunelerin dayanımını azaltmaktadır. Standartlara uygun olarak yapılan deney sonuçlarında Şekil 2.4'de gösterildiği gibi daha geniş parçaların daha yüksek dayanıma ve daha düşük dağılıma sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 2.4. Çeşitli numunelerin eğilme dayanımı ve E-modülü (Marissen ve Linsen 1999)

Kompozit malzemelerin elastik davranışlarının hasar analizlerinde, hasar mekanizmalarının başlama ve ilerlemesinin üzerinde etkili olan deformasyon hızının araştırılmasında gerekli olan dinamik yüklemelere maruz kalmaktadır. Jendli ve ark.

(2004) çalışmalarında SMC-R26 kompozit malzemelerin, düşük ve yüksek hızlı çekme testleri ile SEM gözlemlerini eşleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda bütün hasar büyümesi ve davranışı üzerine, makroskopik ve mikroskopik malzeme ölçümlerinde deformasyon hızı etkisinin analizi için deneysel bir yaklaşım geliştirerek katkıda bulunmuşlardır. Deformasyon hızının başlıca hasar eşik değeri ve yığılması ile yönetildiğini göstermişlerdir. Bu durum nihai gerilim ve uzamanın artması ile mekanik bir davranışla uyumunu verir. Ayrıca hızlı çekme yüklemesine maruz bırakılan, süreksiz- rasgele elyaf kompozitin (SMC-R26) hasar büyümesi ve mekanik davranış etkisi üzerinde deformasyon hızını araştırmak için deneysel bir çalışma uygulamışlardır. Deneysel hasar araştırmalarını sanki-statik çekme testleri rehberliğinde geliştirmişlerdir. Süreksiz-rasgele elyaf kompozitlerde, hasar mekanizmaları sırasıyla; matris mikro çatlak, elyaf matris ayrılması, ara yüzey ayrılması ve elyaf kırılması yoluyla hasara uğrar. Fakat SMC kompozit malzemelerde hasar matris mikro çatlakları ve ara yüzey ayrılması ile başlamaktadır. Ara yüzey ayrılması ve elyaf kırılmasına yol açan matris mikro çatlaklarının yığılması ile hasarın büyüdüğünü, mikro grafik gözlemler ve mikroskopik analizler ile yerinde doğrulamışlardır. Matris ve ara fazın davranışı zamana bağlı olduğu için, viskozitenin bütün SMC R-26 davranışı üzerine iki etkiye sahiptir. İlki matris ve ara yüzeyde gerilme durumunun etkileri. İkincisi matris dayanımındaki değişimler ve böylece deformasyon hızının artması ile artan ara yüzey dayanımı. Elde edilen sonuçlarda birinci etkinin ikinciden daha az önemli olduğu görülmüştür (Jendli ve ark. 2004).

Kamyon gövde panelleri üretiminde basınçlı kalıplamalardan biri olan SMC en fazla büyüyen uygulamalardan biridir. Kamyonculuk endüstrisinde parçalar yüksek rijitlik ve dayanım daha düşük yüzey kalitesine gereksinim duyar. Bu ihtiyaca geniş bir şekilde kullanılan cam elyafın yanında karbon elyaf da alternatiftir. Son araştırmalarda SMC'de uygulanan hem cam hem de karbon elyafların, farklı elyaf uzunluklarının etkisi, mekanik özellikler, kalıplama kuvvetleri ve yüzey kalitesini karşılaştırmak amaçlanmıştır. Otomotiv endüstrisi maliyete aşırı hassastır. Bu endüstride SMC başlıca elyaf takviye edilmiş polimer kompozit üretim yöntemlerinden en popüler olanıdır. SMC otomotiv endüstrisinde RTM ve onun herhangi bir varyasyonundan daha uygun ve ekonomik bir basınçla kalıplama yöntemidir.

Otomotivde SMC kalıpları, basit üretim proseslerinde ihtiyaç duyulan ve yaygın biçimde kullanılan cam elyaflara alternatif olarak, rijitliği sağlaması için karbon elyafları ekleyerek bir avantaj sağlar. Gerçekte SMC üreticileri için karbon ve cam elyafları birleştirmek kolay değildir. Yalnızca karbon ve yalnızca cam elyaf tabakaları beraber birleştirmek daha uygundur.

Cabrera-Rı'os ve Castro (2006) çalışmalarında cam elyaf tabakalarının yerine karbon elyaf tabaka ekleyerek SMC'nin mekanik özelliklerini geliştirmeye çalışmışlardır.



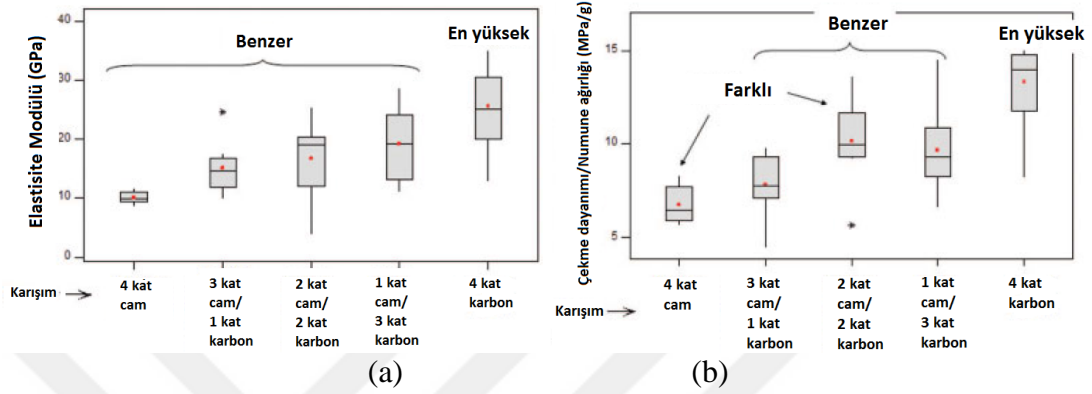
Şekil 2.5. SMC’de karbon ve cam elyafı karıştırmanın iki farklı yolu (Cabrera-Rı’os ve Castro 2006)

Farklı elyaf tiplerinin karıştırılmasını kapsayan deneylerde özellikle iki işlem önemlidir:

- Elyafların karıştırılması
- Deneyden elde edilen dataların analiz edilmesi

İlk durum ile ilgili, cam veya karbon elyaflar ile karıştırılan veya hazırlanan SMC'nin mümkün olan iki yoldan birinin seçilmesi gerekir ve sonra sandviç biçiminde yapılarak birleştirilir. Şekil 2.5’de her iki teknik arasındaki fark gösterilmiştir. İkinci konu deneyler hakkında sonuçların doğrulamasına istatistiki olarak ulaşmak zorundadır. Deneysel tasarımlarda faktöriyel tasarım kullanımı tercih edilebilir.

Cabrera-Rı'os ve Castro (2006) çalışmalarında farklı sayıda cam veya karbon elyafli tabakalar kullanarak ürettikleri plakalardan elde ettikleri nihai çekme dayanımları ve elastik modülleri sonuçlarını Şekil 2.6'daki gibi sunmuşlardır. Grafiklerden görüldüğü gibi karbon elyaf oranı arttıkça mekanik özellikler iyileşmektedir.



Şekil 2.6. a) Deneylerden elde edilen nihai çekme gerilmesi/numune ağırlığı, b) Elastisite modülleri (Cabrera-Rı'os ve Castro 2006)

Otomobillerdeki elyaf takviyeli plastik uygulamalarının hafifletme malzemesi olarak talebi petrol fiyatlarındaki dalgalanmalar ve küresel ısınma problemlerinden dolayı zordur. Gerçek uygulamalarda otomobilde bir çok kompleks şekilli parçalardan oluştuğu için biçimlendirme oldukça önemlidir. Bu yüzden süreksiz elyaf takviyeli plastiklerde, daha iyi biçimlendirmeyi başarmak için sürekli elyaf takviyeli plastikler tercih edilir. Taketa ve ark. (2008) çalışmalarında tekyönlü kıyılmış filamentlerin dizildiği (UACS) tabakaların, SMC ile karşılaştırıldığında daha üstün mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermeye çalışmışlar ve UACS'nin dayanımının, kırılma mekaniğini esaslı basit bir modelle kolaylıkla ortaya çıkarılabileceğini önermişlerdir.

Daha hafif ağırlıkta tasarlanan otomotiv kompozit parçalarının daha büyük araç çarpışma dayanımı, darbe sönümlene yeteneği, darbe hasarı kapasitesinin araştırılarak geliştirilmesini teşvik etmiştir. Süreksiz elyaf takviyeli kompozitler, yüksek gerilme/ağırlık ve rijitlik/ağırlık oranından dolayı ilgi çekicidir. Bu malzemeler gelişerek taşıma endüstrisinde araç ağırlığını azaltmak için yapısal çelik bileşenlerin yerini almaktadır. Yüklemeler altında onların mekanik tepkisini daha iyi anlayamayız. Bu gibi kompozit malzemelerin yüksek enerji dağılımlarının karakterize

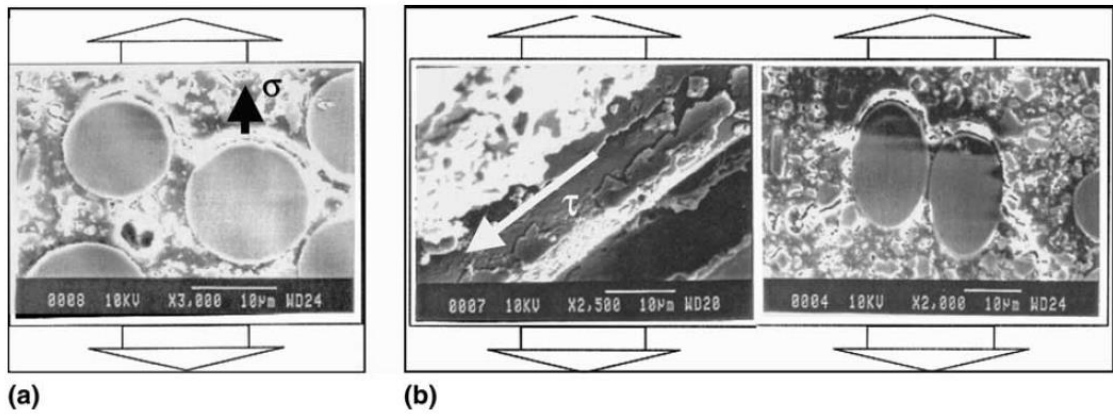
edilmesine rağmen onların endüstride yaygın kullanımlarının sınırlı olmasıdır. Bu nedenle yüksek deformasyon hızlarında, kompozit malzemelerin deformasyon hızı davranışının bütününe anlamak için bu analizlere ihtiyaç vardır. Ayrıca bu analizler süreksiz ve rasgele takviyeli kompozitlerin hasar başlangıcı ile malzeme mikro yapısı bütünleştirilebilir.

Malzeme ve yapısı, sanki-statik yüklemelerle karşılaştırıldığında hızlı deformasyon altında önemli bir şekilde değişmektedir. Jendli ve ark. (2005) bu deformasyon oranını hassas bir şekilde süreksiz elyaf takviyeli kompozitlerde araştırmışlardır. Mikroskobik ve makroskobik ölçek sonuçlarından elde ettikleri visko-hasar: hasar başlangıcı ve kinetiği, yükleme hızı etkisine karşın deformasyon oranı oldukça duyarlıdır, varsa elastik özellikler önemsizdir. Malzemenin makroskopik yanıtları, deformasyon oranı arttığında elyaf matris arasındaki hasar gerilmesi önemli biçimde arttığını kontrol etmişlerdir. Ayrıca elyaf oryantasyonunun etkisi analizleri boyunca deformasyon oranı etkisi (hasar başlangıcında kinetik hasar yığılması biraz azalarak ertelenir) elyaf-matris ara yüzeyinde, sadece normal gerilmeye maruz kaldığında daha önemli olduğunu sunmuşlardır. Deformasyon oranının etkisini anlamak, SMC kompozitlerin dinamik davranışını yöneten bu mikroskobik mekanizma üzerinde etkilidir. Gerçekte süreksiz elyaf takviyeli kompozit mekanik davranışı ile mikro yapısını birleştirmek kompleks hasar prosesleri içerir. Düşük hızda yüklemeler kompozit içinde hasar oluşturur. Mikroskobik gözlemlerde çekme kuvveti uygulamaları süresince geniş oranda deformasyon hızı, hasar oluşumu aşağıdaki gibi gözlenir:

- 1) İlk aşamada önemli bir hasar meydana gelmez (lineer elastik parça)
- 2) İkinci aşamada çekme doğrultusunda, 90° ve 60° yönünde ilk ara yüzey çatlakları ortaya çıkmaya başlar.
- 3) Bu aşamada süresince nadiren matris mikro çatlağı ortaya çıkar. Bu çeşit hasar mekanizmasında matrisin baskın olduğu alanlarda mikro çatlakları çabuk bir şekilde stabilize ederek yerleşir. Böylece bu çeşit hasar olayları gerilme-gerinim eğrilerinin %80'inde makul bir şekilde ihmal edilir.

- 4) İkinci lineer durumda elyaf çevresinde var olan ara yüzey çatlakları artar ve çatlak açıklığı büyür. Dahası yeni ara yüzey çatlakları daha az yönlenmemiş elyaf ortaya çıkarır.
- 5) Sonuçta elyaflar çekme yönünde kırılır.

Elyaf yönelimine bağlı olarak ara yüzey çözülmesi hem kayma hem de normal gerilme ile ortaya çıkmaktadır. Örnek olarak Şekil 2.7. a)'da gösterilen ara yüzey hasarı elyaf için 90°'de nispeten çekme yönündedir. Elyaf ara yüzeyinin altında yerel normal gerilmelerin artması ile çözünmenin artacağı not edilmelidir. Diğer taraftan Şekil 2.7 b)'de yanlış yönlenmiş elyafların ara yüzey hasarları görülmektedir. Bu hasarların Elyaf-matris ara yüzeyi boyunca normal ve kayma gerilmesi birleşimi ile oluşmaktadır.



Şekil 2.7. Elyaf-matris ara yüzey kırılması a) Normal gerilme etkisi (σ), b) kayma gerilmesi etkisi (τ), (Jendli ve ark. 2005)

Jendli ve ark. (2005) araştırma sonuçlarında makroskopik ölçekte malzemenin mekanik karakteristikleri olan Elastisite modülü (E), hasar eşik değeri ve nihai gerilme, gerinim değerlerini yüksek hızlı çekme testleri ile tahmin etmişler, farklı deformasyon hızlarında numunenin toplam hasarını belirlemişlerdir.

Daha önce anlatılan sonuçlar ve gözlemlerin temelinde hasarın deformasyon-hızı etkisi aşağıdaki gibi yeniden gruplanabilir:

- Lokal ara yüzey gerilimi artışı (özellikle normal nihai gerilme) kinetik hasar yığılmasını ve hasarın başlamasını ertelemektedir.

- Elyaf- matris ara yüzeyinde saf normal gerilme etkisinin daha önemli olduğu öne sürülmektedir.

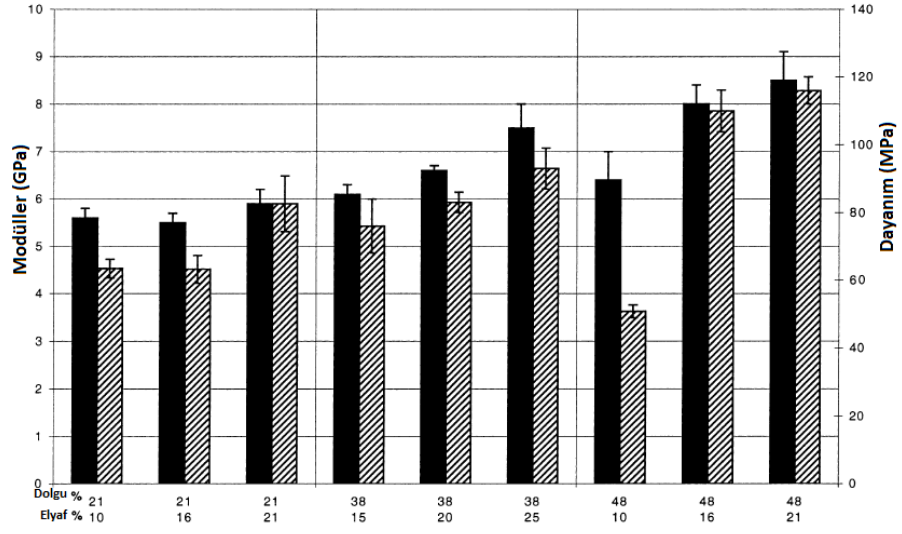
Düşük deformasyon oranı ile elyaf-matris ara yüzeyinin çözülmesi başlıca ara yüzeydeki normal gerilme ile ortaya çıktığı sonucu elde edilmiştir. Ancak yüksek deformasyon oranı hasar kinetiği ile bütün elyaf dağılımları nispeten özdeşleşmiştir. Makroskobik ölçekte hasar değişimi elyaf-matris ara yüzeyi boyunca mikro-çatlak yoğunluğu uygulamada deformasyon oranı ve elyaf dağılımının bir fonksiyonu olarak analiz etmişlerdir (Jendli ve ark. 2005).

Çelik malzemelerde darbe enerjisi plastik deformasyon ile absorbe edilirken kompozit malzemelerde elyaf çözülmesi, elyaf kırılması, matris çatlaması gibi hasar mekanizmaları ile absorbe edilir. Bundan dolayı endüstriyel uygulamalarda metal malzemeler yerine bir kompozit malzemeyi kullanabilmek için kompozit malzemenin darbe özellikleri iyi bilinmelidir. Lee ve ark. (1999) çalışmalarında nispeten düşük maliyet ve yüksek verimliliğinden dolayı otomobil endüstrisinde geniş bir şekilde kullanılan SMC'nin darbe etkisini hem deneysel hem de nümerik olarak incelemişler, bunun için düşürme ağırlıklı darbe test sistemi uygulamışlardır. Bu sistem kullanılarak SMC plakalardaki darbe enerjisi dağılımını araştırmak için darbe ölçerin şekli ve kütlesi, başlangıç hızı ve numune kalınlığı ölçülmüştür. Nümerik olarak tahminler için SMC hasar modeli modifiye edilmiş ve ticari olarak kullanılan bir simülasyon programı tasarlamışlardır.

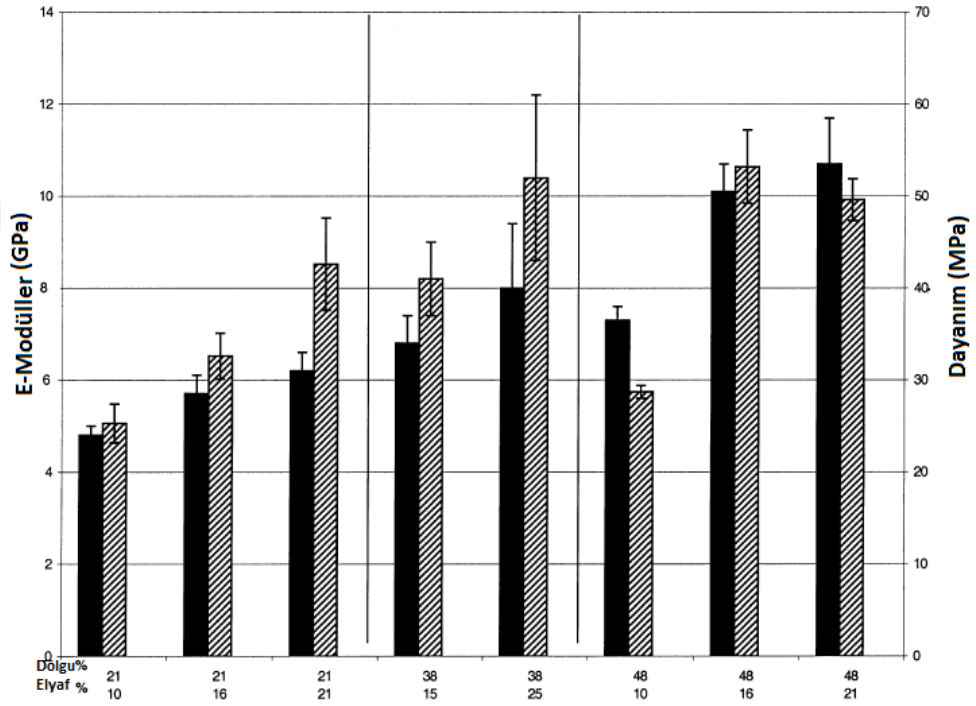
Elde ettikleri sonuçlarda numunelerin darbe enerjisi dağılım kapasitesi geometri ile kontrol edildiğini göstermişler, bu kapasite başlangıç darbe enerjilerinin dağılımı ile önemli bir şekilde etkilememekte ancak bu kapasiteyi etkileyen farklı darbe ölçer tiplerinin neden olduğu farklı hasar mekanizmalarını bulmuşlardır. Deneysel ve nümerik sonuçları karşılaştırmışlar, nümerik işlemlerin deneysel gözlemlerle tutarlılık sağladığını göstermişlerdir. Deneysel ve nümerik sonuçlar, numune kalınlığı arttıkça darbe enerjisi dağılımının arttığını göstermiştir (Lee ve ark. 1999).

Doğal elyafla takviye edilmiş kompozitlerin (NFRC) otomotiv endüstrisindeki kullanımını bugünlerde artmaktadır. (NFRC)'in cam elyafla takviye edilmiş kompozitlerle (GFRC) karşılaştırıldığında, düşük yoğunluk ve düşük ekipman aşınması gibi birkaç avantajı vardır. Ayrıca selülozik elyaflar (jüt, manila keneviri, sisal, keten) nispeten daha ucuzdur ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilebilir. Ayrıca Avrupa'daki atık azaltma yasalarında, GFRC'nin aksine NFRC'nin yanabilir olması bir avantajdır.

van Voorn ve ark. (2001) yaptıkları çalışmada SMC üretiminde faydalı olarak kullanımına izin veren, kısa keten elyaflar için yeni geliştirilen sistemi anlatmışlardır. Kurutulmuş eşit bir şekilde dağıtılan kısa keten elyaflar kullanılarak, kontrollü bir şekilde emdirilen ve olgunlaştırılarak kalıpta homojen pestil elde edip sonra keten elyaf takviye edilmiş SMC (FFSMC) üretmişlerdir. Özellikle elyaf uzunluğu 25 mm'yi aştığında keten elyafla takviye edilmiş SMC malzemeler, sertliğe nazaran uygulanan tasarımlarda mekanik data olarak cam elyaflı SMC ile rekabet ettiği gözlenmiştir. Çalışmalarında çekme, eğilme ve darbe özelliği olarak üç mekanik özelliği incelemişlerdir. Her bir elyaf yüzdesi, dolgu yüzdesi ve elyaf uzunluğunu tanımlamışlardır. Hem keten elyaf hem de inorganik dolgu FFSMC'nin elastisite modülü ve dayanımlarını artırmışlardır. Elyaf ve dolgu miktarı arttıkça çekme özelliklerinin artması da beklenmektedir (Şekil 2.8). Eğilme özelliklerinde de benzer etkiler görülmektedir (Şekil 2.9). FFSMC'nin darbe özelliklerinde dolgunun önemli bir etkisi yoktur ancak keten elyaf miktarı arttıkça darbe dayanımını arttırmaktadır. Ayrıca cam elyaf yerine %15-30 keten elyaf kullanarak ağırlığı %11-20 oranında azaltmayı başarmışlardır. Sonuç olarak, cam elyafla keten elyaf arasında mekanik değerler olarak yakın değerler elde edilmiştir (van Voorn ve ark. 2001).



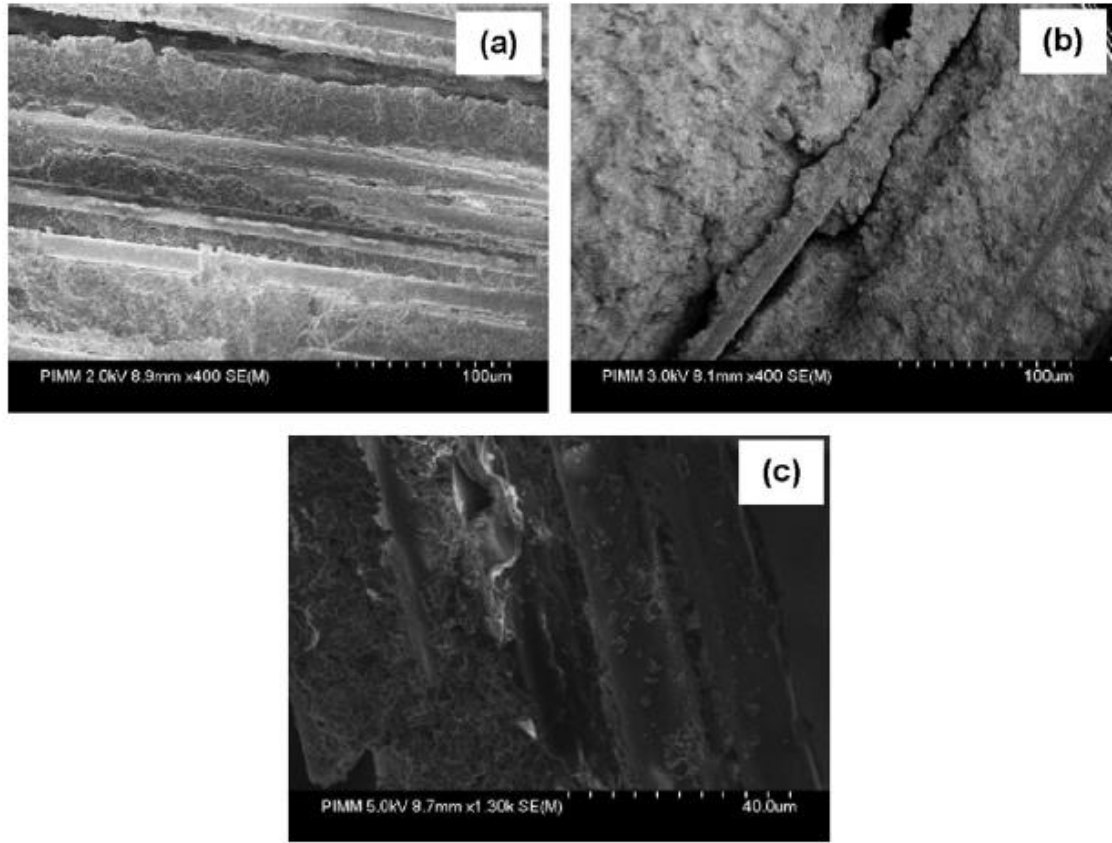
Şekil 2.8. FFSMC'nin çekme özellikleri: Soldaki sütun E-modülü, sağdaki çekme dayanımları (van Voorn ve ark. 2001)



Şekil 2.9. FFSMC'nin eğilme özellikleri: Soldaki sütun E-modüller, sağdaki eğilme dayanımları (van Voorn ve ark. 2001)

Standart SMC kompozitlerde elyaf oranı ağırlıkça %30'dan daha azdır. İleri (Advanced) SMC ile bu elyaf oranı %50 üzerine çıkarılabilmektedir ve yapısal otomotiv parçaları için iyi bir kompozit malzeme adaydır. Shirinbayan ve ark. (2015) A-SMC parçaları yüksek hızlı gerilim altındaki mekanik davranışlarını mikro ve makroskopik

karakterizasyonunu ileri bir deneysel yöntem geliştirerek incelemiştir. Deneysel metodolojiyi geliştirmek için A-SMC deformasyon oran etkileri üzerine dinamik çekme makinası tercih etmişlerdir. Yüksek deformasyon oranı 100 s^{-1} olana kadar elde etmek için servo-hidrolik test ekipmanı kullanmışlardır. Yüksek deformasyon oranlı çekme testlerinin deneysel sonuçlarına göre deformasyon oranı arttığında numunelerin elastisite modülü sabit kaldığı halde kompozitin davranışı deformasyon oranına sıkı bir şekilde bağlıdır. SEM analizlerinde kırılan çekme numunelerini incelemişler, nihai gerilime kadar elyaf-matris ara yüzeyinde ayrılmadan dolayı hasar enerjisinin fazla olduğunu bulmuşlardır.

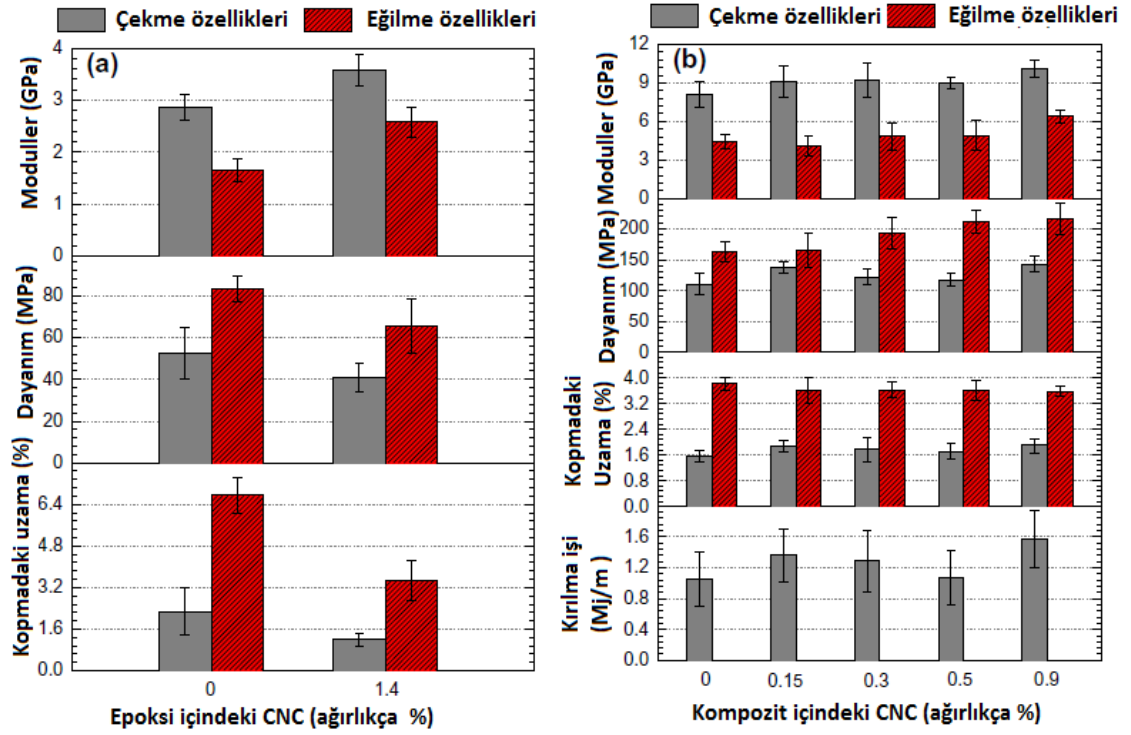


Şekil 2.10. Elyaf matris ara yüzeyinde ayrılma a) 0° (100 s^{-1} civarında) b) 45° (100 s^{-1} civarında) c) yaklaşık 90° sanki-statik (Shirinbayan ve ark. 2015).

Çekme yönüne bağlı elyaf yönlenmelerine bağlı elyaf-matris ara yüzey ayrılması Şekil 2.10'da verilmiştir. Kırılan ara yüzeylerin etrafında matris parçalarının olmasının hem sanki-statik hem de dinamik yüklemelerde elyaf-matris arasında yüksek dayanım özellikleri olduğunu ifade etmişlerdir (Shirinbayan ve ark. 2015).

Kesikli elyaf ile takviye edilen kompozitler SMC yöntemi ile araç parçalarının üretiminde sıklıkla kullanılır. Karbon elyafla takviye edilen plastiklerin CFRP üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında SMC ile kesikli elyaf malzemeli kompozit üretmek, biçimlendirme özelliği ve düşük maliyetten dolayı üstünlüğe sahiptir. Karbon elyaf SMC (C-SMC) kompozit malzeme karbon elyaf uçları ve matris arasında oluşan çatlaklardan dolayı çok mükemmel bir performans sağlayamazlar. Bu amaçla Fujitani ve ark. (2016) çalışmalarında kesikli elyaf karbon SMC malzemenin yorulma özelliklerini geliştirmek ve bu mekanizmayı açıklamak için 500 nm çapında mikro cam elyafları vinil ester reçine içerisine doğrudan ekleyerek yükseltmişlerdir. Ürettikleri plakaları numune boyutlarında kestikten sonra çekme, eğilme ve yorulma testi ile dayanımlarını incelemişlerdir. Sonuç olarak modifiye edilmeyen malzemelere göre çekme dayanımının %56,6, eğilme dayanımının %49,8 ve yorulma dayanımının 14-23 kez arttığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca mikro cam elyaflar ile vinil ester matris modifiye edildiğinde, karbon elyaf uçları etrafında lokal olarak uzamanın artışının önlenmesi ile çatlak başlangıcı ve ilerlemesi önlenmekte ve bunun kesikli karbon elyaf plastiklerin statik ve dinamik özelliklerini geliştirdiğini öne sürmüşlerdir.

Kompozit malzemeler araçlarda ağırlık hafifletmede tercih edilmektedir. Ağırlığı azalan araçlarda yaklaşık % 6-8 yakıt verimliliği artırılmaktadır. Nano malzemelerin eklenmesi ile polimer reçine özellikleri artırılırken kompozit bileşenlerinde ağırlık azaltılmakta ve malzemenin mekanik özellikleri geliştirilmektedir. Asadi ve ark. (2016) çalışmalarında selüloz nanokristaller CNC içeren kısa elyaflı epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerini SMC üretim metodunu kullanarak, CNC-epoksinin reolojik ve termomekanik özelliğinin yanı sıra CNC içeriğinin bir fonksiyonu olarak araştırmışlardır.

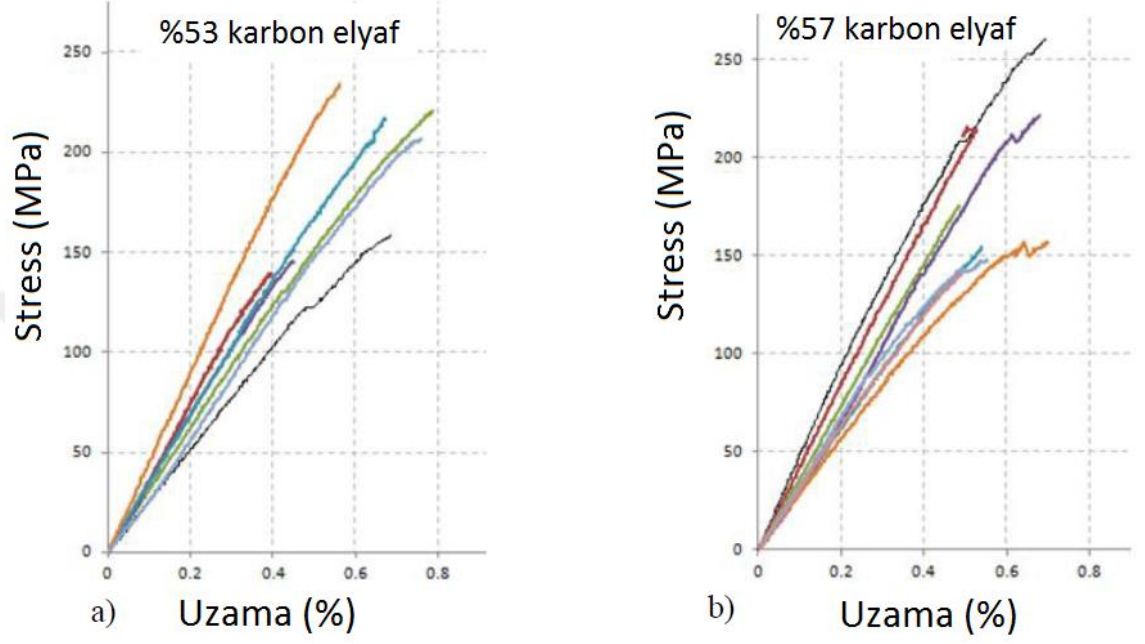


Şekil 2.11. CNC içeriğinin etkisi a) CNC-epoksi ve b) ağırlıkça %35 cam elyaf/epoksi kompozitlerin çekme ve eğilme özellikleri (Asadi ve ark. 2016)

CNC'yi ağırlıkça % 1.4'e kadar SMC üretimdeki epoksi reçine içine dağıtmışlardır. Ayrıca CNC'nin eklenmesi reçine viskozitesini artırdığını ve sıcaklık, reçine kullanma süresi etkisi ve kürlenme zamanı olmaksızın polimerizasyon süresince tepkime ısısının hafifçe azalttığını söylemişlerdir. Ağırlıkça % 0,9 CNC ekleme SMC kompozitte elastik modül ve çekme dayanımını %25 ve %30 ve eğilme modül ile eğilme dayanımında %44 ve %33 sırasıyla arttığını sonucunu bulmuşlardır (Şekil 2.11). CNC'nin ağırlıkça %0,9'a kadar darbe dayanımı değiştirmedini ifade etmektedirler (Asadi ve ark. 2016).

Araştırmacılar ve otomobil üreticileri, temiz-hava çevre gereksinimleri ve yakıt fiyatlarının hızlı artışından dolayı otomobillerde kütle azaltma uygulamalı CFRP ile ilgilenirler. Son kompozit teknolojilerinde araştırmacılar otoklav malzeme biçimlendirmenin dışında önemli derecede daha etkili üretimlere, otomatik proseslere odaklanmışlardır. Basınçlı kalıplama yüksek hacimli parçaların seçiminde yaygındır. SMC yöntemi ile ısı ve basınç altında kapalı kalıplarda çevrim zamanı, parça kalınlığı ve boyutuna bağlı olarak 1-10 dakikada bir parça üretilebilir. SMC ile cam elyaf malzemeler polyester ve vinil ester reçine içine gömülürken şimdilerde mekanik

performansı artırmak için termoplastik reçineye karbon elyaflar (25 mm'ye kadar) adapte edilmektedir. Nicoletto ve ark. (2016) çalışmalarında hacim oranı olarak %53 ve %57 oranında rasgele karbon elyaf ile SMC üretmeyi başarmışlar ve Şekil 2.12'de verilen gerilme-birim deformasyon eğrilerini elde etmişlerdir.



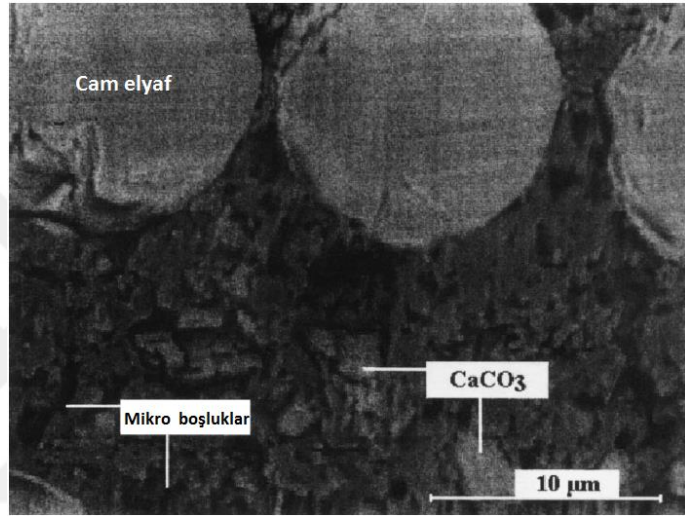
Şekil 2.12. Karbon elyaf içeriklerine göre gerilme-birim uzama eğrileri a) %53, b) %57 (Nicoletto ve ark. 2016)

2.2. Yüzey Kalitesi ve Hatalar

SMC'de porozite ve özellikle büzülmeden sonuçlanan mikro boşlukların nicel morfolojik analizleri görüntü işleme kullanılarak yapılmaktadır. Doymamış polyester ve cam elyaflı kompozit malzemeler hafif ağırlıkları, iyi mekanik özellikleri, korozyon dayanımı, dayanıklılık ve estetik özelliklerinden dolayı otomotiv endüstrisinde artan biçimde kullanılmaktadır. Bunların arasında SMC, yapısal gövde parçalarında A sınıfı yüzey görünümü elde edildiği için kullanılabilir.

Yeterli korozyon dayanımına sahip olmalarına rağmen yaşlandıklarında durabilitelerini kontrol altına almak giderek önemli hale gelmiştir. Bu malzemelerin iç mikro boşlukları yüzey görünümünde önemli bir anahtar rol oynamaktadır. Doymamış polyesterin

yaşlanması uzun yıllar çalışılmış, difüzyon katsayısı ve suyun etkisine özellikle dikkat çekilmiştir. Merle ve ark. (1998) çalışmalarında, SMC’de oluşan mikro boşlukları analiz etmişlerdir. Yaşlanma sonrası organik malzemelerin (genellikle küçük boşluğa sahip kenarların soğuma esnasında farklı büzölmelere neden olduğu) çukur şeklinde boşluklar ortaya çıkardığını ve mikroskopik ölçümlerde farklı dış yüzeylerde daha çok reçinenin daha az poroziteye neden olduğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 2.13). Ayrıca hidrotermal yaşlanmanın gözle görülür biçimde mikro boşlukları azalttığını ifade etmişlerdir.



Şekil 2.13. SMC morfolojisine örnek- saf SMC’den 0,5 mm. kenardan kesilmiş parlatılmış taramalı elektron mikroskobunda görüntülenmiştir (5 kV, 22,5 µm ×30 µm boyutlarda) (Merle ve ark. 1998)

SMC gibi kompozit malzemelerin termoset karakteristiklerinde matris-yüzey etkileşimleri ile takviye malzemesi etkilidir. Feuillade ve ark. (2006a) çalışmalarında farklı boyutlardaki cam elyaflar ile doymamış polyester matrisin ıslatma özelliklerini kontak açısı belirlenmesi ile çalışmışlardır. Yüzey enerjileri ile ıslatma ve adezyon özelliklerini sağlayan çeşitli parametreler aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

- Boyut miktarı
- Anti-statik ajan özelliği
- Anti-statik ajan biriktirme metodu
- Doğal film oluşturucu

Çalışmada, cam elyaf karakteristikleri, malzeme akışı ve SMC panellerin yüzey kalitesi arasında istatistiksel olarak bir korelasyon kurulmuştur. SMC performanslarını optimize etmek için yalnızca reçine ve elyaf düşünülmemeli aynı zamanda global kompozit davranış etkisinin, oluşum evresine neden olan boyut özelliği de dikkate alınmalıdır. Bu davranışta reçine viskozitesi, jelleşme zamanı, kür kinetiği gibi proses şartları da etkileyebilmektedir. Daha uniform ve sürekli emdirme prosesi daha iyi SMC yüzey kalitesi, zayıf emdirme ise zayıf adezyon ve boşluklara neden olmaktadır. Bu SMC panel yüzeyinde boşluklar üretecektir.

Yüzey kalitesi, panel yüzeyindeki dalgalanmalar, iğne deliği, baloncuklar ve krater olarak kusur sayısı ile tanımlanır. Bu yüzey kalitesini SMC bileşenleri (elyaf, organik matris), kalıplama parametreleri, cam elyaf/organik matris etkileşimleri etkilemektedir. Feuillade ve ark. (2006a) bu parametrelerin etkisini geliştirmeye ihtiyaç duymuştur. Yaptıkları çalışmada cam elyafın boyut bileşimine göre SMC panellerinde cam elyafın karakteristikleri, malzeme akışı ve yüzey kalitesi arasındaki ilişkiyi daha iyi anlamayı amaçlamışlar. Sonuçları yorumlarken, cam elyaf karakteristiklerinin birbiri ile olan özellikle elyaf sertliği, cam hasır geçirgenliği, şişme, boyut çözünürlüğü gibi parametrelerin birbiri ile etkileşimlerinin yorumlanmasının zorlukları tartışmışlardır. Global analizlerde geçen en önemli özellikler:

- 1) Daha yüksek yüzey kalitesi elde etmek için cam elyaf hasır geçirgenliği önemlidir.
- 2) Emdirmeden önce yüksek elyaf sertliği, kalıplama süresince cam elyaf dağılımı geliştirilmelidir.
- 3) Daha düşük stiren çözünürlüğü (%50 civarı)
- 4) Düşük yüzey şişkinliği yüzey bakımı gerekmektedir.

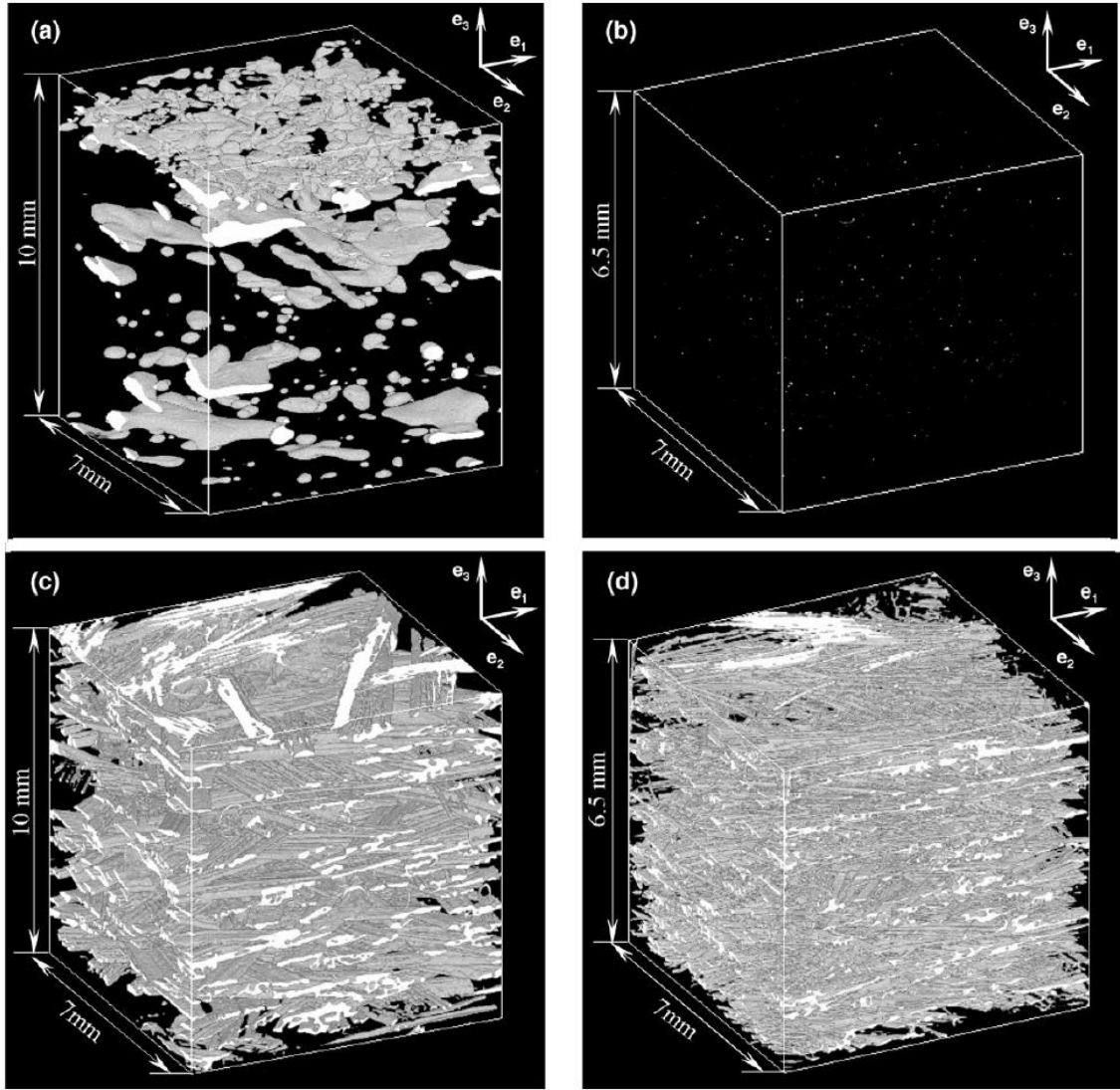
Çalışmalarında ayrıca kalıplanan SMC panellerin yüzey kalitesi ile bozulma arasında ilişki, iyi yüzey kalitesi elde etmek için yüksek viskoz reçine gerekliliği, cam elyafın yüksek sertliğe, elyaf hasırın yüksek geçirgenliğe, düşük elyaf boyutlarının, düşük şişkinliğe sahip olması gerektiğini göstermişlerdir. Yüksek elyaf sertliği, hasır elyafların

yüksek geçirgenliği ve elyaf boyutlarının azaltılması SMC panellerin yüzey kalitesini yükseltir.

Feuillade ve ark. (2006a) çalışmalarında cam elyafın boyut kompozisyonuna uygun olarak SMC panellerin yüzey kalitesi, malzeme akışı ve cam elyaf karakteristikleri arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Deformasyon işi SMC yüzey kalitesi ile ilişkilidir; yani iyi yüzey kalitesi, elyaf boyutlarındaki düşük şişme, elyaf hasırlardaki yüksek geçirgenlik, cam elyafların yüksek sertliğe sahip olması ve yüksek viskoz reçine ile elde edilebilmektedir.

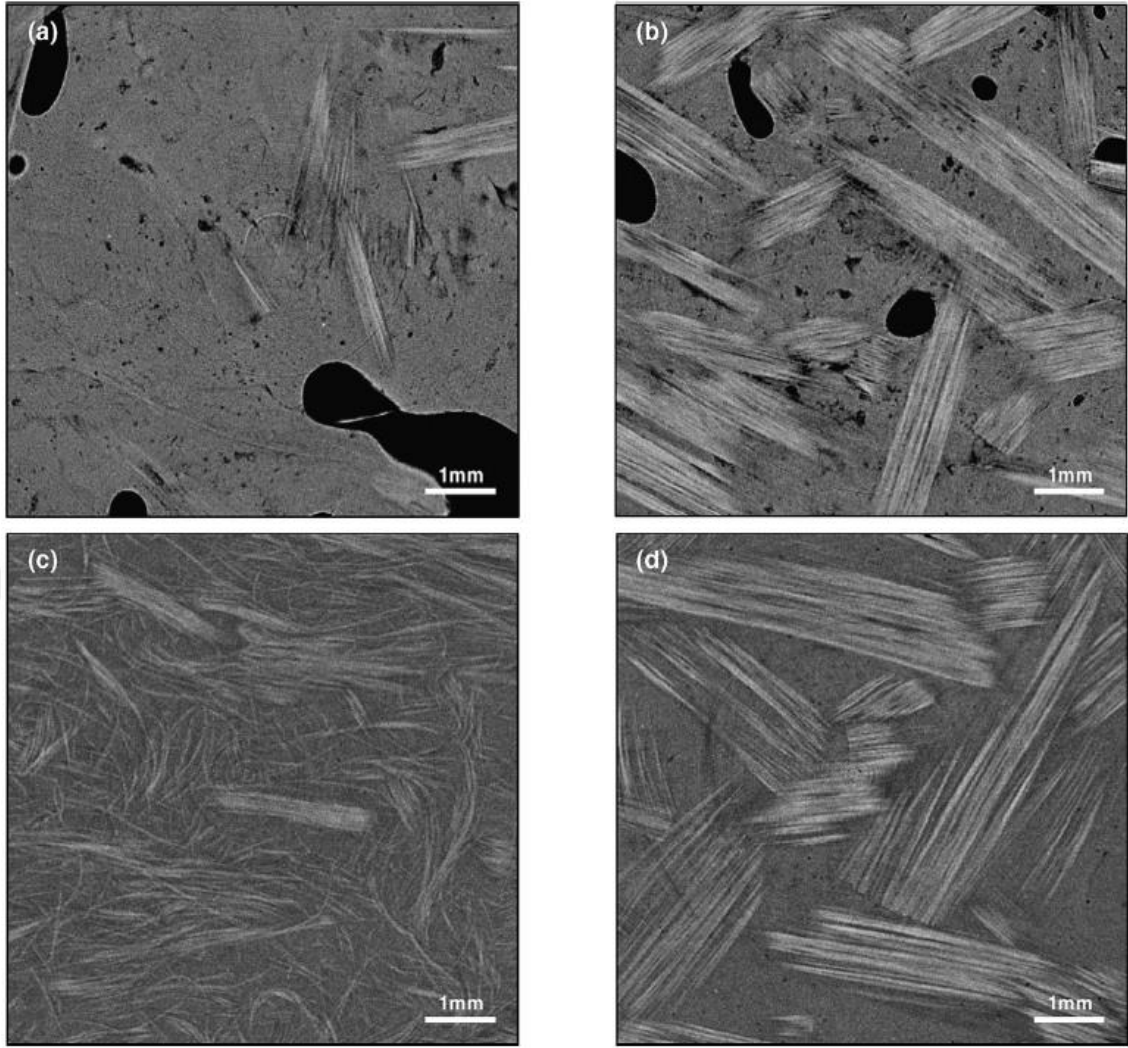
Sıcak kalıp içerisinde basınç altında kalan SMC levhalarındaki elyaf demetlerinin dağılımı ve yönelimleri gibi nedenlerle mikro yapısı büyük oranda değişir ve boşluklar gelişir. Bu değişimler kalıplanan parçaların yüzey görünümünün iğne deliği, kraterler, yüzey dalgalanmaları yanı sıra nihai fiziksel ve mekanik özelliklerini önemli oranda etkiler. Le ve ark (2008) deforme olmadan kesilmiş basınçlı kalıplama SMC plaka örneklerini X ışını mikro-tomografi ile kontrast yol kullanarak analiz etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre; SMC başlangıç sıcaklığı artırılması ile kalıplamadan sonra porozitenin önemli bir şekilde azaldığını vurgulamışlardır. Kabuk içinde elyaf içeriği ve porozite çekirdek bölgeden daha zayıf ve elyaf demetleri yüksek derecede kırıktır. Aksine elyaf demetlerinin kalanı çekirdek bölgeyi muhafaza eder. Bu kalıplama aşamasında elyaf demetlerinin dağılımlarının düzenlenmesi, boşlukların oluşumu ve gelişimi gibi büyük mikro yapısal değişimler ortaya çıkar. Optik ve taramalı elektron mikroskobu matris ile emdirilen demetler hakkında büyük oranda önemli bilgiler elde edilir. X ışını radyografi absorpsiyonu elyafların dağılımını karakterize etmek için kullanılmıştır.

Şekil 2.14 c) ve d)'de görüldüğü gibi elyaf yığınının ağ gibi kompleks ve zor karmaşık mikro yapılarının kolay biçimde resimden çıkarmak ve her bir yığınının geometrik özelliklerini analiz etmek mümkün değildir. Bunun yerine manuel ve doğrudan 3D gri ölçekli resim ve Matlab yazılımı kullanarak çıkarılmışlardır.



Şekil 2.14. 3D örneklerden alınan mikroskopik örnekler a) ve c), deforme olmayan örnek, $0 \text{ mm} < x_3 < 10 \text{ mm}$) ve b) ve d), basınçlı kalıplamadan sonra, $0 \text{ mm} < x_3 < 6,5 \text{ mm}$), gözenek görünüyor, a) ve b) ve demetler, c) ve d), X-ray mikrotomografi faz kontrast modu ile elde edildiler (Le ve ark. 2008)

Şekil 2.15 a)'da kabukta birkaç demet vardır buna karşın Şekil 2.15 b)'de çekirdekteki tabakalarda birçok yığın düz olmaktan ziyade matris içinde karmakarışık ve poroz bir ağ yapısındadır. Deforme olan lifli mikro yapıları örneklerin oldukça farklı sistematik olarak iki belirgin bölge göstermektedir: kabuk ve çekirdek (Le ve ark. 2008).



Şekil 2.15. Deforme olmayan 2D mikro grafik örnekler (a ve b) ve basınçlı kalıplanan örnek (c ve d), kabuğa yakın (a ve c), $x3 = 0,02 \text{ mm}$) ve örneklerin ortasında ((b ve d), $x3 = h/2$) (Le ve ark. 2008)

Önceki çalışmalarda SMC'deki gözeneklerin (porozite) oluşum nedenleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

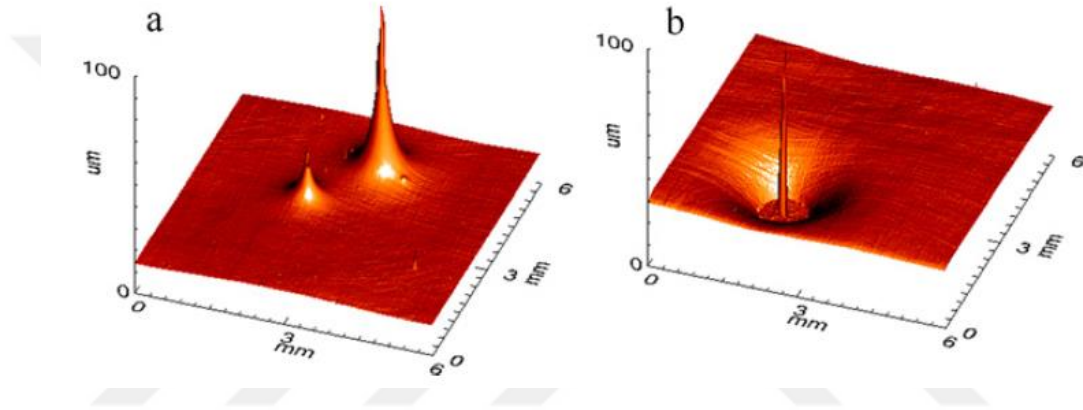
- Birleşim fazı, örneğin macun karıştırma, elyaf demetine emdirme esnasında hava hapsolması.
- SMC tabakaları yüklenirken sıkıştırma olmadan önce benzer mekanizmaya neden olur.
- Elyaf-yığınlarının ıslatma özelliği ve rijitlik her ikisi de, boyut tipleri ve aşırı boyutlara bağlıdır, basınçlı kalıplanan parçaların gözenekli içeriği etkilidir.
- Akış başlangıcında ortaya çıkan ezilme hava hapsolmesine neden olur.

- Kür esnasında, stiren kaynaması da gözenekliğin kaynağıdır.
- Matrisce zengin kabuktaki akış mekanizmalarında basınçlı kalıplanan parçaların çekirdeğindeki poroziteden daha düşük yüzey gözenekleri görülür.
- Poroziteyi etkileyen olası tüm proses parametreleri arasında, kalıp kapama basıncı, akış aşamasının sonunda kalıp kapama basıncı, bileşenlerin kürü esnasında gaz fazlarının hapsolmasının sınırlı genişlemesinde önemli bir rol oynayabilir.
- SMC tabakalarını ön ısıtma; makul dereceli sıcaklıklarda ön ısıtılan SMC tabakaları (stirenin çok altında kaynaması) ve makul zamanda (polyester reçinenin küründen önce) porozite de etkilidir ve basınçlı kalıplanan parçalarda gözenek azaltmak uygun olabilir (Le ve ark. 2008).

Genellikle SMC parçalarına arzu edilen renkleri sağlamak için ilaveten kaplama yapılır. Dış gövde parçaları araç rengine göre boyanırlar. Mevcut alternatif tamamlama teknolojileri çözücü veya su içinde ıslatılmış boya, iç kalıp süsleyicileri filmleri içerir. Son zamanlarda toz kaplama teknolojilerinden faydalanmak için engellerin üstesinden gelme çabaları vardır. Bu alanda uzun çalışmalar olmasına rağmen proses geliştirmenin yanı sıra basınçlı kalıplanan SMC parçalarının mikro çatlaklar, çukur ve porozite, yüzey eksiklikleri gibi yüzey kusurları ve endüstriyel kaplama prosedürleri problemleri halen üzerinde çalışılan konulardır. Böylece zaman kaybı ve aşırı maliyete neden olan ek işlemler (astar uygulaması, alev işlemleri, takviye) A sınıfı yüksek kalite yüzey standardı için ortadan kaldırılabilir. Gedan-Smolka ve ark. (2011) kaplama işlemleri esnasında SMC kalıplarının davranışını açıklayarak, gelecekteki kaplama eksiklikleri probleminin üstesinden gelmek için yeni teknolojik öneriler getirmeye çalışmışlardır.

Endüstriyel kaplama işlemleri süresince gaz çıkışı ve sertleşme sonrasında yanı sıra reaktif inceltici ve doymamış reçinenin tamamlanmamış kür reaksiyonlarının farklı şartlarda kalıplanmasının A-sınıfı SMC test panelleri üzerine yapılan termal araştırmalara dayanan, kaplama problemlerindeki gözlemlenen iki ana sebeptir. Ayrıca test panellerinin yüzey özellikleri, bilhassa kontak açısı ve yüzey pürüzlülüğü güçlü bir şekilde temizleme ve paklamanın yanı sıra sertleşme ve kaplama işlem parametrelerine bağlıdır. Gedan-Smolka ve ark. (2011) endüstriyel kaplama işlemlerinin gereksinimi

dolduran güçlü yeni etkili maliyet prosedürünün dezavantajlarının üstesinden gelmeye çalışmışlar, elektron demetinin yüksek enerji elektronları ile sertleştirme ve işlevselleştirilmesine dayanan yeni ön işleme yöntemi geliştirmişler, SMC parçalarının sertleşme sonrası yüzey işlevselleştirilmesini başarmışlar. Yeni ön kaplama teknolojisi ile etkili kaplama işlemlerini artırmışlar ve patent almışlardır. Şekil 2.16'da iki kaplama kusuru verilmiştir. Hiç kuşkusuz yıllardır literatürde bilinen SMC kalıplamadaki, hava hapsolmesi, su ve stiren kaynaması ve SMC yüzey tabanına astar çözücü penetrasyonu ortaya çıkmaktadır, fakat buharlaşma hakkında fazla detay yoktur.



Şekil 2.16. Kromatik odak tarafından görüntülerin saptandığı SMC-alt tabaka kaplama kusurları; (6mm×6mm); a) yükselme, örneğin gaz çıkışı tarafından, b) krater, iğne deliği veya kabarcık tarafından (Gedan-Smolka ve ark. 2011)

SMC, MgO ile kalınlaştırılan doymamış polyester reçineden oluşan termoset malzeme, CaCO₃ dolgu ve diğer katkıları ve 25 mm uzunluğundaki rasgele yönelmiş cam elyaf ile takviye edilmesidir. SMC malzemelerin yüksek dayanım/ağırlık oranı, iyi mekanik özellikleri nedeniyle otomotiv endüstrisinde kullanımı artmaktadır. Fakat SMC panellerin yüzeyindeki üretim esnasında oluşan kusurlar problemdir. Çeşitli eksiklikler otomotiv üreticileri tarafından aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- 1) İğne deliği (Pinhole) (<1mm) ve krater (>1mm) : Kalıplanan reçinede lokal CaCO₃ partiküllerinin toplanması ve düşük püskürtülen yağlayıcı ajanın krater oluşturması.
- 2) Kabarcık (1mm'den 1 cm'ye kadar) : Hava veya gaz stirenin SMC panel yüzeyinde boşluk oluşturması.

3) Lokal elyaf dağılımları ve reçinenin büzüşmesi sonucu dalgalı yüzey oluşması.

Literatürde ise yüzey kalitesini etkileyen birkaç parametre aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Kalıplama sıcaklığı
- Elyaf dağılımı
- Elyaf emdirme, elyafın reçine ile ıslanması, emdirme esnasında reçinenin olgunlaşması ve kalıplama (Feuillade ve ark. 2006b).

2.3. Simülasyonlar ve Modelleme

Enerji verimliliği, gaz emisyonları yönetmelikleri ve binek arabaların ağırlığını azaltma kompozitlerin kullanılmaya başlanmasının ana nedenleridir. Kompozit yapıların tasarımında üç önemli ana faktör olan; şekil, malzeme ve darbe dayanımı şartları üzerinde Hosseinzadeh ve ark. (2005) çalışmışlar ve elde ettikleri sonuçları çelik ve alüminyum gibi geleneksel malzemelerle karşılaştırmışlardır. Sözü geçen faktörler karakterize edilirken GMT tampon yerine daha yüksek dayanıma sahip olduğu için SMC tampon önermişlerdir. Önerilen modelin diğer avantajları; eşit dayanım, yapının rijitliği, daha az malzeme, üretim kolaylığı, düşük üretim maliyetleri olarak sıralanmıştır.

Bu yapılar için öncelikle darbe dayanımı istendiğinden, malzemenin darbe karakteristiklerini doğrudan etkileyen parametreler araştırılmış ve ticari tamponlar üzerine darbe modellerinden sonuçların değişimlerinin kolaylıkla yapılabileceği görülmüştür. Test modelleme süresinde üç ana stratejik parametreyi dikkate almışlardır: Bunlardan ilki malzeme; malzemenin kesiti nasıl darbe şartlarını etkileyebilir ve daha düşük parça maliyetleri amacıyla ne çeşit malzemeler yerine kullanılabilir. İkincisi şekil; nasıl küçük değişimlerde bile, darbe dayanımını azaltmaksızın daha az malzeme hacmi ve daha kolay üretim prosesleri ile sonuçlanabilir. Üçüncüsü darbe dayanımı; darbe davranışını etkileyen parametrelerin test sonuçları ile ifadesi gösterilmiştir. Yazarlar ayrıca araştırmaları ile bugün arabalarda plastik ve kompozit malzemelerden

yapılan ve %8 olarak belirtilen güncel malzeme kullanımından daha düşük maliyetli üretilere dikkat çekmeye çalışmışlardır.

Hafif ve rijit yapı, dayanıklılık ve paslanmama özelliklerinden dolayı SMC son zamanlarda otomotiv dış panellerinde sac metal parçalar yerine kullanmak için iyi bir adaydır. Basınçlı kalıplama çevriminde; malzeme karakterizasyonu, ısı transferi, kurlenme, SMC yükleme ve kalıp arasındaki kontak sınır şartları basınçlı kalıplanan SMC'nin mekanik özelliklerini etkiler. Bu yüzden kalıptaki akış mekanizması, sıcaklık dağılımı, kür oranı ve cam elyaf filamentlerinin dağılımı ve oryantasyonunu tahmin etmek çok zordur. Kim ve İm (1997a) yaptıkları çalışmada, SMC basınçlı kalıplamayı oda sıcaklığında rijit-viskoplastik yaklaşım temelli üç boyutlu sonlu elemanlar programı ile analiz etmek için geliştirmişlerdir. Basınç testlerinden elde edilen deneysel sonuçlar ile literatürdeki mevcut sonuçları, simülasyon sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Mevcut araştırmalarda; gereken yükleme, malzemenin ön akışının yayılımı üzerine kalıplama hızları ve sürtünme etkisinin araştırmak için basınçlı kalıplanan dikdörtgen SMC numunelerin bu karşılaştırmalar temelinde geliştirdikleri bir program ve simülatör yardımıyla doğruluğunu ispatlamışlardır.

Kalıplama esnasında oda sıcaklığındaki SMC'nin deformasyonu üzerine sürtünme ve basınç hızının etkisini incelemek için Kim ve İm (1997a) dikdörtgen yüklemenin basınçlı kalıp simülasyonunu, iki sürtünme ve hız şartı altında incelemişlerdir. Sürtünmenin etkisinin oda sıcaklığındaki basınçlı kalıplama süresince ve sürtünme ile biçimlendirme yükleme seviyesinde deformasyon artışı ile fark edilen kapama hızı daha önemlidir. Ayrıca analiz programının malzemenin akışı ve mekanik özellikleri üzerine reolojik özelliklerini kalıplama parametrelerinin etkisini araştırmak için çok faydalı olduğunu bildirmişlerdir.

Kırılmış kısa cam elyaflar termoset SMC reçine içine eklenerek birleştirilirken, kalıplanan parçaların dayanım ve rijitliğine ilaveten SMC reçine bileşenlerinin etkilerini, kalıp geometrilerini, akış karakteristikleri üzerine proses değişkenlerini, kalıplanan parçaların mekanik performansının daha iyi anlaşılması karmaşık bir konudur. Bu yüzden Kim ve İm (1997b) yaptıkları diğer bir çalışmada kimyasal

reaksiyon ve elyaf hacim oranı tahminini de içeren 3 boyutlu rijit termo-viskoplastik sonlu eleman yazılımını geliştirmişler ve SMC basınçlı kalıplama yüklemesinin analizlerini uygulamışlardır. Yerleşme zamanının etkileri, kalıp kapama hızı, sürtünme, kalıp doldurma ve kürlenme üzerine kalıp sıcaklığı, SMC yükleme miktarının 3 boyutlu kalıplama simülasyonlarını araştırmak için kalıp kapama hızı (45mm/dk ve 250 mm/dk) ve kalıbın sıcaklığı (130 ve 150°C) ve sabit kayma sürtünme faktörü (0,1 ve 0,8) gibi çeşitli kalıp parametreleri değiştirilip kullanılarak gerçekleştirilmişlerdir. Düzlem uzama şartları için hesaplanan elyafın hacimsel oran dağılımı literatürdeki mevcut elektron tarama mikroskobundan elde edilen bilgiler deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Simülasyon sonuçlarından ise kalıp kapama hızlarının artması ile SMC yüklemesinin serbest yüzeyinin akış tercihlerinin azaldığını bulmuşlardır. Kalıp sıcaklığı kürlenme davranışındaki en kritik parametredir.

Kim ve ark (1997), SMC parçalarını kalıpta sıkıştırırken fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine kalıptaki değişimlerin etkisini deneysel olarak gözlemlemeye çalışmışlardır. Basit sıkıştırmada, testler için gres yağı ya da polyester film tabaka çeşitli sıcaklıklarda yağlayıcı olarak kullanmışlar, cam elyaf SMC'nin akış gerilmesinin sıcaklığı ve SMC reçinesinin kompleks etkisini karakterize ederek denemişler, düz kalıplanan parçaların çekme ve eğilme özellikleri üzerine kalıplama parametrelerinin etkisini araştırmak için iki farklı kalıp sıcaklığı ve yakın kalıplama hızları düzlem–gerinim şartları altında test numunelerini imal ederek kullanmışlardır. Sıkıştırma ile kalıplanan SMC parçalarının mekanik özelliklerini ve yüzey kalitesini tanımlamak için, yüzey pürüzlülüğü, çekme ve 3 noktalı eğilme testlerini uygulamışlar, kalıplanan parçaların elyaf yönelimini ve dağılımını fotoğraflarla ele alarak araştırmak için SEM cihazını kullanmışlardır.

Malzeme ve özellikle cam elyafların akışını karakterize etmek SMC'yi daha iyi anlamak için gereklidir. Takviye bileşenlerinin oryantasyonu ve dağılımı bileşenlerin nihai boyutları ve mekanik özellikleri için büyük öneme sahiptir. Oryantasyon çok önemli, akışın olduğu yerde çok karışıktır. Gerekli hesaplamaları yapmak çok kompleks olduğu için tahmin etmek zordur. Bu amaçla Massardier-Nageotte ve ark. (2003) SMC kompozit bileşenlerinin de kısa cam elyafın oryantasyonu ve lokal kütle bölümlerini karakterize etmek için bir metodoloji geliştirmişlerdir. Elyafın akışı hakkında ilgi

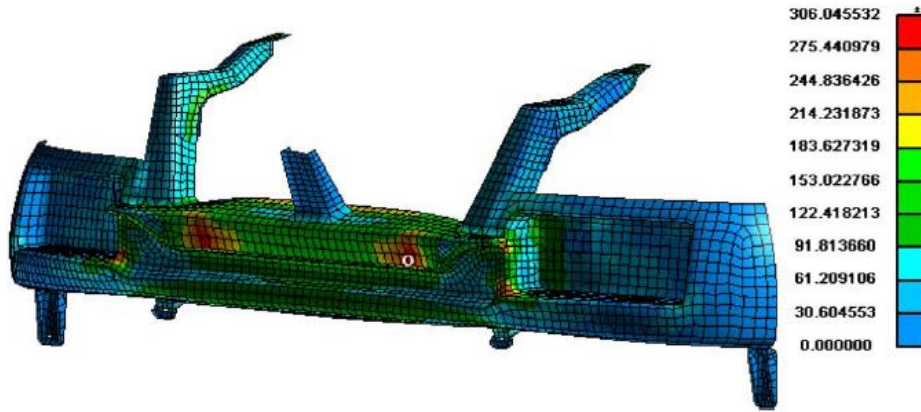
çekici bilgileri ve önemli oryantasyonları karakterize eden yerli bir yazılım ile görünür ışık iletimi ve X-ray fotoğrafları analiz etmişlerdir. Cam elyafların akışını karakterize etmek için bir kaç metodoloji düşünmüş ve akış esnasında izleyicinin oynadığı rol için renklendirilen elyaflar kullanılmıştır. Bu metot yalnızca yüzey yakınındaki takviye malzemelerinin oryantasyonunun tanımlanmasına izin verir. X-ray fotoğrafları bir yazılım vasıtasıyla görüntü işleyerek, oryantasyonu karakterize etmede kullanılmışlardır. Bu yazılımla analiz edilen X-ray fotoğrafları kapsayan metodoloji sayesinde geniş alanlı SMC parçaları karakterize edebildiklerini göstermişlerdir.

Bledzki ve Gassan. (1999) çalışmalarında keten elyaf ve cam elyaf üzerine temellendirilmiş SMC malzemelerini karşılaştırmışlardır. Doğal bir elyaf olan ketenle, cam elyaf kıyaslandığında cam elyafla takviye edilmiş malzemelerde çekme gerilmesi hariç daha yüksek karakteristik değerler elde etmişlerdir. Ancak yoğunluk referans alınarak ölçülen değerler dikkate alınır, keten elyaflı SMC malzemeler, cam elyaflı SMC malzemelerle aynı oranda yerleştirilmiştir. Daha önce bahsedilen doğal elyaflı malzemelerin karakteristik değerlerinin nem oranına bağlı olduğu açıktır.

İyi tasarlanmış bir otomotiv parçası yolcuların güvenliği sağlamalı aynı zamanda düşük ağırlığa sahip olmalıdır. Güvenliğin rolünün yanında yakıt verimi ve gaz emisyonlarının düzenlenmesi otomobillerin ağırlığının azaltılmasında üreticiler için daha önemli olmuştur. Marzbanrad ve ark. (2009) araştırmalarında alüminyum, GMT ve SMC ile üretilmiş üç farklı ön tampon direğini; sehimi, çarpma kuvveti, gerilme dağılımı ve enerji absorbe etme davranışı parametrelerini tanımlamak için çarpmayı modellemeye çalışmışlardır. Bahsedilen karakteristiklerden şekil ve kalınlık olarak en iyisini seçerek malzemeyi bulmak için birbiri ile kıyaslamışlar, SMC ile modifiye edilen tampon direklerindeki sehimi, çarpma kuvveti ve gerilme dağılımını minimum yaparken, elastik gerinin enerjisinin maksimum yapıldığını göstermişlerdir. Ayrıca yolcuların çarpma davranışı etkisini de denemişlerdir. Yaptıkları çalışmada SMC malzemeler ile basit nervürsüz şekillendirilmeden dolayı kolay üretilebilme ve düşük maliyetli kompozit malzeme ile ağırlık azaltmanın başarılabilirliğinden bahsetmişlerdir. Modifiye edilmiş SMC tampondaki maksimum von-Mises gerilme dağılımı ise Şekil 2.17'de gösterilmiştir.

Otomobil tamponunda GMT yerine SMC kullanmanın bazı avantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Kirişler çıkarıldığı için tampon yapıları daha kolay üretilebilir.
- Yapının ağırlığı aynı kalabilir ya da azaltılabilir.
- SMC malzeme üretim metodu GMT'den daha kolaydır.
- SMC yapısı hacmi ortalama kalınlık azaltılarak azaltılabilir.



Şekil 2.17. Modifiye edilmiş SMC tamponda maksimum von-Mises gerilme dağılımı (Marzbanrad ve ark. 2009)

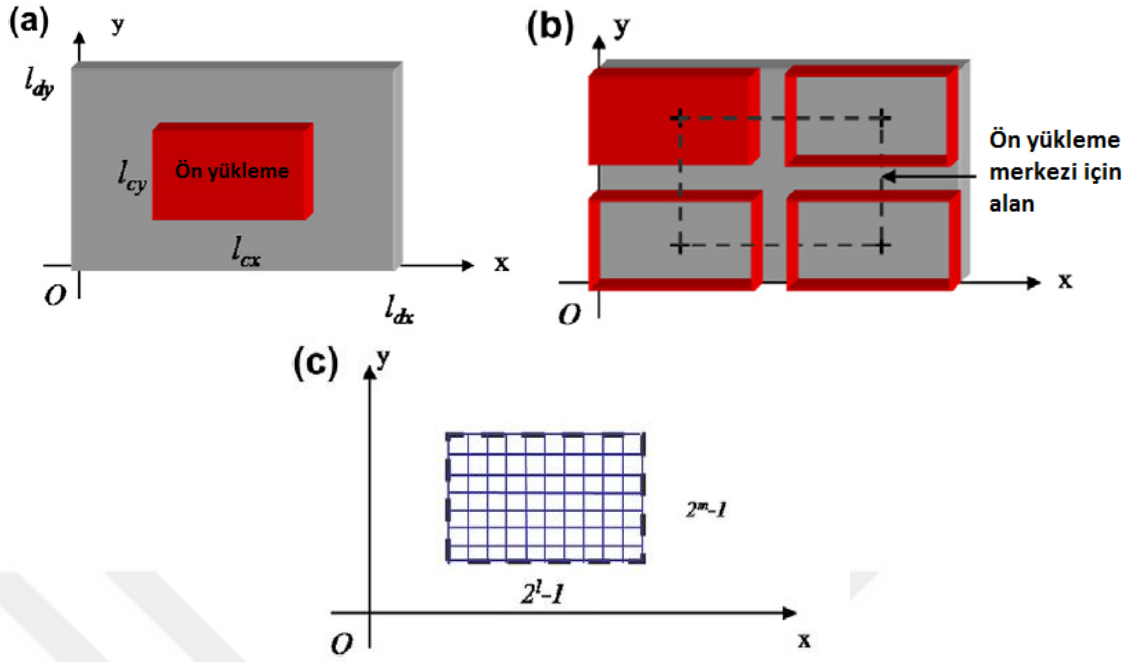
Kısa elyaflar kompozit malzemelerin yalnızca dayanımını değil aynı zamanda rijitliğini de artırmaktadır, fakat kırılma tokluğu kırılman için çok önemlidir. Son zamanlarda tabakalar arası tokluğu geliştirmek için karbon elyaf tabakalı kısa elyaflar da kullanılmaktadır. Araştırmaların çoğu elyaf/matris arası gerilme transferi ve hasar mekanizmaları gibi mekanik özelliklere odaklanmıştır. Elyaf ve kırılman matris arasındaki gerilme transferi dört aşamada olur: Elastik gerilme transferi, ara yüzey ayrılması, matris kırılması, elyaf sıyrılması ve kırılma. Ayrılma elyafların sıyrılmasına ve bozulmasına neden olur. Ayrılma olduktan sonra elyaf sıyrılması ara yüzey dayanımı sürtünme kayma gerilmesinden gelir. Ara yüzey kayma gerilmesi Coulomb'un sürtünme kanunu ile sıklıkla tanımlanmaktadır ve elyaf/matris malzemeler üzerine elyaf yüzey işlemleri ve fabrikasyon teknolojilerine bağlıdır.

Huang ve Zhao (2012) kısa elyafların bağlanması ve sertleşmesini tahmin etmek, optimum elyaf parametrelerini tartışmak ve SMC'nin elyaf sertleşmesinde kullanmak için basit analitik bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Modelde elyaf uzunluğu, gerilme ve çatlak arasındaki sürtünme gibi ana parametreler değiştirilerek onların bağlanma ve sertleşme etkilerini araştırmışlardır (Huang ve Zhao 2012).

2.4. Kalıp Ön Yükleme (Precharge)

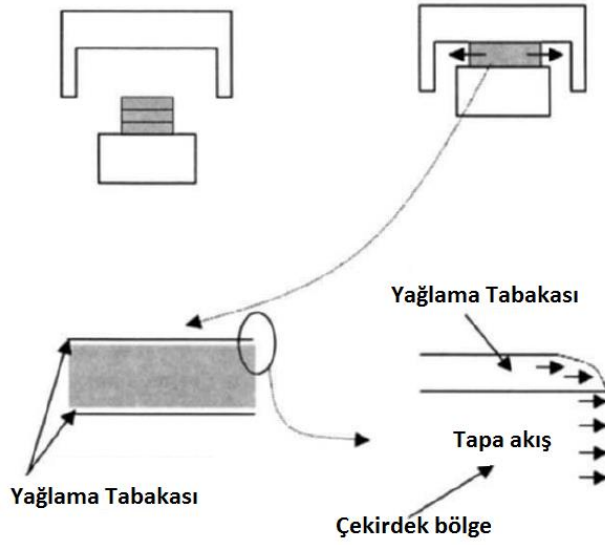
SMC malzemenin kalıbı doldurma esnasında ortaya çıkan akış karakteristiklerinden dolayı elyafların durumu değişmektedir. Son ürünün mekanik özelliklerini elyaf durumu baskın bir şekilde belirlemektedir. Homojen olmayan elyaf durumunun dağılımı, elyaf dağılımı veya elyaf oryantasyonunu değiştirerek basınçlı kalıplama işlemi esnasında nihai üründe homojen olmayan mekanik özellikler ortaya çıkaracaktır.

Kür zamanı, kalıp kapanma hızı, kalıp basıncı ve kalıp önyükleme özellikleri (geometri, ön yüklemenin boyutu ve yerleşimi) gibi bazı temel süreç parametreleri son ürün kalitesinde etkilidir. Bunların arasında ön yükleme özelliği, süreç esnasında çeşitli akış durumlarını ortaya çıkardığı için doğrudan bir parametre olarak tanımlanabilir. Gelişigüzel yükleme durumlarında, homojen elyaf hacim oranı ile elyaf durumu ve izotropik elyaf oryantasyonu, mekanik performans için en iyi olabilir. Kim ve ark. (2011) yaptıkları çalışmada başlangıçta elyaf hacim oranı ve elyaf yönlenmesini tahmin etmek için simülasyon programını ortaya koymuşlardır. Daha sonra ön yüklemenin yerleşimi ve boyutlandırılması gibi şartları optimizasyon problemi olarak tanımlamışlar ve genetik algoritma (GA) optimizasyon metodunu uygulayarak simülasyon programı ile birleştirmişlerdir. Basınçlı kalıplama prosesinde önyükleme konumunu ve boyutlarını optimizasyon probleminin tasarım değişkenleri olarak düşünmüşlerdir. Ön yüklemenin yerleşim ve boyutlarını tanımlamak için tasarım vektörü olarak, yer ve boyut kararını ızgara yapı ile yerine getirmişlerdir (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Ön yükleme merkezi ve ızgaralar için alan tanımlaması (a) kalıp ve ön yükleme, (b) merkezi ön yükleme alanı ve (c) ön yüklemenin merkez ızgarası (Kim ve ark. 2011)

SMC geniş kamyon parçalarında da kullanılmaktadır. Parçanın genişliği arttıkça kalıplama esnasında akarak kalıbı doldurması da önemli hale gelmektedir SMC'nin akışı, uzun ve çok sayıda cam elyaftan dolayı karmaşıktır. Akışın yönünde hız SMC'nin kalınlığının yönünden bağımsızdır. Oda sıcaklığında SMC sıcak kalıba (149 °C) yerleştirildiğinde yüzeyi yumuşar. Bu yumuşayan zengin reçine yüzeyi yağlayıcı tabaka olarak hareket eder. Abrams ve Castro (2003) çalışmalarındaki modellerin amacı akış alanını ikiye bölgeye bölmektir, akış bölgesinin çoğunu kaplayan çekirdek ve ince yağlama tabakası şematik olarak Şekil 2.19'de gösterilmiştir.



Şekil 2.19. Şematik SMC basınçlı kalıplama prosesi (Abrams ve Castro 2003)

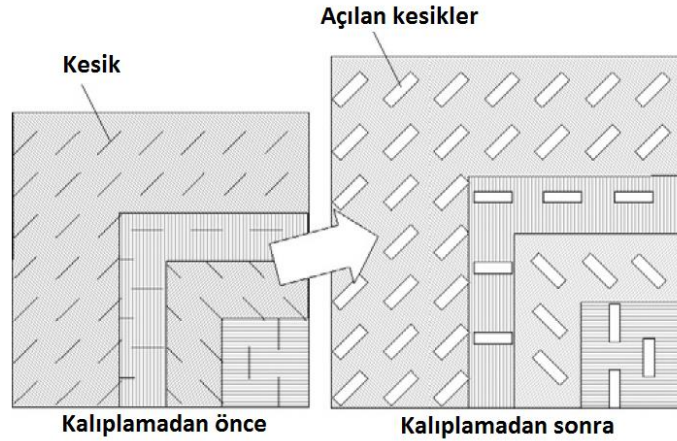
Farklı elyaf tipleriyle üretim yapmak mümkündür. Karbon elyaf özellikle ağırlık hafifletmede tercih edilmektedir. Karbon elyaf tabakalarda kalıba yükleme merkezde toplandığında daha iyi kalıplanan panellerin bitmiş yüzeylerinde daha iyi bir görüntü elde edilir. Ayrıca karbon elyaf plakaların yapımında merkeze doğru yüklemede üretilen kompozitler daha yüksek çekme gerilmesine sahiptir (Palmer ve ark. 2010).

2.5. Akış Özellikleri (Reoloji)

Günümüzde parçalar kalıp içinde biçimlendirilirken SMC'nin reolojisi çok iyi bilinmemektedir. SMC'nin akış özelliklerinin analizleri ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Le Corre ve ark. (2002) araştırmalarında belirli sayıda basit akış modelleri üreterek geniş ölçüde endüstriyel simülasyon araçlarında kullanmışlardır. Yeni bir reometre (akış ölçer) geliştirerek bu çeşit malzemelere daha iyi deneysel data sağlamak için deneysel bir program geliştirmişlerdir. Bu reometre, süreci temsil eden deformasyon hızı ve sıcaklıklarda, basit basma ve kayma testlerinde kullanılmıştır. Geliştirdikleri bu reometre ile elyaf bölümünün etkisini basit basma ve kayma için çalışmışlardır. Sıcaklık, deformasyon hızı ve elyaf hacmi gibi SMC'nin davranışı üzerine etkileyen ana parametreler değerlendirmelere izin verir. Elde ettikleri sonuçlarda elyafla takviye edilen SMC'nin, elyaf bölümüne ve mekanik yükleme tipine bakmadan pastaya benzer davranışlara sahip olduğunu göstermişlerdir.

Kalıplama esnasında mükemmel bir akış olduğu için birçok mühendislik alanında SMC kullanılmaktadır. Elyafların dağılımı ve hacimsel oranı akışı değiştirmektedir, bu da ciddi oranda mekanik özellikleri etkilemektedir. Birçok araştırmacı reçine ile elyaf arasındaki akış ilişkisinin kompleksliğini karakterize etmeye çalışmışlardır. Son zamanlarda pestil içine elyaflar rasgele ve tek yönlü dağıtılarak mekanik özellikleri iyileştirilmiştir. Destek (feder) gibi keskin geometrik değişimler ile basınçlı kalıplamada üretim yapmak zordur.

Taketa ve ark. (2011) çalışmalarında basınçlı kalıplamada kırılmış elyafların tek yönlü dağıtılarak düzenlendiği düz plaka ve desteklerin akışkanlıklarını incelemişlerdir. Bunun için karbon elyaf tekyönlü tabaka, cam elyaf tabaka içine yerleştirilmiştir. Araştırmada tek yönlü karbon elyaf pestil tabakalar düzenli bir şekilde değişik açılarda kesilerek, cam elyaf tabakalar arasına yerleştirilmiş ve daha sonra kalıplanarak, akış incelenmiştir. Tabakalar Şekil 2.20'de gösterildiği gibi her katmanda elyaf oryantasyonunda değişim olmaksızın her yerde homojen bir şekilde uzamıştır. Aynı zamanda kırılmış elyafların sadece enine elyaf yönünde değil aynı zamanda diğer tabakaların uzamasını takip eden elyaf yönünde taşındığını ortaya çıkarmışlardır.



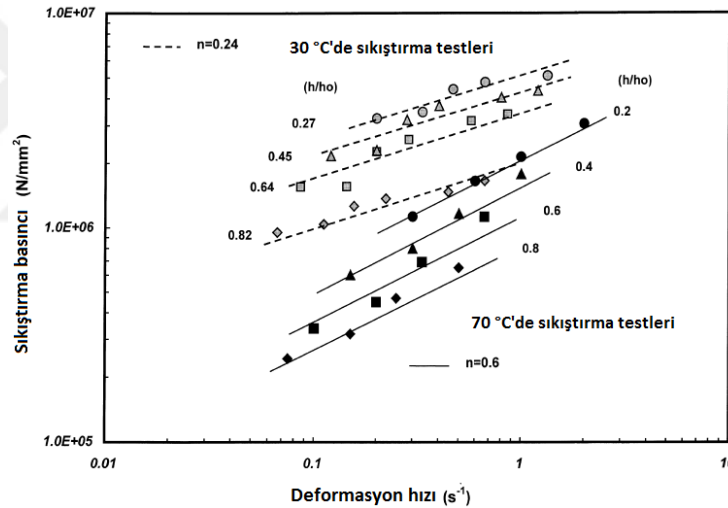
Şekil 2.20. Geometrik olarak benzer şekilde şematik ideal uzama diyagramı (Taketa ve ark. 2011).

Kotsikos ve Gibson (1998) çalışmalarında basınçlı kalıplamada SMC'nin akışını oda sıcaklığında ve 30-70°C sıcaklığa yükselterek paralel dairesel plakalar arasında sıkıştırma akış testi ile araştırmışlardır. SMC'nin sıkıştırma akışını araştırmak için

kaymanın tek eksenli uzamasından çeşitli akış rejimlerine izin veren çeşitli akış modelleri uyarlamışlardır. Değişken yaklaşım temelli bir model SMC'nin sıkıştırma akışını karakterize etmek için kabul edilmiştir.

Mevcut sonuçlarda 30 ve 70 °C'de SMC'nin sıkıştırma akış yayılımı, genelde yalnızca çok küçük plaka ayrılmalarında olan kayma dağılımı ile uzamanın önemli olduğunu göstermişlerdir. Basınçlı kalıplama SMC'nin akış karakteristiklerinin sıcaklık ile güçlü bir biçimde bağlı olduğunu akış parametrelerinin değişmesiyle göstermişlerdir.

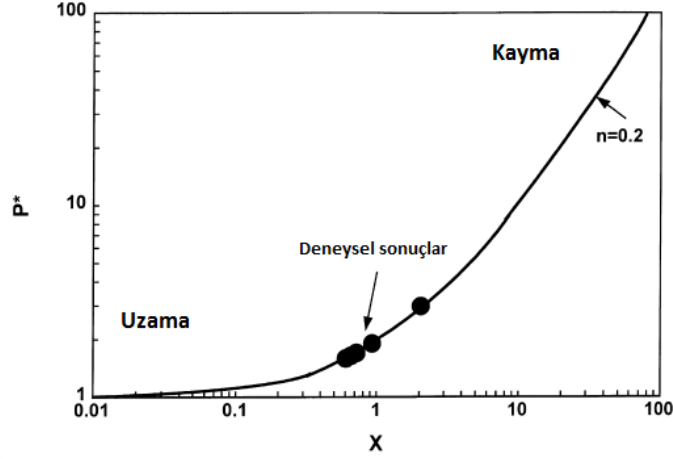
Sıcaklık yükseldiğinde sıkıştırma akış testleri için farklı uzama seviyelerinde, uzama oranına karşı sıkıştırma basıncının logaritmik grafiği 30°C'lik testlerde 0,24 ve 70°C'de 0,6 eğimli paralel doğru serileri Şekil 2.21'de gösterilmiştir.



Şekil 2.21. SMC'nin 30 °C'de ve 70 °C'de sıkıştırılmalı akış süresince çeşitli plakala dağılımları için, deformasyon hızına karşı sıkıştırma basıncının logaritmik grafiği (Kotsikos ve Gibson 1998)

Şekil 2.22'de grafikte geniş aralıkta X değerleri (veya plaka dağılımları) için sıkıştırma basıncının değişiminin deneysel değerleri birleştirilmiştir. SMC'nin akışı sadece kayma ve akış arasındaki bölgeye uzandığını göstermiştir, ancak uzanan akış bölgesine daha yakındır. Ayrıca SMC'nin sıkıştırma basıncı süresince akış rejimi ağırlıklı olarak test esnasında plaka üzerindeki basınç dağılımı ölçülerek elde edilmiştir. Plaka

kenarlarındaki basınç düşüşü elyaf yataklarının bulunmasından dolayı ‘kenar etkisine’ dayandırılmıştır .



Şekil 2.22. 1 mm/s sıkıştırma hızı için üst sınır teorisi analizlerinden (katı hat) elde edilen X parametreleri ile P* basıncının değişimi (Kotsikos ve Gibson 1998)

SMC kalıplama yönteminde pratik süreç bilgisinin yani yüksek kalite kompozit elde etmek için üretimden önce süreç parametrelerinin ayarlanabilir olması sonucuyla yakından ilgilidir. Ayarlamalardan kurtulmak için genel kurallar elde edilmelidir ve kaliteli kompozitler geliştirmedeki bazı sorunlar açıklanmış olmalıdır. Sıklıkla çalışılan ve çözülemeyen sorunlardan birisi üretim esnasında elyafların yeniden oryantasyonlarıdır. Elyaf dağılımı kompozitin mukavemetini güçlü bir şekilde etkilediği için bu önemli bir bilgidir. Otomotiv endüstrisinde başka hayati bir problem ise kalıplama süresince yüzeyin biçimlendirilmesinde oluşan boşluklardır. Bu boşluklar A sınıfında boyadan sonra ortaya çıkan ve maliyetli bakım gerektirmesi anlamına gelir. SMC basınçlı kalıplama süresince boşlukları çıkarmanın iki yolu vardır: Yüksek miktarda basınç gradyanı ve yeterince yüksek basınç.

SMC basınçlı kalıplama süresince boşluk bilgisi mekanizmaları için sürdürülen bilgiler ve üretim süresince basınç dağılımını doğru bir şekilde tahmin etmenin yolları araştırılmalıdır. Odenberger ve ark. (2004) çalışmalarında SMC basınçlı kalıplamada kalıp kapanma esnasındaki akışı deneysel olarak canlandırmaya çalışmışlardır. Endüstri ölçekli ekipmanlar ile üretim şartlarına yakın dairesel plakalar üretmişlerdir. Deneysel gözlemlerde akış öncesi için üç faz tanımlamışlardır. Ezilerek, akarak, ve kaynarak;

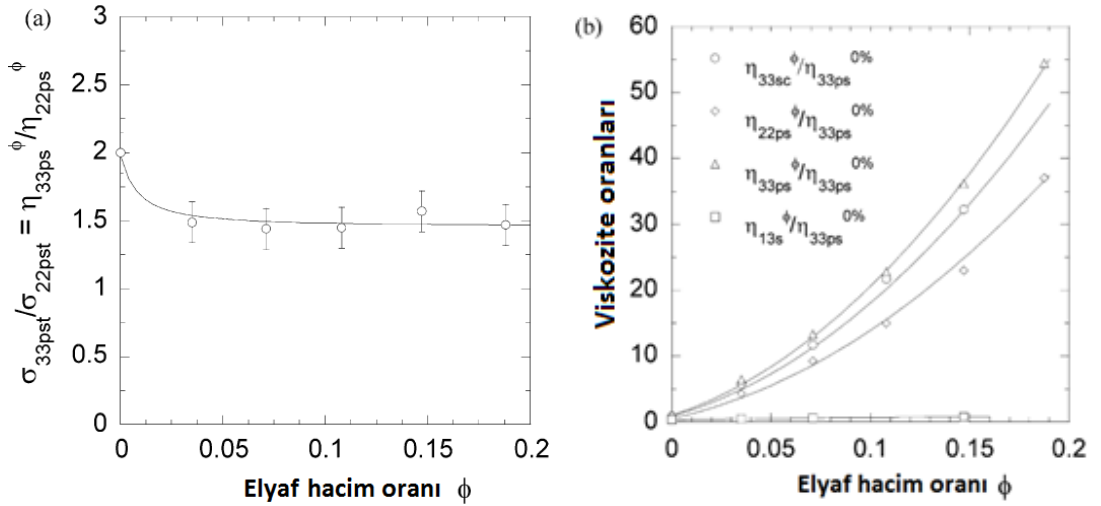
birinci faz olan ezilme esnasında dıştaki tabakalar olduğu gibi kalmamış, gerçek akış çok kompleks olup muhtemelen hava içerde hapsolmaktadır. İkinci fazda akma, akışı stabil ve görünüşte viskoz, üçüncü fazda ise kaynama, kabarcıklar düşük basınç bölgelerinde akış öncesi hem içte hem yüzeyde boşluk içerdiğini gözlemlemişlerdir. Tüm bu gözlemlerden sonra SMC preslemenin çok kompleks bir prosedür olduğunu ifade etmişlerdir.

Ticari basınçlı bir kalıplama olan SMC çeşitli proses şartları altında endüstriyel basınç cihazı ile gerçekleştirilir. SMC başlangıç sıcaklığı, aksenal zımbalama hızı ve kalıp geometrisinin lokal normal gerilme seviyesi gibi proses parametrelerinin etkili olduğunun altı çizilmelidir. Kalıp parçasının asal eksenindeki elyaf yığınının ayrılması ihmal edilmiştir. Akış aşaması çok kısa olsa bile, elyaf yığınlarının oryantasyonunun değişimi ve ayrılması, birleşim noktaları gibi akışın neden olduğu olaylar, üretilen parçaların geometrik stabilitesi, yüzey görünümleri, yapısal ve fiziksel özellikleri ile güçlü bir şekilde etkilidir. Bu nedenle endüstriyel SMC üreticileri, kalıp tasarımı ve geliştirilmesinde uzun ve deneysel aşamaları azaltmak için bu akış durumunu simüle etmeye ihtiyaç duyarlar. Basınçlı kalıplama süresince SMC akışı, SMC'nin reolojisine, mikroyapı içermesine, polyester reçinenin kürlenmesine, SMC ve kalıp arasındaki termal ve mekanik sınır şartlarına güçlü bir şekilde bağlıdır. Günümüzdeki yaklaşımlarda SMC kuvvet-yasası, viskoz ortam sunan enine izotropik düşünülmektedir. Dumont ve ark. (2007) bir kabuk modeli özellikle kompozit malzemelerin basınçla kalıplama simülasyonu için geliştirilerek sonlu elemanlar kodlarını uygulamışlardır. Simülasyon ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak tüm kaydedilen gerilme seviyeleri üzerine SMC reolojisinin önemi belirtilmiştir. Basit bir model olmasına rağmen iyi karşılaştırmalar elde etmişlerdir.

Dumont ve ark (2003) çalışmalarında SMC üretim prosesinde önemli olan reoloji bilgilerini geliştirmeyi amaçlamışlar, bunun için basınçlı kalıplama süresince SMC örneklerinin çeşitli mekanik yükler altında gerinim oranları ve elyaf içeriklerini homojen biçimde ölçmeye izin veren özel bir reometre tasarlamışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda deney süresince hem deformasyon hızının hem de elyaf içeriğinin önemli bir

rol oynadığını vurgulamışlardır. Viskoz ve enine izotropik modelleri için deney süresince kaydedilen uygun bir gerilme seviyesi kullanmayı önermişlerdir.

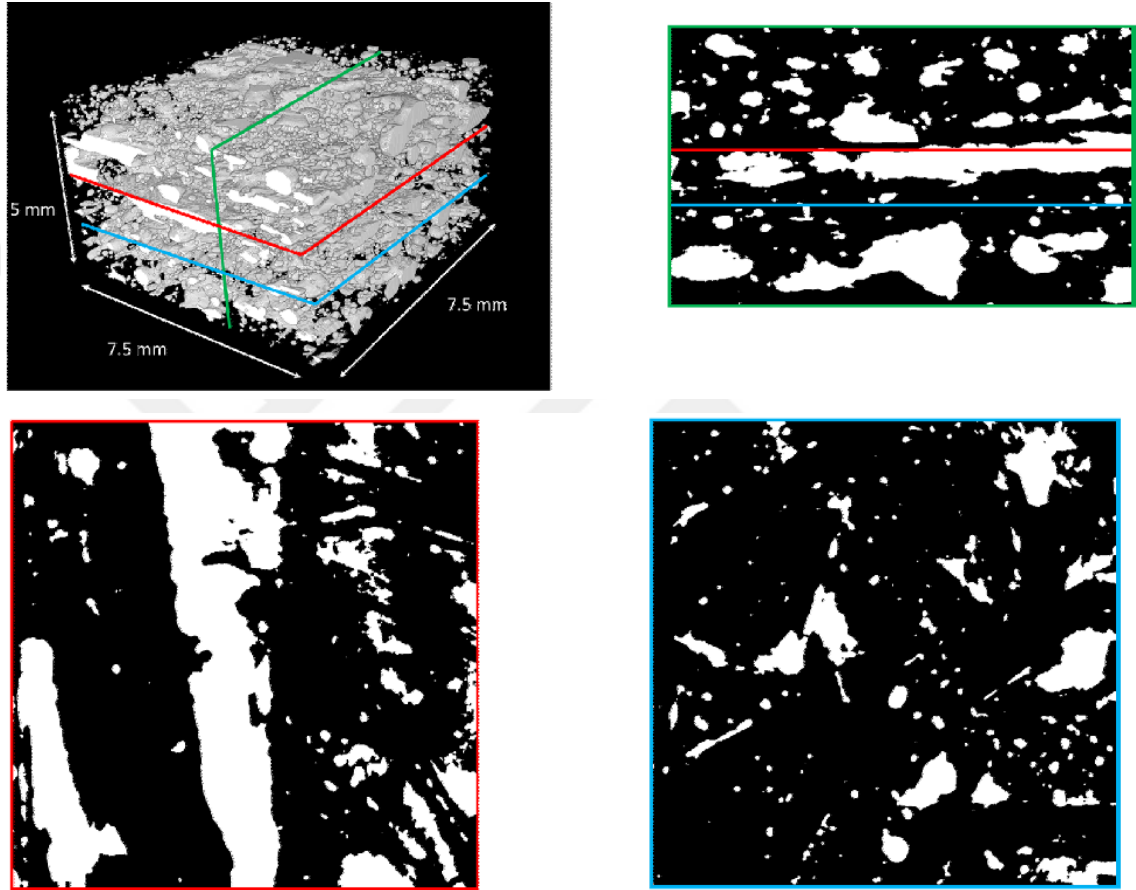
Elde ettikleri sonuçlarda deformasyon oranı ve elyaf sonuçlarının önemli bir rol aldığını ifade etmişler, gerilme seviyeleri güçlü bir kayma gerilmelerinin artması ile viskozitenin azalmasına neden olan deformasyon oranının bir fonksiyonu olarak göstermişlerdir. Elyaf içeriğinin de bir fonksiyonu olarak gösterilmiş ve elyaf içeriği arttıkça SMC’de anizotropiyi artırmaya neden olduğu ifade edilmiştir. Elyaf hacim oranı arttıkça SMC reolojisinin güçlü bir şekilde etkilendiğini göstermişlerdir (Şekil 2.23). Deneylerde viskozitenin elyaf içeriğinin bir fonksiyonu olarak arttığını kanıtlamışlardır. Ayrıca, elyaf içeriği arttıkça SMC’de anizotropiyi yükseltmeye neden olduğunu göstermişlerdir.



Şekil 2.23. Elyaf hacim içeriği üzerine a) boyutsal oranlar ve b) gerilme oranı (Dumont ve ark 2003)

SMC gibi basınçlı kalıplanan polimer kompozitlerde basınç esnasında malzemelerin sıkıştırılabilmesinde porozite etkilidir. Geniş ölçüde deneysel ve modelleme yaklaşımları bu akış davranışını ihmal etmişlerdir, bu nedenle araştırmaya ihtiyaç vardır. Guiraud ve ark. (2012) çalışmalarında tek endüstriyel SMC formülasyonu test edip gerçekte test koşullarına bağımlı sıkıştırılabilir veya sıkıştırılamaz çok çeşitli malzemeleri olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Çalışmalarında basit basınç testleri ve kalıp kompozit ara yüzeyinde ortaya çıkan sürtünme etkilerinden ortaya çıkan geniş hatalardan dolayı sapmalar görülmüş, bu nedenle tanımlanan reolojik parametreler

ortaya çıkarılmıştır. Bununla beraber (deneyle sınırlı olmasına rağmen) ölçülen porozite değerleri kalıplamadan önce yüksektir ve SMC malzeme kalıplanmadan önce porozitenin önemi verilen resimlerde açıkça görülmektedir. Çeşitli tabakaların ve yığınların arasında veya SMC tabakalar arasında hapsolan hava ve stirenden gaz çıkışı ile ilişkili bu olay Şekil 2.24’de görülmektedir.



Şekil 2.24. 3D görüntü gösteren resimlerin gösteriminin ayarlanması ve başlangıç durumunda (kürleme yokken) dört SMC tabaka içine hapsolmuş porozitenin (beyaz) üç enine kesiti (resimlerdeki sınırlar renklendirilmiş). Toplam porozite yaklaşık %15 ölçülmüştür (Guiraud ve ark. 2012).

2.6. Kürleşme

SMC, çelik malzeme ile karşılaştırıldığında; kompleks yapılarla tasarım imkanı, ağırlık azaltma gibi bir çok avantajından dolayı otomotiv sektöründe giderek daha fazla kullanılan bir kompozit malzemedir. Temel olarak maliyeti azaltmak için doymamış polyester reçine içine kalsiyum karbonat kıyılmış elyaf malzeme, düşük çekme

termoplastik katkı eklenerek elde edilen termoset reçineye kalıplama işlemi yapılmaktadır. Kalıplama sıcaklığında kür hızlıdır (tipik olarak en az 1 dakika) ve genel teknikler ile reaksiyonu takip etmek zordur. Heterojen bir malzeme olan SMC bileşim fonksiyonunun farklı kürlerini tahmin edebilmek faydalıdır. Gerçekte kürdeki değişimlerin etkisiyle parçada kusurlar oluşabilir. SMC kür bilgisine daha iyi sahip olabilmek için CaCO_3 ve cam elyaf olmaksızın basitçe karıştırılarak gerçekleştirilen birkaç kinetik model vardır.

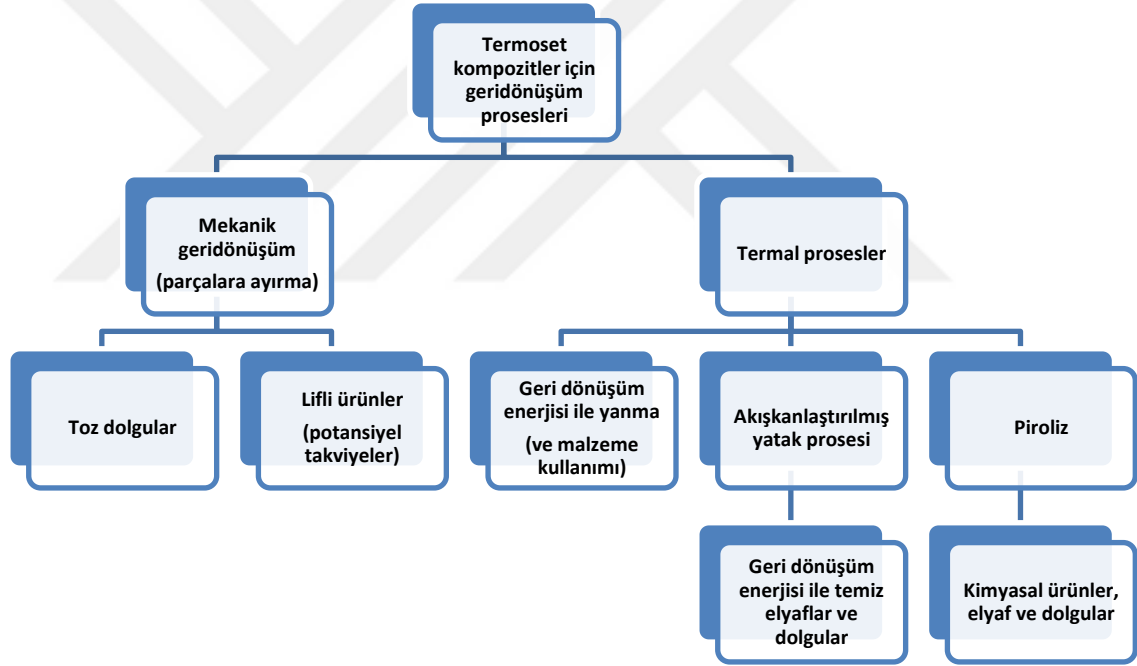
Lee (1981) ve Stevenson (1980) tarafından önerilen radikal polimerizasyon mekanizmaları Massardier-Nageotte ve ark. (2004) tarafından geliştirilmeye çalışılmıştır. Çalışmalarının ana orijinalitelerinden biri olarak kalıba yerleştirilen dielektrik ölçücüler kullanarak gerçek kompozit malzemeleri dikkate alan ilk sonuçları aldıklarını iddia etmişlerdir.

Ayrıca kalıpta iyonik iletkenliğin ölçümü ile gerçek kompozit malzeme çalışmışlardır. Isınmaya başladığında iletkenlik artar. Reaksiyon başlar başlamaz iyonların difüzyonu azaldığı ve ağ oluştuğu için iletkenlik azalır. Elde ettikleri sonuçlara göre kinetik model gerçek SMC'nin endüstriyel koşullarda kürünü tahmin etmede etkili bir araç olabilir. Farklı kalınlıklarda çeşitli SMC'nin kür zamanının tahmini için bir model kullanılabilir.

Katayama ve ark. (2003) çalışmalarında SMC için haddeleme uygulaması yapmayı denemişlerdir. SMC haddeleme işleminin diğer kalıplama metotları ile karşılaştırıldığında daha düşük biçimlendirme enerjisi, kısa üretim zamanı elyaf yöneliminin kontrolü, büyük ebatlı parçalara olanak sağlaması gibi bazı avantajları vardır. Sürekli kalıplamanın amaçlanması ile kür şartları ve kür karakteristiklerinin açıklanması kolaydır. Çalışmalarında kür karakteristiklerini araştırmada test parçalarının sıcaklıklarını üzerine sertleşme sıcaklık etkisine dair deneyler gerçekleştirmişler, test parçalarının ölçülmesi ile tamamlanan sertleşme ve sertleşme sürecinde artış değerini görerek ekzotermik reaksiyon, jelleşme gibi olayları anlamının mümkün olabileceğini ifade etmişlerdir.

2.7. Geri Dönüşüm İşlemi (Recycling)

Ekonomi ve çevre açısından bakıldığında polimer malzemelerde geri dönüşüm önem arz etmektedir. Termoplastik malzemeler eritilerek kolayca yeniden kullanılabilmesine rağmen aynı durum maalesef termoset malzemeler için geçerli olamamaktadır. Bunun nedeni, termoset malzemelerde moleküllerin çapraz bağlanması ve malzeme ısındığında moleküller birbirinden ayrılamadan bozulmasıdır (Torres ve ark. 2000, Pickering 2006). Dünyanın birçok yerinde bazı sektörlerde geri dönüşüm yasal olarak zorunlu kılınmakta bazı sektörlerde ise teşvik edilmektedir. Termoset kompozit malzemelerin geri dönüşümü için geliştirilmiş birçok yöntem önerilmektedir. Bu yöntemler Şekil 2.25'deki gibi özetlenebilir.



Şekil 2.25. Termoset kompozit malzemelerin geri dönüşümü (Pickering 2006).

Bu proseslerde temel olarak iki kategori vardır: Mekanik geri dönüşümde malzemeler küçük parçalar halinde öğütülerek yeniden kompozit malzemelerde dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır. Bu geri dönüşümde yaygın olarak iki termoset cam elyaf kompozit vardır: BMC ve SMC. Bir öğütücü ile toz haline getirilen bu malzemeler SMC ve BMC’de kalsiyum karbonat yerine kullanılabilir. Bu malzemeler yaklaşık %10 mekanik özellikleri düşürse de tolere edilebilir. Ancak yüksek oranlarda

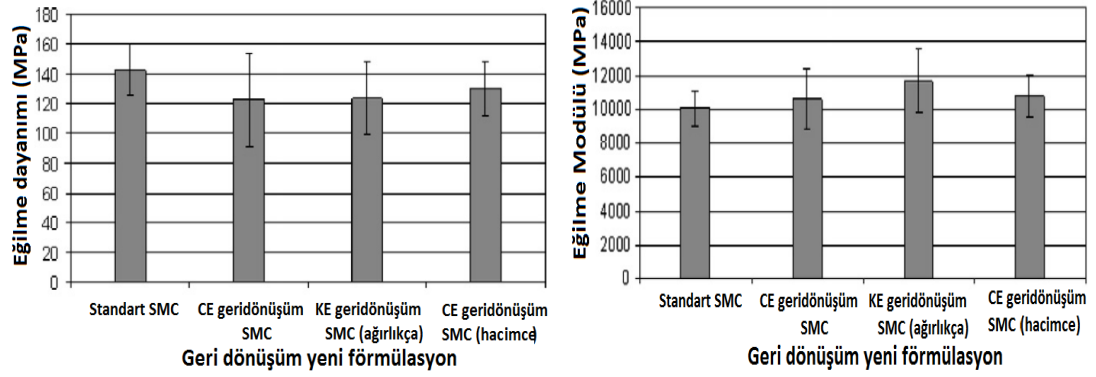
katıldığında, proseste daha çok reçine emme, bileşenleri kalıplama esnasında viskoziteyi artırma, daha önemlisi mekanik özellikleri azaltma gibi problemler ortaya çıkabilir. Geri dönüşüm malzemelerin bir avantajı ise kalsiyum karbonattan daha düşük bir yoğunluğa sahiptir. Bristol Üniversitesinde geri dönüşümü araştırmak için yapılan bir çalışmada bu kompozit malzemelerin ses yalıtımında daha etkili olduğunu göstermişlerdir.

Termal süreçlerde ise malzeme yakılarak enerjisinden, yanma sonucu kalan kül içindeki yanmayan malzemeler (elyaf, dolgu) ise ayrıştırılarak yeniden kullanılabilir. Termoset kompozitlerin geri dönüşümde farklı metotlar ve araştırmalar olmasına rağmen doğru bir şekilde uygulanabilen başarılı ticari bir yöntem dünyada henüz başarılamamıştır.

Karbon elyaf kompozit malzemelerin üretim hacmi cam elyaflılara göre daha azdır ama karbon elyaflar cam elyafların maliyetinden tipik olarak en az 10 kat daha değerli malzemelerdir. Bu açıdan karbon elyafların geri dönüşümü potansiyel olarak çok daha ön plandadır (Pickering 2006).

Takviye bileşenlerinin çoğunluğu kısa (25 mm) cam elyaf demetlerinin rasgele dağıtılması ile oluşturulur. Karbon elyaflar sertlik, ağırlık azaltma gibi belirgin bazı avantajlar sunarlar. Cam elyafların elastisite modülü 70 GPa iken ticari sınıftaki karbon elyafların 3 kat daha yüksektir (230 GPa) ve özgül ağırlığı ise 1800 kg/m^3 (E-Cam elyafların yalnızca %70'i)'tür.

Karbon elyafların otomotiv endüstrisinde kullanımı yarış araçları gibi küçük üretim hacimleri (1000/yıl) ile hala sınırlıdır. Bunun nedeni ham karbon elyaf malzemelerin hala sınırlı olmasıdır. Son zamanlarda yalnızca mekanik özellikleri azaltmada değil aynı zamanda yakıt verimliliğini artırmak, ağırlık azaltmak gibi ihtiyaçların zorlaması bu fikri yeniden canlandırmıştır. Palmer ve ark. (2010) geleneksel cam elyafların (CE) yerine takviye bileşeni olarak geri dönüşümü yapılmış düşük karbon elyaf kullanarak yeni SMC ürettiklerini iddia etmişlerdir. Çalışmalarında ağırlıkça %50 cam ve karbon içeriği ile takviye edilen farklı kombinasyonlardaki ürettikleri test plakalarının mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır (Şekil 2.26).



Şekil 2.26. Ağırlıkça ve hacimce %20 karbon elyaf (KE) birleştirilerek yapılan SMC panellerin a) Eğilme dayanımı, b) Eğilme modülü (Palmer ve ark. 2010)

Sonuçlara göre ağırlıkça yeniden formüle edilen kompozitlerin eğilme ve darbe dayanımları standartla karşılaştırıldığında daha zayıf, hacimce formüle edilen kompozitlerde ise daha iyi mekanik özellikler vermektedir. Genel olarak bunun nedeni:

- Karbon elyaf ve matris arasındaki zayıf adezyon ve
- Esas elyafların, elyaf yığınları içinde yetersiz dağılımıdır.

Güncel çevre sorunları, zayıf biyo-bozunurluk, atıkları depolama alanlarındaki sınırlamalar Avrupa'daki yasalara göre plastiklerin geri dönüşümlerinin gelişerek artmasına yol açmaktadır. Yayınlanan birçok çalışmada polyeater tabanlı termoset kompozisyonların geri dönüşümünde öğütme, yakma ve polimer matrisin kimyasal geri dönüşümü olarak üç ana geri dönüşüm teknolojisi dikkate alınmıştır (Perrin ve ark. 2008).

Geleneksel olarak geri dönüşümü olmayan plastik malzeme olarak düşünülen termosetler, genellikle büyük miktarlarda cam- elyaf, CaCO_3 gibi inorganik bileşenler içerir. Bu yüzden inorganik bileşenlerin geri dönüşümü ile yeniden kullanımı büyük ilgi çekmektedir. Piroliz termoset kompozitlerin geri dönüşümünde uygun bir alternatif olarak görülmüştür. Piroliz prosesinde (oksijensiz ısıtılarak) malzemedeki organik parçalar yakıt veya kimyasal kaynak olarak sıvı (likit) ve gaza ayrışır, CaCO_3 , cam-elyaf gibi inorganik bileşenler değişmeden kaldığı için plastik malzeme veya başka

kompozitlerde kullanılabilir. Bu yüzden piroliz ile kompozit malzemelerdeki bileşenlerin kullanımına yeniden izin verdiği için termoset kompozitlerin geri dönüşümünde çok artan bir teknik olarak görülmektedir. Torres ve ark. (2000), standart polyeester ve cam-elyaf SMC'yi 300, 400, 500, 600 ve 700°C'de, 3,5 dm³ otoklavda nitrojen altında piroliz etmişlerdir. SMC'nin likit piroliz karakterizasyon detayları verilmiş, özellikle gaz kromatografisi, kütle spektroskopisi ile bileşenlerin tanımlanmasına bağlı kalınmış ve sıvı gibi mümkün olan yeniden kullanımlar değerlendirilmiştir. Sıvıların yaklaşık ağırlıkça %40'ı şeffaf olarak ticari yakıtı karıştırmak için damıtılabilir, %60'dan fazlası ise ısınma yakıtı olarak karıştırılarak kullanılabilir (deMarco ve ark. 1997, Torres ve ark..2000).

300, 400, 500, 600 ve 700°C' de gerçekleştirilen SMC piroliz deneylerinden elde edilen katı, sıvı, gaz ürünler ağırlıkça Çizelge 2.2'de sunulmuştur.

Çizelge 2.2. SMC piroliz ürünleri (ağırlıkça %) (Torres ve ark. 2000)

	Sıcaklık (°C)				
	300	400	500	600	700
Katı ürün	82,6±1,73	75,2±0,39	74,9±0,40	73,9±0,72	72,6±0,36
Sıvı ürün	9,7±1,62	14,5±0,77	14,2±0,63	14,9±0,75	13,7±0,25
Gaz ürün	6,1±0,12	10,5±0,92	11,0±0,59	11,5±1,46	12,8±0,35

^a Ortalama değerler ± en az dört piroliz çalışması için standart sapma.

deMarco ve ark. (1997), SMC plastik atıkların geri dönüşüm metotları olarak piroliz işlemlerinin deneysel çalışmalarını açıklamışlardır. Piroliz ettikten sonra elde ettikleri geri dönüşüm malzemeleri ile BMC kompozit malzeme hazırlayıp saf BMC kompozit malzemenin mekanik özellikleri ile karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçların ortalama değerleri ve standart sapmaları Çizelge 2.3'de verilmiştir. Çizelge 2.3'deki dataların yalnızca ortalama değerleri ele alındığında geri dönüşüm SMC malzeme ile elde edilen BMC saf BMC'den daha iyi özelliklere sahiptir. SMC'nin pirolizinden elde edilen malzemeler diğer kompozit malzemelerde yalnızca dolgu maddesi değil aynı zamanda biraz dayanım özelliği vermektedir.

Çizelge 2.3. BMC'nin mekanik özellikleri (Marco ve ark. 1997)

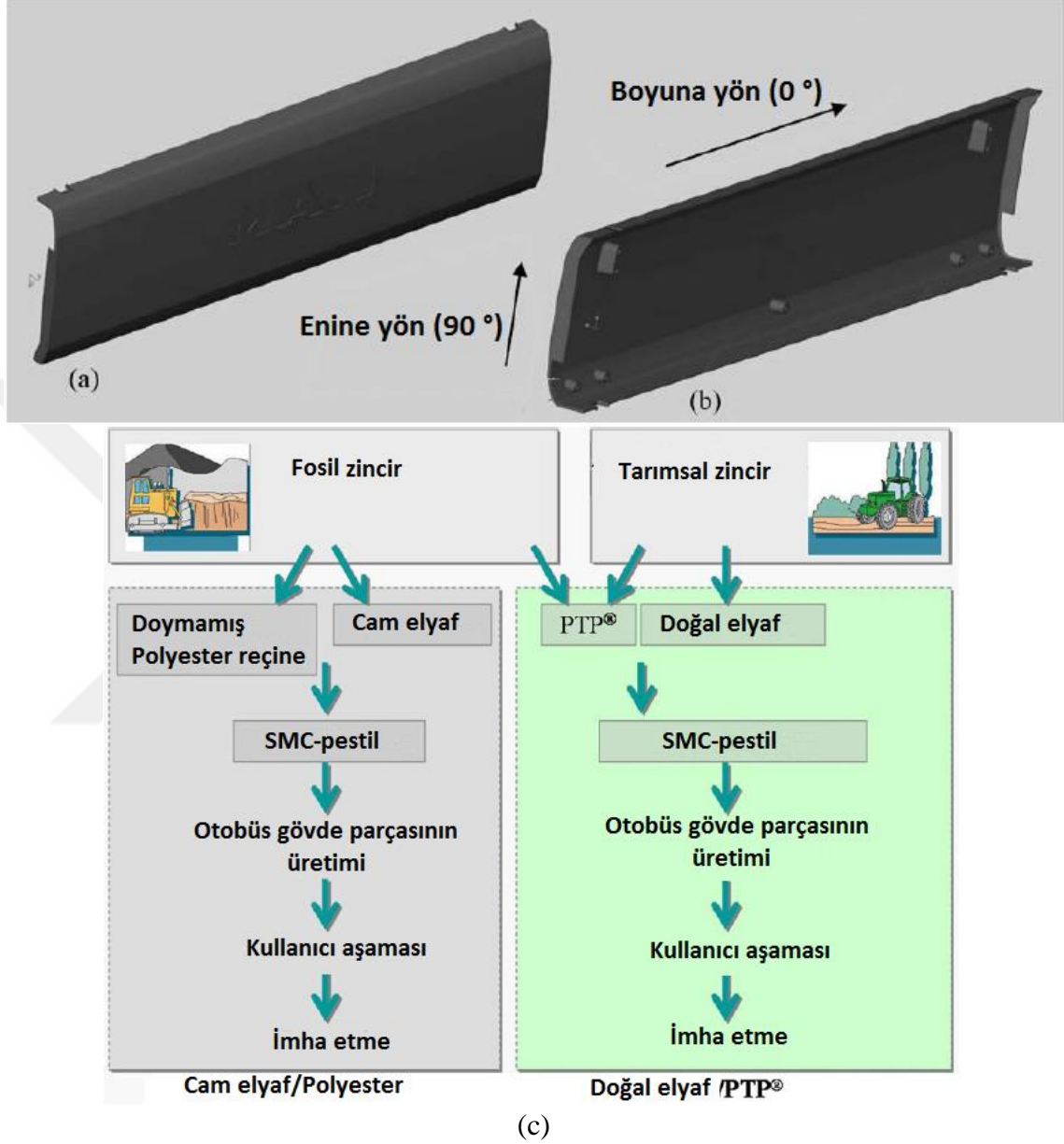
Özellik	Saf BMC-I	SMC geri dönüşüm	
		malzemeleri ile yapılan BMC (BMC-R)	Saf BMC-II
Çekme dayanımı (MN m ⁻²)	19,1±4,0	24,0±5,0	22,9±7,0
Eğilme dayanımı (MN m ⁻²)	64,9±11,0	68,9±17,0	85±12,0
Eğilme Modülü (GN m ⁻²)	10,9±0,9	11,1±1,0	11,5±1,0
Barkol sertliği	68±5,0	66±3,2	65±5,3
Çentiksiz Charpy darbe dayanımı (kJ m ⁻²)	16,4±3,3	16,5±4,8	18,5±5,2

Yenilenebilir kaynakların önemi teknik uygulamalarda artmaktadır. Müssig ve ark. (2006) çalışmalarında otobüs gövde parçalarını, doğal elyaf ve bitki tabanlı termoset reçineye dayanan PTP[®] (trigliseritler ve polikarbon asit anhidritlerden yapılmış polimer malzeme) ile SMC teknolojisi kullanarak üretmişlerdir. Homojen gövde parçalarını, doğal elyaflar için akış yeteneği başardıkları için kenevir/PTP[®]-pestil ile üretmeleri mümkün olmuştur (Şekil 2.27). Çekme gerilmesi yanma davranışı ve su emmesi gibi parça özelliklerini, parça serilerinin sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Son kullanıcı bakış açısı ile parça değerlendirmelerini sunmuşlardır. Araç yönetmeliğinin son kullanım ömrüne göre petrokimyasal kaynak temelli bileşenler üzerine yenilenebilir kaynak temelli bileşenlerin avantajı yoktur. Ancak yenilenebilir kaynak uygulamalarının SMC ile kabul edilen geri dönüşüm teknolojilerinde avantajı olacağı ve gelecekte ekonomik olarak daha önemli olacağını ifade etmişlerdir.

Günümüzde araçlardaki termoset malzemelerin geri dönüşümünü tamamlamanın üç farklı tip yolu vardır:

- 1) Bileşenler parçalanmalı, öğütülmeli ve örneğin SMC'de dolgu malzemesi olarak geri dönüşümü yapılmalıdır.
- 2) Öğütülen hafif parçalar piroliz yoluyla gaz sentezlemeye dönüştürülmelidir. Bu sentezlenen gazlar metanol üretimi için kullanılmalıdır.

- 3) Öğütülen parçalar temizlenmeli ve daha sonra maden ocağında indirgeme ajanı olarak kullanılmalıdır (Müssig ve ark. 2006).

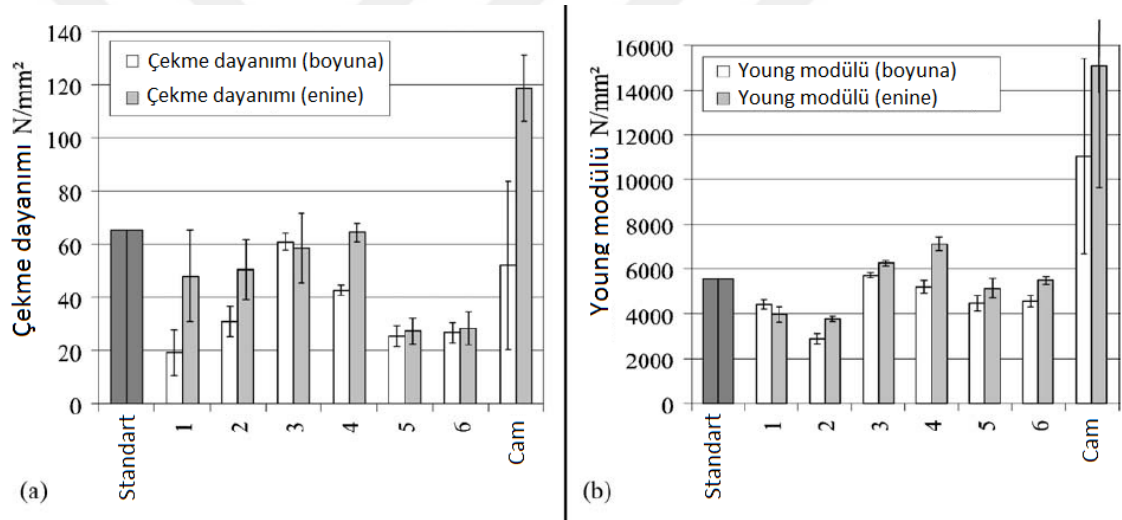


Şekil 2.27. Bileşenlerin CATIA çizimi a) önden ve b) arkadan görünümü c) cam elyaf/polyester ve doğal elyaf/ PTP®-otobüs parçasındaki üretim sistemleri (Müssig ve ark. 2006).

Ayrıca yüksek yüzey kalitesine ve mükemmel yanma karakteristiklerine sahip, doğal elyafların akış kapasitesini başardıkları için, kenevir/ PTP®-pestiller ile homojen bir parça üretmeyi başarmışlardır. Çekme karakteristikleri gereksinimlerini zaten yerine

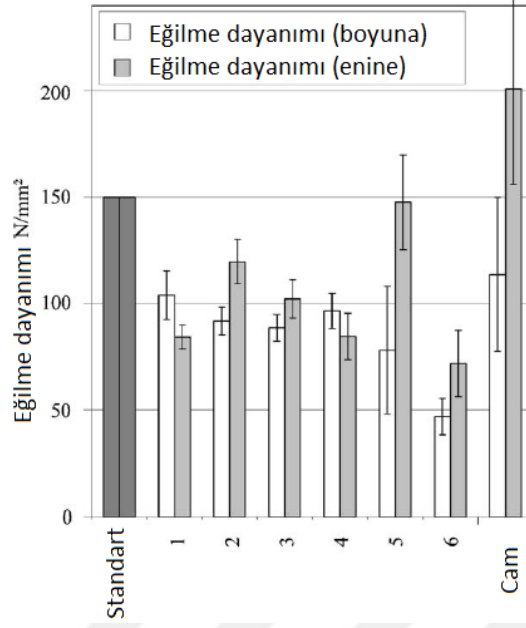
getirerek başarırken özellikle darbe dayanımını geliştirmeye amaçlamışlardır. Çözüm için ilk öneri olarak özel kuvvet-uzama karakteristikleri ile selülozik elyafları yeniden üreterek kullanımları üzerinde durmuşlardır. İlk sonuçlarda PTP®'nin kullanım süresinin polyester sistemlerle karşılaştırıldığında hemen hemen tüm darbe kategorileri için pozitif etki göstermiştir.

Kompozitlerin çekme testleri Şekil 2.28'de gösterilmiştir. Cam elyaf parçalarının çekme dayanımları enine ve boyuna yönde oldukça farklıdır ve çok yüksek derecede değişim gösterir. Havalı serilen kenevir elyaf parçaları (5 ve 6) daha düşük değerler, (3 ve 4) çeşitli değişimler göstermektedir. Benzer eğilimler elastisite modülü karakteristikleri için de görülmektedir.



Şekil 2.28. Çekme dayanımı (a) ve Young modülleri (b) doğal elyaf/ PTP® ile cam/polyester parçaların karşılaştırılması. Referans değer “fabrika standart” (ortalama değer ve standart sapma) (Müssig ve ark. 2006)

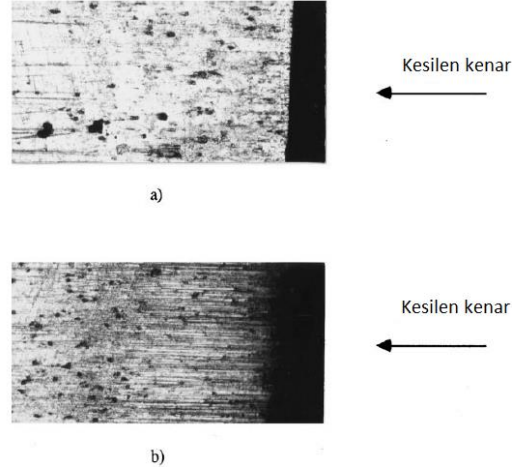
Eğilme dayanımı test sonuçları da Şekil 2.29'da görülmektedir. Cam/polyester parçalarının çekme özellikleri ve makina yönü ile etkilenen enine ve boyuna yönde yüksek dağınıklık ve farklar görülmüştür. Kenevir elyafı parçalarda en düşük lif uzunluğu 6 mm'dir.



Şekil 2.29. Doğal elyaf/PTP[®] ile cam/polyester parçaların eğilme dayanımının karşılaştırılması. Referans değer (ortalama değer ve standart sapma) (Müssig ve ark. 2006)

2.8. Diğer Çalışmalar

Caprino ve ark. (1998) çalışmalarında ortogonal kesme testlerini SMC üzerinde 0° ve 5° ile yüksek hız çeliği (HSS) aleti kullanarak gerçekleştirmişler, tüm testler süresince kesme kuvvetlerini kaydetmişlerdir. Uzun vadeli ortogonal kesme testleri, 0° ve 5° açı ile yüksek hız çelik aletleri kullanılarak ve kesme kuvvetleri üzerine alet aşınma etkisini doğrulamak için sabit derinlikte kesilen SMC üzerine uygulanmıştır. Numuneler periyodik olarak kesilmiş ve kesme kuvvetlerindeki değişim, aşınmanın çeşitli derecelerinde derinliğinin bir fonksiyonu olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak hem yatay hem dikey kuvvetlerin aletlerin aşınmasını artırmada etkili olduğunu ancak dikey kuvvetlerin daha duyarlı olduğunu ifade etmişlerdir. Kesme testleri tamamlandıktan sonra aşınma özelliklerini optik mikroskopla Şekil 2.30'daki gibi vermişlerdir. Bu şekle göre aşınma başlıca kesme yönüne paralel derin çiziklerin olduğu yanlarda sınırlandırılmış saptamışlardır. Ayrıca daha yüksek kesme hızlarında termal etkilerinde oldukça etkili olduğunu ifade etmişlerdir.



Şekil 2.30 (a) Yüzey, ve (b) aşınmış yan yüzeyler (Caprino ve ark. 1998)

Kamyon panellerinin geniş boyutlarından dolayı kalıplama kuvvetleri büyümesi önemlidir ve kalıp çevriminde en büyük etkiye sahiptir. Kalıp kuvvetine bağlı bir model, basınç hızı ve malzeme özellikleri için parça kalınlığı, parça boyutu ve proses şartlarını ayrıca tüm çevrim zamanı ve doldurma zamanını tahmin ve optimize etme amacıyla gereklidir. Abrams ve Castro (2003) çalışmalarında ticari olarak yapılan parçalar için kalıplama kuvvetlerini tahmin ederek geçerliliklerini doğrulamak bir model ortaya koymuşlardır. SMC akış proses modelleriyle ilgili prosedürleri yeniden gözden geçirmişler ve prosedürleri; gerekli malzeme parametrelerini hesaplamak ve kapanma kuvveti elde etmek için kullanılabilir olacak şekilde geliştirmişlerdir. Deneylede modelin geçerliliğini doğrulamak için ticari SMC kullanmış ve ticari olarak otomotivde kullanılan gövde parçalarını karşılaştırmışlardır.

Kalıplanan parçanın pres kapasitesi verildiğinde uygun kapama hızını tanımlamak faydalı olmaktadır. Presin daha hızlı kapanması daha kısa doldurma zamanı demektir. Pres hızının kontrol edilmesi bitmiş parçanın yüzey özelliklerinin optimizasyonunda anahtar rol oynar, doğru üretim maliyet tahminleri ile tekrar edilebilir tarzda istikrarlı parçalar üretilir. Birçok endüstriyel SMC kalıplamada akış, geniş otomotiv parçaları için tipik yüklemeler genişlik-uzunluk oranından dolayı tek boyutlu akışa yakındır. Abrams ve Castro (2003) çalışmalarında 3 değişken kullanmıştır: Kapama hızı, hacim ve yükleme oryantasyonu.

Termoplastik kompozit ve sandviç malzemeler üretim esnasında çevrim zamanını azaltarak proseste bir ekonomi sağlamanın yanı sıra aynı zamanda bileşenlerin ağırlığını azaltmada ve geri dönüşümü artırmada bir potansiyel sunar. Akermo ve Astrom (2000) çalışmalarında ekonomik yönü ile üç farklı termoplastik kompozit basınçlı kalıplama ve sandviç malzeme modelleyip, termoplastik SMC ve sac metal presleme ile karşılaştırmışlardır. Farklı boyut ve kompleksliğe sahip bileşenlerin maliyetini tahmin etmek için bir program geliştirmişlerdir. Sac metal preslemede maliyetlerinde ekipman maliyeti baskınken, basınçlı kalıplanan kompozit bileşenlerinde hammaddenin daha baskın olduğu görülmüştür. Modellerinde, termoplastik kompozitlerin küçük ve orta boyutlardaki bileşenleri ve geniş parçaların kısa üretim serilerinde maliyet olarak rekabet edebileceği öngörülmüştür (Çizelge 2.4).

SMC ile yapılan otomobil gövde parçasını modellemiş ve eşdeğeri olan çelik pres bileşenlerinin maliyeti ile karşılaştırmışlardır (Çizelge 2.5.). Uzun süreli gövde panellerinin üretimlerinde çelik ekonomik bir avantaja sahipken yıllık 50.000-150.000 adet seri üretilen parçalarda SMC ve çelik alternatifleri arasında masrafların eşit olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca parça boyutları ve geometrik kompleksliğe bağlı olanlarda başa başken, basit geometrili geniş panel üretimlerinde çelik pres alternatifi daha büyük avantaja sahiptir.

Akermo ve Astrom (2000) çalışmalarında daha geniş parçalar düşünülmüş (örneğin tampon kirişi, açık ızgara panel, kaput ve pikap yatağı) yıllık 100.000 parçanın aşıldığı seri üretimlerde çelik daha rekabet edici maliyet sonuçları verdiğini göstermişlerdir. Ayrıca çalışmalarında sandviç parçaların daha ekonomik olduğunu doğrulamak için yapısal şartlar altında araştırma hedeflemişlerdir. Bunun sonunda geliştirdikleri program, proses şartları, bileşenlerin geometrisi, malzeme seçimini içeren bir simülasyona izin vermektedir. Basınçlı kalıplama olan (termoset) SMC, sac çelik pres ve alüminyum karşılaştırmak için programa dahil etmişlerdir.

Çizelge 2.4. Ekipman maliyetleri ve gereksinimleri (Akermo ve Astrom 2000)

Ekipman	Maliyet (EUR) ^a	Bakım (EUR/yıl)	Zemin boşluğu(m ²)	Parça boyutu (mm ²)	Güç/sigorta
Hidrolik pres (1400 kN)	87 000	690	5	600*600	77/90
Hidrolik pres (3000 kN)	232 000	690	6	1200*1000	77/90
Hidrolik pres (5000 kN)	463 000	690	7	2000*2000	97/100
Infr. Fırın, manuel	34 000	120	5	400*800	25/70
Infr. Fırın, otomatik	72 000	120	5	400*800	25/70
Infr. Fırın, manuel	42 000	170	6	800*1600	90/250
Infr. Fırın, otomatik	81 000	170	6	800*1600	90/250
Infr. Fırın, manuel	186 000	230	13	2000*2000	1100/3000
Infr. Fırın, otomatik	225 000	230	13	2000*2000	1100/3000
Transfer robot	232 000	120	2,5	-	6,4/16

^a EUR1=USD1.04=GBP0.655=DEM1.96, 30 Temmuz 1999.

Çizelge 2.5. Malzeme maliyetleri (Akermo ve Astrom 2000)

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Kalınlık/tabaka (mm)	Kg başına fiyat (EUR/kg)
Kompozit			
Cam/PA12	1850	0,3	8,00
UD cam/PP	1450	0,2	4,00
Rasgele cam/PP	1120	2	2,80
Cam/polyester SMC	1900	2	1,80
Alüminyum	2800		2,00
Çelik	7800		0,5
Çekirdek			
PMI köpük çekirdek	52-110		18,00
PMI bal peteği çek.	80		15,00
PP köpük çek.	110		10,00
Balsa çek.	200		7,9
Kaplama filmi			
PA 12 film	1020	0,1	10,00

SMC orta büyüklükteki parçalarda genel mühendislik ve otomotiv parçalarında geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Bader (2002) yaptığı çalışmada kompozit parça üretiminde SMC ve GMT gibi üretim yöntemleri ve çeşitli elyafların, maliyet açısından daha verimli ve etkili bir şekilde seçimi için yol gösterecek özellik ve fiyat tabloları hazırlamıştır.

Çevre koruma, iklim değişimlerinin azalması üzerine vurgulanan karbondioksit emisyonları azaltma bugün birçok endüstride için büyümektedir. Bu emisyonların yaklaşık %93'ü taşıma yollarında üretilmektedir ve araç filoları arttıkça Avrupa hükümet organizasyonları ve halkın baskıları endüstrideki bu emisyonları azaltmayı hedeflemektedir. Araçlarda ağırlık azaltmayı başarmanın iki yolu vardır: Çelik yerine daha hafif ağırlıkta alternatifler ile malzeme değiştirme ve daha yüksek performans sağlamak için optimize edilen yenilikçi tasarımlar.

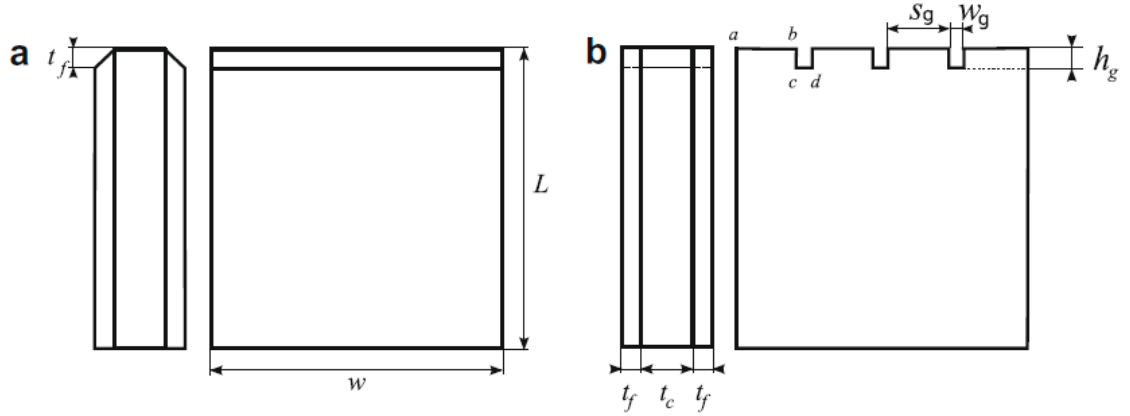
Witik ve ark. (2011) tarafından otomobil uygulamalarında hafifletilmiş malzemelerin çevre performansı ve ömür tayini maliyeti incelenmiş, birkaç uygun hafif polimer kompozitin ömür tayini ve çevre performansı miktarı belirlenmiş, çelik ve magnezyuma karşı kıyaslanmıştır. Çizelge 2.6'daki sonuçlara göre ağırlık azaltmak her zaman çevre performansını geliştirmeye neden olmamaktadır.

Çizelge 2.6. Ulaşılan yüzde ağırlık azaltma ve nihai parça ağırlığı ile düşünülen malzeme ve proses senaryoları (Witik ve ark. 2011)

Malzeme	Prosesler	Parça ağırlığı (kg)	Ağırlık azaltma
Çelik	Presleme	5,8	Temel
SMC	Pres kalıplama	2,5	%57
GMT	Pres kalıplama	2,4	%59
Cam elyaf	Reaksiyon enjeksiyon kalıplama	2,3	%60
Magnezyum	Basınçlı döküm	2,2	%62
Karbon elyaf	Reaktif enjeksiyon kalıplama	1,8	%69

Karbon elyaf ve magnezyum gibi yüksek ağırlık azaltan malzemeler, onların üretimi ile ilişkili çevre yükünü artırdığı için, negatif çevresel etkileri nedeniyle sınırlı kullanımlarının gerektiği gösterilmiştir. SMC gibi daha düşük performanslı malzemelerin geri dönüşü olmamasına rağmen, ömürlerine bakıldığında daha iyi performans gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Araç bileşenlerinde ağırlık azaltmanın her zaman maliyetli olduğu bulunmuştur fakat sonuçta daha az yakıt tüketimi ile tüketici için genel maliyetlerin azalması kaçınılmazdır (Witik ve ark. 2011).

Sandviç paneller yüksek rijitlik ve dayanım, ağırlık azaltmaları sebebi ile potansiyel olarak avantaj sağlarlar ve araç yapılarında kullanılır. Çarpan bir araç yapısında kullanıldıklarında enerji absorpsiyon yeteneği metal yapılarla benzer olarak karşılaştırılabilir seviyededir, ancak panellerin enerji absorpsiyon yeteneğinin tahmin edilebilir olmasına ihtiyaç vardır. Kompozit malzemelerin enerji absorpsiyon yeteneği, metalik yapılardan daha iyi olmasına rağmen, seri üretimlerde nadiren kullanılırlar. Bunun bir nedeni kompozit yapılarda hasar büyümesinin çok kompleks olması, enerji absorpsiyonunun tahmininin zor olmasıdır. Lindström ve Hallström (2010) yaptıkları çalışmalarında sandviç panellerin yüzeyleri üzerine basınç yükleyerek araştırmış ve ezilme kontrolü üzerine bazı değerlendirmeler sunmuşlardır. Yüzeyi cam elyaf kaplı balsa ağacı çekirdeğinden meydana gelen SMC sandviç panelleri test etmişlerdir. Panellerdeki hasar başlangıcı yivler ile sonlu eleman modeli kullanılarak araştırmışlardır (Şekil 2.31). Araştırdıkları modeller arasında tek fark yiv sayısı olduğundan dolayı aynı kırılma mekaniği kriterini tüm durumlar için kullanmışlardır. Yüklenen kenarlardaki gerilme dağılımının yalnızca alan azaltmaya değil aynı zamanda köşelerde tekil gerilmelere neden olmasına bağlı olduğunu ifade etmişlerdir



Şekil 2.31. Başlatma topolojileri a) Yivli tabaka yüzeyli panel b) oluklu panel (Lindström ve Hallström 2010)

Düzlemde yarı-statik yüklenen sandviç yapıların tepkisi, yapıda hasar başlangıcına kadar tipik olarak lineer elastiktir. Yüzey-iç ara yüzey kırılma tokluğu eğilme rijitliği ve yüzey tabakadaki dayanımla yeterince yüksek ilişkiliyse yapı kötü bir şekilde hasara eğilimli olmayacaktır. Daha yüksek stabil ezilme çökmesi durumu elde edilebilirse genellikle daha yüksek enerji absorpsiyonunu yükselteceğini ifade etmişlerdir (Lindström ve Hallström 2010).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde SMC kompozit malzeme üretiminde kullanılan malzemeler ve özellikleri ile üretim yöntemi detaylı bir şekilde açıklanmaya çalışılmıştır.

3.1. Materyaller

3.1.1. Reçineler

Polimer kompozitlerde en fazla kullanılan termoset reçineler doymamış polyester, vinilester, epoksi ve fenoliklerdir. Polimer kompozit yöntemlerinden biri olan SMC’de reçine olarak genellikle termoset esaslı bir malzeme olan doymamış polyester kullanılmaktadır. Doymamış polyester; maliyetinin düşük olması, hızlı bir şekilde kürleşme gibi nedenlerden dolayı başlıca tercih edilmektedir. İleri takviye malzemeleri olarak tanımlanan karbon elyaf gibi malzemelerde kullanılan kaplama malzemesi doymamış polyester ile iyi bir uyum sağlamamaktadır. Bu nedenle matris malzeme olarak vinil ester gibi farklı reçinelerin kullanılması gerekir.

3.1.1.1. Polyester

Polyesterler doymuş (termoplastik) ve doymamış polyester olarak iki grup altında incelenebilir. Özellikleri ve nispeten düşük maliyetinden dolayı bu polyesterler yaygın olarak birçok alanda kullanılmaktadır (Smith 2001). Doymamış polyesterler çabuk kürlenme, iyi mekanik, kimyasal, elektriksel, termal özellikler, düşük maliyet gibi özelliklerinden dolayı kompozit sektöründe en fazla kullanılan reçinedir (yaklaşık %75). Özel formüle edilmiş reçineler sıcaklık etkisi altında hızla kürlendiği için seri üretime uygun olan SMC yönteminde de bu polyesterler tercih edilmektedir. Yüksek miktardaki dolgu maddeleri ve takviye malzemesi ile birleştirilebilen doymamış polyester malzemeleri düşük viskozitelidir. Bu malzemeler %80’e varan oranda cam elyafı takviye edilebilir ve olgunlaştığında 172-344 MPa dayanıma, iyi darbe dayanımına ve kimyasal dirence sahip olur (Smith 2001).

Bu çalışmada Poliya A.Ş. Türkiye firmasından temin edilen ve SMC kalıplama yöntemi için özel olarak üretilmiş Polipol-347 SMC-BMC tip doymamış polyester kullanılmıştır ve bu reçinenin özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Polipol-347 doymamış polyesterin özellikleri (Anonim 2015c).

Yoğunluk	1,118 g/cm ³
Eğilme Dayanımı	117 MPa
Elastiklik Modülü	3546 MPa
Kopmadaki Uzama	% 3,86
Çekme dayanımı	52 MPa
Elastiklik Modülü	2800 MPa
Kopmadaki Uzama	% 2,12
Izod Darbe dayanımı	7kj/m ²
Barkol sertliği (Barkol 934-1)	49

3.1.1.2. Vinilester

Vinil esterler termoset polimerler ailesine en son eklenen reçinelerdir. Bu reçinelerin birkaç tipi olmasına rağmen 1950 yıllarında küçük bir miktar sentezlenmiş, asıl olarak “Shell ve Dow Chemical” tarafından ticarileştirilmiş bugün ise kompozit sektörünün önemli bir bölümünü oluşturmaktadır (Peters 1998). Vinilester reçineler epoksi reçinelerin avantajları ile doymamış polyester reçinelere özgü kolay işleme ve “hızlı sertleşme” gibi özellikleri birleştirmek için geliştirilmiştir.

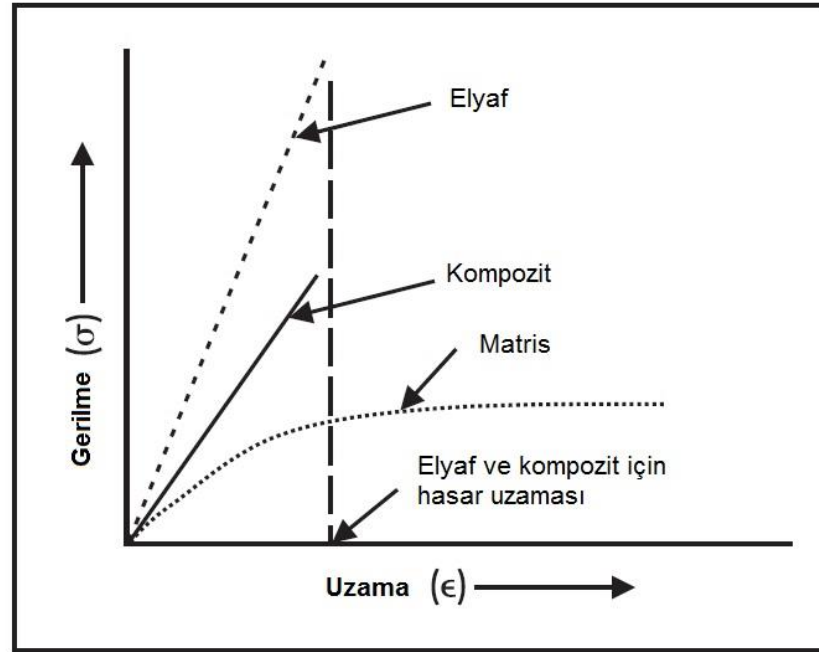
Karbon gibi ileri takviye malzemelerinin kaplama maddesi doymamış polyester malzeme ile uyumlu olmadığı için çalışmada Poliya A.Ş. Türkiye firmasından temin edilen Polives-701 tip vinil ester reçine kullanılmıştır. Bu reçinenin özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Polives 701 vinil ester reçinenin özellikleri (Anonim 2015d).

Yoğunluk	1,118 g/cm ³
Eğilme Dayanımı	160 MPa
Elastiklik Modülü	4360 MPa
Kopmadaki Uzama	% 6,90
Çekme dayanımı	80 MPa
Elastiklik Modülü	3200 MPa
Kopmadaki Uzama	% 5-6
Izod Darbe dayanımı	17kj/m ²
Barkol sertliği (Barkol 934-1)	35

3.1.2. Takviye malzemeleri

Kompozitler içinde bulunan takviye elemanı dayanım, sertlik gibi mekanik özellikleri sağlar. Böylelikle malzemeye gelen yükün büyük bir bölümünü taşır. Matris denen reçine ise deformasyon durumunda çatlak ilerlemesini önleyerek malzemenin hasara uğramasını ve kırılmasını geciktirmektedir (Şahin 2006, Strong 2008). Matris malzemeler daha plastik ve sünek malzeme iken takviye malzemesi daha gevrek ve kırılgandır. Bu sebeple Şekil 3.1’de görüldüğü gibi kompozit malzemenin dayanımı matris ile takviye malzemesinin dayanımı arasındadır.



Şekil 3.1. Kompozit, elyaf, matris arasındaki çekme gerilmesi ilişkisi (Strong 2008)

Takviye malzemeleri genel olarak elyaflar, parçacıklar veya whiskerler (kılcal kristaller) olarak farklı biçimlerde bulunmaktadır (Mazumdar 2002). Takviye malzemesi olarak kullanılan elyaf malzemelerinin özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Bazı elyafların özellikleri (Mallick 2007, Singha 2012)

Elyaf	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Uzama (%)
E- Cam	2,54	3100-3800	72,5-75,5	4,7
S- Cam	2,49	4020-4650	83-86	5,3
Bor	2,7	3100	393	0,8
Bazalt	2,8-2,9	3000-4840	79,3-93,1	3,1
Aramit(kevlar 49)	1,39-1,47	3000-3620	70-179	1,9-4,4
Karbon	1,7-1,8	3500-6000	230-600	1,5-2,0

3.1.2.1. Cam elyaf

Cam elyaflar takviye malzemesi olarak kullanılan ilk elyaftır ve ucuz olmalarından dolayı günümüzde önemlerini halen korumaktadır. Bazı uygulamalarda cam elyaf-

polimer etkileşimleri ayrıca uygun bir bağlayıcı kimyasal kullanılarak arttırılır. Hem cam hem polimerle etkileşebilen bu kimyasal bağlayıcılar kompozit üretiminden önce liflere uygulanır (Saçak 2005). Elyafı hasardan koruyan ve bağlanmayı sağlayan kaplama maddesi olarak genellikle silan kullanılır. Özellikle cam elyaf ile matris arası yapışma gücünü arttıran silan bazlı ince film yapan kimyasalların sentezinden sonra kullanım alanı genişlemiştir (Şardan 2009). Dünya genelindeki takviyeli kompozit tüketiminin yaklaşık yarısına yakın bir pazara sahip olan A.B.D’de takviyeli kompozitlerin ürünlerin yaklaşık %90’ı cam elyaf ile takviye edilirken, %75’lik bir kısmında matris malzeme olarak doymamış polyester kullanılmaktadır.

Takviye malzemesi olarak kullanılan elyaflar sürekli (tek yönlü, düzlemsel iki yönlü ve düzlemsel üç yönlü), kesikli (kısa), rastgele (düzlemsel olarak yönlendirilmiş) olarak farklı boyutlarda, yönlerde ve açılarda kullanılabilirler. Farklı boyut ve yönlerde kullanılan elyaflar kompozit malzemenin mekanik özellikleri ciddi biçimde etkilemektedir. Kesikli (kırpılmış) ve sürekli elyaf elde etmek için Cam Elyaf A.Ş. Türkiye’den SMC yöntemine uygun olan “SMC-3 çok uçlu fitil” cam elyaf bobin temin edilmiştir ve özellikleri Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. SMC-3 cam elyafın özellikleri (Anonim 2015e).

Cam tipi	E
Fitil teksit	2400±%5 g/1000 m
Split teksit	Nom.80 g/1000 m
Elyaf çapı	Nom.15 µ
Nem miktarı	% max. 0,15
Bağlayıcı miktarı	% 1,25±0,20
Bağlayıcı türü	Silan
Reçine uyumu	Polyester

Farklı yönlerdeki mukavemeti sağlayabilmek için, sürekli elyaflardan farklı yönlerdeki açılarda bu elyaflar dokunmaktadır. Birim ağırlık/alan değeri 500 g/m², elyaf yönü [0/90°] olan düz cam elyaf dokuma Fibroteks A.Ş Türkiye firmasından temin edilirken,

birim ağırlık/alan değeri 600 g/m², elyaf yönü [0/90°] olan çok eksenli (multiaksiyel) cam elyaf dokumalar ise Telateks A.Ş. (Metyx kompozit) Türkiye firmasından temin edilmiştir.

3.1.2.2. Karbon elyaf

Üretimlerine 1960 sonlarına doğru başlanan bu elyafların yapısında en az kütlece %93-95 oranında karbon vardır ve 1316 °C üretilirler (Kaw 2006). Karbon elyaflar hafif, kimyasal açıdan inert, yüksek çekme ve basma dayanımı, yüksek elastik modüle sahip maliyetinden dolayı fiyatın önemli olmadığı uzay ve hava araçlarında ileri kompozitlerde kullanılan elyaflardır. Sürekli elyafların çapı ortalama 8-10 µm ve iplik demeti şeklinde yaklaşık 12-120000 sayıdan oluşabilmektedir (Şahin 2006, Saçak 2005). Çekme mukavemeti çelikten fazla ve hafif (2.27 g/cm³) olan bu malzemenin uzaması %1-2 olabilen ve 3000 °C'ye dayanabilen bir malzemedir. Otomotiv endüstrisi için karbon elyafli kompozitlerin fiyatları henüz çelikle rekabet edecek düzeyde değildir. Ancak hafifletmenin gerekli olduğu yerlerde kullanılmaya başlanmıştır (Saçak 2005).

Karbon elyaf maliyetin çok önemli olmadığı havacılık ve uzay gibi endüstrilerde kullanıldığı için mukavemeti ve maliyeti yüksek epoksi reçineye uyumlu olarak üretilip, satılmaktadır. Mevcut epoksi reçinelerin SMC ile kullanımı günümüzde pek uygulanmadığı için Dowaksa A.Ş. Türkiye firmasının deneme amaçlı özel olarak ürettiği vinil ester uyumlu karbon elyaf bobinler firmadan temin edilmiştir. Sürekli ve kesikli elyafların elde edildiği karbon elyafların özellikleri Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Karbon elyaf bobinin özellikleri (Anonim 2015f).

Yoğunluk	1,79 g/cm ³
Çekme Dayanımı	4500 MPa
Çekme Modülü	245 GPa
Uzama	% 1,8

Farklı yönlerdeki mukavemeti sağlayabilmek için kullanılan birim ağırlık/alan değeri 600 g/m^2 , elyaf yönü $[0/90^\circ]$ olan çok eksenli (multiaksiyel) karbon elyaf dokuma ise Telateks A.Ş. (Metyx kompozit) Türkiye firmasından temin edilmiştir.

3.1.2.3. Aramit elyaf

Aramit elyaflar aromatik polimerlerden yapılırlar ve “aromatik polyamid” in kısaltılmış halidir. Aramit elyaflar örme, dokuma veya çapraz bağlanmış tipiyle, kurşun geçirmez koruyucu yelek, uzay sanayisinde, sürtünen malzemelerde, halat ve kablolarda, otomobil lastiğinde kullanılır (Saha 2005).

Bu çalışmada sürekli ve kesikli elyaf elde etmek için kullanılan aramit elyaf bobin Türkiye’de faaliyet gösteren tedarikçi bir firma tarafından Teijin Aramit Hollanda’dan temin edilmiştir ve özellikleri Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Aramit elyafın özellikleri (Anonim 2015g).

Filament sayısı	2000
Lineer yoğunluk	3220 dtex
Kırılma dayanımı	695 N
Modülü	102 GPa
Kopma uzaması	% 2,9

Birim ağırlık/alan değeri 500 g/m^2 , elyaf yönü $[0/90^\circ]$ olan çok eksenli (multiaksiyel) aramit elyaf dokuma ise Telateks A.Ş. (Metyx kompozit) Türkiye firmasından temin edilmiştir.

3.1.2.4. Bazalt elyaf

SMC kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak genellikle cam elyaf kullanılmaktadır. Çevre sorunları ve üstün özelliklere sahip kompozit malzemelere olan ihtiyacın ortaya çıkması ile farklı elyaf ve malzemelerin kullanımı sürekli gündeme

gelmektedir. Son yıllarda birçok kompozit malzeme üretim yönteminde kullanılan bu malzemelerden birisi de bazalttır (Ary Subagia ve ark. 2014b, Asprone ve ark. 2014). Basaltex (Masureel Group, Belçika) firması tarafından üretilen bazalt elyaf malzemesine ait kimyasal içerik bilgisi Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Bazalt elyafın kimyasal bileşimi (Anonim 2016a).

Bileşenler	Ağırlıkça % Bazalt
SiO₂	51,6-57,5
Al₂O₃	16,9-18,2
CaO	5,2-7,8
MgO	1,3-3,7
Na₂O	2,5-6,4
K₂O	0,8-4,5
Fe₂O₃	4,0-9,5

Sürekli ve kesikli elyafları elde etmek için kullanılan bazalt elyaf bobinler Basaltex A.Ş. Belçika’dan doğrudan temin edilmiştir. Bazalt elyaf bobinlerin özellikleri Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Bazalt elyaf bobinlerin özellikleri (Anonim 2016b).

Yoğunluk	2,67 kg/dm ³
Nem içeriği	%0,1
Erime noktası	1350 °C
Filament çapı	17 µm
Lineer yoğunluk	2400 teks
Çekme dayanımı	≥ 55 cN/teks
E-modülü	87 GPa
Sürekli sıcaklık aralığı	-250/550 °C, 1200 °C yangın bariyer
Kaplama tipi	Silan

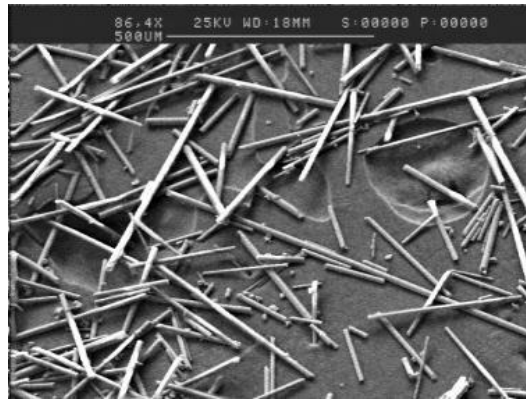
Bazalt malzemenin sahip olduğu yüksek tokluk, termal ve kimyasal dayanıklılık özelliklerinin yanında yeşil endüstriyel malzeme olması daha fazla tercih edilmesinin diğer sebeplerindendir. Doğal liflerde elyaf dağılımının ve hammadde teminin zor olmasından dolayı mineral bir malzeme olan bazalt kullanımını daha da önem kazanmıştır (Lopresto ve ark. 2011).

Birim ağırlık/alan değeri 520 g/m^2 , 600 g/m^2 elyaf yönü $[0/90^\circ]$ olan çok eksenli (multiaksiyel) bazalt elyaf dokumalar da yine aynı firmadan (Basaltex A.Ş. Belçika) temin edilmiştir

3.1.2.5. Bazalt partikül

Bazaltın üstün özelliklerinin yanında, özellikle mikro olarak öğütülebilmesi sayesinde polymer matrislerle kompozit hazırlamaya ve her türlü kompleks şeklin yapımına da imkan vardır (Todic ve ark. 2011). Yapılan bazı çalışmalarda polimer kompozitlere bazalt partikül katkısıyla malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi araştırılmıştır. Partikül haline getirilmiş bazalt aynı zamanda polimer matrisli kompozitlerde dolgu maddesi olarak da kullanılır.

Matris malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılan bazalt partikül Basaltex A.Ş. Belçika firmasından temin edilmiştir (Şekil 3.2). Bazalt partikül katkısının özellikleri ise Çizelge 3.9’da verilmiştir.



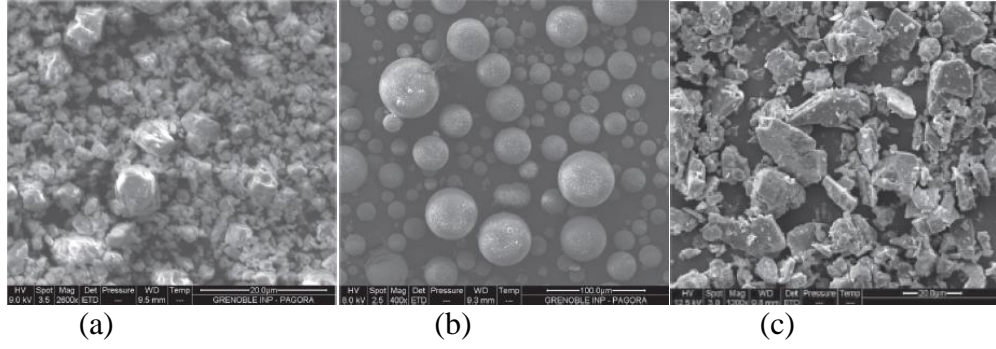
Şekil 3.2. Öğütülmüş bazalt partikül katkısı (Anonim 2016b).

Çizelge 3.9. Bazalt partikül katkısının özellikleri (Anonim 2016c).

Yoğunluk	2,67 kg/dm ³
Nem içeriği	%0,1
Erime noktası	1350 °C
Filament çap oranı	10-17 µm
Uzunluk	±100 µm
Filament kırılma yüklemesi	≥ 67-85 cN/teks
E-modülü	84 GPa
Kırılmada uzama	% 2,8
Sürekli maksimum sıcaklık	350/550 °C, 1200 °C yangın engelleyici
Kaplama tipi	Silan

3.1.3. Dolgu maddeleri

SMC yönteminde Şekil 3.3’de görüldüğü gibi farklı dolgu maddeleri kullanılmaktadır. Dolgu maddeleri SMC pasta içerisine farklı amaçlarla katılır. İlk olarak dolgular malzemenin, yangın dayanımı, iletkenlik, nihai dayanım, yoğunluk gibi bazı fiziksel ve mekanik özelliklerini arttırmak için katılır. İkinci olarak pasta yoğunlaşmaya başlamadan önce pasta viskozitesini düzenler yani pasta karıştırılırken ve emdirme fazından önce bu aşama süresince pasta viskozitesi, elyaf için ideal bir emdirme olması için yeterince düşük olmalı fakat aynı zamanda levha prosesi ambalajlama ve yoğunlaştırma esnasında elyafı bağlanarak dışarı çıkamayacak kadar yeterince yüksek olmalıdır. Son olarak ucuz dolgular SMC imalatında, genellikle maliyet azaltmak için eklenir. SMC pastalarda dolgular genellikle çok geniş hacim oranında (%20-50) konulur. SMC dolguların başlıcaları minerallerdir. En fazla kullanılan dolgu kalsiyum karbonattır (CaCO₃) (Orgeas ve Dumont 2012).



Şekil 3.3. Tipik SMC dolgular a) CaCO_3 , b) İçi boş cam küre c) Al_2O_3 (Orgeas ve Dumont 2012)

Çalışmada kullanılan 5 ve 20 μm boyutlarında CaCO_3 dolgu maddesi, Aydın madencilik Ltd. Şti.'den temin edilmiştir.

3.1.4. Diğer katkıları

3.1.4.1. Başlatıcı (İnitiatörler)

Kürleme reaksiyonunun başında reçinede bulunan serbest radikalleri uygun termal bozunmada harekete geçirmek için başlatıcıya ihtiyaç vardır. Genelde peroksitler karıştırılır SMC sürecinde çapraz bağlanmaların optimizesine katkı sağlamak için formüle edilirler (Orgeas ve Dumont 2012).

SMC kompozit üretilirken başlatıcı olarak AkzoNobel trigonox 29-C50 kullanılmıştır.

3.1.4.2. Düşük profil katkıları

Basınçlı kalıplama fazı, SMC yükleme içinde önemli sıcaklık değişimleri (100-140°C) içerir. Bu sıcaklık kompozitlerin termal genleşme ve büzülme davranışlarının değişimine neden olur. Polimerizasyon büzülmesi ile üretilen parça üzerinde, çarpıklık, zayıf yüzey özellikleri, yüzey kusurları (dalgalanma, içe çökme) iç gözeneklilik, çatlaklar, otomobil gövde panellerinde kabul edilemez eğrilmeler vs. gibi istenmeyen kusurlar ortaya çıkar. Polimerizasyon büzülmesini telafi etmenin çözümü “düşük profil katkıları” olarak bilinen termoplastik polimerler pasta içerisine dahil etmektir (Gülten 2004).

Ayrıca SMC uygulamalarında çekmeyi kontrol altına almak, boyutsal stabiliteyi geliştirmek, mekanik özellikleri iyileştirmek ve yüzeyi-görüntüyü düzeltmek için Co-athylene dolgu maddesi kullanılır. Mikro çatlakların, gerilme çatlaklarının ve su absorpsiyonunun azaltılması için kullanılır (Anonim 2016d).

Termoplastik katkı olarak Poliya A.Ş. Türkiye firmasının ürettiği LSB katkı maddesi kullanılırken. Düşük profil dolgu maddesi olarak Dupont HA 1682 Co-athylene kullanılmıştır.

3.1.4.3. Yoğunlaştırma/kalınlaştırma ajanları

SMC kalıplamadan önce yükleme için kesme, katlama, kalıba yerleştirme gibi birkaç elle yapılan operasyonlara maruz kalmaktadır. Bu gibi elle işlemlerin hatta doldurmanın, SMC pastanın yoğunlaşması olmadan yapılması mümkün değildir. Benzer biçimde basınçlı kalıplama süresince SMC pastanın yüksek viskozitesi olmaksızın kalıp içinde takviye elyafın akışını harekete geçirmek mümkün olmazdı.

Bu çalışmada yoğunlaştırıcı için luvatol marka ürün tedarikçi bir firmadan temin edilmiştir.

3.1.4.4. Kalıp ayırıcı ajanlar

Bu ajanların rolü, basınçlı kalıplanan parçanın kalıptan çıkarılırken mümkün olacak yapışmasına engel olmaktır. Onların miktarı toplam bileşimin %3'unu aşamaz. Genellikle bu ajanlar, stearatlar; çinko, kalsiyum veya alüminyum stearatlar veya stearik asitlerdir. Polyester sertleşmesi esnasında stearatı dışarı atar ve yüzeyde toplanan stearat kalıpla parça arasında bir film oluşturarak kalıptan ayrılmayı sağlar (Şardan 2009).

Kalıp ayırıcı için çinko (Zn) stearat belli oranlarda formül içerisine ilave edilmiştir.

3.1.4.5. Stiren monomer

Stiren SMC pastaya bir miktar katılmaktadır. Üretim esnasında bir miktar stiren kaybı olabileceği gibi stiren reçinenin viskozitesini düşürerek elyafın daha iyi ıslanmasını sağlamaktadır (Şardan 2009). Ek olarak viskozitenin azalması sonucu mekanik özellikleri önemli ölçüde olumsuz etkileyen reçine içerisindeki hava kabarcıklarının tahliyesi daha da kolaylaşmaktadır (Ataş 2007).

Polyester reçineyi inceltmek ve elyafların daha iyi ıslanmasını sağlamak için stiren katkı maddesi Poliya A.Ş. Türkiye firmasından temin edilmiştir.

3.2. Yöntem

Malzemelere istenen özellikleri sağlamak için kullanılan ve sürekli geliştirilen polimer kompozit üretim yöntemleri bulunmaktadır. SMC yöntemi uzun yıllardan beri daha iyi mekanik özellikler, kısa çevrim süresi, mükemmel yüzey kalitesi, estetik, korozyon dayanımı, düşük maliyet gibi özellikler sunduğu için başta otomotiv olmak üzere birçok endüstri alanında tercih edilmektedir. Bu sebeplerden dolayı bu çalışmada SMC yöntemi tercih edilmiştir.

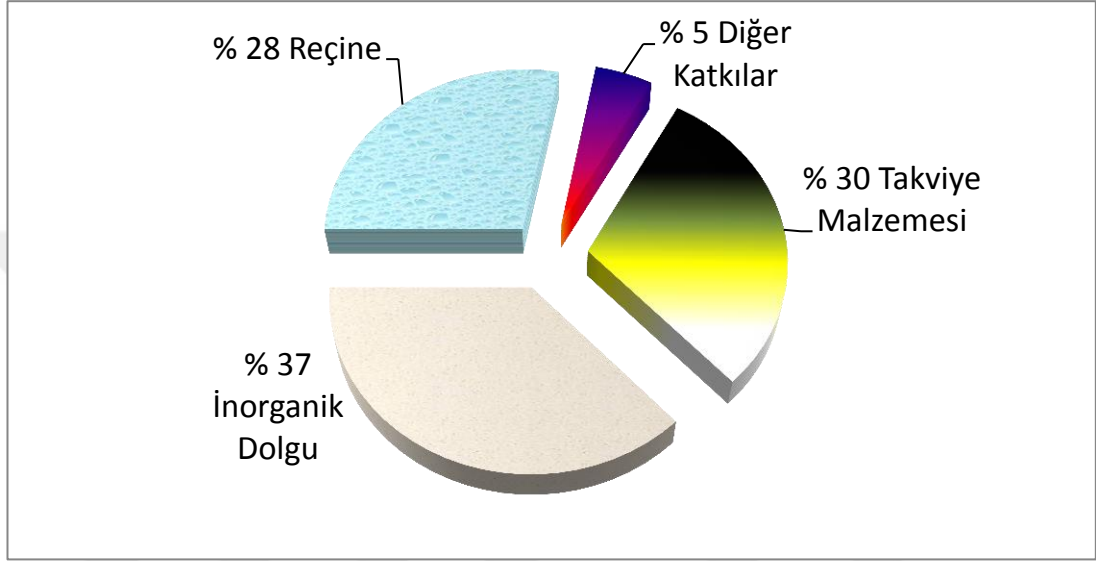
3.3. SMC Kompozit Üretim Yöntemi

SMC kompozitler iki ayrı üretim adımında elde edilirler. İlk adımda kompozit içerisine katılacak tüm malzemeler karıştırılarak pestil biçiminde malzemeler elde edilir. Daha sonra basınçlı kalıplarda, ısı ve basınç etkisi altında şekillendirilir. Bu adımlar aşağıda daha geniş biçimde açıklanmıştır (Kia 1993).

3.3.1. SMC Pestillerinin (Prepregs) Üretimi

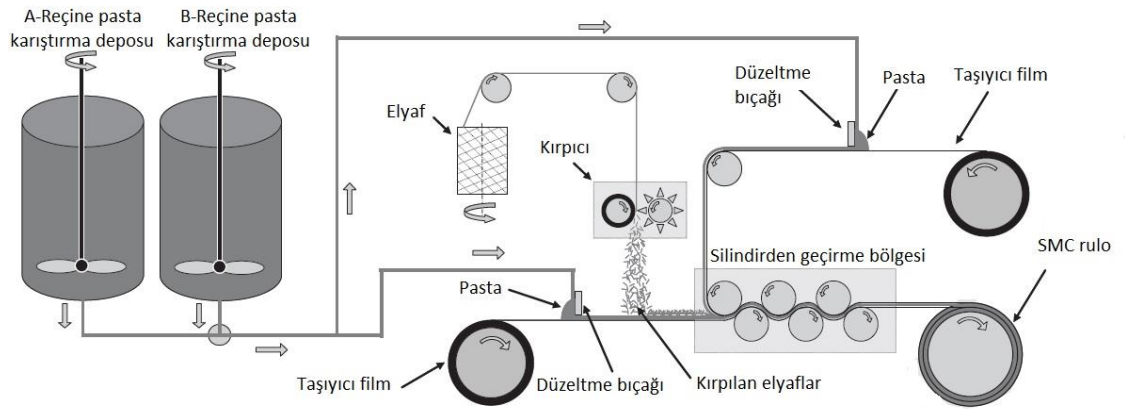
SMC hazır kalıplama yapılmadan önce pestil biçimde levhalar üretilir. Bu levhalarda genelde matris malzemesi olarak polyeester ve vinilester reçine, takviye malzemesi olarak cam ve karbon elyaflar, katkı malzemeleri olarak katalizörler, kalıp ayırıcılar,

kalınlaştırıcılar, dolgu olarak inorganik dolgu malzemeleri gibi birçok malzeme belli oranlarda bulunur (Şekil 3.4). Elyafar genellikle 12 mm'den, 50 mm (bazen daha uzun) uzunluğa kadar kırılır ve ağırlıkça %25-50 arasında çeşitli miktarlarda kullanılırlar. Yapılan araştırmalarda cam elyaf içeriği arttıkça üretilen parçalar daha iyi mekanik özelliklere sahip olmaktadır.



Şekil 3.4. Tipik bir SMC formülasyonu

Mevcut tüm kombinasyonlar ile nihai ürünün son halinde istenen gerekli özellikler çeşitli özel içeriklerin kullanılması ile karşılanırken, sayısız formülasyonlar vasıtasıyla çok yönlü takviye edilmiş SMC kompozitler elde edilir. Belli bir formülasyona göre belirlenen tüm malzemeler (elyaf hariç) birlikte pasta biçiminde karıştırılır. Daha sonra elyafar bu pasta ile ıslatılır (Şekil 3.5). Kalıplama operasyonları doğal olarak içerikteki malzeme tiplerine ve miktarına göre çok aşırı biçimde bağımlıdır.



Şekil 3.5. SMC pestil bileşiminin üretim hattı (Orgéas ve Dumont 2012).

Çalışma kapsamında üretilen pestiller, SMC üretimi yapan bir firmadan alınan özel bir formülasyonun, literatürdeki çalışmalar göz önüne alınarak geliştirilmesi ile elde edilmiştir. Formülasyonun içeriği, kullanılan elyaf tipinin ve içeriğindeki malzemelerin değişimine göre modifiye edilmiştir. Örneğin karbon elyaf için doymamış polyester kullanılmayacağı için reçine vinil ester ile değiştirilmiştir. Pestillerin üretimindeki bu detaylar aşağıda açıklanmıştır.

3.3.1.1. Kesikli (Kırpılmış) rasgele elyaf dağılımlı SMC pestillerin üretimi

Daha önce yapılan çalışmalarda yazarlar ürettikleri SMC pestillerin elyaf oranını ve formülasyonunu tam olarak açık bir şekilde vermediği için literatürdeki mevcut sonuçlar yerine tüm deneyler yeniden yapılmıştır. Yani referans değerleri olarak, daha önce çalışılmış sonuçları almak yerine kendi özel formülasyonumuzla üretilen plakalardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırma yapılmıştır. Referans malzemeler ve ilk defa denenilen takviye malzemeleri aynı formülasyon ve üretim koşullarına sahip olduğu için daha doğru ve gerçekçi sonuçlar elde edildiği düşünülmektedir. İlk önce cam elyaf bobin 24, 48, 65, 75, 95 mm uzunluğunda kırptırıldıktan sonra Çizelge 3.10.'da verilen formülasyona göre pestiller hazırlanmıştır.

SMC reçine üretilirken ilk önce polyester malzeme tartılarak karıştırıcının kabına dökülmüştür. Daha sonra sırası ile malzemeler ağırlıkça belli oranlarda tartılarak eklenmiştir ve karıştırıcı ile belli bir hız ve sürede iyice karıştırılmıştır.

Çizelge 3.10. Kesikli cam elyaf pestil için kullanılan formülasyon

Malzeme	Ağırlıkça (%)
Doymamış Polyester (Polipol 347)	35
Termoplastik Reçine (LSB)	10
Polimerizasyon Katalisti (Trigonox 29-C50)	0,5
İç Kalıp Ayırıcı Zn-Çinko Stearat	1,3
İnert Dolgu (CaCO ₃) Kalsit	30
Diğer katkıları	3,2
Cam Elyaf Kırıkları (Camelyaf SMC3) (24,48,65,75,95 mm)	20
Toplam	100

Pestil üretilirken, SMC reçinenin bir süre sonra elyafları iyi ıslatamayacağı için tüm işlemlerin belirlenen sürede yapılması aksi takdirde reçinenin katılaşacağı unutulmamalıdır. Islatmanın daha iyi olabilmesi için reçine içine bir miktar stiren eklenmiştir. Reçine hazırlandıktan sonra polietilen film üzerine bir miktar sürülmüştür. Daha sonra üzerine kırılmış elyaflar rasgele yönlerde fakat homojen olacak şekilde dağıtıldıktan sonra Şekil 3.6'daki gibi tekrar üzerine polietilen film kapatılarak metal merdane ile reçinenin elyafı iyice sarması sağlandı ve aynı zamanda hava boşlukları giderildi. En son pestilin etrafı bantla kapatılarak stirenin olgunlaşma olmadan uçması engellenmeye çalışıldı. Pestiller uygun laboratuvar şartlarında olgunlaşması için bir süre bekletildi.

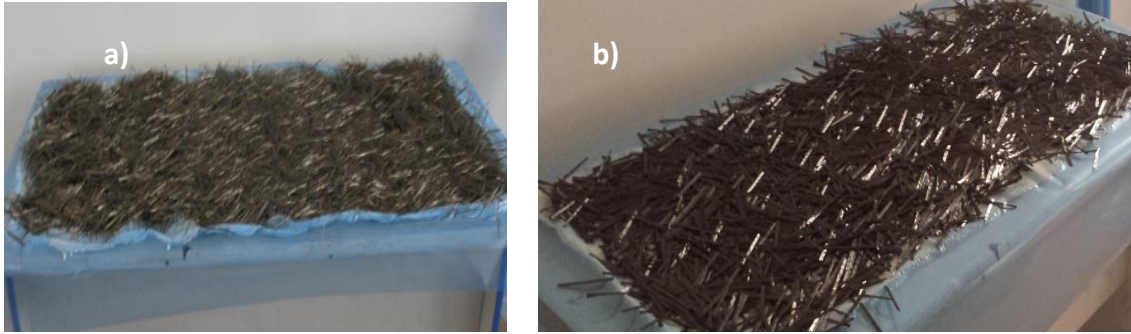


Şekil 3.6. Kesikli rasgele cam elyaf dağılımlı SMC pestiller

Aynı formülasyon ile literatürde olmayan 75 ve 95 mm uzunluğunda kırptırılan cam elyaflar kullanılarak yukarıdaki aşamalar tekrar edilip diğer SMC pestiller üretilmiştir. SMC’de kullanılan elyaf uzunluklarının yanında formülasyon içinde kullanılan ağırlıkça elyaf oranları da üretilen malzemenin nihai mekanik özelliklerini ciddi oranda etkilemektedir. Bu sebeple farklı ağırlık oranlarında (%20 yukarıda yapılmıştı) %25, %30 cam elyaf katılarak SMC pestiller elde edilmiştir.

İleri takviye malzemeleri

SMC yöntemi ile örneğin otomotivde ucuz seri üretim parçaları yapıldığı için genellikle cam elyaf tercih edilmektedir. Çevre sorunlarının getirdiği güncel yasalar ve sınırlamalar emisyonların azalması için araçların hafiflemesini zorunlu hale getirmiştir. Karbon gibi ileri takviye malzemelerinin ucuzlaması ve bazalt gibi yeni kullanılmaya başlanan takviye malzemeleri, SMC için alternatif olmaya başlamıştır. Bu nedenle bu çalışmada karbon, bazalt ve aramit elyaflar gibi ileri takviye elyaf malzemeleri, 65 mm uzunlukta kırptırılarak (cam elyafla karşılaştırabilmek için 65 mm uzunluk seçilmiştir) SMC pestiller üretilmiş cam elyafla karşılaştırılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. a) Kesikli rasgele dağılımlı karbon ve b) bazalt elyaf takviyeli SMC pestiller

Karbon ve aramit elyafın kaplama malzemesi doymamış polyester reçineye uyumlu olmadığı için polyester reçine yerine vinil ester reçine kullanılmıştır. Bu pestiller için kullanılan formülasyon Çizelge 3.11.’de verilmiştir.

Çizelge 3.11. İleri takviye malzemeli pestil için kullanılan formülasyon

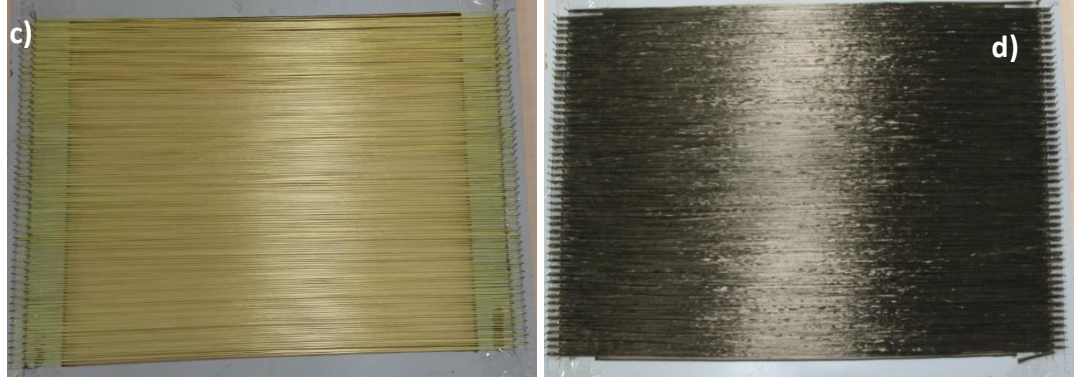
Malzeme	Ağırlıkça (%)
Vinil ester (Polives 701)	35
Termoplastik Reçine (LSB)	10
Polimerizasyon Katalisti (Trigonox 29-C50)	0,5
İç Kalıp Ayırıcı Zn-Çinko Stearat	1,3
İnert Dolgu (CaCO ₃) Kalsit	30
Diğer katkıları	3,2
Cam, Karbon, Bazalt, Aramit elyaf (65 mm)	20
Toplam	100

Ayrıca daha doğru bir karşılaştırma yapabilmek için cam elyafla yapılan SMC pestiller vinil ester reçine ile tekrar yapılmıştır.

3.3.1.2. Sürekli elyaf takviyeli SMC pestillerin üretimi

Kompozit malzemenin mukavemetini sağlayan asıl malzeme elyaftır. Tek yönde dayanımın istendiği yerlerde elyafların tek yönlü yönlendirilmesi mekanik özellikler açısından mükemmel sonuçlar vermektedir. Sürekli elyaflar Şekil 3.8’de görüldüğü gibi basit bir düzenek vasıtasıyla elle ayrı ayrı dokunarak elde edilmiştir.





Şekil 3.8. a) Cam, b) karbon, c) aramit ve d) bazalt sürekli elyaf dokuma

Sürekli elyaf takviyeli SMC pestillere de Çizelge 3.11'deki aynı SMC reçine formülasyonu kullanılmıştır. Yalnızca takviye malzemesi olarak kırılmış elyaf yerine aynı ağırlık oranını (%20) sağlayacak şekilde birden fazla kat sürekli elyaf dokumalar üst üste yerleştirilmiştir. Yukarıda pestil üretme yöntemine benzer şekilde polietilen film arasına yerleştirilen sürekli takviye malzeme elyaflar aralarına reçine sürülerek en son metal merdane ile aradaki boşluklar ve hava kabarcıkları giderilmiştir.

3.3.1.3. Dokuma elyaf takviyeli SMC pestiller

Dokuma elyaflar kompozitin mekanik özelliklerini en az iki yönde iyileştirirler. Aynı zamanda elyaflar istenen yönlerde yönlendirildiği için parçanın mukavemeti artırılmış olur. Dokuma elyafların basınçlı kalıplamada bazı engelleri vardır. Örneğin; karmaşık ve gömme ek parçası, çıkıntı ve çukur bölgeleri olan parçalarda pestilin kalıp içinde hareket etmesi zordur. Basit ve düzlemsel parçalarda bu engeller nispeten çözülmeye çalışılır.

Dokuma SMC pestil üretilirken ilk önce dokuma cam elyaf miktarının mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Çizelge 3.10'da verilen aynı SMC reçine formülasyonu kullanılmıştır. Bunun için içerisinde tek kat dokuma elyaf olacak şekilde ve sadece SMC reçinenin bulunduğu pestiller hazırlandıktan sonra olgunlaşması için bekletilmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Dokuma SMC pestillerin hazırlanması

Daha sonra tek kattan altı kata kadar dokuma pestiller elde edildi. Altı kat dokuma pestil referans olarak seçilerek diğer pestillerin aynı ağırlıkta kalıpta basılması sağlandı. Bunun için basım esnasında aynı özelliklere sahip içeriğinde elyaf olmayan SMC reçine malzeme, üst üste yerleştirilen dokuma elyaf katların her iki tarafına tartılarak yerleştirildi ve böylelikle tüm pestillerin aynı ağırlığa sahip olması sağlandı. Örneğin tek kat dokuma elyaf kalıba uygun olarak kesilip tartıldıktan sonra eksik kalan miktar, elyafsız SMC reçine ile tamamlanarak kalıp içine yerleştirilip pestiller basılmıştır. Aynı işlem altı kata kadar devam etmiştir.

Sonraki çalışmada ise farklı dokuma elyaf tiplerini karşılaştırabilmek için benzer şekilde ileri dokuma elyaflarla pestiller üretilmiştir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Farklı ileri elyaf dokumalar

Daha önce bahsedildiği gibi bu pestilleri hazırlayabilmek için ileri takviye malzemeleri ile uyumlu vinil ester reçine kullanmak gereklidir bu sebeple bu pestiller için Çizelge 3.11’de verilen SMC reçine formülasyonu kullanılmıştır. Formülasyonda verilen kesikli (kırılmış) elyaflar yerine aynı ağırlık oranını sağlayacak şekilde farklı katlarda ileri elyaf dokuma malzemeler kullanılmıştır. Dokuma elyaf pestiller üretim sürecinde aralarına reçine sürülerek üst üste yerleştirilip elde edilmiştir. Aynı reçine ve üretim koşullarına tüm dokuma elyaf pestillerin sahip olabilmesi ve sağlıklı bir değerlendirme yapabilmek için cam elyaf dokuma pestil, vinil ester reçine ile tekrar yapılmıştır.

3.3.1.4. Farklı dolgu maddesi kullanılarak yapılan SMC pestil

Son yıllarda üstün özelliklerinden dolayı tercih edilmeye başlanan bazalt malzeme elyaf olarak kullanılmasının yanında partikül olarak kullanılmıştır. Öğütülerek mikro boyutta partikül haline getirilmiş bazalt partikül, CaCO_3 yerine kullanılarak matris malzemenin mukavemeti arttırılmaya çalışılmıştır. Çizelge 3.10’daki aynı formülasyon kullanılarak hazırlanan SMC pestilde sadece dolgu maddesi değiştirilerek yerine bazalt partikül kullanılmıştır.

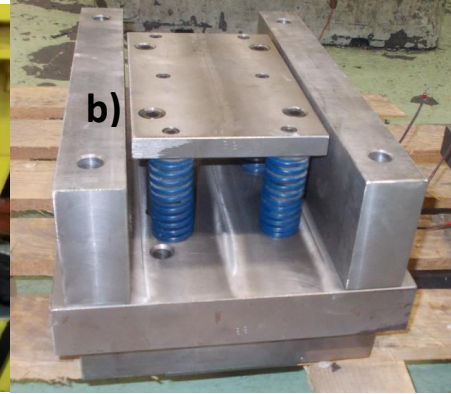
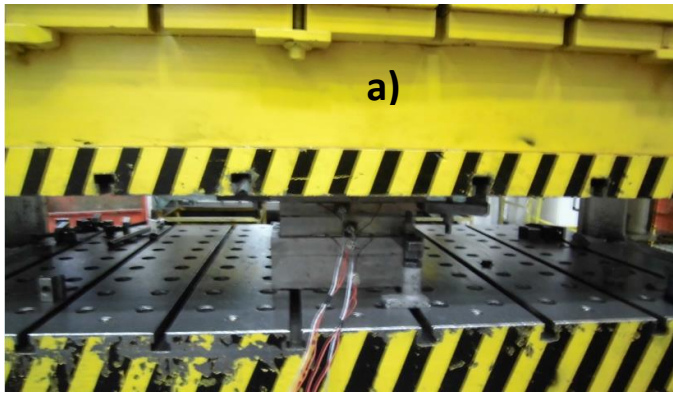
3.3.2. Pestillerin sıcak preste kalıplanması

SMC parçalar sıcaklık ve yüksek basınç etkisi altında üretildiği için kullanılan kalıbın bu şartlara uygun olması gerekmektedir. Bu şartlara uygun çalışabilmesi için ısı ve yüksek basınca dayanıklı özel çelik bir kalıp yaptırılmıştır (Şekil 3.11 a). Isıtmanın sağlanabilmesi için kalıba rezistans bağlanmış ve bu rezistansların sıcaklık kontrolü için özel bir elektrik panosu hazırlanıp sıcaklıklar istenen değerde sabit tutulmuştur Şekil 3.11 b).



Şekil 3.11. a) Özel olarak yaptırılan SMC kalıbı b) sıcaklık kontrolü sağlayan elektrik panosu

SMC plakaların kalıptan kolayca çıkabilmeleri için alt kalıba Şekil 3.12 b)' de görüldüğü gibi iticiler yerleştirilmiştir. Parçanın üst yüzeyinin pürüzsüz olması için ise kalıbın üst tarafı polisajla parlatılmıştır. Kalıbın alt ve üst rezistansı elektrik panosu tarafından ayrı ayrı kontrol edilmektedir. Alt ve üst kalıp arasında 3-5 °C sıcaklık farkı olması gerekir. Bunun sebebi kalıp açıldığında parçanın alt kalıba yapışık olarak kalması istenir böylelikle hem parçanın kalıptan kolayca ayrılması sağlanır hem de parçanın üst yüzeyi pürüzsüz kalır.



Şekil 3.12. a) Kalıbın prese bağlanması b) Kalıp iticileri

Basıncı sabit değerde sürekli tutabilmek için ise kalıp basınç kontrollü hidrolik prese sabitlenmiştir (Şekil 3.12 a).

Pestiller uygun ağırlıkta kesilip tartıldıktan sonra kalıba yerleştirilir. Daha sonra 140-150 °C sıcaklık ve 80 bar basınç altında 4 dakika süre ile bekletildikten sonra Şekil 3.13'deki gibi SMC plakalar elde edilir. Polyester reçine için 4 dakika olan kürleşme süresi vinil ester için 8 dakika olarak alınmıştır.

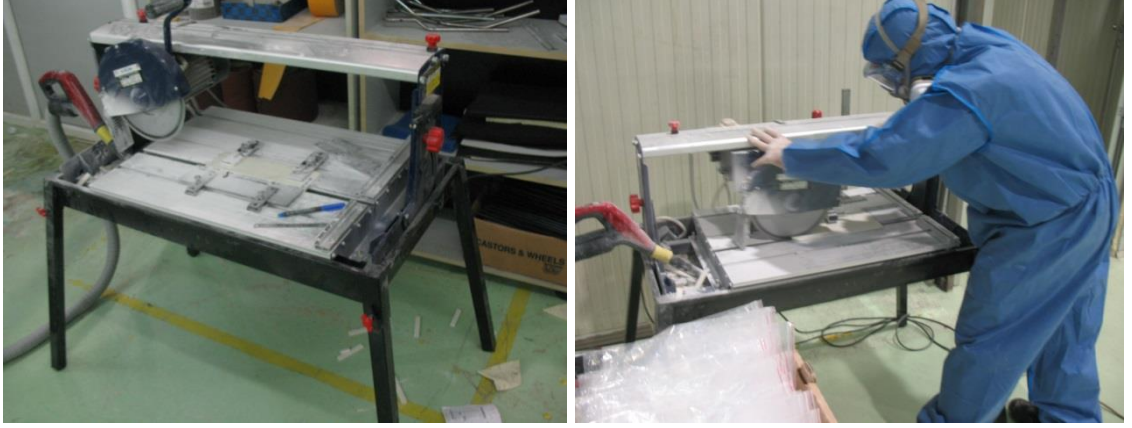


Şekil 3.13. Üretilen SMC plakalar. Solda kırılmış cam elyaf plaka sağda kırılmış karbon elyaf plaka

3.4. SMC Kompozit Malzemelerin Mekanik Karakterizasyonu

3.4.1. Çekme deneyi

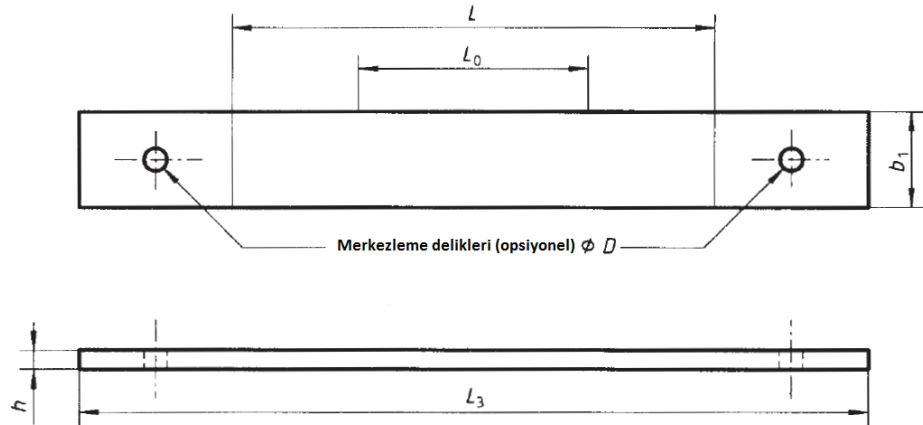
SMC malzemelerin mekanik karakterizasyonu için çekme ve eğilme deneyleri yapılmıştır. Bunun için üretilen SMC plakalar Şekil 3.14'de görüldüğü gibi elmas testere ile standartlara uygun bir şekilde kesilmiştir. Malzeme içerisindeki kimyasal maddelerin sağlığa verebilecek zararlarından etkilenmemek için iş güvenliği kurallarına ayrıca riayet edilmiştir.



Şekil 3.14. SMC plakaların elmas testere ile kesilmesi

Çekme deneyi numuneleri elde etmek için, ISO 527 standartlarına uygun ve Şekil 3.15'deki gibi ve Çizelge 3.12.'de verilen boyutlarda kesilmiştir. Deney numunelerinin çenelerden kaymadan testin sonlandırılabilmesi için numunelerin çenelere bağlanan kısmına aynı ebatlarda aynı deney plakasından kesilen parçalar epoksi ile yapıştırılarak güçlendirme yapılmaktadır veya Şekil 3.15'de görüldüğü gibi merkezleme delikleri açılıp çenelere pim ile bağlanması sağlanarak kayması önlenmeye çalışılmaktadır.

Kullanılan çekme deney cihazının çenelerinin iç kısımları yeterince tırtıklı olduğu, numuneyi yeterince sıkıştırdığı ve en önemlisi numune istenen bir şekilde çeneler arası mesafenin arasında Şekil 3.16 b'de görüldüğü gibi kırıldığı için bu merkezleme deliklerine ve güçlendirme plakalarına gerek görülmemiştir.



Şekil 3.15. ISO 527 standardına uygun olarak hazırlanan çekme deney numunesi.

Çizelge 3.12. Çekme deney numunesi boyutları (ölçüler mm'dir) (Anonim 2016e).

Mesafeler	Standart ölçüler	Hazırlanan deney numunelerinin boyutları
$L_3 = \text{Tüm uzunluk}$	≥ 250	250
$L_0 = \text{Gauge uzunluğu}$	50 ± 1	
$L = \text{Çeneler arası uzunluk}$	150 ± 1	
$b_1 = \text{Genişlik}$	$25 \pm 0,5$ veya $50 \pm 0,5$	25
$h = \text{Kalınlık}^*$	2-10	4-6
$D = \text{Merkezleme delik çapı}$	$3 \pm 0,25$	

* SMC plaka kalınlığı matris malzemenin kalıptan taşma miktarına göre bir miktar değişmektedir. Deney aşamasında tüm numunelerin kalınlığı ölçülüp cihaza girildiği için çekme gerilmesi değeri her numunenin kendi kalınlığına göre cihaz tarafından hesaplanıp, sonuç raporları verilmektedir.

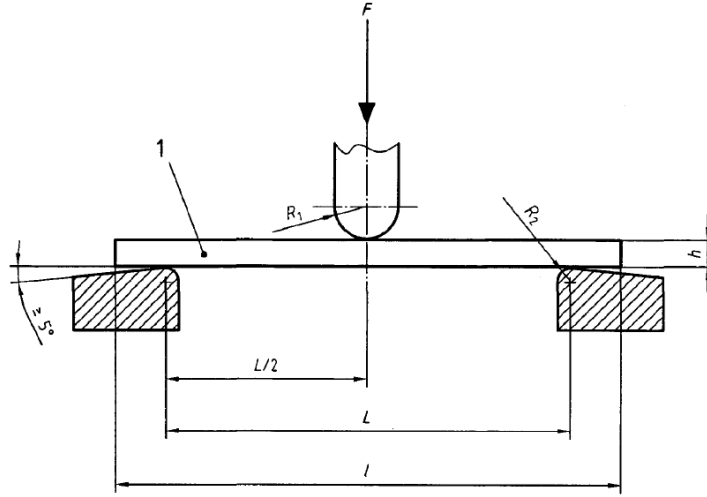
Çekme deneyi için hazırlanmış numuneler 5 mm/dk hızla Shimadzu marka çekme cihazında test edilmiştir (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Numunenin çekme cihazında teste tabi tutulması a) Numunenin test cihazına bağlanması, b) Kırılan çekme deneyi numunesi

3.4.2. Eğilme deneyi

Eğilme deneyi numunesi ISO 178 standartlarına uygun olarak elmas testere ile Şekil 3.17'deki gibi ve Çizelge 3.13'deki verilen boyutlarda kesilmiştir.



Şekil 3.17. ISO 178 standardına uygun olarak hazırlanan eğilme deney numunesi.

Çizelge 3.13. Eğilme deney numunesi boyutları (ölçüler mm'dir) (Anonim 2016f)

Mesafeler	Hazırlanan deney numunelerinin boyutları
$l =$ Numune uzunluğu	80
$b_1 =$ Numune genişliği	15
$h =$ Numune Kalınlığı *	4-6

* SMC plaka kalınlığı matris malzemenin kalıptan taşma miktarına göre bir miktar değişmektedir. Deney aşamasında tüm numunelerin kalınlığı ölçülüp cihaza girildiği için eğilme gerilmesi değeri her numunenin kendi kalınlığına göre cihaz tarafından hesaplanıp, sonuç raporları verilmektedir.

Eğilme deneyi için hazırlanmış numuneler ise Şekil 3.18'de görüldüğü gibi 2 mm/dk hızla Zwick marka eğilme test cihazında üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.18. Numunenin eğilme cihazında teste tabi tutulması

3.5. SMC Kompozit Malzemelerin Yüzey Karakterizasyonu

SMC kompozit malzemelerin çekme ve eğilme numunelerinin kırık yüzey görüntülerinin yüzey karakterizasyonunu yapabilmek için Carl Zeiss Evo40 marka SEM cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.19). Numuneler metal malzeme olmadığı için yüzeylerinin daha iyi yansıtarak kaliteli görüntü elde etmek için malzeme yüzeyleri altın paladyum (gold palladium) kaplandıktan sonra vakum altında inceleme altına alınmıştır.



Şekil 3.19. Numunelerin SEM cihazında görüntülenmesi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kompozitlerde mukavemeti sağlayan malzemeler elyaflardır ve mekanik özellikleri iyileştirmek için genellikle elyaf takviye malzemeleri modifiye edilmektedir. Bundan dolayı bu çalışmada SMC yöntemi ile üretilen polimer kompozit plakalarda cam elyaf için farklı uzunluk, oran ve tipteki elyaflar kullanılmıştır. Çalışılan laboratuvar koşullarında farklı elyaf oranlarında üretilen plakalardan en iyi ıslanma %20 oranında sağlandığı için sadece bu orandaki sonuçlar verilip diğerlerinin verilmesine gerek görülmemiştir. Kompozitin performansını daha iyi artıran ileri elyafların (bazalt, karbon, aramit gibi) yine farklı tipleri kullanılarak SMC plakalar üretilmiştir. Çalışmaların hepsinin birbiri ile kıyaslanabilir olması için üretilen diğer SMC plakalarda da elyaf oranı ağırlıkça %20 alınmıştır.

Kompozit malzemelerde hasar genellikle matris malzemedeki oluşan çatlaklar ile başlamaktadır. Daha sonra çatlaklar ilerleyerek matris ile elyaf ayrılmakta en son elyaflar kırılarak malzeme hasara uğramaktadır. Bu nedenle sadece elyafların modifikasyonu ile yetinilmeyip ayrıca matrisin mekanik özelliklerini iyileştirmek için matris malzeme modifikasyonu da yapılmıştır. Bu amaçla yapılan denemelerde dolgu malzemesi kalsiyum karbonat (CaCO_3) yerine bazalt partikül kullanılarak daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Deneysel çalışmalar için üretilen SMC plakalar elmas testere ile standartlara uygun boyutlarda kesilerek çekme ve eğilme testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar grafiksel ve çizelge olarak verilmiştir. Daha sonra kırılma bölgesinin yüzey karakterizasyonu için SEM cihazı kullanılmış ve çekilen görüntüler yorumlanmıştır. Bu plakalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir. Numuneler Çizelge 4.1'deki notasyona göre kodlanmıştır.

CF: Cam elyaf

VE: Vinil ester reçine

BP: Bazalt partikül

KF: Karbon elyaf

R: Rasgele (Random)

BF: Bazalt elyaf

D: Dokuma

AF: Aramit elyaf

UND: Tek yönlü (Unidirectional)

Çizelge 4.1. SMC plaka notasyonları

Notasyon	Açıklaması
CF R24/48/65/75/95 BF R65	CF R24 ; Elyaf uzunluğu 24 mm kırılmış kesikli cam elyafın rasgele dağıtıldığı, polyester reçineli SMC plaka
CF 1D/2D/3D/4D/5D/6D BF 6D	CF 1D ; Tek kat cam elyaf dokuma ile yapılan, polyester reçineli SMC plaka
CF %20/%25/%30 R65	CF %20 R65 ; Ağırlıkça %20 ve 65 mm uzunlukta olan kırılmış cam elyafın rasgele dağıtıldığı, polyester reçineli SMC plaka
CF/BF UND	BF UND ; Tek yönlü bazalt elyafı, polyester reçineli SMC plaka
BP-CF-R65	BP R65 ; CaCO ₃ dolgu maddesi yerine bazalt partikül ile yapılan 65 mm kırılmış kesikli cam elyafın rasgele dağıtıldığı, polyester reçineli SMC plaka
CF/BF/KF/AF-VE R65	CF-VE R65 Elyaf uzunluğu 65 mm kırılmış kesikli cam elyafın rasgele dağıtıldığı, vinil ester reçineli SMC plaka
CF/BF/KF/AF-VE 6D	KF-VE 6D ; Altı kat karbon elyaf dokuma tabakanın üst üste yerleştirildiği, vinil ester reçineli SMC plaka
KF/AF-VE-UND	AF-VE UND ; Tek yönlü aramit elyafı, vinil ester reçineli SMC plaka

Elde edilen SMC kompozit plakaların mekanik karakterizasyonlarını tespit etmek için çekme ve eğilme testleri yapılmıştır. Deney numuneleri üretilen plakalardan elmas testere ile standartlara uygun olarak kesilerek hazırlanmıştır. Çekme deneyi için standartlarda verilen ölçülere göre; 25 mm genişliğinde ve 250 mm uzunluğundaki numuneler hazırlanıp çekme deney cihazında teste tabi tutulmuş daha sonra elde edilen veriler; grafikler, çizelgeler ve resimler olarak aşağıda verilerek yorumlanmıştır. Eğilme deneyi için ise plakalardan standartlara uygun biçimde 15 mm genişliğinde ve 80 mm uzunluğundaki numuneler üç noktalı eğilme deney cihazında teste tabi tutulduktan sonra elde edilen grafikler, çizelgeler ve resimler aşağıda verilerek yorumlanmıştır.

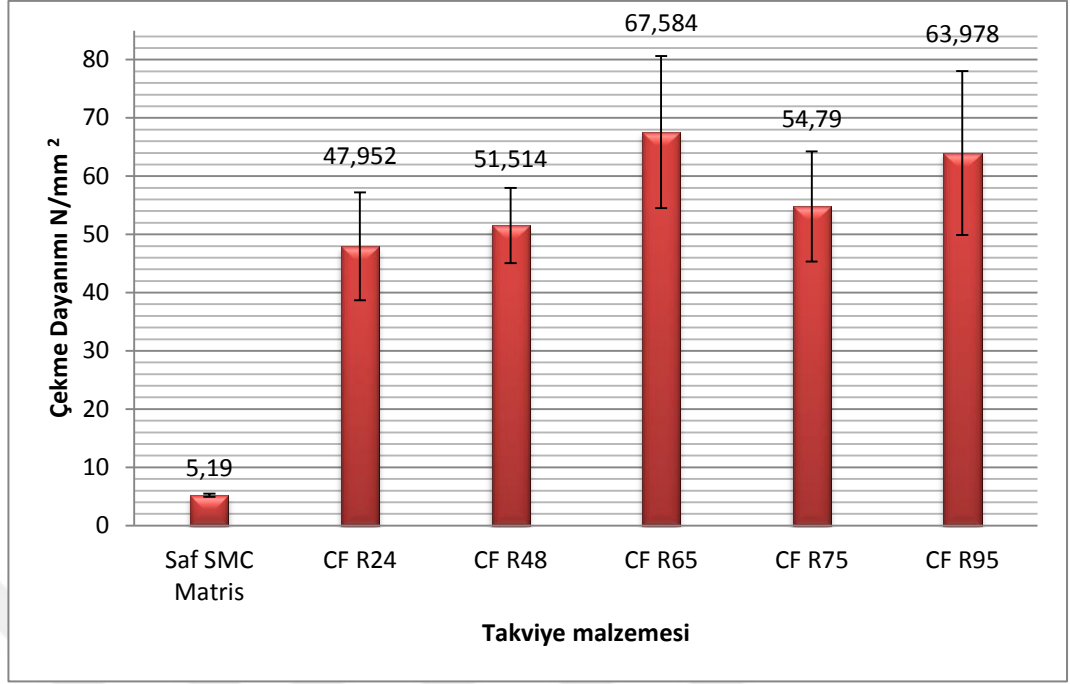
Malzemenin mekanik özelliklerinin irdelenmesinde kuşkusuz kompozitin iç yapısının incelenmesi gerekmektedir. Mekanik dayanımı belirleyen en önemli unsurlardan

bazıları; elyaf ile matrisin birbiri ile etkileşimleri, elyafın yönlenmesi, dolgu maddesinin dağılımı ve matris-elyaf etkileşimleridir. Bunların yanında malzemenin hasara uğrarken kırılma şekli de malzemenin yapısı hakkında bize bilgi vermektedir. Malzemenin iç yapısını gözlemek amacıyla yapılan yüzey karakterizasyonunu elde etmek için Carl Zeiss Evo40 marka SEM cihazı ile çekme ve eğilme numunelerinin kırık yüzey görüntüleri çekilmiştir. Numuneler metal olmadığı için yüzeyi altın paladyum (gold palladium) kaplandıktan sonra vakum altında inceleme altına alınmıştır ve elde edilen resimler daha sonra yorumlanmıştır.

4.1. Kesikli (Kırılmış) Rasgele Elyaf Dağılımlı SMC kompozitler

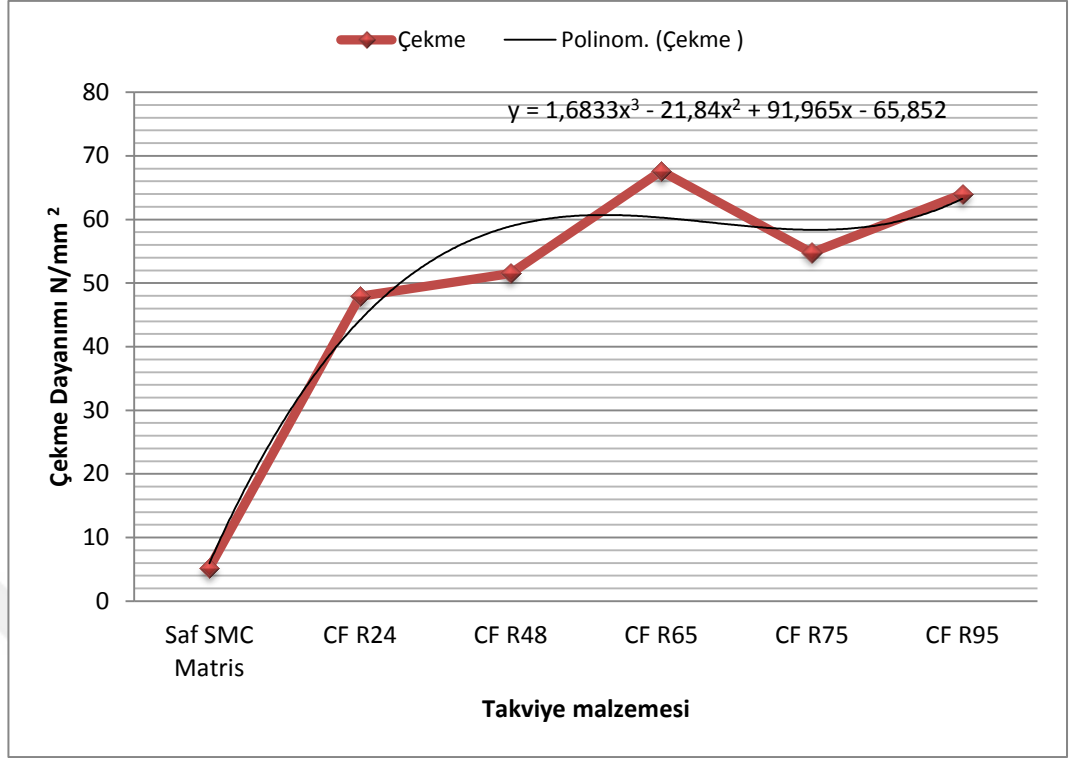
4.1.1. Kesikli (kırılmış) rasgele elyaf dağılımlı SMC kompozitlerin çekme deney sonuçları

İlk olarak elyaf uzunluğunun etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Literatürde genellikle 24, 48, 65 mm uzunluğunda rasgele cam elyaf malzemenin çekme deney sonuçları mevcuttur. Bunlara ilaveten 75 ve 95 mm uzunluğundaki elyaflarında çekme deney sonuçları elde edilmiştir. SMC malzeme ile yapılan kompozitlerin içerisinde birçok farklı malzeme bulunmaktadır ve içeriğindeki bu malzemelerin standart bir formülasyonu yoktur. Firmalar kendi ihtiyaçlarına yönelik hazırladıkları formüllerle üretim yapmaktadır. Literatürdeki yapılan çalışmalarda da formülasyon içeriğinin tamamı verilmemekle birlikte üretim koşulları da değişebilmektedir. Bunun yanı sıra kullanılan malzemelerin özellikleri de farklılık gösterebilir. Yani her firmanın ürettiği malzeme özelliği değişebilmektedir. Tüm bu koşulları sağlamak pek mümkün değildir. Bu sebeple literatürde verilen test sonuçlarını kullanarak yeni malzemelerle karşılaştırmak yerine aynı formülasyon ve üretim koşulları ile bu testlerde tekrar edilmiş böylece daha doğru ve gerçekçi karşılaştırmalar yapılabileceği düşünülmüştür. Cam elyaf takviye ile üretilen SMC numunelerin çekme deney sonuçları grafiksel olarak Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Kesikli rasgele cam elyafı SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları

Deney sonuçları arasındaki ilişki Şekil 4.2’de verilen çizgi grafikte de ayrıca verilmiştir. Rasgele dağılımlı cam elyaflarla üretilen SMC kompozitlerde 24 mm’den 65 mm’ye kadar mekanik değerlerde neredeyse doğrusal bir ilişki varken bu uzunluktan sonra değerler düzensiz değişmektedir.



Şekil 4.2. Kesikli rasgele cam elyafı SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları

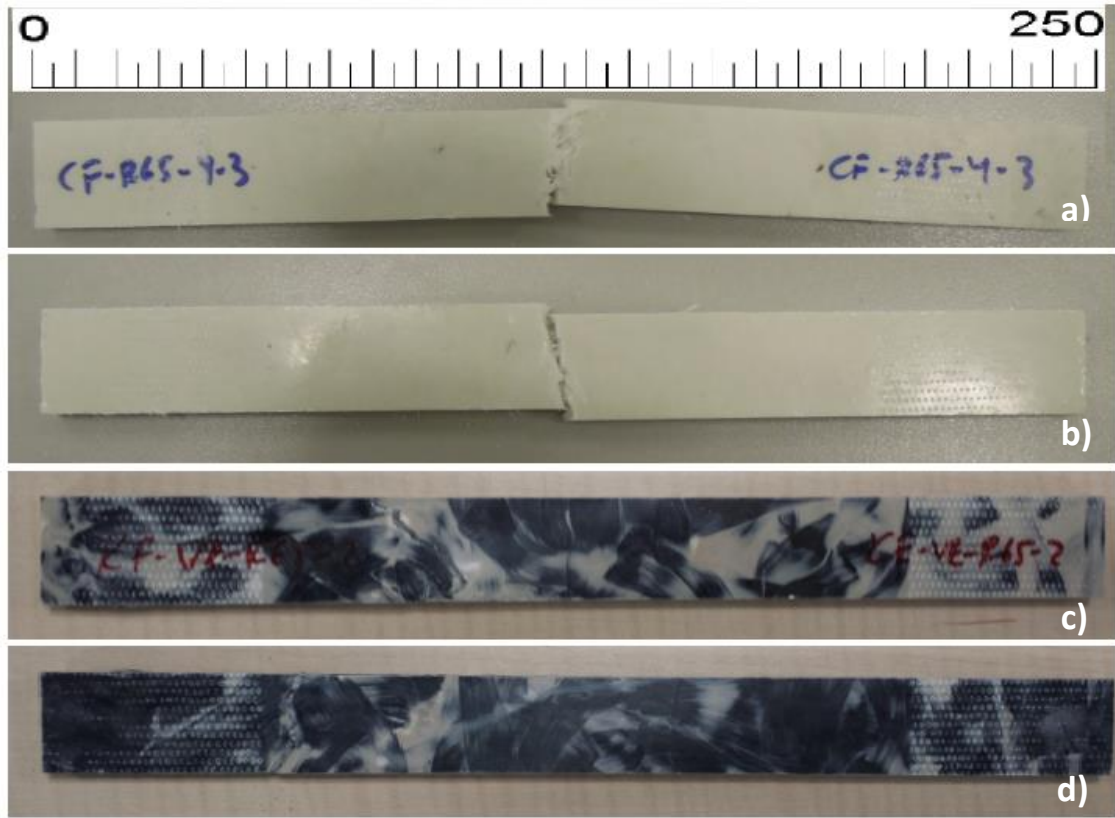
Deneilerin geçerli olabilmesi için standartlarda en az 5 numunenin hazırlanmış olması gerekmektedir. Her bir deney grubunun aritmetik ortalamasının alınarak verildiği çekme deney sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Kesikli rasgele cam elyafı SMC numunelerin çekme deneyi sonuçları

Malzeme*	Çekme gerilmesi N/mm ² (MPa)	Standart Sapma	Uzama %
Saf SMC reçine	5,19	0,28	-
CF R24	47,95	9,26	2,81
CF R48	51,51	6,45	2,85
CF R65	67,58	13,04	3,62
CF R75	54,79	9,45	2,39
CF R95	63,98	14,08	2,72

*Tüm sonuçların ortalama değerleri verilmiştir

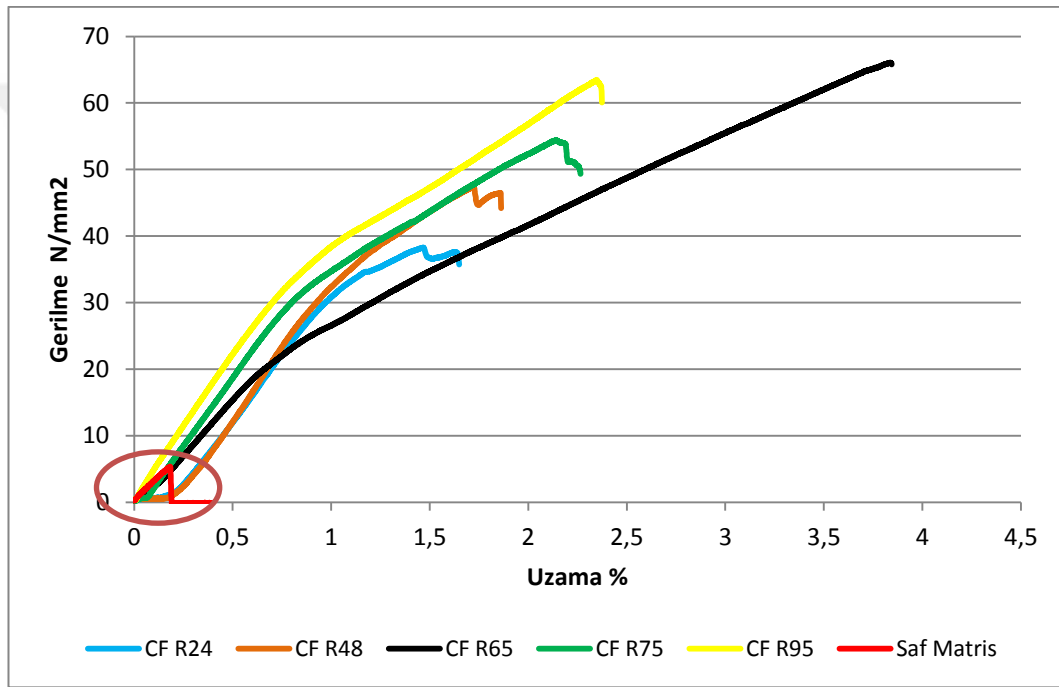
Çizelge 4.2’de ve Şekil 4.4’de verilen gerilme birim deformasyon eğrisi daire içerisinde gösterilen saf SMC reçinenin verileri incelenirse çekme gerilmesi değeri diğer sonuçlara kıyasla çok düşüktür. Bu durum kompozitin mukavemetini sağlayan asıl malzemenin içeriğindeki elyaf olmasını net bir şekilde onaylamaktadır. Ayrıca çekme deneyi raporunda saf reçine için uzama değerinin olmaması numunenin hiç uzama göstermeden gevrek biçimde kırılması anlamına gelmektedir. Yine gerilme ve uzama eğrisi incelendiğinde diğer numunelerin de kuvvet etkisi altında bir miktar uzadıktan sonra matris çatlakları ve sonrasında bir kısım elyafın kırılması, bir kısım elyafın ise sıyrılması ile malzemenin gevrek bir şekilde hasara uğradığı gözlemlenmektedir Şekil 4.3. Bu kırılma mekanizması literatürde açıklanmıştır (Jendli ve ark. 2004, Huang ve Zhao 2012, Oldenbo ve ark. 2003).



Şekil 4.3. Hasara uğramış çekme deneyi numuneleri, kesikli rasgele cam elyaf SMC’nin a) ön ve b) arka görünümü, Kesikli rasgele karbon elyaf SMC’nin c) önden ve d) arkadan görünümü

Normalde elyaf uzunluğu arttıkça malzeme mukavemeti de artmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde bu durum 65 mm elyaf uzunluğuna kadar devam ederken bu değerden

sonra 75 mm elyaf uzunluğuna kıyasla çekme gerilmesi değerinde yaklaşık %20'lik bir düşüş söz konusu olmuştur. Bu durumun basınç etkisi ile şekillendirilen SMC plaka içinde uzun elyafların bükülmesinden kaynaklandığı düşünölmektedir. Bükölen elyaflar, hem düzensiz takviyelendirme yapar hem de yükleme doğrultusuna dik yönde olmadığı için daha düşük gerilmeler altında kayma gerilmelerinin etkisi ile malzeme hasara uğramaktadır (Jendli ve ark 2005). Sonuçların ortalaması alındığında bu ortalamaya yakın numune grubunu temsil eden bir deney sonucunun gerilme-uzama grafiği seçilerek bu eğrilerin bir arada çizildiği grafik ise Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Kesikli rasgele cam elyaflı SMC numunelerin çekme gerilmesi-birim deformasyon eğrileri

Şekil 4.4. incelendiğinde SMC kompozit malzemeler belli bir değere kadar elastik deformasyona uğrarken yaklaşık %0,2-0,5 deformasyona ulaştığında matris malzemede mikro çatlakların oluşması ile gerilme hafif azalmakta daha sonra yükleme devam ettikçe deformasyonda devam etmekte %2 civarında deformasyona ulaştığında elyaf-matris arasındaki ayrılmalar ile plastik deformasyon başlar ve malzeme akma gerilmesine ulaşır. Bu noktadan sonra elyafların kırılması sonucu çok az bir deformasyon ile kompozit malzeme gevrek olarak hasara uğrar. Elde edilen grafiklerdeki hasar durumu literatür ile de örtüşmektedir.

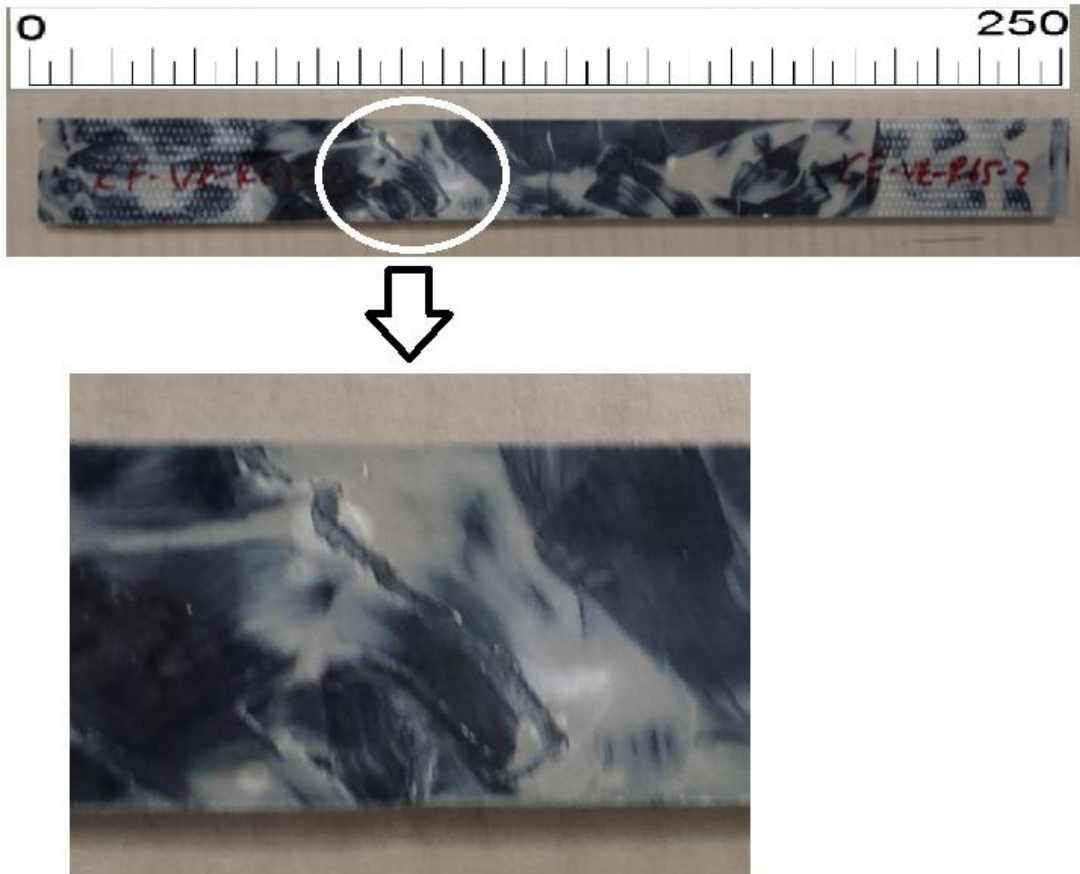
Takviye malzemeleri kompozitlerde %70-80 oranında yük taşıyıcı bileşen olarak görev yaparak matrisin rijitliği ve dayanımını artırmaktadır (Saçak 2005). Bu bakımdan normal şartlarda özellikleri daha iyi farklı elyaf malzemeler kullanılarak yapılan kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin de daha iyi olması beklenir. SMC kompozitlerde genellikle cam elyaf kullanılmasına rağmen yapılan diğer bir çalışmada ise cam elyaf yerine bazalt, aramit ve karbon gibi farklı ileri elyaf malzemeler kullanılmıştır. Teknik literatürde SMC kompozitlerde bazalt ve aramit elyafın kullanımı ile ilgili daha önce yapılmış bir çalışma bulunmamaktadır yani bazalt ve aramit elyaf malzeme ile SMC kompozit üretimi ilk kez bu çalışmada gerçekleştirilmiştir. Daha önceki cam elyaf çalışmasında elyaf uzunluğu olarak en iyi performansı kesikli 65 mm'lik elyaf vermiştir. Bu nedenle farklı elyaflarda da 65 mm uzunluk tercih edilmiş, rasgele dağıtılarak üretilen kesikli elyaflı SMC kompozit plakalar yukarıda anlatıldığı gibi standartlara uygun olarak test edildikten sonra sonuçlar aşağıdaki Şekil 4.7'de ve Çizelge 4.3'de verilmiştir. Farklı elyaflarla üretilen kompozitlerin aynı koşullarda olabilmesi ve daha doğru bir karşılaştırma yapabilmek için 65 mm uzunluğundaki cam elyaf numuneler vinil ester reçine ile tekrar edilmiş ve bu numunelerde polyester ile üretilen cam elyaf numune ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.3. Kesikli rasgele ileri elyaflı SMC numunelerin çekme deneyi sonuçları

Malzeme*	Çekme gerilmesi N/mm² (MPa)	Standart Sapma	Uzama %
Saf SMC	5,19	0,28	-
Matris			
BF-VE R65	51,56	11,52	2,33
KF-VE R65	58,02	11,83	1,74
AF-VE R65	64,05	9,42	2,68
CF R65	67,58	13,04	3,62
CF-VE R65	68,22	13,98	3,12

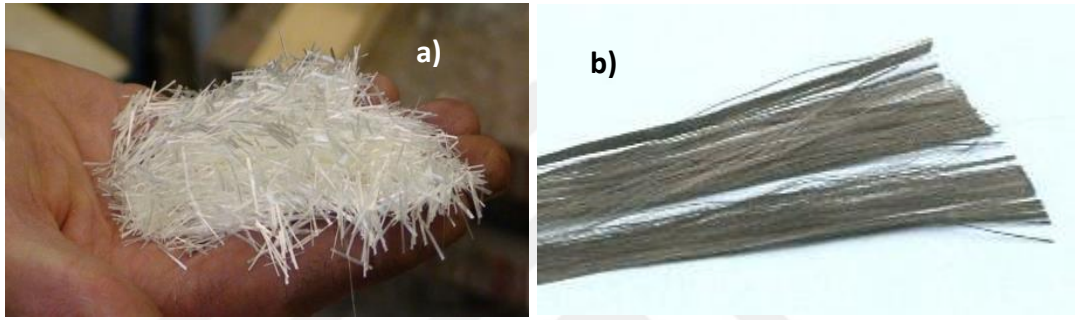
*Tüm sonuçların ortalama değerleri verilmiştir

Kompozitlerde asıl mukavemeti sağlayan takviye malzemesinin görevini tam olarak yerine getirmesi için matris ile uyumlu olmalı ve üretim koşullarına uygun olarak malzemeler birleştirilmelidir (Huang ve Zhao 2012). Ayrıca yükün matristen elyafa iletilebilmesi için fazlar arasında fiziksel ve kimyasal uyumun iyi olması ara yüzey bağının güçlü olması gerekir (Saçak 2005). Tablo ve grafikler incelendiğinde daha iyi özelliklere sahip bazalt, aramit ve karbon elyafın çekme gerilmesi değerinin çok daha yüksek olması gerekirken aksine beklenenden düşük çıkmıştır. Bu matris ile elyafın tam olarak iyi ara yüzey bağı kuramamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca Şekil 4.5’de görüldüğü gibi plakanın bazı bölgelerine matris yığılmaları olmuş, bu malzeme içinde gerilme ve rijitlik düzensizliklerine sebep olmakta ve aynı zamanda kesit üzerindeki dayanım değerini düşürmektedir.



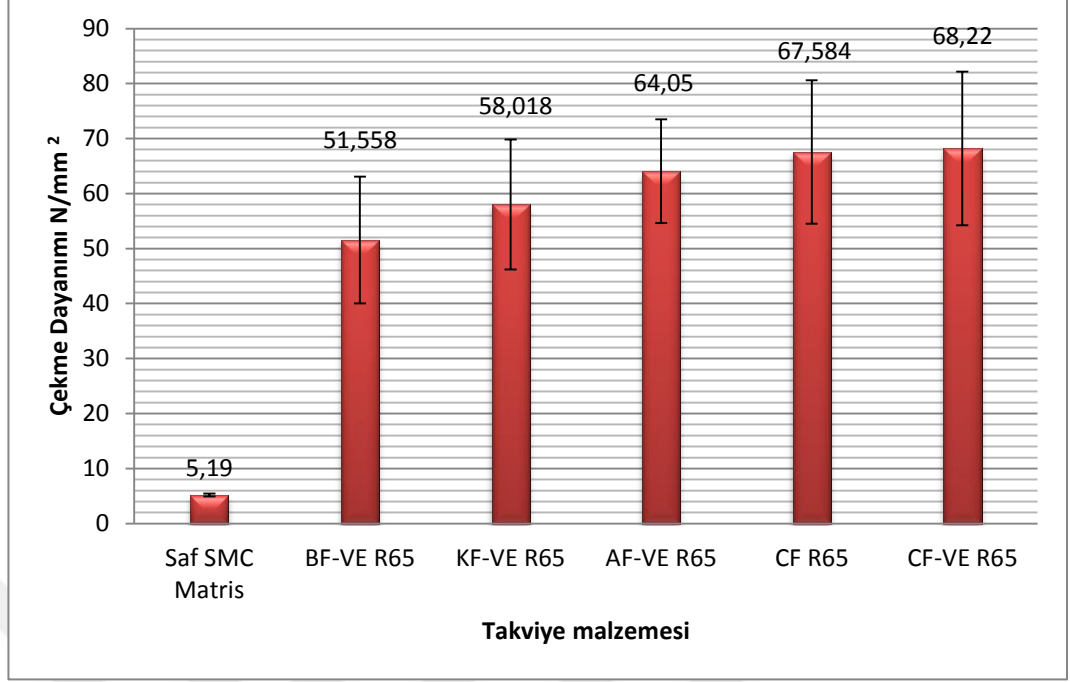
Şekil 4.5. Elyaf matrisin arasındaki zayıf yapışmayı gösteren kesikli rasgele karbon elyaf numune.

Böylece fiziksel ve kimyasal olarak iyi bağlanamayan elyafları bir arada tutan nispeten daha düşük kuvvetlerde kırılan matris daha sonra bu elyafları bir arada tutamamaktadır. Ayrıca aynı ağırlık oranı ile üretilen örneğin Şekil 4.6 a)'da gösterilen cam elyafların çapı nispeten daha kalınken çok yüksek sayıda (örneğin 12000) filamentin bir araya gelerek Şekil 4.6 b)'deki gibi görülen karbon elyafların filament çapı çok daha küçüktür. Bu durum elyaf yüzey alanını çok fazla artıracaktır böylelikle dolgu oranı yüksek SMC reçine ile cam dışındaki diğer elyafları ıslatmakta çok daha zorlaşacaktır. Tüm bu faktörler neticesinde sonuçlar beklenenin aksi yönde çıkmıştır.



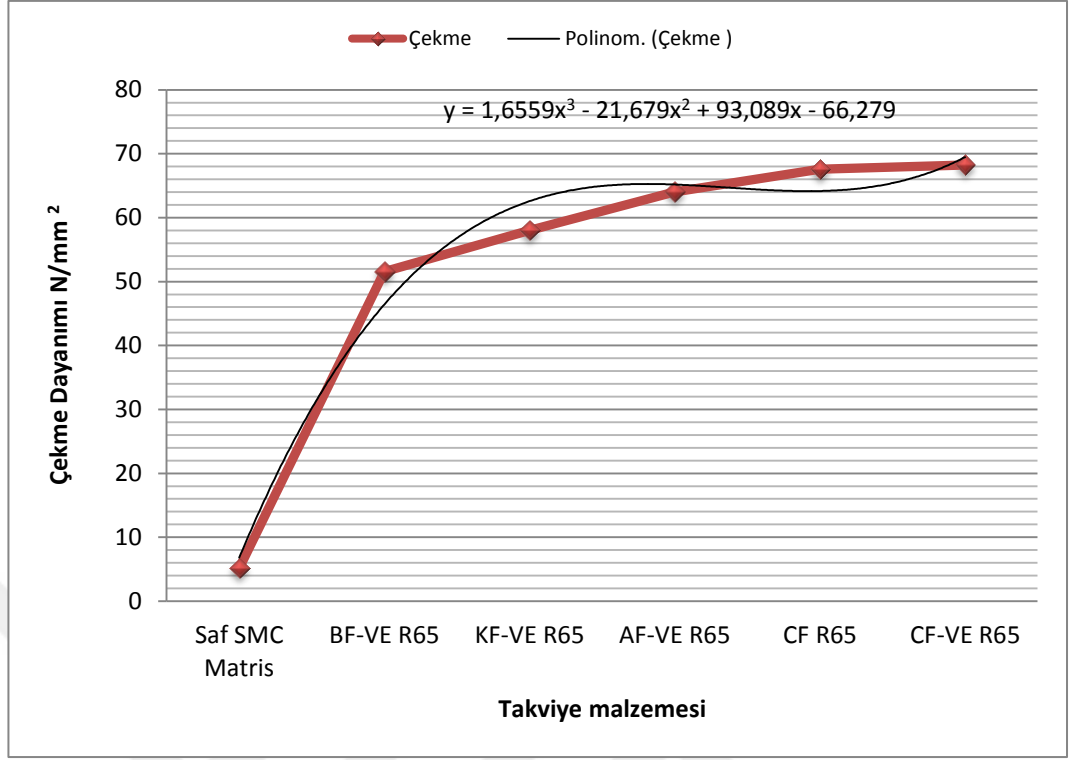
Şekil 4.6. a) Kesikli cam elyaf, b) Karbon elyaf

Elde edilen sonuçlar Şekil 4.7'de verilen sütun grafikte daha iyi görülmektedir. Grafik incelendiğinde en düşük değer bazalt elyaf ile sağlandığı en yüksek değer cam elyaf ile sağlandığı görülmüştür. Oysa elyafların elastisite modül değerlerine ve literatürde yapılan çalışmalara göre en düşük değer cam elyaf en yüksek değer karbon elyaf ile sağlanması tahmin edilmişti. Bu durumun sebepleri yukarıda açıklanmıştır.



Şekil 4.7. Kesikli rasgele ileri elyaf ile üretilen SMC kompozitlerin ortalama çekme gerilmesi değerleri

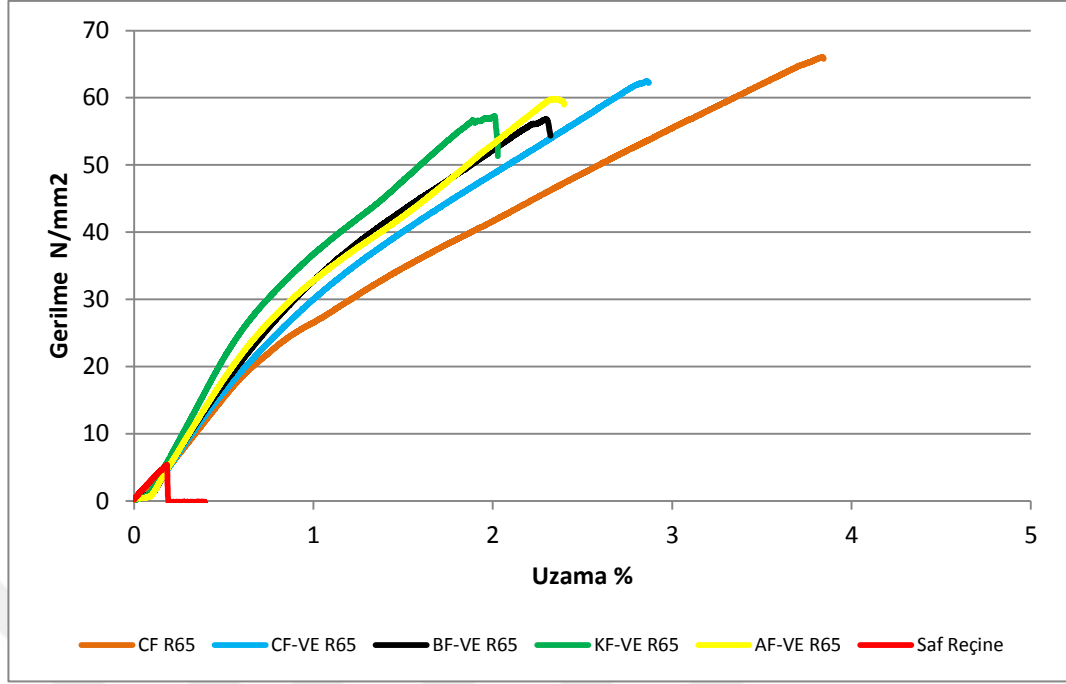
Ayrıca polyester ve vinil ester reçine ile elde edilen 65 mm cam elyafı SMC kompozit numuneleri karşılaştırıldığında sonuçlar neredeyse aynı çıkmıştır. Farklı reçine kullanımının etkisinin çok fazla olmamasında, reçine oranının düşük olması ile malzeme üretiminden kaynaklanan varyasyonların sebep olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.8. Kesikli rasgele ileri elyaf ile üretilen SMC kompozitlerin ortalama çekme gerilmesi sonuçları

Çekme gerilmesi değerleri en küçük değerden en büyüğe doğru sıralandığı için Şekil 4.8’ de verilen grafik sadece elyaflar dikkate alındığında doğrusala yakındır. Bu lineer ilişkinin eğilme gerilmesi değerinde devam edip etmeyeceği sonraki bölümde incelenecektir.

Sonuçların ortalaması alındığında bu ortalamaya yakın numune grubunu temsil eden bir deney sonucunun çekme gerilmesi-birim deformasyon grafiği seçilerek bu eğrilerin bir arada çizildiği grafik ise Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9. Kesikli rasgele ileri elyaf lar ile üretilen SMC kompozitlerin çekme gerilmesi-birim deformasyon eğrileri

Şekil 4.9'da verilen grafik incelenirse bütün numunelerin pek fazla plastik deformasyon olmadan gevrek bir şekilde kırıldığı görülmektedir.

4.1.2. Kesikli (kırılmış) rasgele elyaf dağılımlı SMC kompozitlerin eğilme deney sonuçları

Her koşulda kullanılabilen mühendislik malzemeleri farklı kuvvetlere maruz kalabilmektedir. Bu kuvvetler beraberinde farklı gerilmeleri ortaya çıkaracaktır. Bu sebeple parçaların eğilme gerilmelerinin de incelenmesi gerekmektedir. SMC kompozit plakalardan elmas testere ile çekme deney numunesi elde edilirken aynı plakadan eğilme deney numunesi de elde edilip teste tabi tutulduktan sonra sonuçlar Çizelge 4.4.'de ve Şekil 4.10'da verilmiştir.

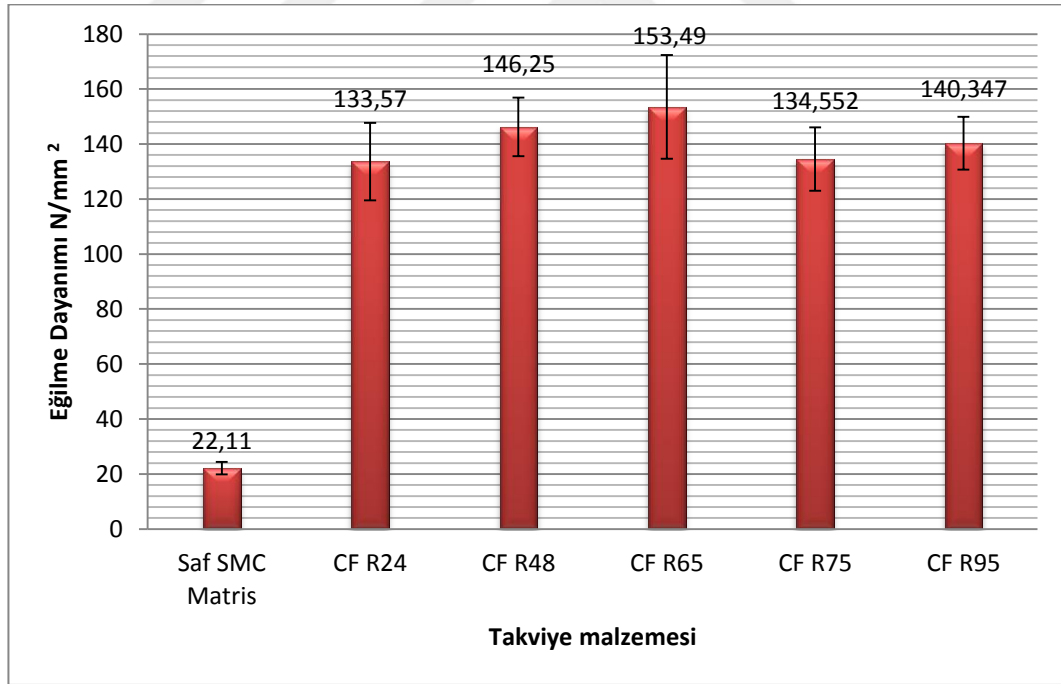
Kesikli elyaf lı SMC kompozit malzemelerin çekme deney numunelerinden elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar eğilme numunelerinde de elde edilmiştir. Elyaf boyu belli bir değere ulaşana kadar malzemenin mukavemeti artmakta daha sonra azalmaktadır.

Çizelge 4.4. Kesikli rasgele cam elyaflı SMC numunelerin eğilme deneyi sonuçları

Malzeme*	Eğilme gerilmesi N/mm ² (MPa)	Standart Sapma
Saf SMC reçine	22,11	2,27
CF R24	133,57	14,08
CF R48	146,25	10,62
CF R65	153,49	18,89
CF R75	134,552	11,54
CF R95	140,347	9,61

*Tüm sonuçların ortalama değerleri verilmiştir

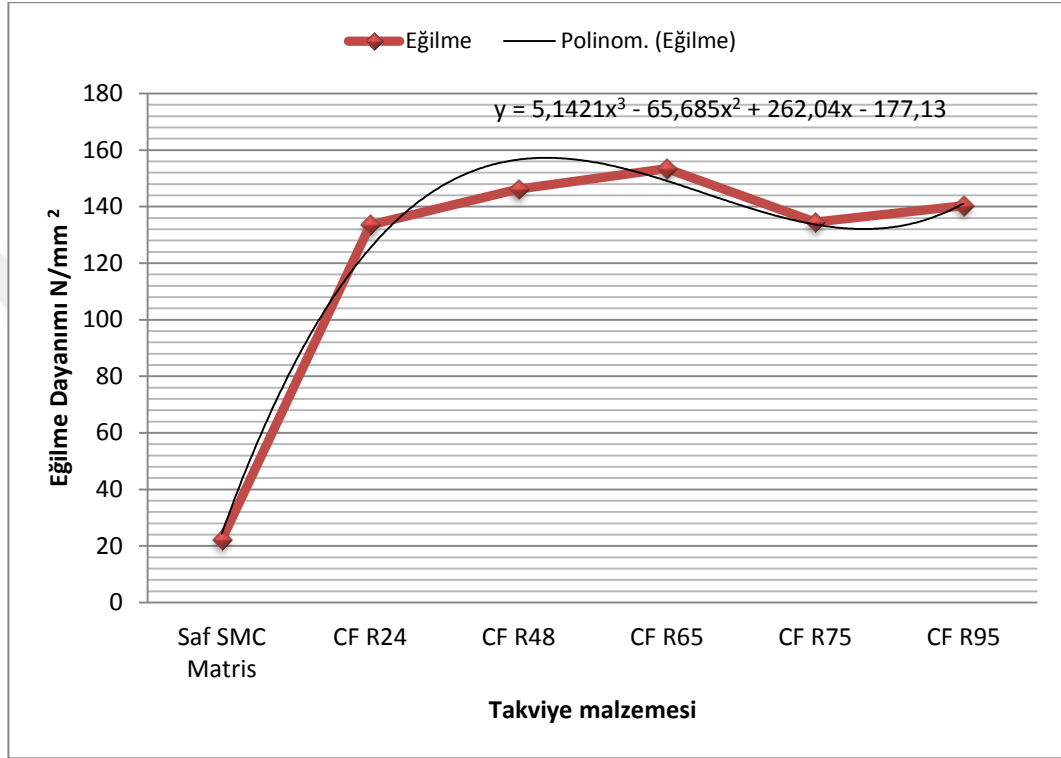
Şekil 4.11 ve Çizelge 4.4 incelenirse kesikli cam elyaflı SMC kompozitin eğilme gerilmesi değeri 65 mm uzunluğa kadar artmış 75 mm uzunlukta yaklaşık olarak %12 azalma olmuştur



Şekil 4.10. Kesikli rasgele cam elyaflı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları

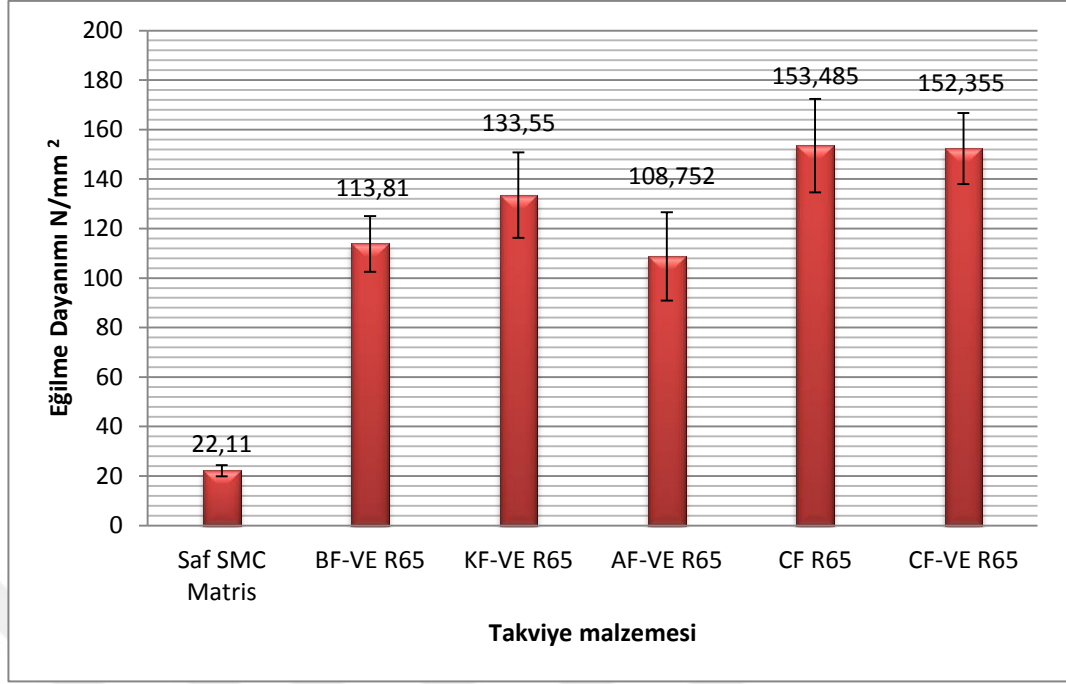
Test cihazında eğilme numunelerine üstten kuvvet uygulanmaya başladığında numunenin alt kesimi çekme gerilmesine maruzken kuvvetin uygulandığı üst kesiminde

basma gerilmesi oluşmaktadır. Böylelikle numunenin alt kısmında elyaflar çekmeye zorlanırken üst kısmındaki elyaflar ezilmeye zorlanmaktadır. Yük arttıkça alt kısmında matris çatlakları oluşmaya başlamakta, matris ve elyaf ara yüzeyi sağlam olmayan elyaflar sıyrılmaya, sağlam olanlar ise kopana kadar deformasyon devam etmekte en sonunda malzeme hasara uğramaktadır.



Şekil 4.11. Kesikli rasgele cam elyaflı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları

İleri elyaf takviyeli SMC kompozitlerin sonuçları incelendiğinde çekme gerilmesine benzer bir eğilim (aramit elyaf hariç) eğilme gerilmesi değerlerinde de görülmektedir (Şekil 4.12 Çizelge 4.5). Yukarıda bahsedildiği gibi ileri takviye malzemeleri ile üretilen SMC kompozitlerin eğilme dayanımları beklenenin aksine düşük çıkmıştır. Matris-elyaf ara yüzeyinin iyi olmaması, matrisin elyafı iyi ıslatamaması, elyaflar arasında reçine havuzlarının oluşması, boşluk ve kusurlarının eğilme yükü altında olan kompozitlerde de dayanımın düşük çıkmasının nedenleri olarak düşünülmektedir.



Şekil 4.12. Kesikli rasgele ileri elyafalı SMC numunelerin eğilme deneyi sonuçları

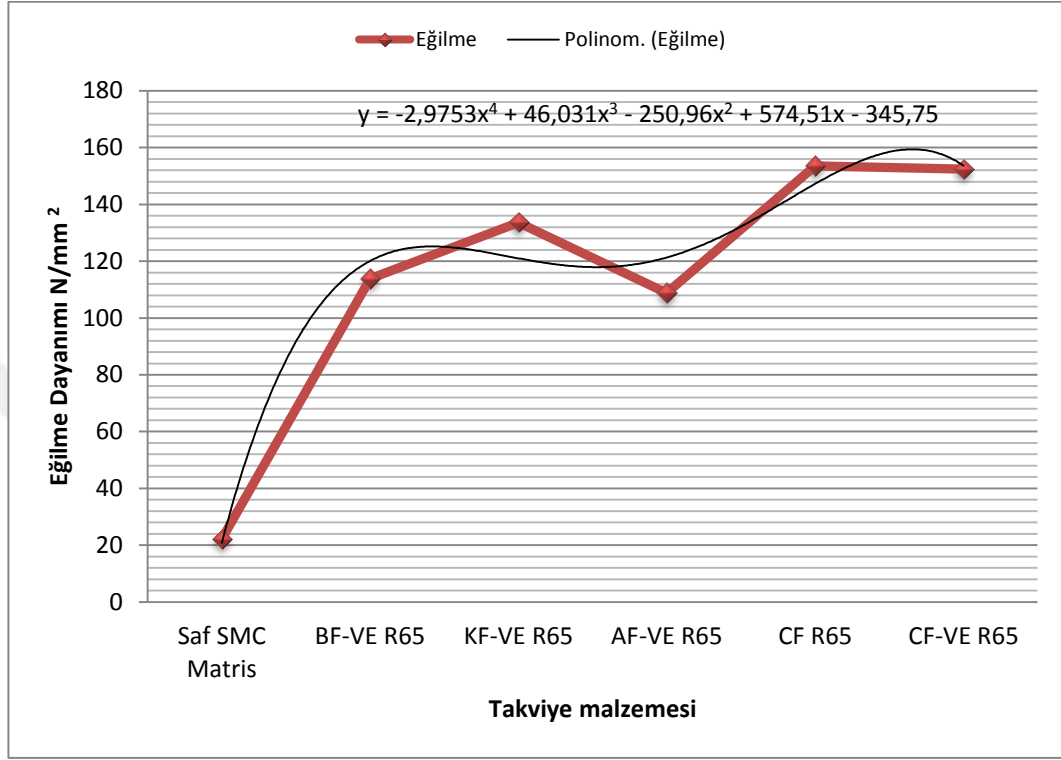
Aramit elyafın çekme dayanımının normalde çok yüksek olmasına rağmen aramit elyafalı SMC kompozitlerin mekanik özelliklerinin düşük çıkmasının bir diğer nedeninin elyaf üzerindeki kaplamanın reçineye uygun olmaması böylelikle reçine ile iyi arayüz dayanımı sağlamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.5. Kesikli rasgele ileri elyaf ile üretilen SMC kompozitlerin eğilme gerilmesi sonuçları

Malzeme*	Eğilme gerilmesi N/mm ² (MPa)	Standart Sapma
Saf SMC reçine	22,11	2,27
BF-VE R65	113,81	11,26
KF-VE R65	133,55	17,25
CF R65	153,485	17,85
CF-VE R65	152,355	18,89
AF-VE R65	108,752	14,33

*Tüm sonuçların ortalama değerleri verilmiştir

Çekme dayanımı değerleri daha lineer bir ilişkiye sahipken eğilme dayanım değerleri aramit elyafın değerlerinin küçük çıkmasından dolayı daha non-lineer olmuştur (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Kesikli rasgele ileri elyaf ile üretilen SMC kompozitlerin ortalama eğilme gerilmesi sonuçları

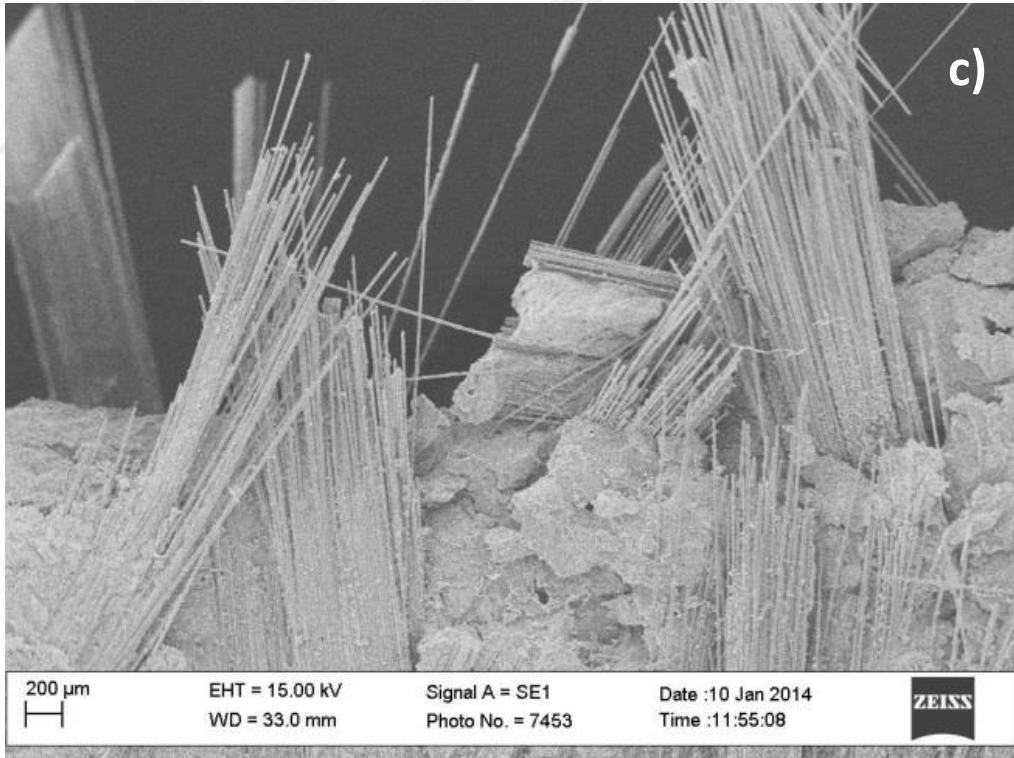
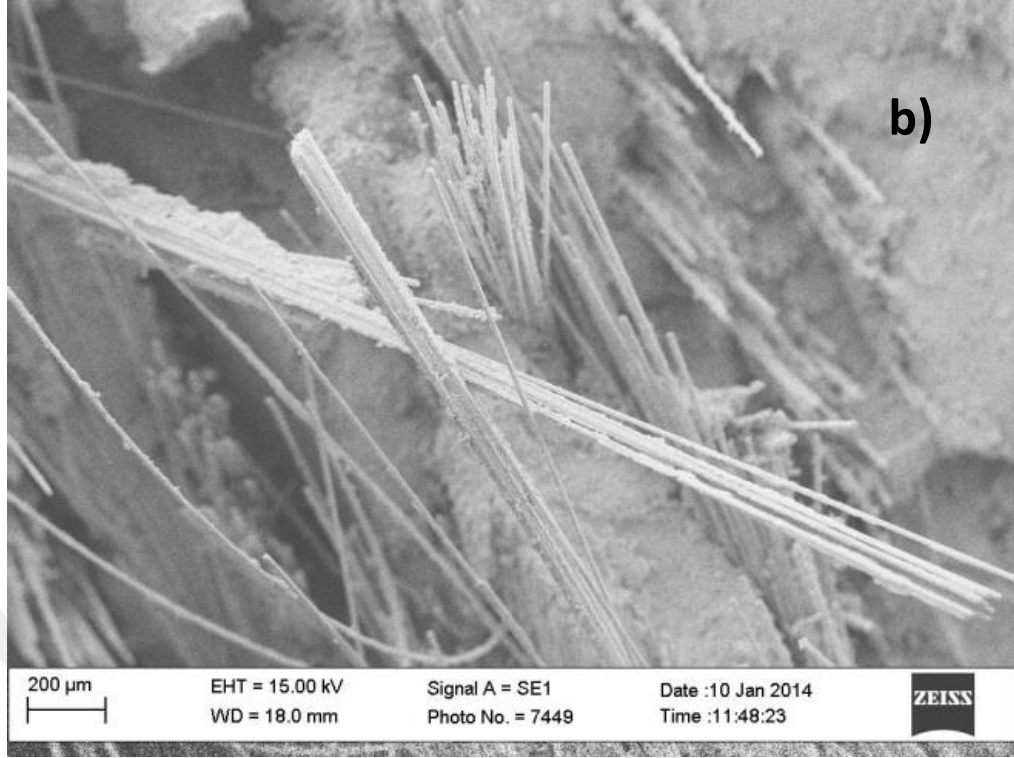
4.1.3. Kesikli (kırılmış) rasgele elyaf dağılımlı SMC kompozitlerin yüzey karakterizasyonu

Kompozit malzemelerde hasar mekanizması genellikle üç aşamada gerçekleşmektedir, ilk aşamada matriste mikro çatlaklar oluşmakta daha sonra elyaf ile matris arasında ara yüzeyde ayrılma ve elyafların kırılması ile hasar oluşmaktadır (Fitoussi ve ark. 2013, Fitoussi ve ark. 2005, Huang ve Zhao 2012, Ochola ve ark. 2004). Bu mekanizma bazı yayınlarda kırılma mekaniği ile açıklanmaya çalışılmıştır (Ogi ve Yamanouchi 2011).

Kompozit malzemeler heterojen ve anizotrop malzemelerdir. Fakat kompozit malzemelerin çekme ve eğilme gibi mekanik karakterizasyon deneyleri makro-mekanik analiz kapsamında ele alınır. Makro-mekanik analizde kompozit malzeme homojen ve

izotrop olarak kabul edilerek ve mekanik karakterizasyon yapılır. Kesikli rasgele elyaf (65 mm uzunluğunda) dağılımlı SMC kompozit malzemenin dik yönde kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 4.14' de verilmiştir. Elyafların makro ölçekte rasgele ve homojen olarak malzeme içinde dağıldığı düşünülse de Şekil 4.14 a) incelendiğinde bu durumun mikro ölçekte heterojen ve anizotrop olduğu görülür. Parçanın kırık yüzeyi incelendiğinde malzeme içerisinde kimi bölgelerde elyaf yığılmaları olurken kimi bölgelerde sadece matris malzeme bulunmaktadır. Elyafların yığılmaları matrisin elyafı iyi ıslatamamasından dolayı pek istenen bir durum değildir. Ayrıca SMC kompozit malzeme hazırlanırken dolgu maddesi reçine ile homojen bir şekilde karıştırıldığı için plakalar üretildikten sonra malzeme iç yapısında bu dolgu maddesinin homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir.





Şekil 4.14. Rasgele kesikli 65 mm uzunluğundaki cam elyafla (CF-R65) üretilen SMC malzemenin belli oranlarda büyütülmüş SEM görüntüleri

Bunların dışında matris ile elyafın birbiri ile olan ilişkisine bakılırsa Şekil 4.14 a)'da elyafların bir kısmı zayıf ara yüzey bağından dolayı sıyrılıp çıkarken (pull-out) çıkarken, bir kısmı ise güçlü ara yüzey bağından dolayı koparak ayrılmıştır. Ayrıca matris içerisinde mikro boşluklar gözlemlenmiştir. Diğer taraftan Şekil 4.14 b)'de numunenin içyapısında elyafların farklı yönlerde rasgele dağılımı görülmektedir. Son olarak Şekil 4.14 c)'de enine yönde kırık yüzeyde görülen elyaflar üzerinde matris parçacıklarının oluşu hem elyaf-matris arasındaki ara yüzey bağının o bölgede iyi oluşuna hem de malzemenin hasar uğramadan önce az da olsa plastik deformasyona uğradığını göstermektedir. Genel olarak şekiller yorumlanırsa elyafların sadece bir kısmı kuvvet yönündedir yani kuvvet taşıyan elyaflar daha az miktardadır ve yük etkisinde elyafların bir kısmı sıyrılıp bir kısmı kopmuştur. Bunların dışında yukarıda bahsedilen diğer içyapı kusurlarından dolayı ileride anlatılacak olan sürekli ve dokuma elyaflara göre daha düşük mekanik özellikler ortaya çıkmaktadır.

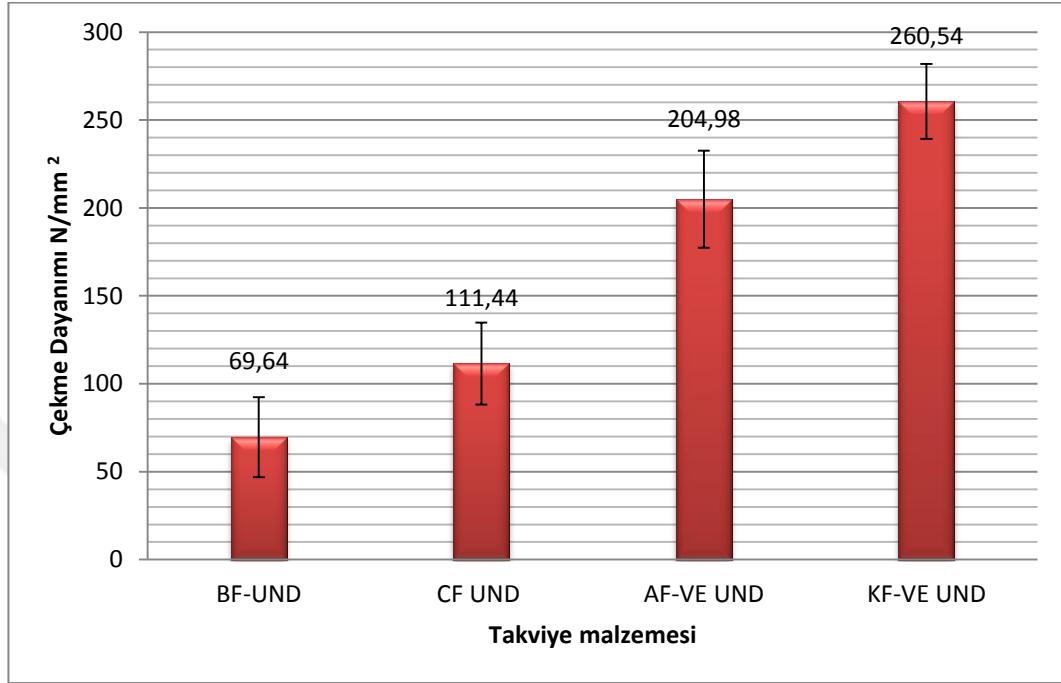
4.2. Sürekli Elyaf Takviyeli SMC Kompozitler

4.2.1. Sürekli elyaf takviyeli SMC kompozitlerin çekme deney sonuçları

Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden biriside elyafların matris içerisinde oryantasyonudur. Dünyada üretilen kompozitlerin tamamına yakını kesikli elyaflarla üretilmektedir. Kesikli elyaflar hem üretim koşullarına daha uygundur hem de malzemeye rasgele dağıldığı için farklı yönden gelen kuvvetlere de yaklaşık aynı tepkiyi verebilmektedir. Yani izotrop malzemelere yakın davranabilmektedir. Üretilen kompozit malzemenin çalışma koşulları belli ise ve tek yönlü kuvvetlere maruzsa elyaflar tek yönlü yönlendirilerek mekanik özelliklerinde muazzam bir artış sağlanabilir. Bu amaçla sürekli elyaf takviyeli kompozitler kullanılır.

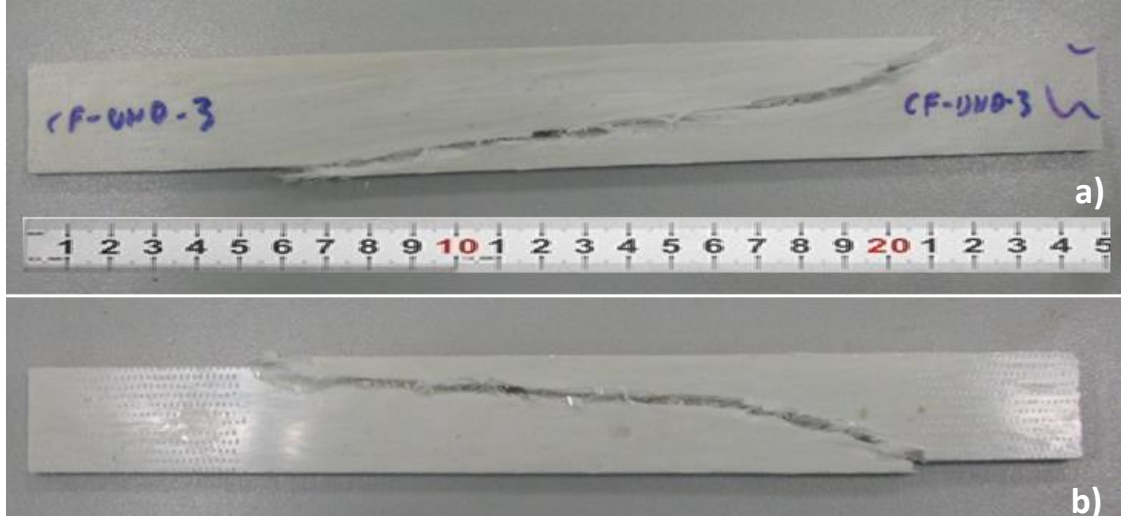
Basınçlı kalıplama yöntemlerinde sürekli elyafla üretim yapmak, basınç esnasında elyafların kontrolünün iyi sağlanamamasından dolayı pek mümkün değildir. Deneysel olarak küçük plakalarla çalışıldığı için sürekli elyaflar ile SMC kompozitler elde edilmiştir. Elmas testere ile standartlara uygun olarak kesilen bu plakalardan elde edilen

numuneler çekme deneyi testine tabi tutularak sonuçlar aşağıdaki Çizelge 4.6 ve Şekil 4.15’de verilmiştir.



Şekil 4.15. Sürekli elyaf takviyeli SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları

Sürekli bazalt ve cam elyaf takviyeli SMC kompozitlerde reçine malzemesi olarak polyeester reçine kullanılırken aramit ve karbon elyaf takviyeli kompozitler için vinil ester reçine kullanılmıştır. Kullanılan reçinelerin farklı olmasının sebebi elyafların üzerindeki kaplamaların (sizing) reçineye uyumluluğunu sağlamaktır. Daha önce rasgele kesikli elyafla 65 mm uzunluğunda cam elyaf kullanılarak aynı elyaf oranı ve formülasyonla elde edilen SMC kompozitler karşılaştırıldığında farklı reçine (polyester ve vinil ester için) kullanımının etkisinin pek fazla olmadığı bulunmuştu (bkz. bölüm 4.1.1). Bu durumun reçine oranının düşük olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Böylelikle polyeester reçine ile üretilen sürekli cam, bazalt elyaflı SMC kompozit ile vinil ester reçine ile üretilen sürekli aramit, karbon elyaflı SMC kompozitlerin karşılaştırılması aynı grafik üzerinde yapılmıştır.



Şekil 4.16. Sürekli cam elyaf SMC kompozitin hasara uğramış çekme deney numunesi a) ön ve b) arka görünümü

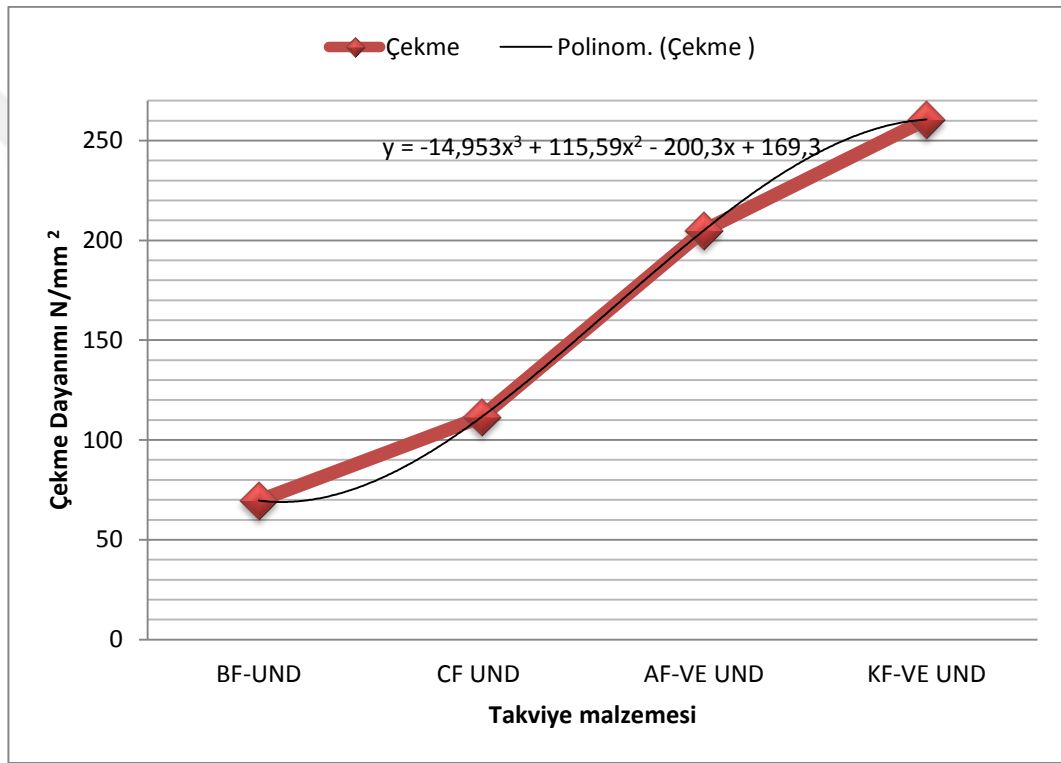
Benzer kırılma davranışları gösterdikleri için Şekil 4.16'da sadece sürekli cam elyaf SMC kompozitin kırılan numune resimleri verilmiştir. SMC malzeme basınç etkisi altında şekillendiği için elyafları yüzde yüz kontrol etmek mümkün değildir. Normalde elyaflar (pestil içerisinde elyaflar daha önce yönlendirilmiştir) kalıp kenarına 0° paralel olacak şekilde kalıba yerleştirilmesine rağmen Şekil 4.16 a) incelenirse basınç etkisi ile elyafların açılarında kayma olmuştur. Elyafın açılarının değişmesinden dolayı normal gerilmenin yanında kayma gerilmelerinin de etkisi ile çok eksenli gerilmeye maruz kalan matriste kayma gerilmesi çatlakları da oluşmuştur. Matris çatlağı elyaf doğrultusunda boyuna ilerleyerek malzeme hasara uğramıştır.

Çizelge 4.6. Sürekli elyaf takviyeli SMC numunelerin çekme deneyi sonuçları

Malzeme*	Çekme gerilmesi N/mm ² (MPa)	Standart Sapma	Uzama %
BF-UND	69,64	22,71	3,68
CF UND	111,44	23,28	3,94
AF-VE UND	204,98	27,65	5,31
KF-VE UND	260,54	21,33	6,01

*Tüm sonuçların ortalama değerleri verilmiştir

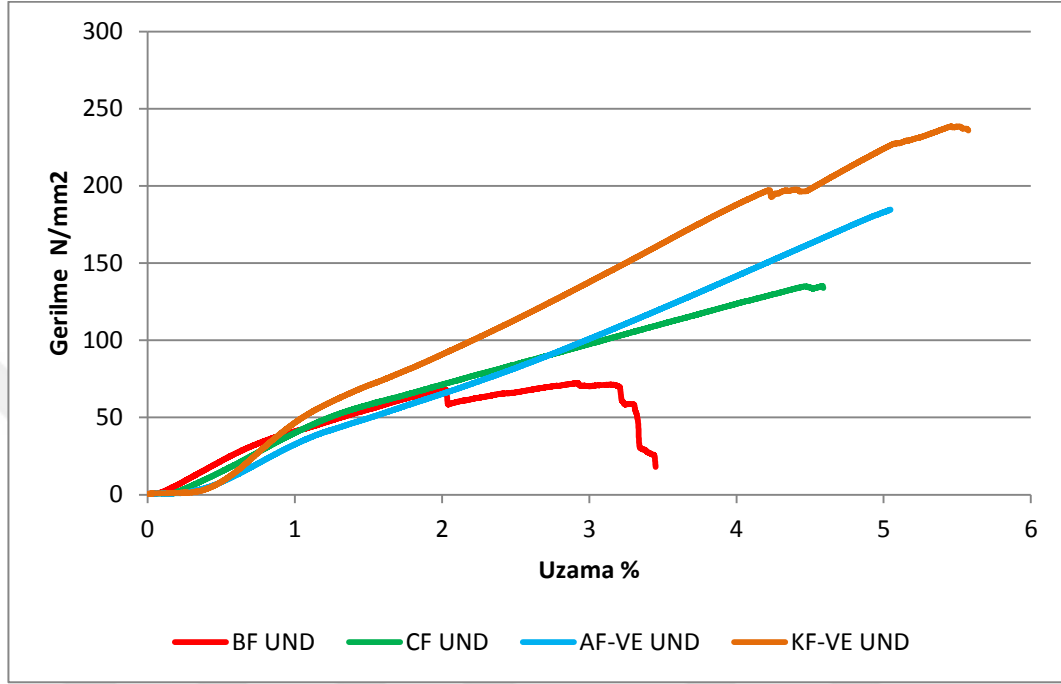
İleri elyafların sürekli elyaf olarak kullanılarak hazırlanan SMC kompozitlerin çekme dayanımı sonuçları incelendiğinde cam, karbon ve aramit elyaf çekme dayanımlarına göre beklenen sonuçlar verirken bazalt elyaf şaşırtıcı bir şekilde cam elyaftan daha düşük çıkmıştır. Bu durumun elyaf ile matrisin iyi ara yüzey bağı kuramamasından (yetersiz ıslanma vs.) ve üretim esnasında oluşan problemlerden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ayrıca çekme deney sonuçlarının değerlerine göre sıralanması sonucu çizilen Şekil 4.17'deki grafikteki lineerliğin eğilme gerilmesinde devam edip etmeyeceği sonraki bölümde tartışılacaktır.



Şekil 4.17. Sürekli elyaf takviyeli SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları

Numunelerin ortalama değerlerini gösteren Şekil 4.16. incelendiğinde 69,64 MPa ile bazalt elyaf en düşük değerde çıkarken 260,54 değer ile karbon elyaf en yüksek değerde çıkmıştır. Aynı üretim koşulları ve formülasyon kullanılmasına rağmen farklı elyafın kullanımı ile çekme dayanımı yaklaşık %376 artmıştır. Normalde epoksi reçine ve basınçsız kompozit üretim yöntemleri ile elde edilen karbon elyaf takviyeli kompozitlerin çekme dayanım özellikleri literatürde daha yüksek verilmiştir. SMC yöntemi ile üretilen karbon elyaf takviyeli kompozitlerde hem daha ucuz olan vinil ester

reçine hem de dolgu maddesi kullanılarak daha ucuz malzemelerin elde edileceği düşünülmektedir. Ayrıca özellikle otomotiv sektöründe hayati önemi olan kısa çevrim süresi ile çok daha kısa sürede parçalar üretilebilmektedir.



Şekil 4.18. Sürekli elyaf takviyeli SMC numunelerin çekme gerilmesi-birim deformasyon eğrileri

Bu numunelerin ortalama değerlerine yakın bir numunenin çekme gerilmesi-birim deformasyon eğrileri seçilerek Şekil 4.18’de gösterilen grafik çizilmiştir. Sürekli elyaf kompozitlerin Şekil 4.18’de verilen çekme gerilmesi-birim deformasyon grafiği incelendiğinde numunelerin daha sünek bir davranış gösterdiği görülmektedir. Rasgele kesikli elyaf ile yapılan kompozitlerde %2-3 civarında malzeme hasara uğrarken grafikte görüldüğü gibi karbon elyafın kopma uzaması %5’ i geçmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde bazalt elyaf hem elastisite modülü ve birim deformasyonu hem de tokluğu en düşük elyaftır. Buradan sürekli bazalt elyafın kompoziti yumuşak ve zayıf bir malzeme yaptığı söylenebilir. Karbon elyaf ise hem elastisite modülü ve birim deformasyon hem de tokluğu en yüksek elyaftır. Sürekli karbon elyafı SMC kompozitin en sert ve dayanıklı kompozit olduğu söylenebilir.

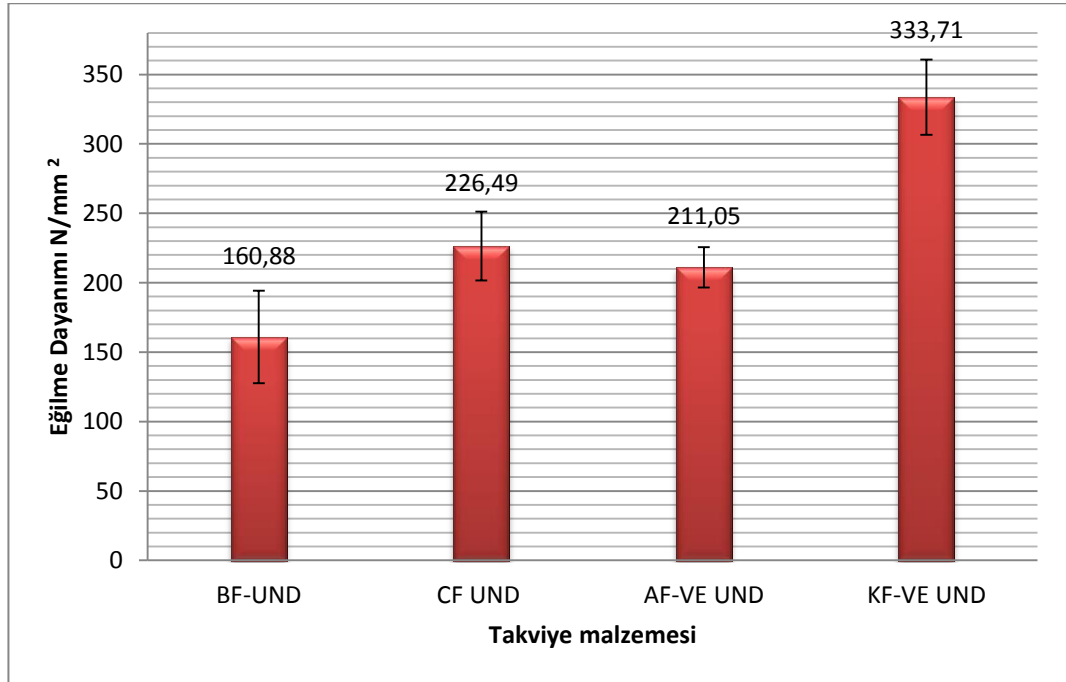
4.2.2. Sürekli elyaf takviyeli SMC kompozitlerin eğilme deney sonuçları

Sürekli elyaf takviyeli SMC kompozitlerin eğilme deney sonuçları Çizelge 4.7 ve Şekil 4.19'da verilmiştir. Grafik ve çizelge incelenirse bazalt ile cam elyaf arasındaki çekme gerilmesi dayanım değerlerine benzer bir eğilim vardır. Fakat aramit ve karbon elyafın çekme gerilmesi daha düşük çıkmıştır. Bu Aramit elyafın yüzeyindeki kaplama ile matris uyumsuzluğu sonucu ara yüzey bağının zayıf kalmış olabileceği düşünülmektedir.

Çizelge 4.7. Sürekli elyaf takviyeli SMC numunelerin eğilme deneyi sonuçları

Malzeme*	Eğilme gerilmesi N/mm ² (MPa)	Standart Sapma
BF-UND	160,88	33,28
CF UND	226,49	24,83
AF-VE UND	211,05	14,51
KF-VE UND	333,71	27,07

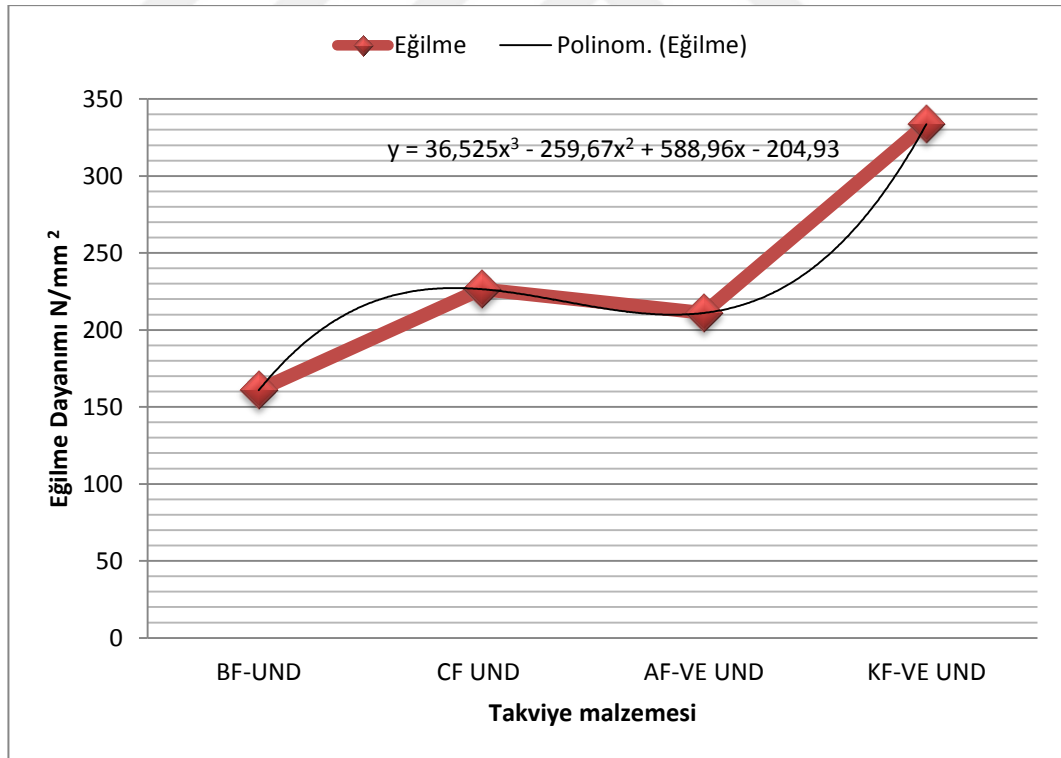
*Tüm sonuçların ortalama değerleri verilmiştir



Şekil 4.19. Sürekli elyaf takviyeli SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları

Ayrıca karbon ve aramit elyafıta filament sayısının fazla olmasından dolayı her iki elyafı matris yeterince ıslatamamış olabilir. Bunların dışında önceki bölümlerde (bkz. bölüm 4.1.1) bahsedilen diğer sebeplerden dolayı iki elyaf da beklenenden daha düşük gerilme altında hasara uğramıştır.

Sürekli ileri elyafı SMC kompozit malzemelerin çekme dayanımına göre sıralanan eğrilerdeki eğilim eğilme gerilmesinde Şekil 4.20’de görüldüğü gibi daha farklı çıkmıştır. Bazalt ve cam elyafı kompozitlerin eğilimi birbirine yakınken aramit elyafın daha düşük çıkması ile bu eğilim değişmiştir. Bunların haricinde yine en düşük değer sürekli bazalt elyafı kompozitle elde edilirken en yüksek değer sürekli karbon elyafı SMC kompozit ile elde edilmiştir. Yalnız iki kompozit arasında çekme gerilmesi değerinden daha düşük (%108) bir fark vardır. Bu fark sürekli karbon elyafı SMC kompozitin eğilme gerilmesi değerinin beklenenden daha düşük çıkmasından kaynaklanmaktadır.

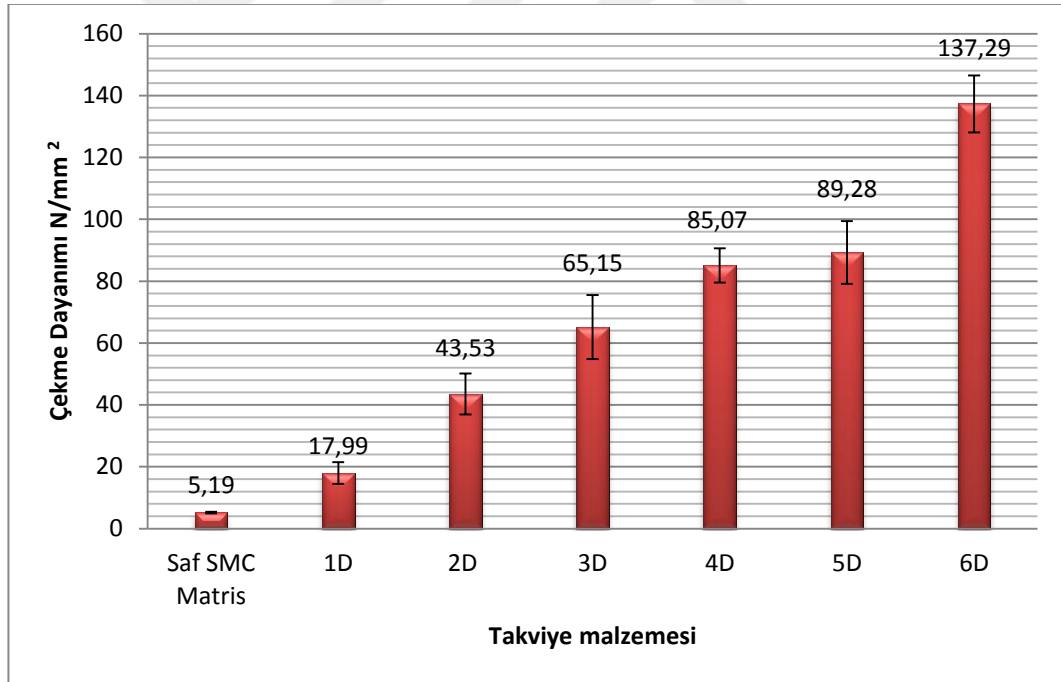


Şekil 4.20. Sürekli elyaf takviyeli SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları

4.3. Dokuma Elyaf Takviyeli SMC Kompozitler

4.3.1. Dokuma elyaf takviyeli SMC kompozitlerin çekme deney sonuçları

Kompozit malzemelerin kullanımındaki en önemli engellerden biri izotrop malzeme özellikleri göstermemesidir. Kuvvet tek taraftan etkiyorsa tek yönlü sürekli elyafların kullanımı uygun olabilir. Fakat gerçek tasarımlarda genelde malzeme farklı yönlerde kuvvetlere maruz kalmaktadır. Kompozit malzemenin farklı yönlerde mukavemetini artırmak için elyaf dokumalar kullanılmaktadır. Dayanımı artıran bir diğer önemli özellik ise elyaf oranını artırmaktır. Bu sebeple de birden fazla dokuma kat üst üste yerleştirilir. Bu bölümde; farklı sayıda cam elyaf dokuma katları ve farklı tipteki (cam, bazalt, karbon, aramit) dokuma elyaflarla SMC kompozitler üretilmiş daha sonra bu elyafların, parçanın mekanik özelliklerine olan etkisi incelenmiştir.



Şekil 4.21. Farklı katlardaki dokuma cam elyaflı SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları

Öncelikli olarak 1 kattan 6 kata kadar cam elyaf dokuma kullanılarak üretilen SMC kompozitlerin çekme deneyi sonuçları elde edilerek Şekil 4.21 ve Çizelge 4.8'de verilmiştir. Çizelge ve grafik incelendiğinde dokuma kat sayısı ile dolayısıyla elyaf

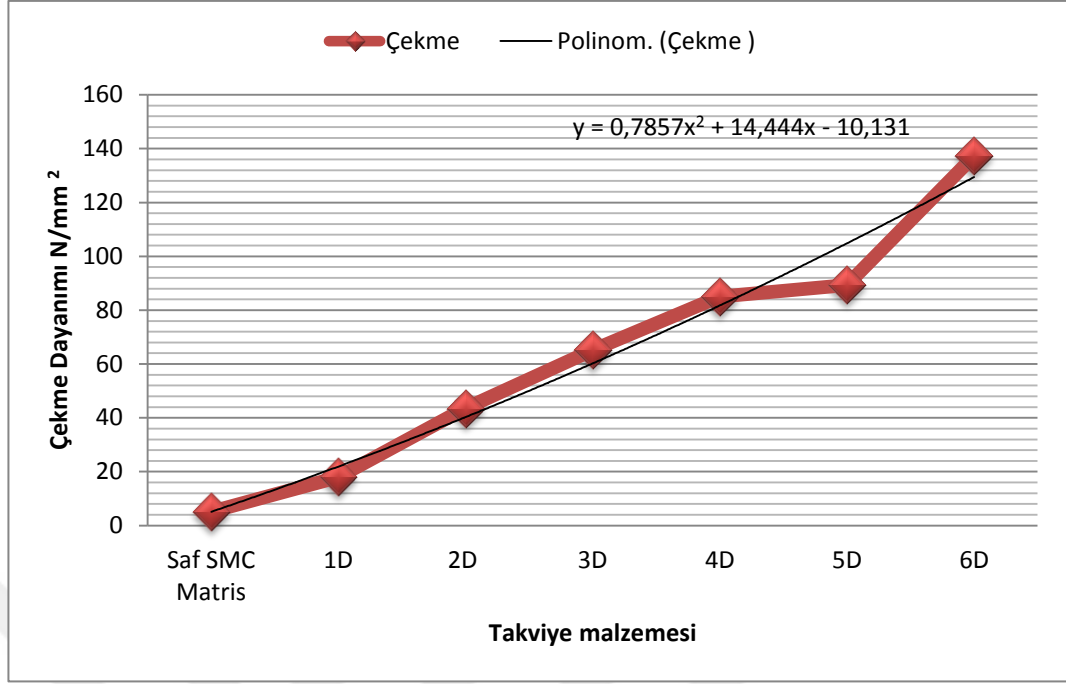
oranı arttıkça mekanik özellikler iyileşmiştir (Cabrera-Ríos ve Castro 2006). Bu konuda yapılan çok fazla literatür çalışmaları bu durumu desteklemektedir. Elyaf oranı artışı malzemenin elastisite modülünü ve birim deformasyonunu artırmıştır. Normalde kompozitlerde elastisite modülü arttıkça malzeme daha gevrek olmakta ve birim deformasyon değeri düşmektedir. Birim deformasyonun artması demek aynı zamanda kompozitin tokluk değerinin de artması demektir ki bu da mühendislik tasarımlarında en çok istenen durumdur. Sonuç olarak SMC kompozit malzeme daha sert ve dayanıklı hale gelmiştir.

Çizelge 4.8. Farklı katlardaki dokuma cam elyafli SMC numunelerin çekme deneyi sonuçları

Malzeme*	Çekme gerilmesi N/mm ² (MPa)	Standart Sapma	Uzama %
Saf SMC reçine	5,19	0,28	-
1 D	17,99	3,54	-
2 D	43,53	6,66	2,70
3 D	65,15	10,33	3,46
4 D	85,07	5,52	3,60
5 D	89,28	10,14	3,91
6 D	137,29	9,25	4,44

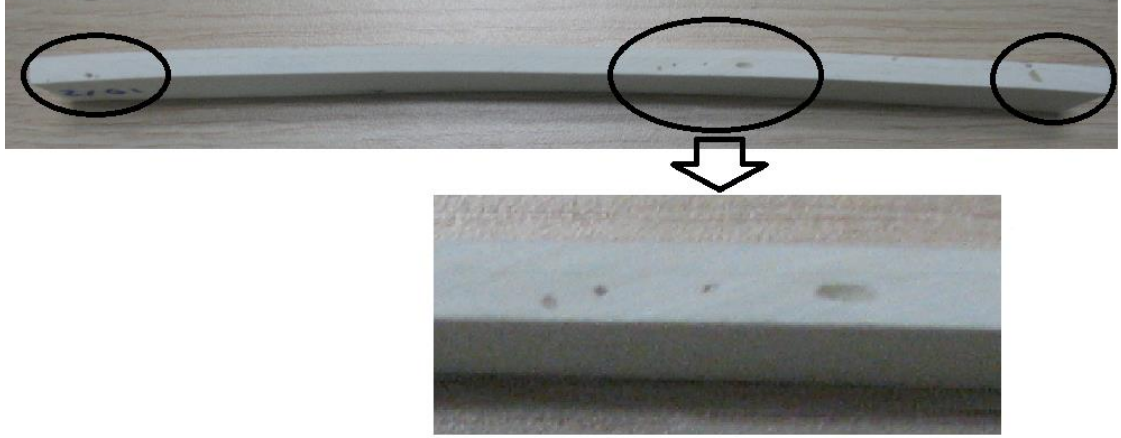
*Tüm sonuçların ortalama değerleri verilmiştir

Şekil 4.22. incelendiğinde elyaf oranı ile kompozitin çekme dayanımının lineer bir şekilde arttığı daha açık görülmektedir. Çizelge 4.8'deki sonuçlar incelendiğinde tek katlı dokuma ile altı kat dokuma arasında %700 fark gözükmemektedir. Tek kat dokuma ile elde edilen kompozitin çekme dayanımının çok düşük çıkmasının tek sebebi elyaf oranı değildir.



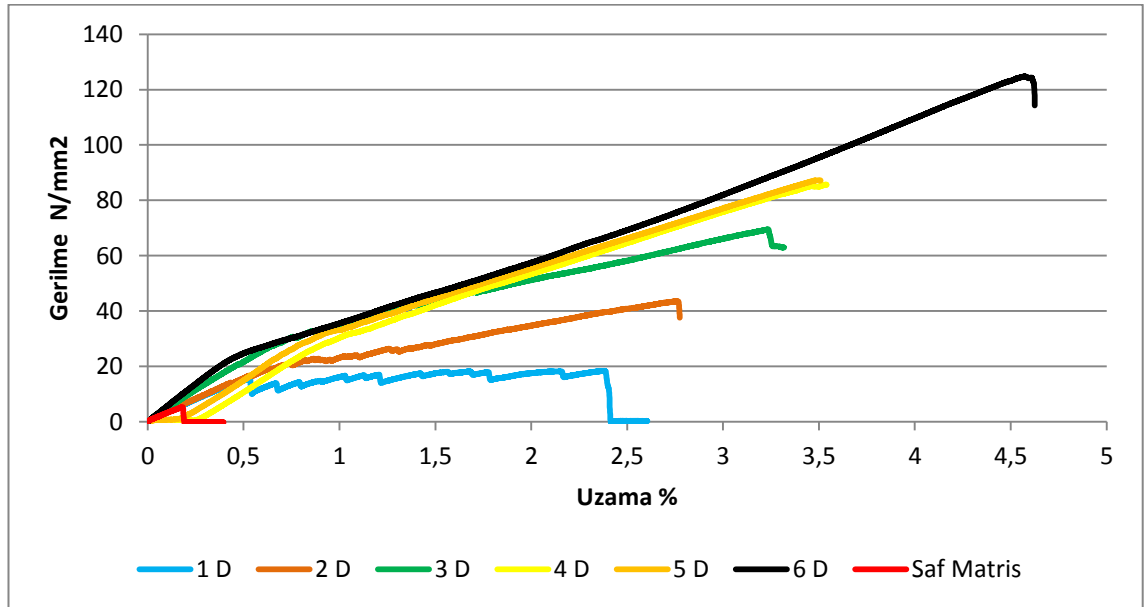
Şekil 4.22. Farklı katlardaki dokuma cam elyafı SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları

Basınçlı bir kalıplama yöntemi olan SMC’de malzeme içerisinde yeterli miktarda elyaf yoksa, kalıp kapanması esnasında reçine kalıp boşluklarından taşarak kalıp içerisinde yeterli miktarda malzeme kalmamaktadır. Bu durum ise Şekil 4.23’de görüldüğü gibi malzeme içerisinde boşluklara yani poroziteye neden olmaktadır. Böylelikle mekanik özellikleri azaltmaktadır. SMC kompozit malzemelerin mukavemetini etkileyen en önemli unsurlardan birisi içindeki boşluk yapısının fazla olmasıdır (Merle ve ark. (1998), Feuillade ve ark. (2006), Le ve ark (2008), Guiraud ve ark. (2012)). Bu boşluklar malzeme üzerinde matris çatlaklarına sebep olarak küçük gerilme etkilerinde malzemenin hasara uğramasına neden olur. Elyaf oranı düşük ve ara yüzey bağları zayıf olan numuneler de çok düşük kuvvetlerde belli bir yerinden kırılma eğilimindedirler.



Şekil 4.23. Elyaf oranı düşük olan 2 kat cam dokumalı SMC plakada oluşan porozite

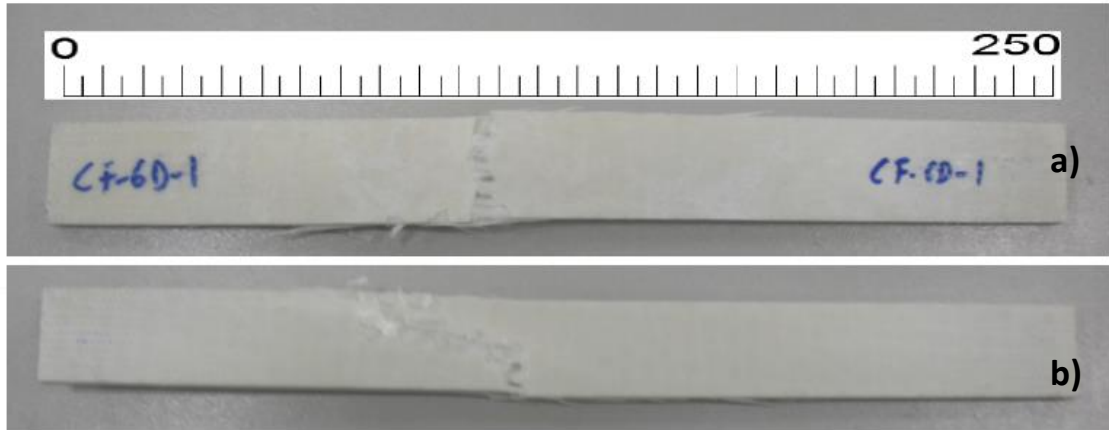
Üretilen plakalar içerisinde elyafar ağırlıkça yüzde olarak eklenmektedir. Bu bakımdan altı kat dokuma tartıldığında yaklaşık olarak daha önce yapılan kesikli rasgele SMC kompozitlerin içerisinde katılan elyafarın ağırlığı (%20) kadardır. Sonuçlar incelendiğinde ağırlıkça aynı oranda altı kat dokuma elyaf kullanıldığında kesikli cam elyafı SMC parçalara göre çekme gerilmesinde neredeyse %103'lük bir artış olmuştur. Literatürde bahsedildiği gibi elyafarın kuvvet yönünde yönlendirilmesi ile kuvvet taşıyan elyaf sayısı artışı ile mekanik özellikler iyileşmiştir.



Şekil 4.24. Farklı katlardaki dokuma cam elyafı SMC numunelerin çekme gerilmesi-birim deformasyon eğrileri

Çekme deney numunelerinin ortalama değerleri alındığında malzemeyi temsil eden bir numunenin gerilme birim deformasyon eğrileri Şekil 4.24’de çizilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde en fazla birim deformasyon altı kat dokuma elyafı ile üretilen SMC kompozitte bulunmaktadır. Ayrıca buna bağlı olarak en yüksek çekme gerilmesi ve elastisite modül değeri de yine bu kompozite aittir.

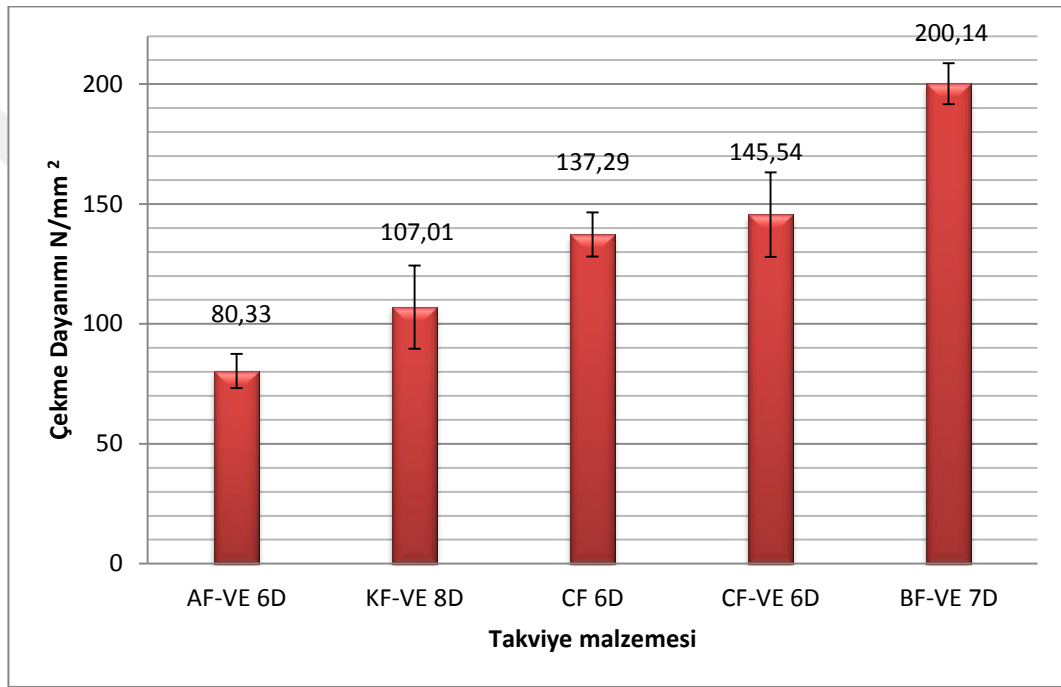
Dokuma elyafı SMC kompozitin hasar mekanizması incelenirse; elyaflar numune boyunca sıra ile dizildiği için yük numune kesiti boyunca dağılmakta matris belli bir noktadan kırılmaktan çok uzunluk boyunca çatlak oluşturma eğilimli olmaktadır. Uygulanan kuvvet etkisi ile elyaflara normal yönünde gerilme oluştururken aynı zamanda kayma gerilmeleri etkisinde enine çatlaklar da oluşturmaktadır. Bu durum Şekil 4.25’de daha açık görülmektedir.



Şekil 4.25. Hasara uğramış çekme deneyi numuneleri, dokuma cam elyaf SMC’nin a) ön ve b) arka görünümü

Ayrıca dokuma elyaftaki bağlantı noktalarında reçine havuzları, boşluklar ve düşük ıslanma eğilimi vardır. Gerilme etkisi altında normal ve kayma gerilmeleri etkisi altında ilk önce matris çatlakları oluşacaktır. Bahsedilen kusurlardan dolayı matris ile elyaf arasında lokal ayrılmaların yanında ara yüzey dayanımı kötü olan elyaflar sıyrılacak (pull-out) ve iyi olanlar kopacaktır. Bunların dışında üst üste yerleştirilen dokuma elyaf tabakaları arasında hem reçine havuzlarının olması hem de eğilme cevabı uyumsuzluğu sebebiyle tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) gerçekleşerek en son malzeme hasara uğrayacaktır.

Çalışmanın diğer bir aşamasında dokuma elyaf takviyeli SMC kompozit malzemelerde kullanmak için farklı tipte ileri elyaf kullanılmıştır. Aynı ağırlıkça aynı oranda elyaf takviyesi olabilmesi için cam elyaf altı kat, bazalt elyaf yedi kat, karbon elyaf sekiz kat ve aramit elyaf ise 6 kat kullanılmıştır. Kat sayısının farklı olmasının nedeni hem dokumanın kumaş sıklığının farklı olmasından hem de elyaf yoğunluk farkından gelmektedir. Aynı boyutlarda kesilen elyaf dokuma kumaşlar terazide tartılarak yaklaşık olarak ağırlıkları eşitlenmiştir. Çekme deneyi testine tabi tutulan bu numunelerin çekme gerilmesi sonuçları Şekil 4.26'da ve Çizelge 4.9'da verilmiştir.



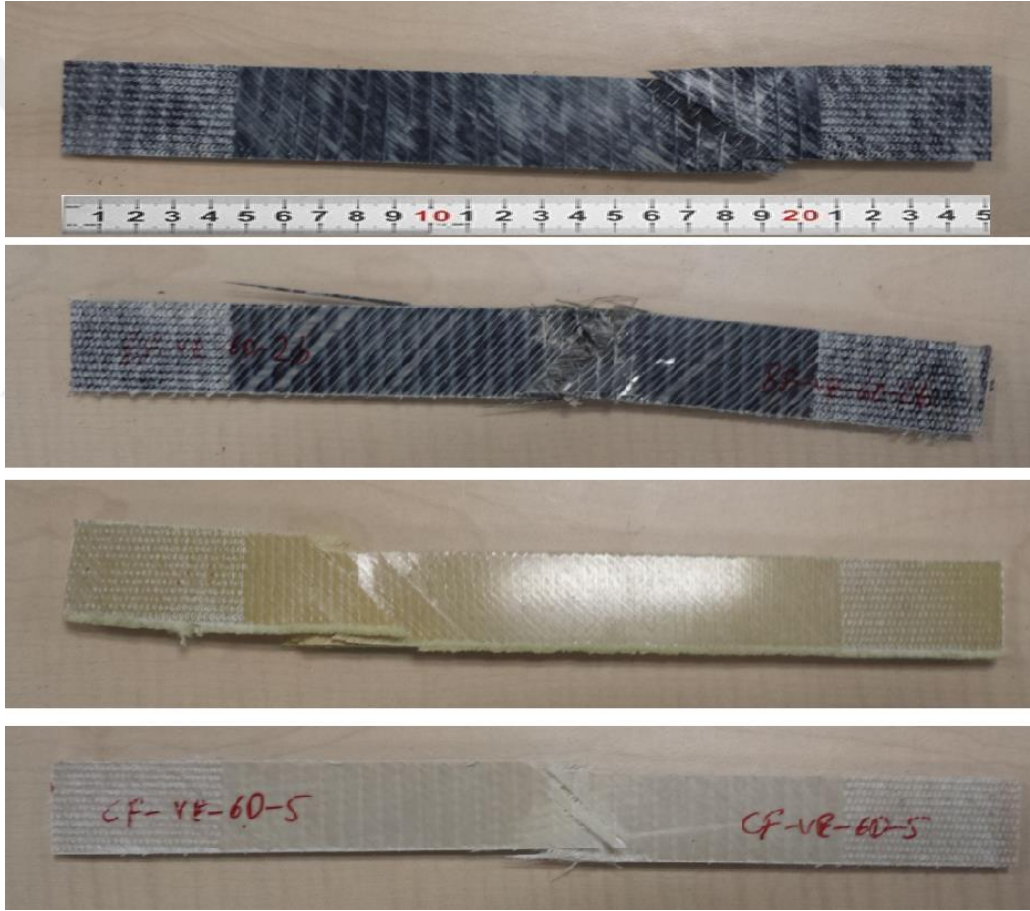
Şekil 4.26. Farklı tipte dokuma elyafı SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları

Bu sonuçlara daha önce polyester reçine ile yapılan altı kat dokuma elyafta eklenmiştir. Grafikler ve çizelgeler incelendiğinde şaşırtıcı sonuçlar ortaya çıkmıştır. Çekme dayanımı ve elastisite modülü en yüksek olan karbon ve aramit elyafı SMC kompozitin çekme dayanımının deney sonucunda en yüksek çıkması beklenirken cam elyaftan bile daha düşük çıkmıştır. Cam ve bazalt elyafı SMC kompozitlerin sonuçları beklenen düzeylerde dir.

Çizelge 4.9. Farklı tipte dokuma elyafı SMC numunelerin çekme deneyi sonuçları

Malzeme*	Çekme gerilmesi N/mm ² (MPa)	Standart Sapma	Uzama %
AF-VE 6D	80,33	7,17	4,65
KF-VE 8D	107,01	17,32	5,33
CF 6D	137,29	9,25	4,44
CF-VE 6D	145,54	17,61	4,63
BF-VE 7D	200,14	8,56	6,35

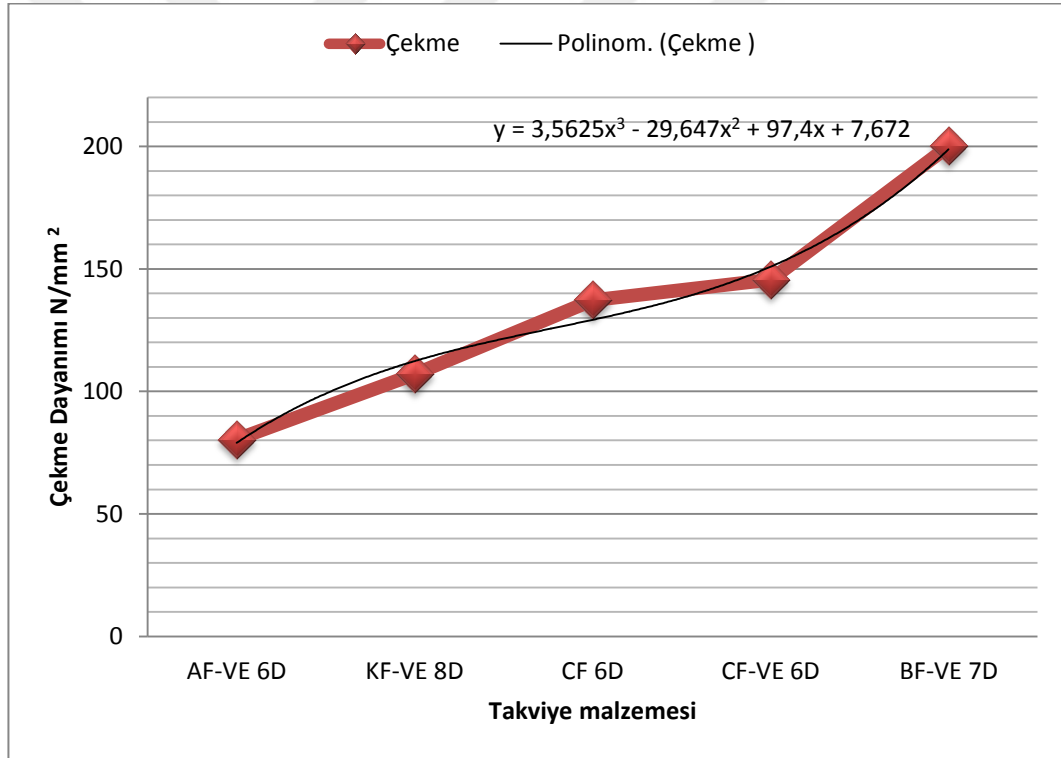
*Tüm sonuçların ortalama değerleri verilmiştir



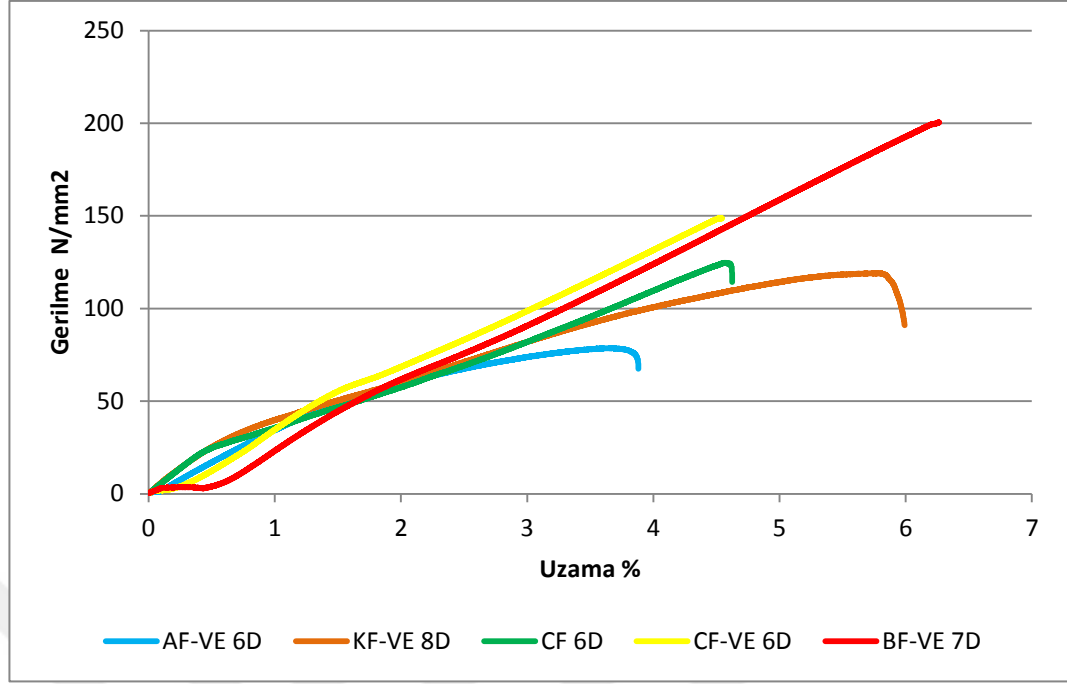
Şekil 4.27. Dokuma elyafı SMC kompozitlerin hasara uğramış çekme deneyi numuneleri; a) Karbon dokuma b) Bazalt dokuma c) Aramit dokuma d) Cam dokuma

Bu sonuçların sebepleri incelenirse; daha fazla kat sayısı olan karbon elyafı matris malzemenin yeterince ıslatamadığı için yeterli elyaf-matris ara yüzey dayanımı elde edilememiştir. Tabakalar arası yeterli miktarda matris olmadığı için bağlanma iyi

sağlanamaz ve neticede gerilme etkisinde başlayan matris çatlakları ve devamında tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) ile malzeme hasara uğrar. Aramit elyaflar da ise elyaf yüzeylerinin diğer elyaflara göre daha kaygan olması yine yeterli ara yüzey dayanımı sağlayamamaktadır. Böylelikle yükleme esnasında normal ve kayma gerilmeleri etkisinde matris çatlakları daha kolay oluşmakta matris yükü elyaflara tamamıyla iletemeden malzeme hasara uğramaktadır (Şekil 4.27). Bunların dışında polyester ve vinil ester reçine ile elde edilen dokuma SMC kompozitler arasında yine belirgin bir fark oluşmamıştır. Bu etkinin az olma sebebi önceki bölümde (bkz. bölüm 4.2.1) açıklanmıştır. Farklı tipte dokuma elyafı SMC numunelerin çekme deneyi sonuçları değerleri sıralanarak çizilen Şekil 4.28'deki grafiğin lineerliğinin eğilme gerilmesi sonuçlarında da sağlanıp sağlanmayacağı bir sonraki bölümde tartışılmıştır.



Şekil 4.28. Farklı tipte dokuma elyafı SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları



Şekil 4.29. Farklı tipte dokuma elyafı SMC numunelerin çekme gerilmesi-birim deformasyon eğrileri

Test numunelerinin ortalama değerlerini temsilen ona yakın bir numunenin çekme gerilmesi-birim deformasyon grafikleri Şekil 4.29’da verilmiştir. Grafik incelenirse en yüksek çekme gerilmesi, birim deformasyon değerinin ve buna bağlı olarak en yüksek elastisite modülü ve tokluk değerinin bazalt dokuma elyafı SMC kompozit numuneye ait olduğu görülür. Bu ise en sert ve sağlam malzemenin olduğu anlamına gelir. Bunun haricinde maliyet olarak düşük değere ve yüksek mekanik özelliklere sahip, çevreci bir malzeme olan bazalt dokuma elyaf ile SMC kompozit malzeme üretiminin yapılabileceği düşünülmektedir.

4.3.2. Dokuma elyaf takviyeli SMC kompozitlerin eğilme deney sonuçları

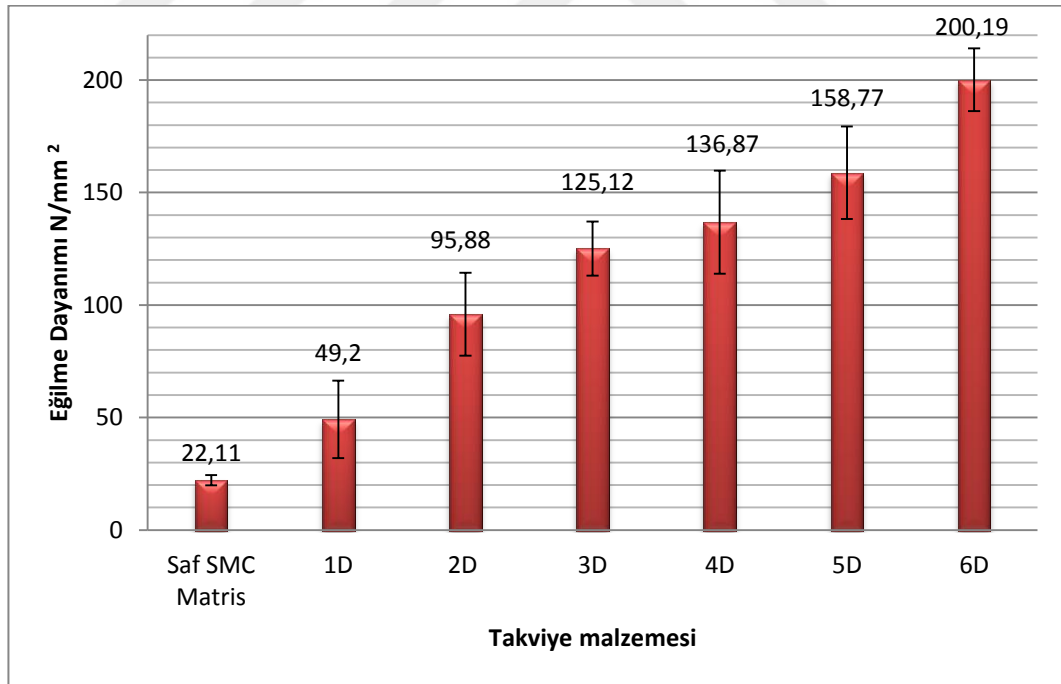
Eğilme deney sonuçlarını elde etmek için dokuma cam elyafı ile takviye edilen SMC plakalar standartlara uygun boyutlarda kesilerek teste tabi tutulduktan sonra sonuçlar aşağıdaki Çizelge ve grafiklerde verilmiştir. Dokuma kat sayısının artmasının doğal bir sonucu olarak kompozit elyaf oranı da artmaktadır. Çekme deney sonuçlarına benzer bir eğilim eğilme dayanımı sonuçlarında da Çizelge 4.10. ve Şekil 4.30’da açıkça görülmektedir. Tek katlı dokuma elyaf takviyeli SMC kompozit ile altı kat dokuma

kompozitin eğilme gerilmesi değerleri arasında ise yaklaşık %308 artış vardır fakat bu fark çekme gerilmesi değerinden çok daha düşüktür.

Çizelge 4.10. Farklı katlardaki dokuma cam elyafı SMC numunelerin eğilme deneyi sonuçları

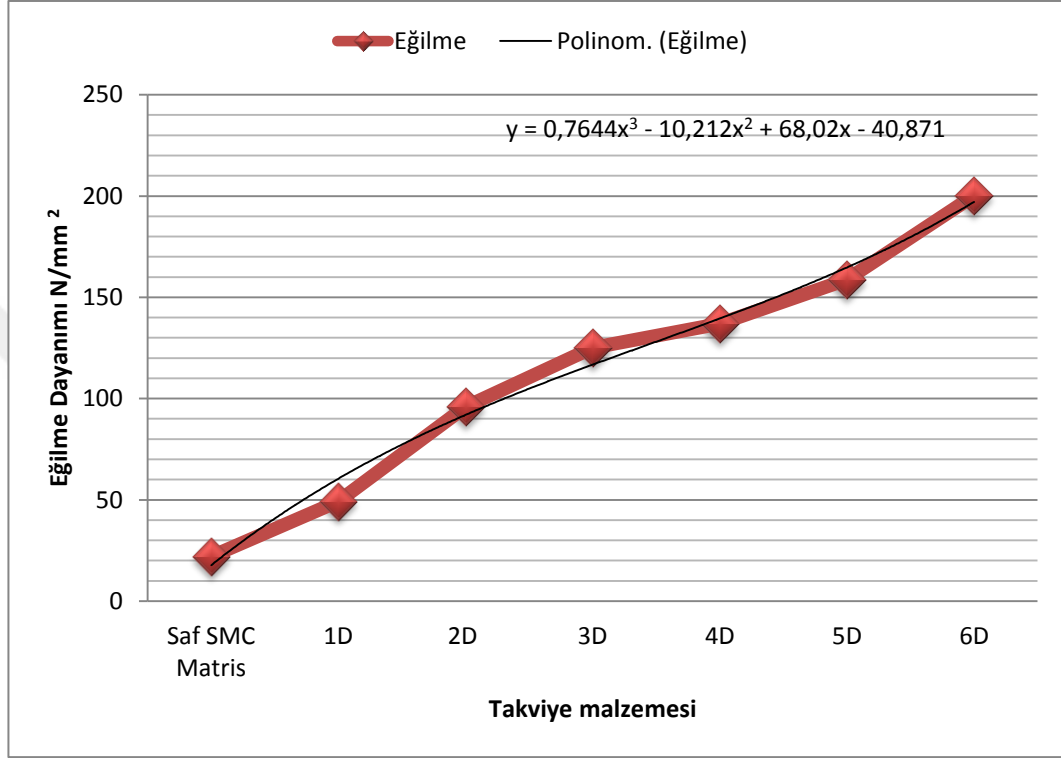
Malzeme*	Eğilme gerilmesi N/mm ² (MPa)	Standart Sapma
Saf SMC reçine	22,11	2,27
1 D	49,2	17,21
2 D	95,88	18,45
3 D	125,12	12,03
4 D	136,87	22,92
5 D	158,77	20,56
6 D	200,19	13,94

*Tüm sonuçların ortalama değerleri verilmiştir



Şekil 4.30. Farklı katlardaki dokuma cam elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları

Dokuma kat sayısı arttıkça gerilme dayanımının da yaklaşık olarak lineer arttığı Şekil 4.31’de gösterilmiştir. Bu durum literatürde verilen değerlerle uyum içindedir. Yapılan birçok çalışmada kompozite dayanımını veren en önemli faktörlerden birinin malzemenin elyaf oranı olduğu belirtilmiştir.



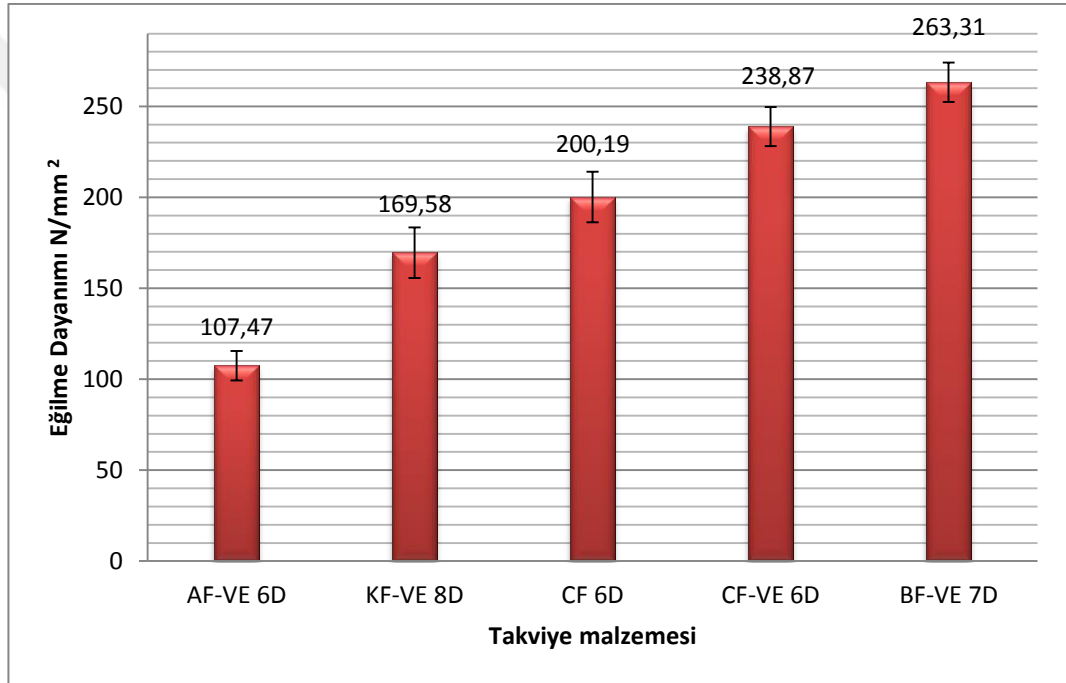
Şekil 4.31. Farklı katlardaki dokuma cam elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları

Farklı dokuma elyafı SMC kompozitlerin eğilme deneyi sonuçları Çizelge 4.11 ve Şekil 4.32’de gösterilmiştir. Eğilme deneyi sonuçları çekme gerilmesi sonuçları ile benzer bir eğilim göstermiştir. En düşük eğilme gerilmesi değerine sahip olan dokuma elyaf takviyeli aramit elyaf ile en yüksek değere sahip bazalt arasında yaklaşık olarak %145 fark vardır. Karbon ve aramit elyafı dokuma kompozitlerin eğilme dayanımının bu kadar düşük çıkmasının nedenleri daha önceki bölümde çekme dayanımında tartışılan sebeplerle benzerdir.

Çizelge 4.11 Farklı tipte dokuma elyafı SMC numunelerin eğilme deneyi sonuçları

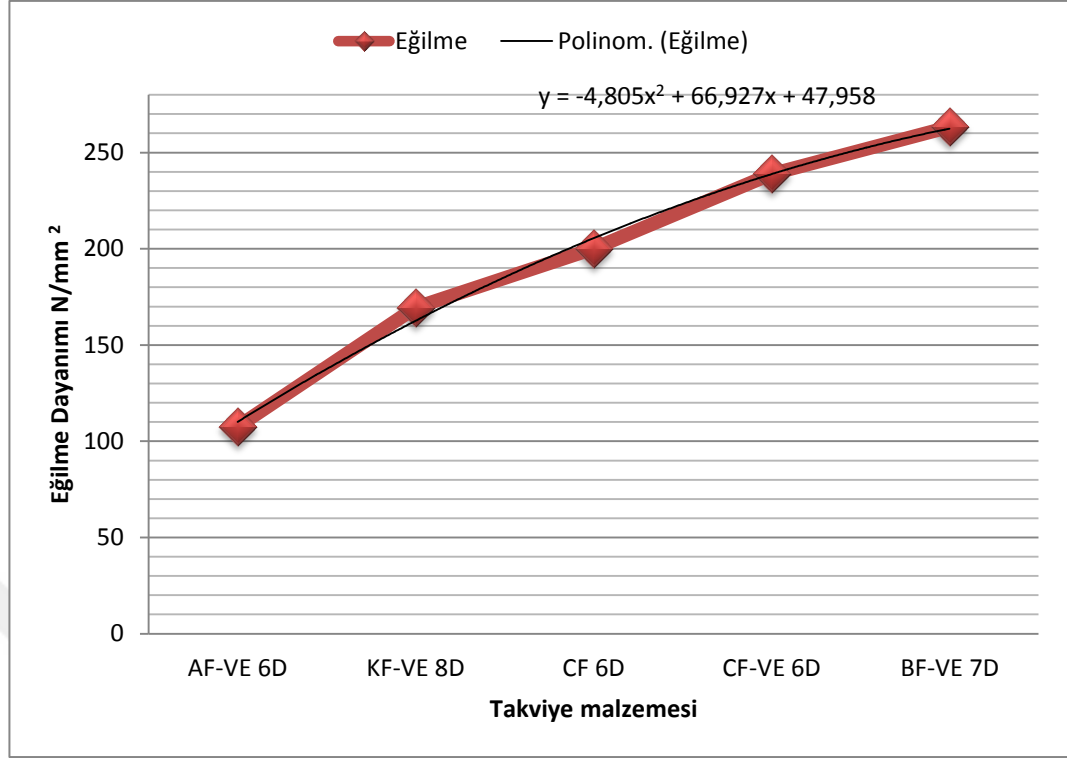
Malzeme*	Eğilme gerilmesi N/mm ² (MPa)	Standart Sapma
AF-VE 6D	107,47	8,11
KF-VE 8D	169,58	13,89
CF 6D	200,19	13,94
CF-VE 6D	239,41	10,73
BF-VE 7D	263,31	10,84

*Tüm sonuçların ortalama değerleri verilmiştir



Şekil 4.32. Farklı tipte dokuma elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları

Eğilme gerilmesi sonuçlarının ortalama değerlerine göre elde edilen Şekil 4.33' deki çizgi grafik incelendiğinde çekme gerilmesi değerleri büyüklüğüne göre çizilen grafiğin benzer bir lineer eğilim verdiği görülmektedir.

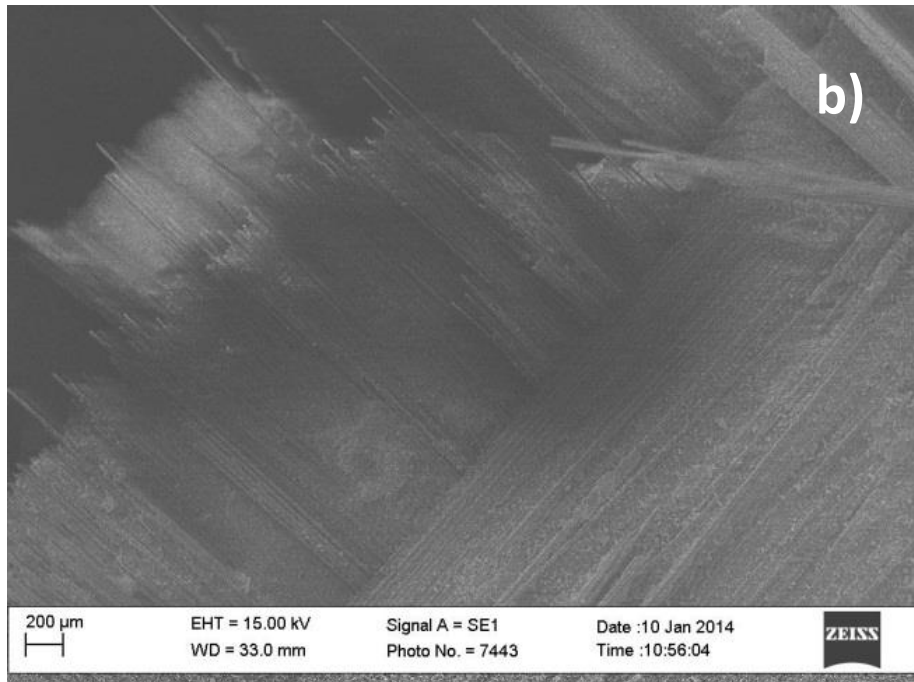
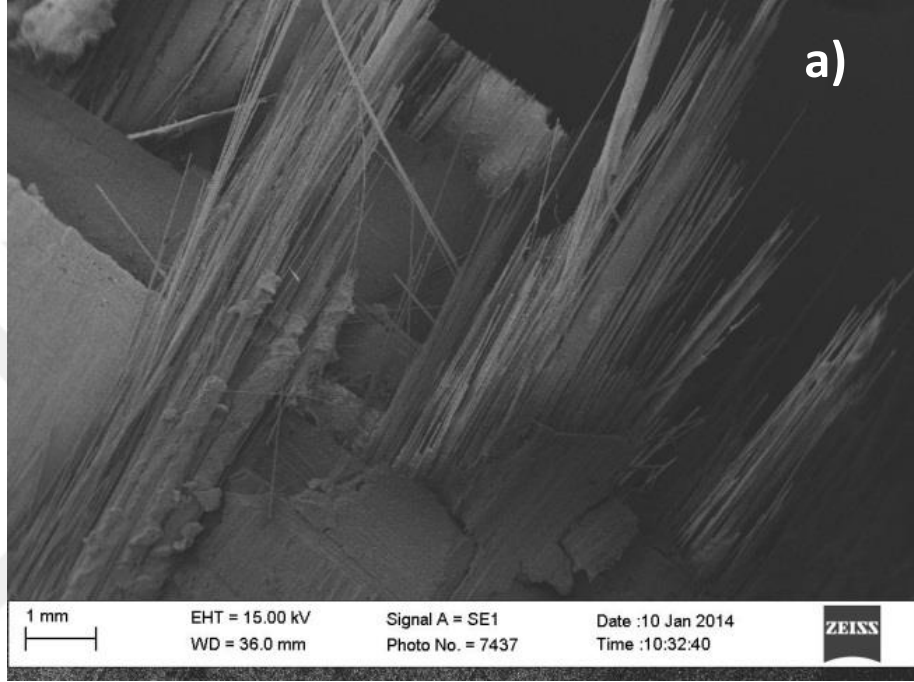


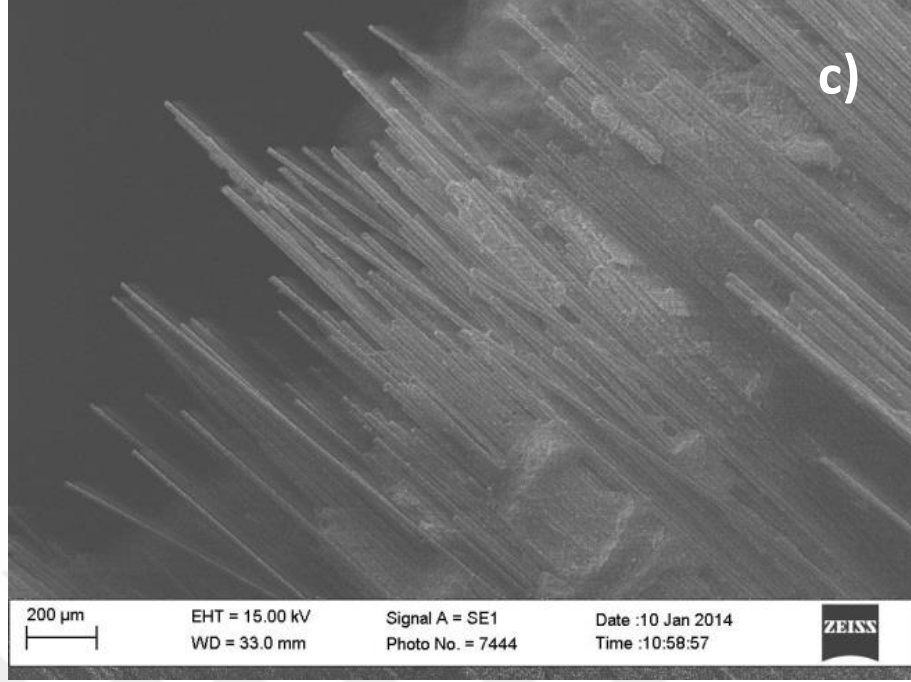
Şekil 4.33. Farklı tipte dokuma elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları

4.3.3. Dokuma elyaf takviyeli SMC kompozitlerin yüzey karakterizasyonu

Deneysel sonucu hasara uğrayan malzemelerin yüzey karakterizasyonu onların kırılma bölgesinde hasar durumu için bize önemli fikirler vermektedir. Dokuma elyafı SMC kompozit malzemelerin kırılma mekanizmaları benzer olduğu için bütün numuneleri incelemek yerine sadece altı kat dokuma elyafı SMC kompozit malzemenin SEM görüntüleri elde edilerek incelenmiştir. Belli büyütme oranları ile çekilen Şekil 4.34 a)'daki görüntüler incelenirse üst üste konulan elyaf tabakaları açıkça görülebilir. Elyaf ve matris ara yüzey yapışması iyi olduğu için malzeme yükleme esnasında belli bir miktar uzayarak plastik deformasyona uğramıştır. Hasar küçük matris çatlakları ile başlayıp kuvvet arttıkça aynı zamanda plastik deformasyon artmış, tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) ile beraber matristeki çatlaklar büyüyüp bazı yerlerinde parçalanarak malzeme hasara uğramıştır. Kuvvete karşı olan bu direnç hem elyafların sıyrılmamasından (pull-out) hem de çok az elyafın kopmasından kaynaklanmaktadır. Hatta matrisin çatlayarak parçalanmasına rağmen bazı elyafların üzerinde yapışık kalması iyi ara yüzey dayanımını desteklemektedir. Elyaflar 0° ve 90° (enine ve

boyuna) dokunmuştur. Bu malzemenin iki boyutta mukavemetli olmasını sağlamaktadır ve Şekil 4.34 b)'de bu yönlenme görülmektedir. Uygulanan kuvvet yönünde olan elyafların olması matris malzemenin yükü elyaflara ileterek malzemenin daha yüksek dayanımlara ulaşmasını sağlamaktadır. Kuvvet yönünde düzgün sıralanan elyaflar Şekil 4.34 c)'de daha yakından görülmektedir.





Şekil 4.34. Altı kat dokuma cam elyafı SMC malzemenin belli oranlarda büyütülmüş SEM görüntüleri

4.4. Cam Elyaf Takviyeli SMC Kompozitler

4.4.1. Cam elyaf takviyeli SMC kompozitlerin çekme deney sonuçları

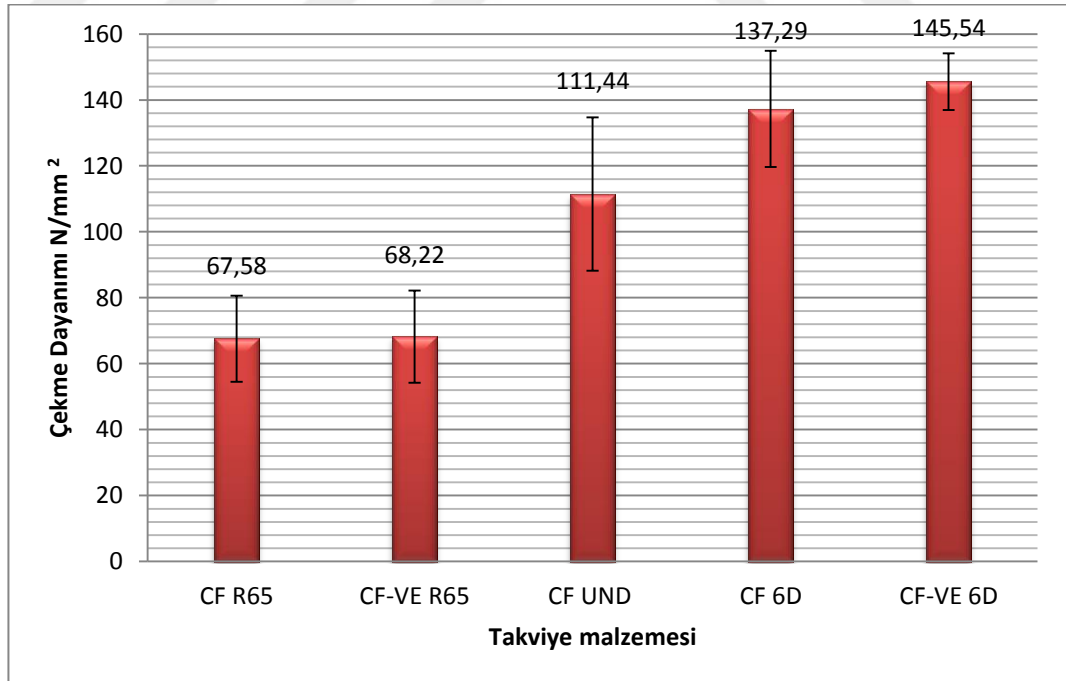
Daha önceki bölümlerde cam elyafın çeşitli uzunluk, oran ve tipleri için elde edilen sonuçların hepsini kendi aralarında değerlendirebilmek için çekme deneyi sonuçları aşağıdaki çizelge ve grafiklerde bir araya toplanmıştır. En yüksek çekme gerilmesi değerleri alınarak en iyi mekanik özellikleri veren kompozitler ve sebepleri açıklanmaya çalışılmıştır. Örneğin kesikli rasgele SMC plaka için kullanılan 24, 48, 65, 75, 95 mm uzunluğundaki cam elyafı kompozit numunelerin çekme gerilmesi değerini en iyi veren 65 mm uzunluğundaki elyaf ile üretilen malzemenin değeri alınmıştır. Dokuma elyaf için bir kattan altı kata kadar olan numunelerden en iyi sonucu veren altı kat dokuma elyafı SMC kompozit değeri eklenmiştir. Bu sonuçların hepsi Çizelge 4.12 ve Şekil 4.35’de görülebilmektedir. En düşük çekme gerilmesi değerine sahip kesikli rasgele cam elyafı (65mm) SMC kompozit ile vinil ester reçine ile üretilen altı kat dokuma elyafı SMC kompozit arasında %116 artış vardır.

Çizelge 4.12. Farklı cam elyafı SMC numunelerin çekme deneyi sonuçları

Malzeme*	Çekme gerilmesi N/mm ² (MPa)	Standart Sapma	Uzama %
CF R65	67,58	13,04	3,62
CF-VE R65	68,22	13,98	3,12
CF UND	111,44	23,28	3,94
CF 6D	137,29	17,61	4,44
CF-VE 6D	145,54	8,56	4,63

*Tüm sonuçların ortalama değerleri verilmiştir

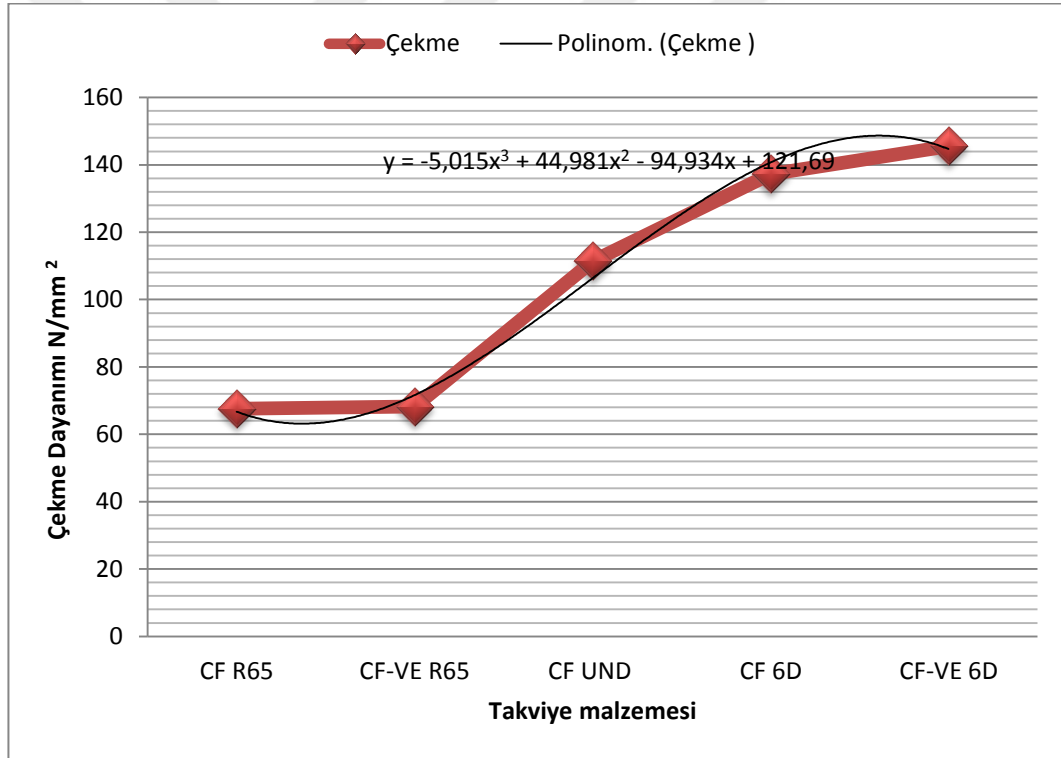
En yüksek çekme gerilmesi değeri veren vinil ester reçine ile üretilen altı kat cam elyaf dokumalı SMC kompozit numuneler ile en düşük değeri veren 65 mm kesikli rasgele SMC numuneler arasındaki bu farkın sebepleri önceki bölümlerde verildiği için burada tekrar edilmeyecektir. Öte yandan hem kesikli rasgele hem de dokuma elyafı ile üretilen SMC plakalarda farklı reçine kullanımının mekanik özelliklere çok ciddi bir katkısının olmadığı burada görülmektedir.



Şekil 4.35. Farklı cam elyafı SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları

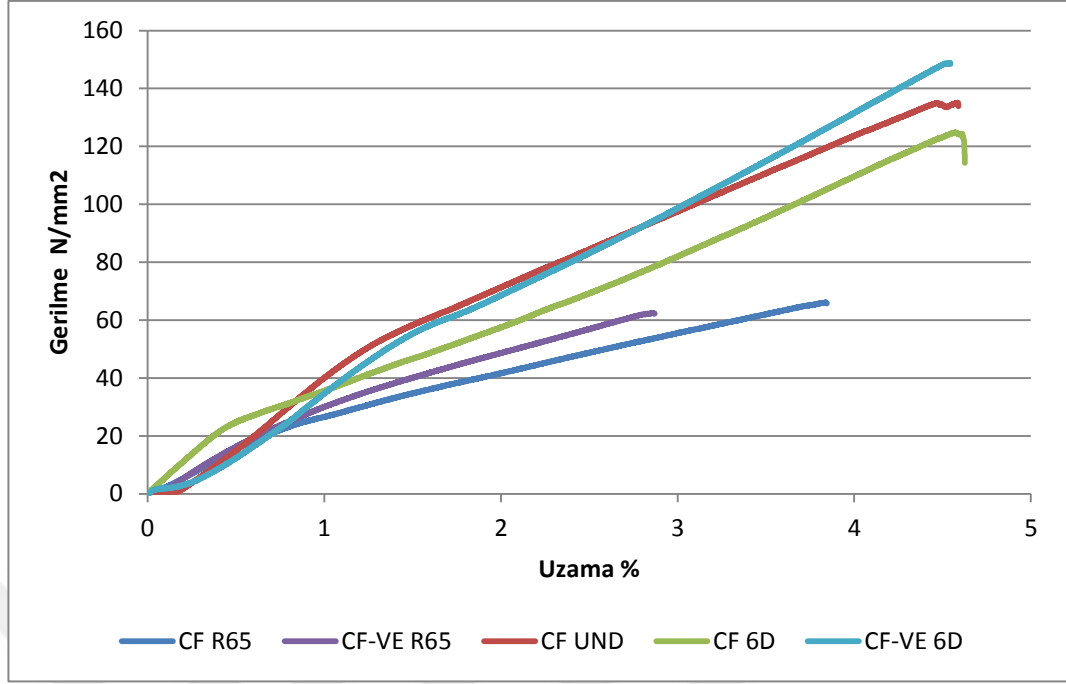
Tasarımlarda malzeme seçimi yapılırken maliyeti daha yüksek olan vinil ester reçine ile reçinenin kürleşme süresi (SMC yöntemi için polyesterin iki katı süre) dikkate alınmalıdır. Bu farka değecek düzeyde ise seçim yapılır değilse gerek yoktur.

Normalde tek yönlü elyaf kompozitlerde elyaf yönünde kuvvet uygulanırsa bu kompozitlerde yüksek dayanım verir. Daha önce (bkz. bölüm 4.2.1) açıklandığı gibi basınçlı kalıplamada basıncın etkisi ile elyafların bir kısmının yönü kaydığı için kesme gerilmeleri etkisinde elyaf matris arasında kayma olmakta, matrisin çatlaması ile daha düşük gerilmelerde malzeme hasara uğramaktadır. Çekme gerilmesi değerlerinin sıralamasına göre çizilen Şekil 4.36'daki grafiğin lineerliğinin eğilme gerilmesinde nasıl bir değişim göstereceği bir sonraki bölümde tartışılacaktır.



Şekil 4.36. Farklı cam elyafı SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları

Çekme gerilmesi-birim deformasyon eğrileri Şekil 4.37'de verilmiştir. Eğrilerden görüldüğü gibi tek yönlü ve dokuma elyafı malzemelerin hem elastisite modülü hem de tokluk değeri diğer malzemelere göre belirgin bir derecede daha yüksektir.



Şekil 4.37. Farklı cam elyafı SMC numunelerin çekme gerilmesi-birim deformasyon eğrileri

4.4.2. Cam elyaf takviyeli SMC kompozitlerin eğilme deney sonuçları

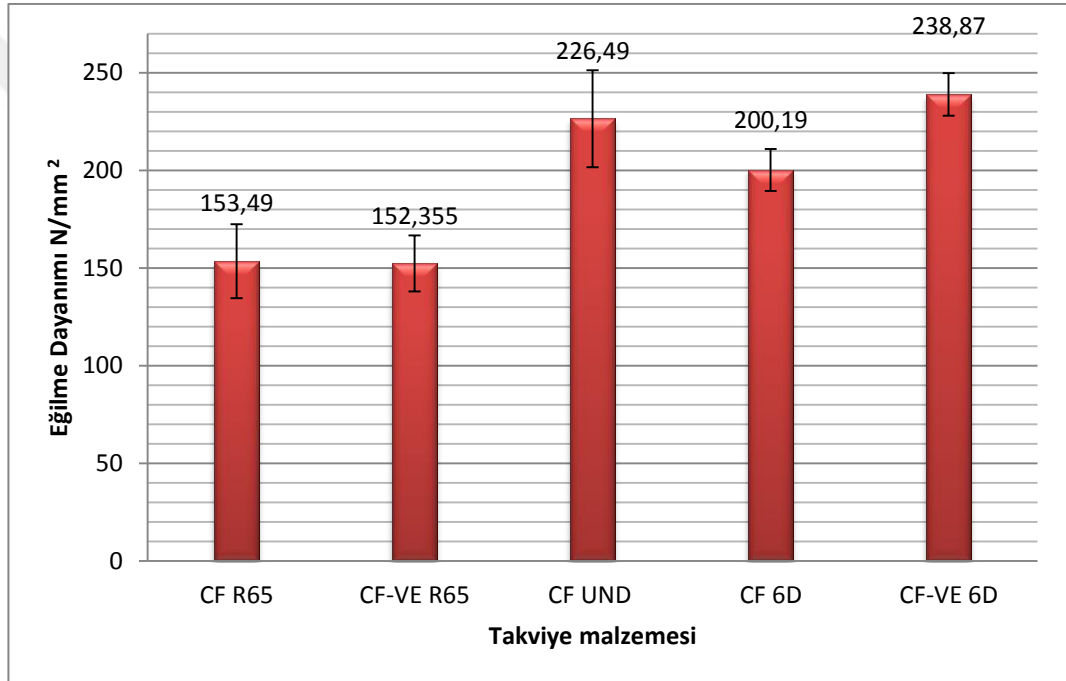
Eğilme deneyi sonuçlarındaki sıralama Çizelge 4.13. ve Şekil 4.38’de görüldüğü gibi değişmiştir. Daha önce çekme gerilmesi değerleri karşılaştırılan kesikli rasgele cam elyafı (65mm) SMC kompozit ile vinil ester reçine ile üretilen altı kat dokuma elyafı SMC kompozitin eğilme gerilmesi değerleri arasında ise %55 artış vardır. Aradaki farkın azalmasının eğilme gerilmesinde oluşan çok eksenli gerilmelerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tek yönlü elyaf kompozitte elde edilen değer altı kat dokumadan daha yüksek çıkmıştır. Normalde bir önceki bölümde açıklandığı gibi tek yönlü elyaf kompozitlere elyaf yönünde kuvvet uygulanırsa yüksek mukavemet özellikleri gösterir. Burada yüksek çıkması normaldir. Bu eğilme numunesinde elyafların kuvvet yönüne daha çok dik yönlendiğini gösterir. Sürekli elyafların çekme gerilmesi değerlerinin elyaf yönünün değişmesinden kaynaklandığı daha önce (bkz. bölüm 4.2.1) açıklanmıştı.

Çizelge 4.13. Farklı cam elyafı SMC numunelerin eğilme deneyi sonuçları

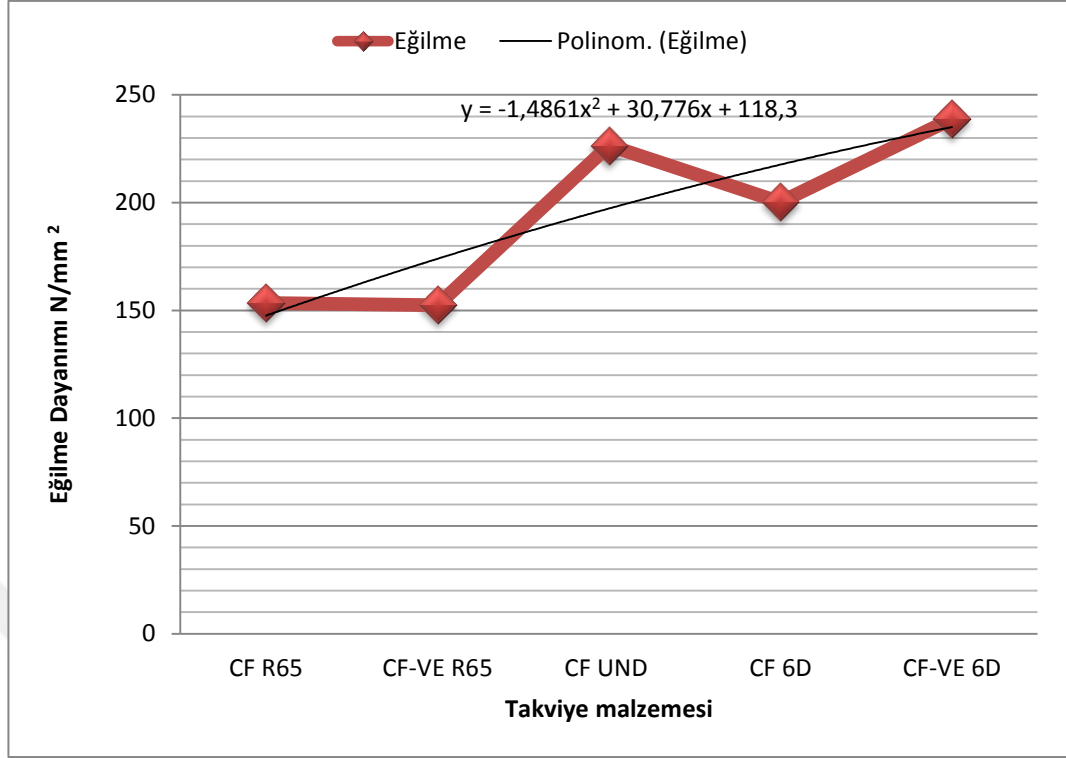
Malzeme*	Eğilme gerilmesi N/mm ² (MPa)	Standart Sapma
CF R65	153,49	18,89
CF-VE R65	152,36	14,33
CF UND	226,49	24,83
CF 6D	200,19	10,73
CF-VE 6D	238,87	10,84

*Tüm sonuçların ortalama değerleri verilmiştir



Şekil 4.38. Farklı cam elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları

Altı kat dokuma elyafı kompozitlerde ise beklenenden daha düşük değerler elde edilmiştir. Bu durumun eğilme kuvveti etkisi ile malzemede oluşan normal, basma ve kayma gerilmelerinin malzeme içinde çok eksenli gerilmeler oluşturması ile dokuma elyafı matris arasında çatlaklar ortaya çıkarmıştır. Sonrasında ise oluşan delaminasyon sonucu malzeme hasara uğramıştır. Şekil 4.39’da görüldüğü gibi çekme gerilmesindeki lineerlik eğilme gerilmesinde bozulmuştur.



Şekil 4.39. Farklı cam elyafli SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları

4.5. Bazalt Elyaf Takviyeli SMC Kompozitler

Artan çevre sorunları ve üstün özelliklere sahip kompozit malzemelere olan ihtiyacın ortaya çıkması ile elyaf ve matris içerisindeki katkıları değiştirilerek daha iyi malzemeler ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Son yıllarda birçok kompozit malzeme üretim yönteminde kullanılan bu malzemelerden birisi de bazalttır. Bazalt malzemeler cam elyafa göre daha iyi mekanik özellikler, karbon elyafa göre düşük üretim maliyetlerinden dolayı gittikçe yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır (Ary Subagia ve ark. 2014a-b, Asprone ve ark. 2014, Lopresto ve ark. 2011, Petrucci ve ark. 2013, Rambo ve ark. 2015, Wei ve ark. 2011b, Wu ve ark. 2014). Bazalt lifli kompozitlerin kullanımının artması için mekanik özelliklerinin daha iyi tanımlanması gerekmektedir. Bu amaçla Colombo ve ark. (2012) epoksi ve vinil ester gibi farklı reçineli bazalt lifli kompozit deney numuneleri üreterek mekanik özelliklerini incelemiştir (Colombo ve ark. 2012). Lopresto ve ark. (2011) ise vakum torba (bag) teknolojisi ile ürettikleri cam ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş plakaların mekanik özelliklerini karşılaştırmıştır.

Ary Subagia ve ark. (2014b) ise bazalt elyaf ile takviye edilmiş epoksi matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir.

Bazalt kompozitler yüksek aşınma dayanımlarından dolayı otomobil ve tarım aletlerinin sürtünmeye karşı dayanıklı olması gereken elemanlarının üretiminde de tercih edilir (Wang ve ark. 2010). Mekanik özellikleri metallerle aynı olmamasına rağmen üretimdeki kolaylık, ekonomik fiyat ve enerji tasarrufu gibi nedenlerle bazalt kompozitler tercih edilmektedir.

4.5.1. Bazalt elyaf takviyeli SMC kompozitlerin çekme deney sonuçları

Bazalt elyaf, yüksek tokluk, iyi mekanik ve termal özellikleri, çevreye duyarlı olmasından dolayı tercih edilen bir elyaf olmaya başlamıştır. Bu tez çalışması kapsamında bazalt elyafın her tipi kullanılmaya çalışılmıştır. SMC kompozit üretim yönteminde ilk kez kullanılan bazalt elyaf önceki bölümlerde diğer elyaflarla kıyaslanmıştır. Bu bölümde ise bazalt elyaf takviyeli SMC plakalar kendi aralarında değerlendirilmiştir.

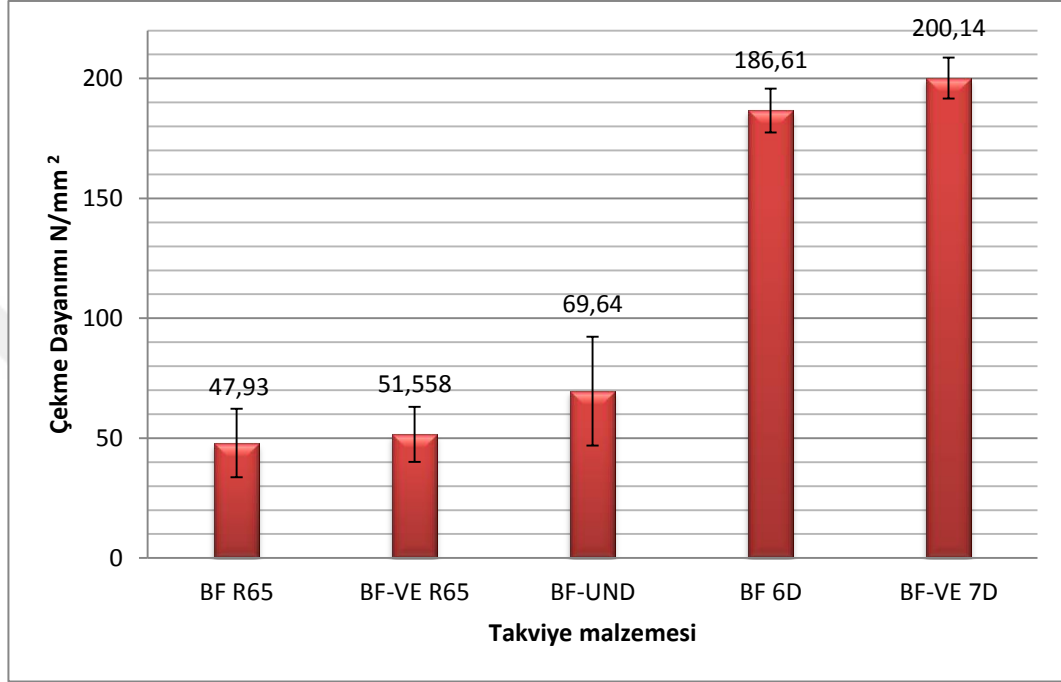
Çizelge 4.14. Farklı bazalt elyafı SMC numunelerin çekme deneyi sonuçları

Malzeme*	Çekme gerilmesi	Standart	Uzama %
	N/mm ² (MPa)	Sapma	
BF R65	47,93	14,29	2,07
BF-VE R65	51,56	11,52	2,33
BF-UND	69,64	22,71	3,68
BF 6D	186,61	9,15	6,59
BF-VE 7D	200,14	8,56	6,35

*Tüm sonuçların ortalama değerleri verilmiştir

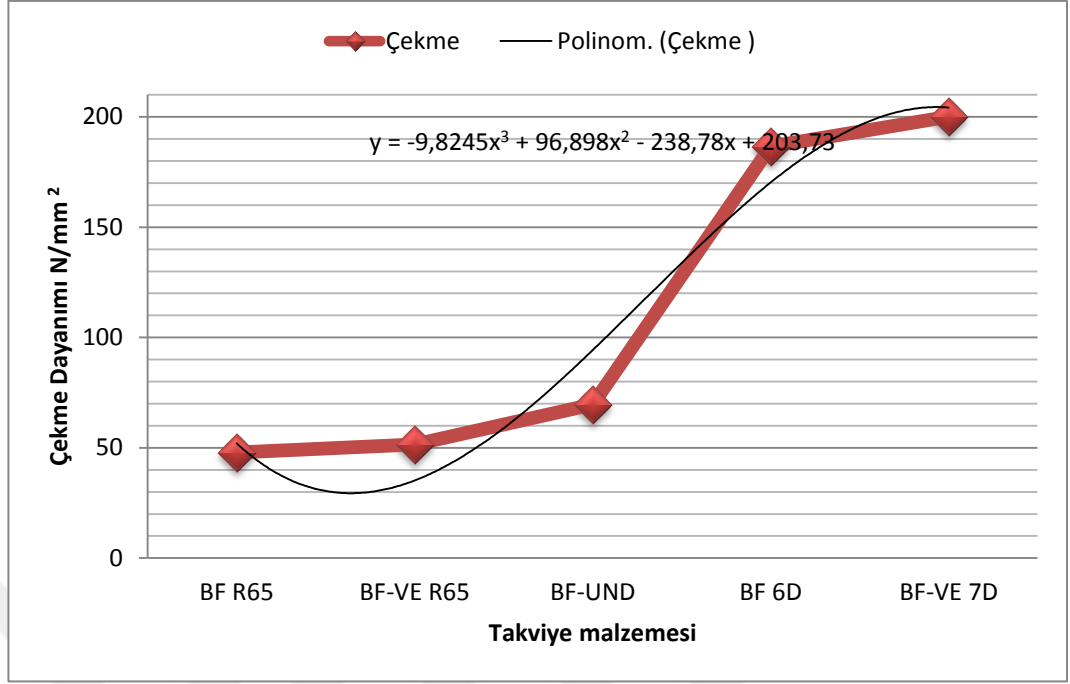
Bazalt elyafı elde edilen numunelerin çekme gerilmesi sonuçları Çizelge 4.14 ve Şekil 4.40'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, aynı oran (%20) ve uzunlukta (65 mm) kesikli rasgele bazalt elyafı elde edilen numunelerde farklı reçine (polyester, vinil ester) etkisinin pek fazla olmadığı bazalt elyafı SMC kompozitlerde de görülmüştür.

Aynı durum dokuma elyafı bazalt kompozitlerde de geçerlidir. En düşük çekme gerilmesi değerine sahip kesikli rasgele bazalt elyafı (65mm) SMC kompozit ile vinil ester reçine ile üretilen yedi kat dokuma elyafı SMC kompozit arasında %325 artış vardır.



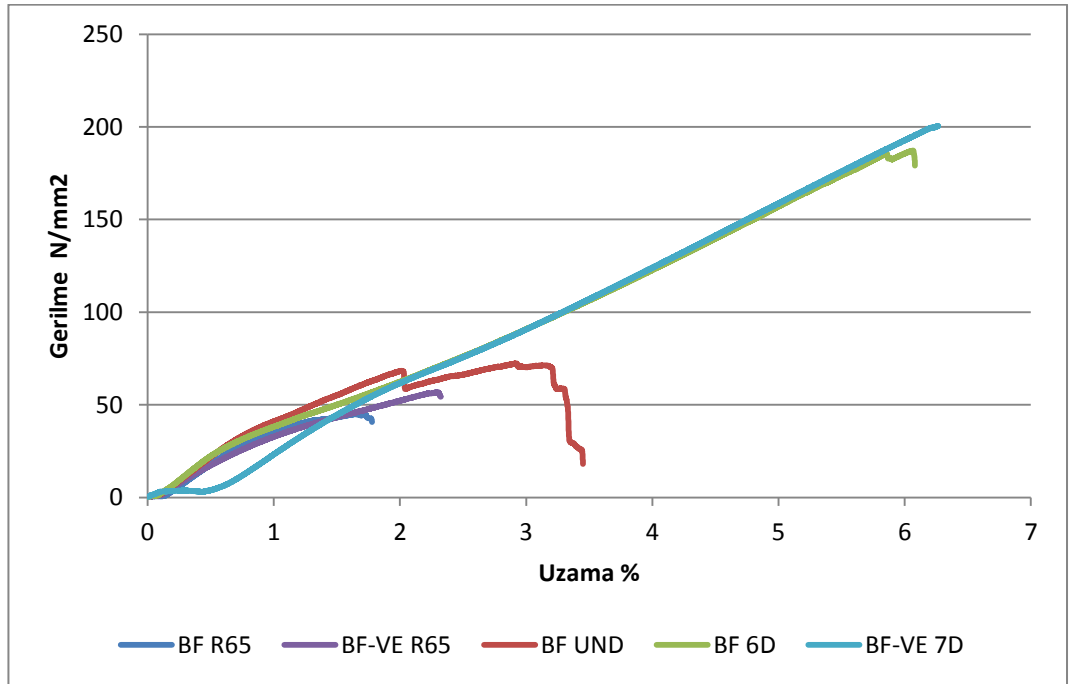
Şekil 4.40. Farklı bazalt elyafı SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları

Çizelge 4.14.'de dikkat edilirse polyester reçine ile yapılan dokuma elyaf takviyeli kompozit altı kat iken vinil esterle yapılan kompozit yedi kattır. Bunun sebebi elyaf dokuma sıklığı (520 g/m^2 , 600 g/m^2) farklı olan bazalt elyaf kompozitte aynı ağırlık oranının (%20) sağlanmaya çalışılmasından kaynaklanmaktadır. En şaşırtıcı sonuç ise tek yönlü elyaf kompozitte görülmüştür. Normal şartlarda kuvvet yönüne dik bir şekilde elyaflar yönlendirildiğinde çok yüksek mekanik özellikler elde edilmektedir. Burada ise beklenenin çok altında çıkmıştır. Bu durumun basınç etkisi altında elyafın istenen yönde kalmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Böylelikle düşük gerilmeler altında oluşan matris çatlakları ile yük elyafa tam olarak iletilemeden malzeme hasara uğramıştır.



Şekil 4.41. Farklı bazalt elyafı SMC numunelerinin ortalama çekme deneyi sonuçları

Malzemelerin çekme gerilmelerinin ortalama değerleri alındığında aralarında çok fazla doğrusal bir ilişki olmadığı Şekil 4.41’de gösterilmiştir.



Şekil 4.42. Farklı bazalt elyafı SMC numunelerinin gerilme-birim deformasyon eğrileri

Diğer taraftan Şekil 4.42'deki gerilme-birim deformasyon eğrileri incelendiğinde ise dokuma elyafı bazalt SMC kompozitler çok iyi çekme dayanımı, birim deformasyon ve tokluk değerleri gösterirken diğerlerinde çok daha düşük değerler gözlemlenmiştir. Elyaf yönelmesinin önemi burada açık bir şekilde tekrar görülmektedir.

4.5.2. Bazalt elyaf takviyeli SMC kompozitlerin eğilme deney sonuçları

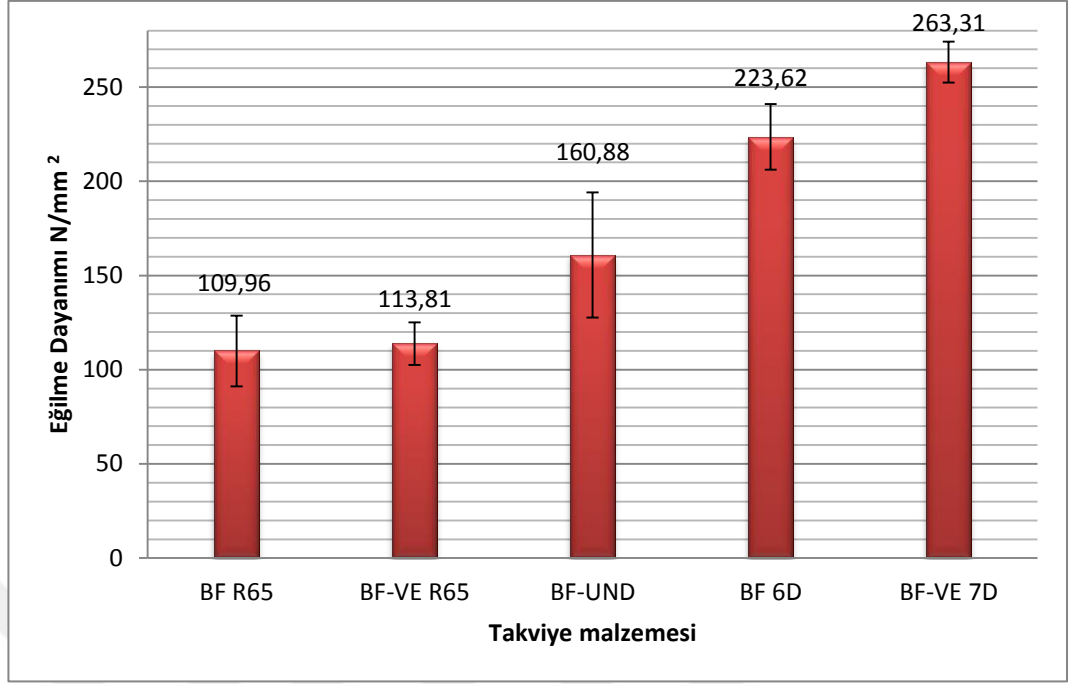
Bazalt elyaf takviyeli SMC kompozitlerden elde edilen plakaların eğilme deney sonuçları Çizelge 4.15 ve Şekil 4.43'de bir araya toplanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde çekme gerilmesine yakın bir eğilim görülmektedir.

Daha önce çekme gerilmesi değerleri karşılaştırılan kesikli rasgele bazalt elyafı (65mm) SMC kompozit ile vinil ester reçine ile üretilen yedi kat dokuma elyafı SMC kompozitin eğilme gerilmesi değerleri arasında ise %141 artış vardır. Aradaki farkın azalmasının eğilme gerilmesinde oluşan çok eksenli gerilmelerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.15. Farklı bazalt elyafı SMC numunelerin eğilme deneyi sonuçları

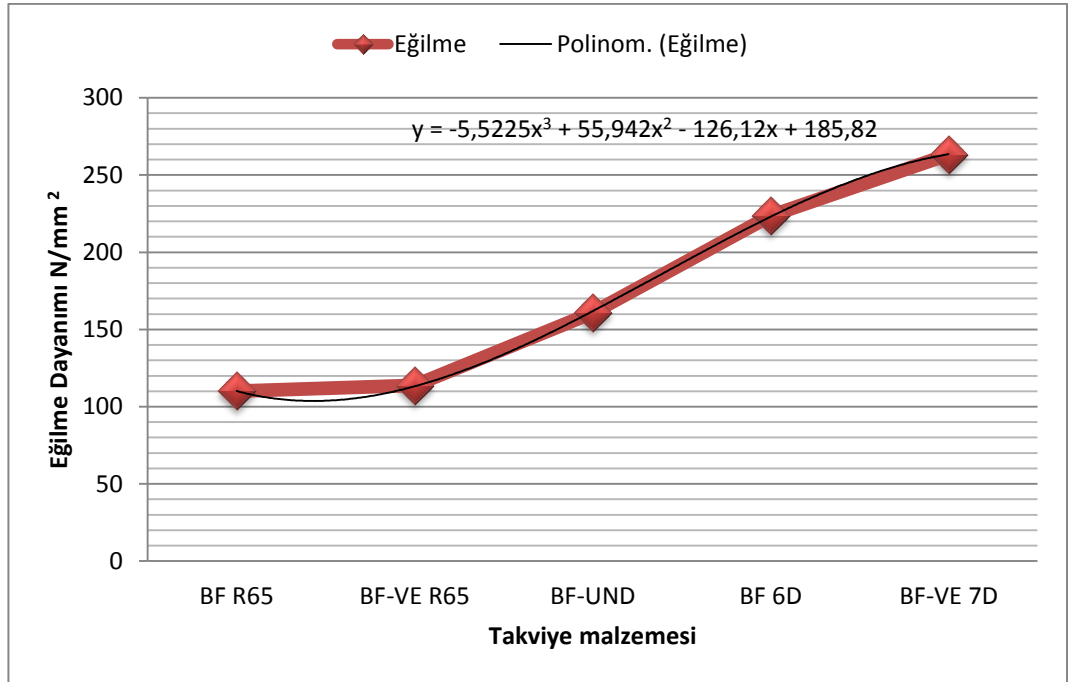
Malzeme*	Eğilme gerilmesi N/mm ² (MPa)	Standart Sapma
BF R65	109,96	18,78
BF-VE R65	113,81	11,26
BF-UND	160,88	33,28
BF 6D	223,62	17,42
BF-VE 7D	263,31	10,84

*Tüm sonuçların ortalama değerleri verilmiştir



Şekil 4.43. Farklı bazalt elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları

Bazalt elyafı SMC kompozitlerin eğilme dayanım sonuçları arasında çekme gerilmesi sonuçlarına göre Şekil 4.44’de görüldüğü gibi biraz daha lineer bir ilişki gözlemlenmiştir.



Şekil 4.44. Farklı bazalt elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları

4.6. Aramit Elyaf Takviyeli SMC Kompozitler

4.6.1. Aramit elyaf takviyeli SMC kompozitlerin çekme deney sonuçları

Aramit elyaf daha çok balistik amaçlı kompozitlerde tercih edilmektedir. SMC kompozit üretim yönteminde ilk kez kullanılan bu elyafın farklı tipleri ile elde edilen çekme deneyi sonuçları kendi aralarında değerlendirilmek üzere Çizelge 4.16 ve Şekil 4.45’de bir araya toplanmıştır. Normalde bütün sonuçlar beklenenin altında çıkmıştır. Özellikle dokuma aramit elyafı SMC kompozitin çekme gerilmesi değeri kesikli rasgele elyafın en az üç dört katı olması beklenirken neredeyse aynı çıkmıştır. Bu durumun matris ve elyaf arasındaki zayıf ara yüzey dayanımı, iç kusurlar ve üretim hatalarından olduğu daha önce (bkz. bölüm 4.3.1) açıklanmıştır.

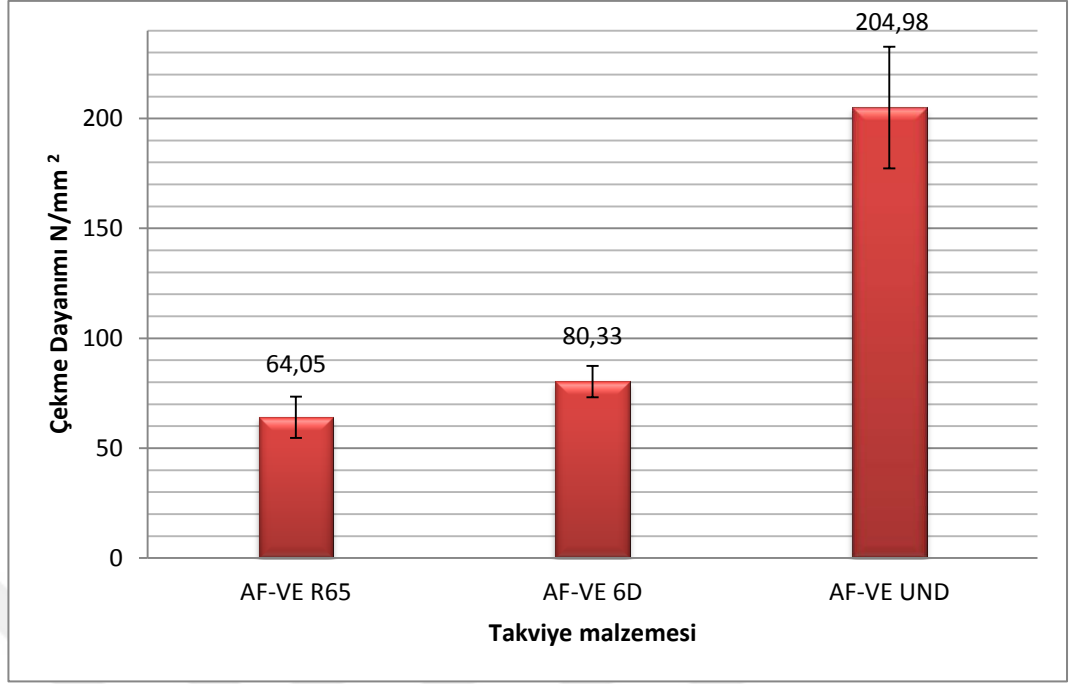
Çizelge 4.16 incelendiğinde kesikli rasgele aramit elyafı SMC kompozitten en düşük çekme gerilmesi değeri gözlemlenirken en yüksek değer sürekli elyaf takviyeli aramit elyaf arasında gözlemlenmiştir ve bu kompozitler arasında yaklaşık %218’lik bir artış söz konusudur.

Çizelge 4.16. Farklı aramit elyafı SMC numunelerin çekme deneyi sonuçları

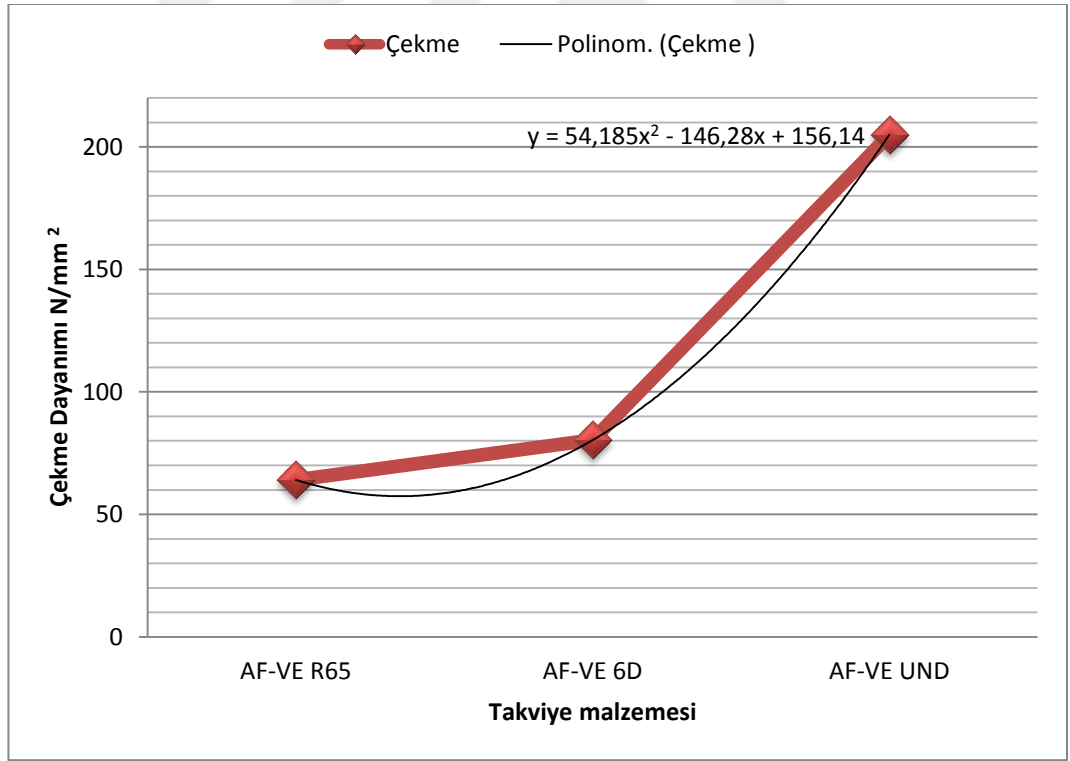
Malzeme*	Çekme gerilmesi N/mm ² (MPa)	Standart Sapma	Uzama %
AF-VE R65	64,05	9,42	2,68
AF-VE 6D	80,33	7,17	4,65
AF-VE UND	204,98	27,65	5,31

*Tüm sonuçların ortalama değerleri verilmiştir

Tek yönlü aramit elyafın çekme gerilmesi dayanımı diğerlerine göre nispeten çok yüksekken cam ve bazalt elyafa göre düşüktür. Bu durumda daha önce (bkz. bölüm 4.2.1) bahsedilen sebeplerden ve basınçlı üretim yönteminde elyaf yönünün tam olarak kontrol edilememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



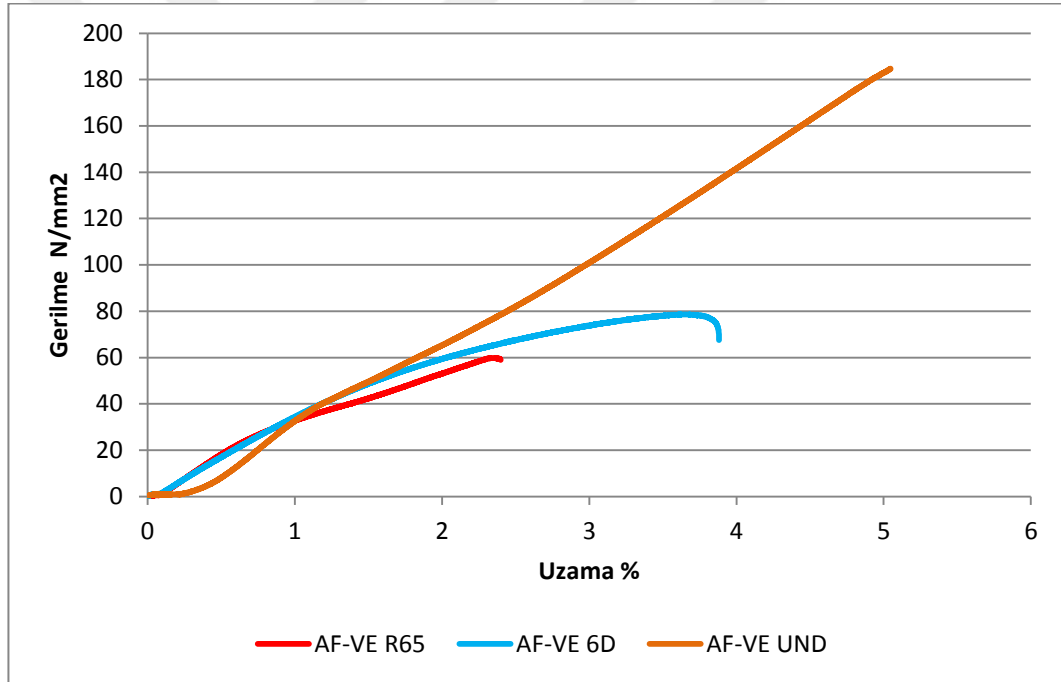
Şekil 4.45. Farklı aramid elyafı SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları



Şekil 4.46. Farklı aramid elyafı SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları

Aramit elyafly SMC kompozitlerin çekme gerilmesi değerlerine göre sıralama yapılıp Şekil 4.46’da görülen grafik çizdirildiğinde, elyaf tipine göre lineere yakın bir ilişki gözlemlenmiştir. Bu ilişkinin eğilme gerilmesindeki değişimi sonraki bölümde açıklanacaktır.

Aramit elyafın çekme gerilmesi-birim deformasyon eğrileri Şekil 4.47’de gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde tek yönlü aramit elyafın hem çekme gerilmesi ve birim deformasyonu hem de tokluk değerleri diğerlerine nazaran çok daha iyidir. Dokuma elyafly aramit kompozitin kesikli rasgele elyafly aramit kompozite göre birim deformasyonu çok daha iyi iken çekme gerilmesi değerinde aşırı bir fark yoktur. Bu dokuma elyafly aramit elyafın tokluğunun daha iyi olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 4.47. Farklı aramit elyafly SMC numunelerin çekme gerilmesi-birim deformasyon eğrileri

4.6.2. Aramit elyaf takviyeli SMC kompozitlerin eğilme deney sonuçları

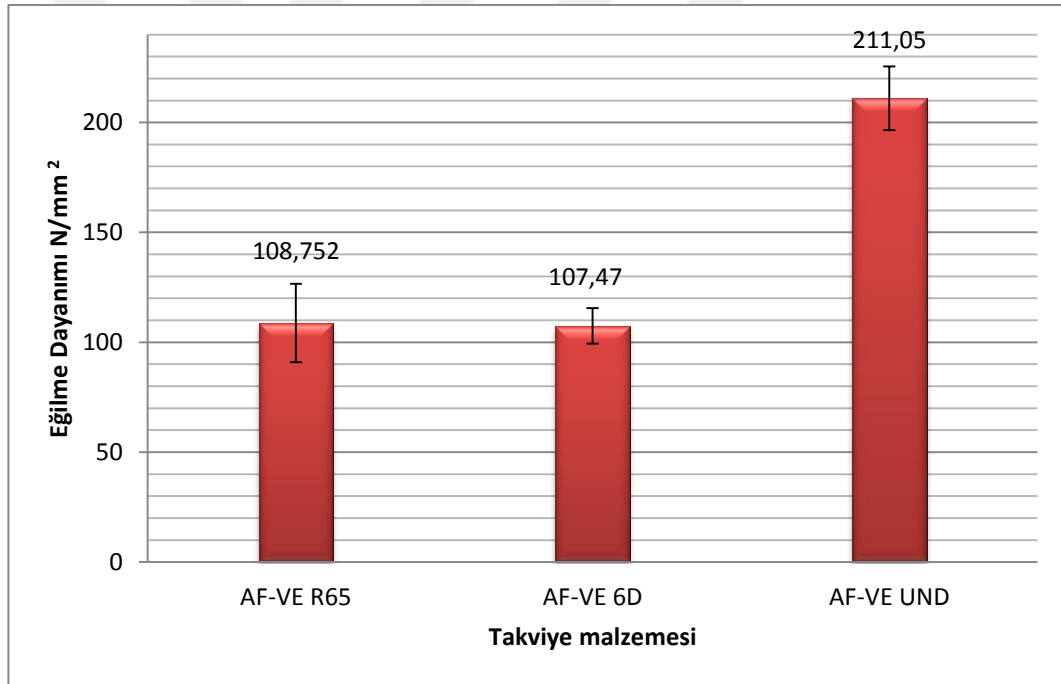
Aramit elyaf takviyeli SMC kompozitlerden elde edilen plakaların eğilme deney sonuçları Çizelge 4.17 ve Şekil 4.48.’de bir araya toplanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde altı kat dokuma aramit elyafın eğilme gerilmesi değerinin çekme gerilmesine değerine

oranla çok fazla düştüğü görülmektedir. Yine en yüksek değer sürekli aramit elyafı elde edilmişken en düşük değer kesikli rasgele aramit elyafı SMC kompozitte bulunmuştur. Bu iki kompozit arasında %95'lik bir artış söz konusudur.

Çizelge 4.17. Farklı aramit elyafı SMC numunelerin eğilme deneyi sonuçları

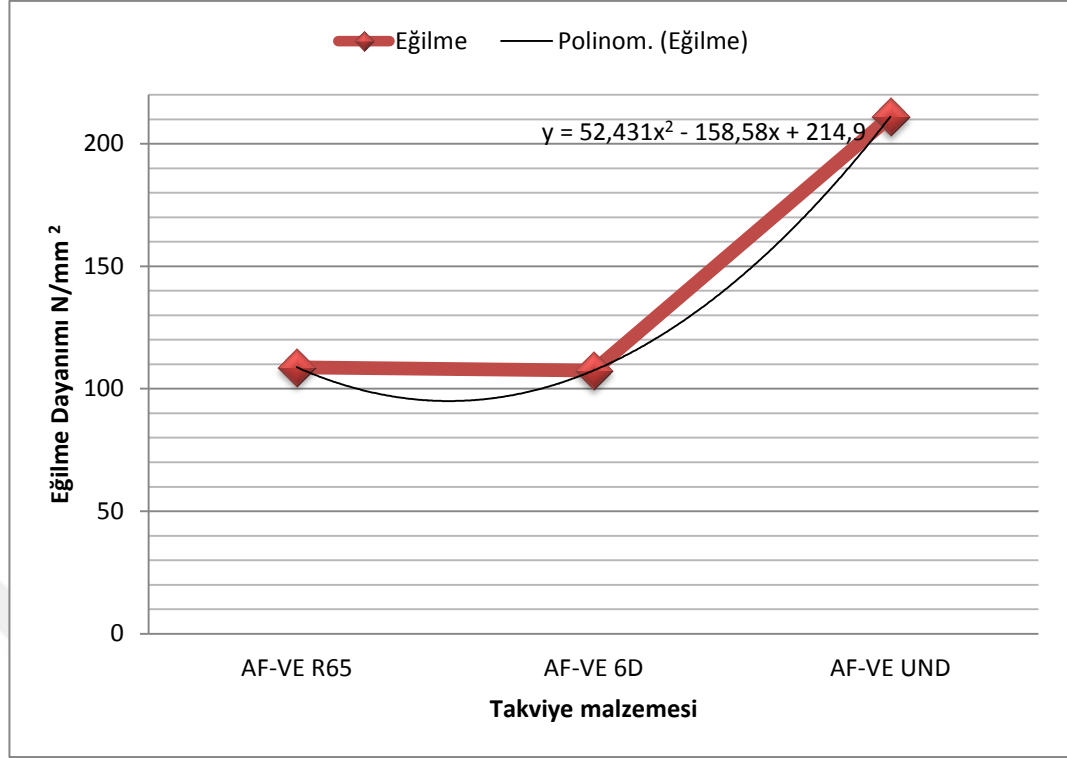
Malzeme*	Eğilme gerilmesi N/mm ² (MPa)	Standart Sapma
AF-VE R65	108,75	17,85
AF-VE 6D	107,47	8,11
AF-VE UND	211,05	14,51

*Tüm sonuçların ortalama değerleri verilmiştir



Şekil 4.48. Farklı aramit elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları

Aynı oran kullanılarak hazırlanan farklı tipteki aramit elyafı SMC kompozitlerde eğilme gerilmesi sonuçları arasında lineer bir ilişki olmadığı Şekil 4.49'da görülebilmektedir.



Şekil 4.49. Farklı aramid elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları

4.7. Karbon Elyaf Takviyeli SMC Kompozitler

4.7.1. Karbon elyaf takviyeli SMC kompozitlerin çekme deney sonuçları

İleri takviye malzemesi olan karbon elyaf, dayanım özelliklerinin istendiği birçok alanda kullanılmasına rağmen SMC kompozit üretimde araştırılma aşamasındadır. Farklı tipte üretilen karbon elyaf takviyeli SMC kompozitlerin çekme gerilmesi sonuçları Çizelge 4.18 ve Şekil 4.50’de bir arada verilmiştir. Karbon elyaf genelde epoksi reçine uyumludur ve yüksek performanslı parça üretiminde tercih edilir. Literatür incelendiğinde epoksi reçine ve farklı kompozit üretim yöntemlerinin kullanımı ile çok daha yüksek sonuçlar elde edilmektedir.

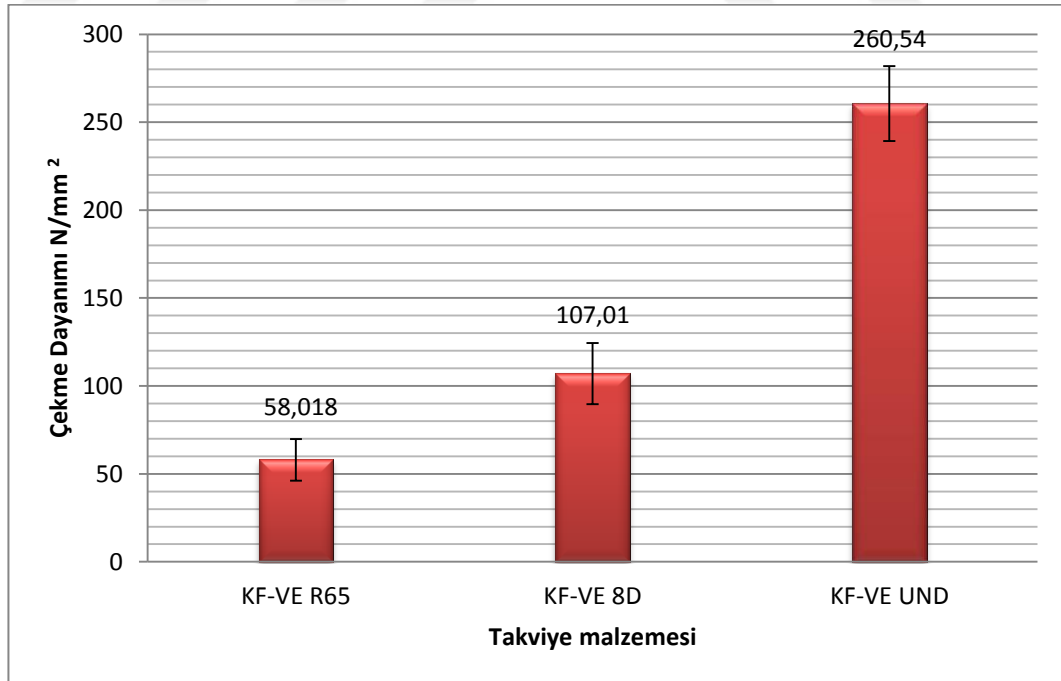
Çizelge 4.18 incelendiğinde kesikli rasgele karbon elyaf SMC kompozitten en düşük çekme gerilmesi değeri gözlemlenirken en yüksek değer sürekli elyaf takviyeli karbon elyaf arasında gözlemlenmiştir ve bu kompozitler arasında %348’lik bir artış söz konusudur.

Çizelge 4.18. Farklı karbon elyafı SMC numunelerin çekme deneyi sonuçları

Malzeme*	Çekme gerilmesi N/mm ² (MPa)	Standart Sapma	Uzama %
KF-VE R65	58,02	11,83	1,74
KF-VE 8D	107,01	17,32	5,33
KF-VE UND	260,54	21,33	6,01

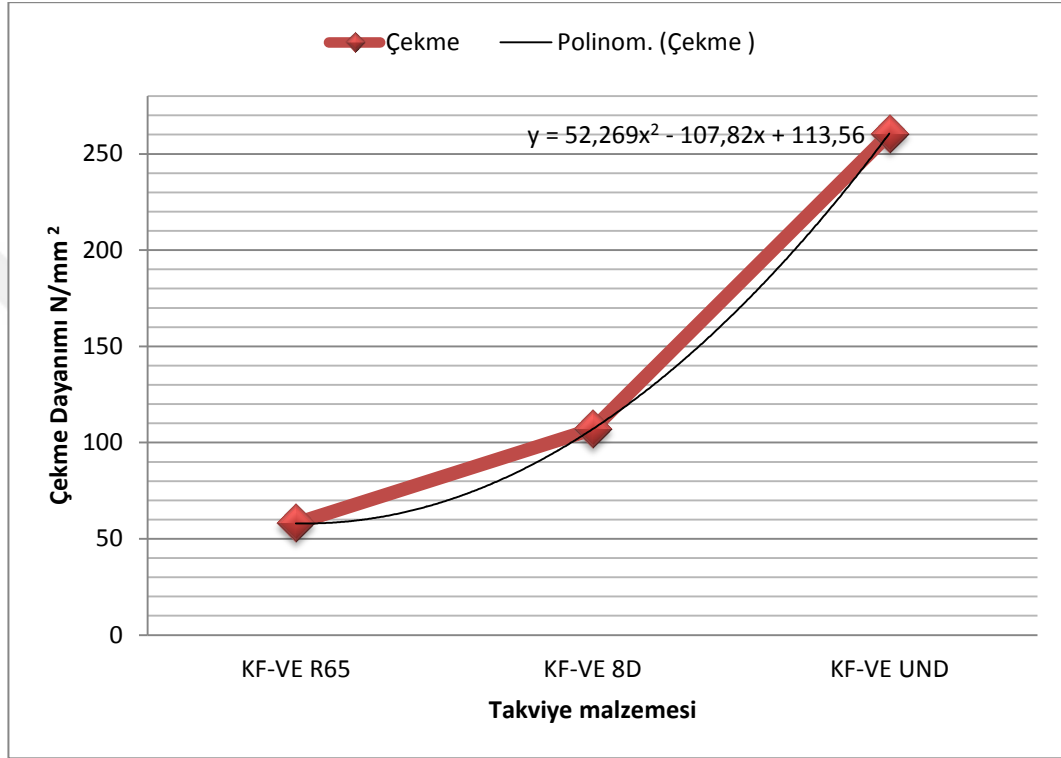
*Tüm sonuçların ortalama değerleri verilmiştir

Piyasada polyester ve vinil ester reçine uyumlu karbon elyaf bulmak pek mümkün değildir. Dow-aksa firmasının deneme amaçlı ürettiği vinil ester reçine uyumlu karbon elyaf ve seri üretime uygun SMC yöntemi kullanıldığı için sonuçlar beklenenden daha düşük çıkmıştır (Çizelge 4.18). Sonuçların düşük çıkmasının sebepleri yukarıdaki bölümlerde (bkz. bölüm 4.1.1) açıklandığı için burada tekrar edilmeyecektir. Karbon elyaf daha düşük yoğunluğa sahiptir ve kullanılan karbon elyaf dokumanın dokuma sıklığı daha düşüktür. Ağırlıkça aynı elyaf oranını (%20) sağlamak için karbon elyaf 8 kat kullanılmıştır.



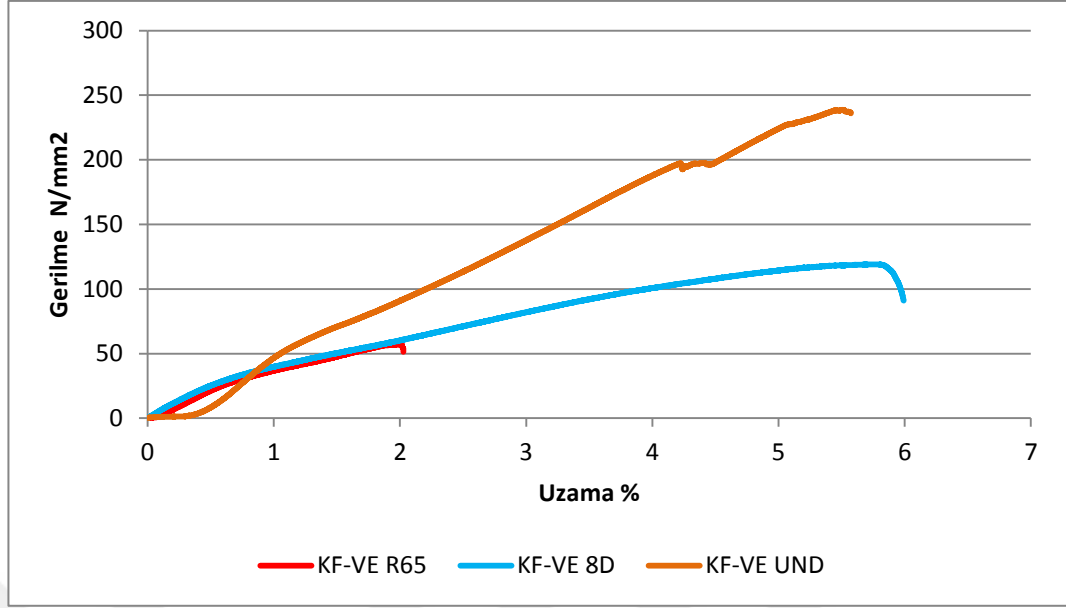
Şekil 4.50. Farklı karbon elyafı SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları

Kompozit malzemelerden elde edilen dayanım sonuçlarının varyasyon katsayıları üretimi etkileyen faktörlerin çok fazla olmasından dolayı yüksektir. Çizelge 4.18 ve Şekil 4.51’de verilen sonuçlar ortalama sonuçlardır ve aslında iyi ıslanma, düşük kusurlar ve iyi üretim koşulları sağlandığında bazı numunelerin daha iyi sonuçlar verdiği hatırd tutulmalıdır.



Şekil 4.51. Farklı karbon elyafı SMC numunelerin ortalama çekme deneyi sonuçları

Şekil 4.51. incelendiğinde karbon elyaf tipleri ile çekme gerilmesi sonuçları arasında daha lineer bir ilişki söz konusudur. Şekil 4.52’deki gerilme-birim deformasyon eğrileri incelenirse kesikli rasgele karbon elyaf SMC kompozitin birim deformasyon değeri küçüktür ve malzeme gevrek davranış göstererek hasara uğramıştır.



Şekil 4.52. Farklı karbon elyafı SMC numunelerin çekme gerilmesi-birim deformasyon değerleri

Sekiz kat karbon elyaf dokumanın birim deformasyon değeri neredeyse sürekli elyaf takviyeli karbon elyaf SMC kompozit kadardır. Fakat sürekli elyaf takviyeli karbon elyaf kompozitin çekme gerilmesi ve birim deformasyon değerinin daha yüksek olmasının doğal bir sonucu olarak tokluğu da daha yüksektir.

4.7.2. Karbon elyaf takviyeli SMC kompozitlerin eğilme deney sonuçları

Karbon elyaf takviyeli SMC kompozitlerin eğilme gerilmesi sonuçları Çizelge 4.19 ve Şekil 4.53' de verilmiştir. Kesikli rasgele elyafı SMC kompozit hariç çekme gerilmesi sonuçlarına yakın bir eğilme eğilme gerilmesi sonuçlarında da görülmektedir.

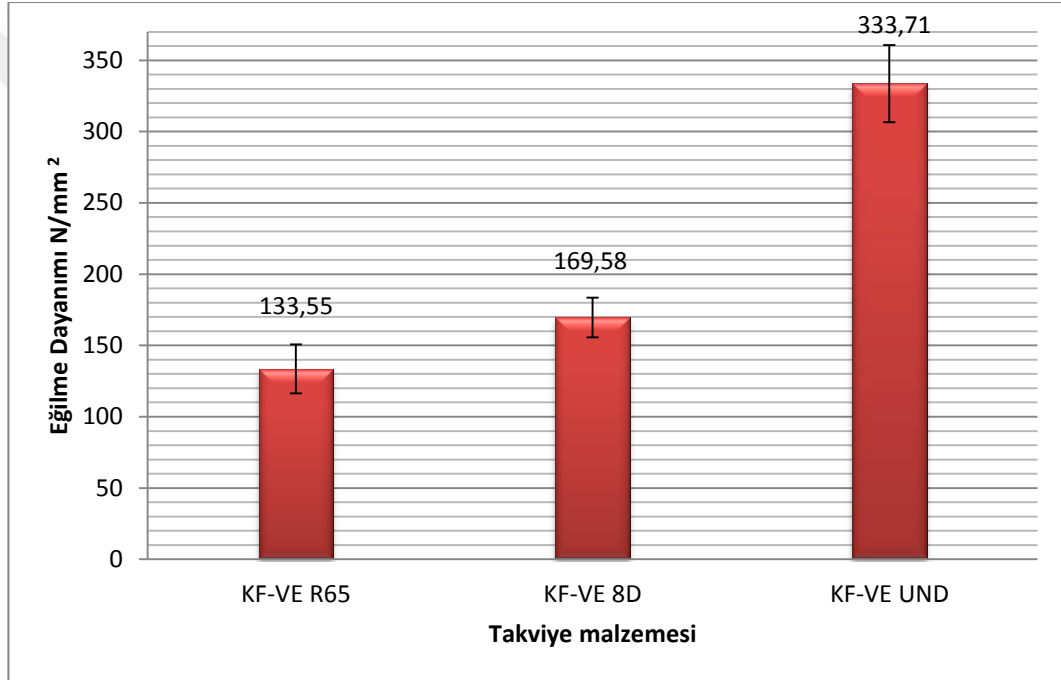
Çizelge 4.19. Farklı karbon elyafı SMC numunelerin eğilme deneyi sonuçları

Malzeme*	Eğilme gerilmesi N/mm ² (MPa)	Standart Sapma
KF-VE R65	133,55	17,25
KF-VE 8D	169,58	13,89
KF-VE UND	333,71	27,07

*Tüm sonuçların ortalama değerleri verilmiştir

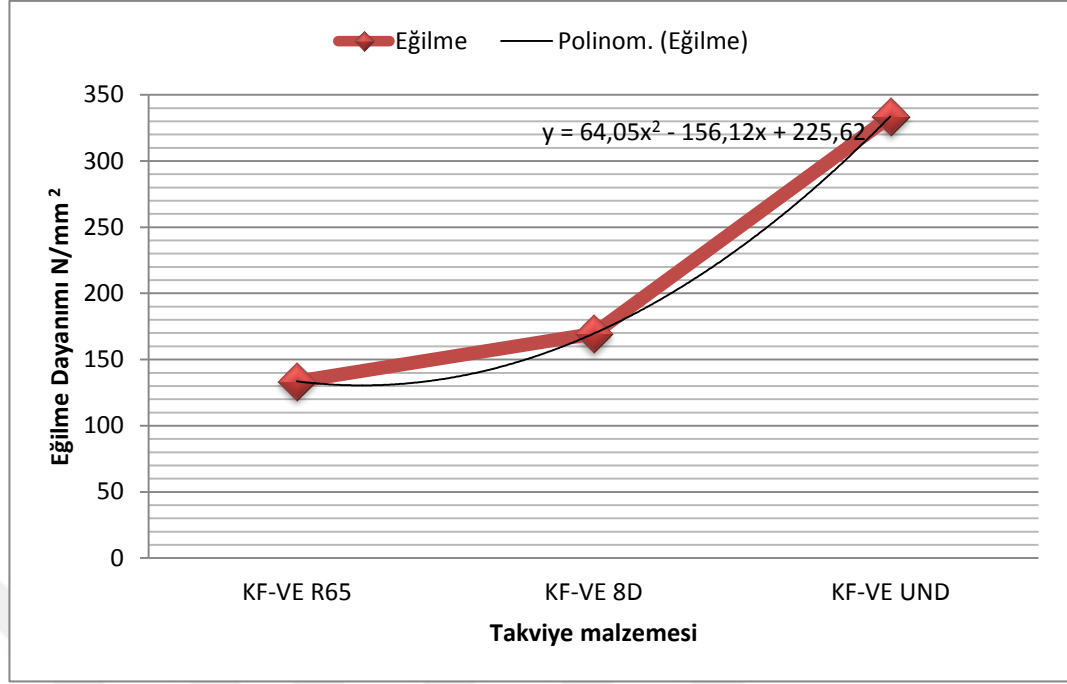
Sonuçlar incelendiğinde sekiz kat dokuma karbon elyafın eğilme gerilmesi değerinin düşük çıktığı görülmektedir. En yüksek değer sürekli karbon elyafı elde edilmişken en düşük değer kesikli rasgele karbon elyafı SMC kompozitte bulunmuştur. Bu iki kompozit arasında yaklaşık %150'lik bir artış söz konusudur.

Kesikli rasgele karbon elyaf takviyeli SMC kompozitin eğilme gerilmesi sonuçları çekme gerilmesine nispeten daha iyi çıkmıştır. Bunun sebebinin kompozit malzeme içerisinde elyaf matris arası bağlanmanın ve kusurların o bölgede daha iyi olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.53. Farklı karbon elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları

Bu sebeple Şekil 4.54' de görüldüğü gibi elyaf tipleri ile malzemenin eğilme dayanımı arasındaki lineer ilişki çekme gerilmesi değerlerine göre biraz daha değişmiştir ve daha non-lineer olmuştur.



Şekil 4.54. Farklı karbon elyafı SMC numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları

4.8. Farklı Dolgu Maddesi Kullanılarak Yapılan SMC Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemelerde yük etkisi altında oluşan gerilmeler sonucu hasar başlangıcı ilk olarak matris çatlakları ile ortaya çıkmaktadır. Matris malzemenin mekanik özelliklerini artırarak böylelikle hasar mekanizması geciktirilmiş ya da önlenmiş olacaktır. Bu sebeple çalışmanın bu kapsamında dolgu maddesi modifikasyonu ile matrisin mekanik özellikleri arttırılmaya çalışılmış ve başarılıdır. Bu amaçla kalsiyum karbonat (CaCO_3) dolgu maddesi yerine bazalt partikül kullanılmıştır.

Bazalt, özellikle mikro olarak öğütülebilmesi sayesinde polimer matrislerle kompozit hazırlamaya ve her türlü kompleks şeklin yapımına da imkan vardır (Todic ve ark. 2011, Colombo ve ark. 2012, Wei ve ark. 2011a). Yapılan bazı çalışmalarda polimer kompozitlere partikül katkısıyla malzeme özellikleri iyileştirilmesi araştırılmıştır.

Eslami-Farsani ve ark. (2014) kil dolgu maddesi ile takviye edilmiş polipropilen (PP) ile kırılmış bazalt elyaf ile takviye edilmiş PP-kil nano-kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kompozitlerin akma dayanımı ve Young Modülü düşük sıcaklıklarda azalırken yüksek sıcaklıklarda artmıştır. Bazalt partikülün diğer önemli

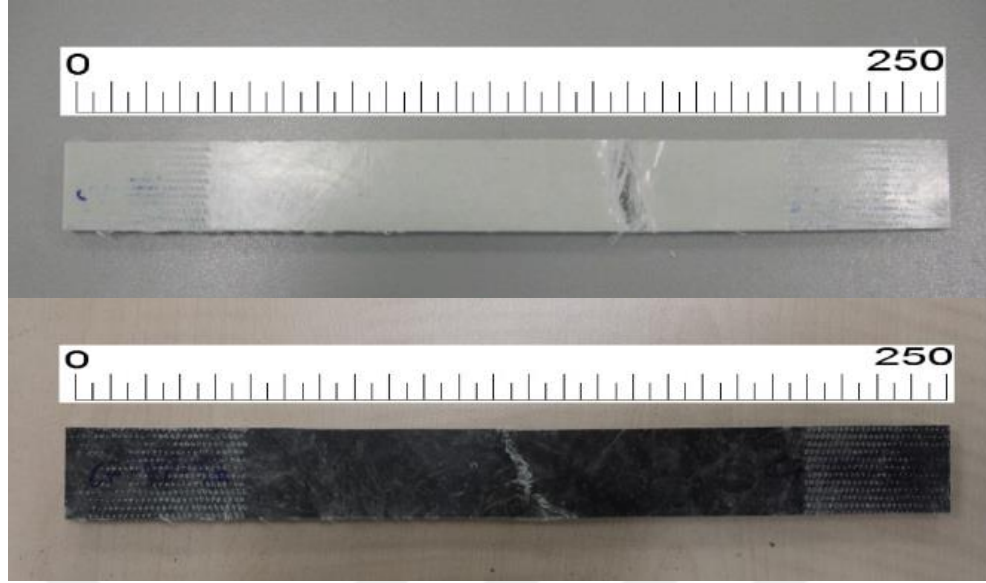
özelliği her türlü kalıplama yöntemi ile parça üretimine uygundur (Akinci ve ark. 2011, Akinci ve ark. 2009, Eslami-Farsani ve ark. 2014). Akinci ve ark. (2009) belli oranlarda, düşük yoğunluklu polietilen (DYPE) matris içerisine bazalt partikül takviyesi yaparak, enjeksiyon kalıplama yöntemiyle kompozit malzemeler üretmiş ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Aşınma özellikleri bazalt takviyesi ile iyileşmiştir.

Todic ve ark. (2011) çeşitli büyüklükte bazalt partiküllerden elde ettikleri kompozitleri incelemişler, daha iyi mekanik ve kimyasal dayanım elde etmişlerdir. Ayrıca parça üzerinde poroz ve baloncuk yapılar olmadığını da gözlemlemişlerdir. Özetle partikül katkısı ile kompozit malzemelerin mukavemet özelliklerinin arttığı literatürdeki çalışmalarla tespit edilmiştir.

4.8.1. Farklı dolgu maddesi kullanılarak yapılan SMC kompozitin çekme deney sonuçları

Kompozit malzemelerin mukavemeti, elyaf ile matris arasındaki ara yüzey mekaniği ile doğrudan ilişkilidir. Ara yüzey mukavemeti arttıkça kompozit malzemenin dayanımı da artmaktadır. Kimyasal ve mekanik olan bu bağlanmayı artırmak için son yıllarda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Partikül katkı maddeleri genellikle maliyet ucuzlatmada kullanılsa da üstün özellikli partikül katkılarla üretilen kompozit malzemelerin mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikleri iyileştirilebilmektedir (Cavdar ve Bingöl 2016).

Bu çalışmada yaygın olarak kullanılan CaCO_3 dolgu maddesi yerine, bazalt partikül katkısı eklenerek numuneler elde edilmiş böylelikle mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Çekme deneyi sonucu hasara uğrayan deney numuneleri Şekil 4.55’de verilmiştir.



Şekil 4.55. Test sonucu kırılan çekme numuneleri a) CaCO₃ katkılı, b) bazalt katkılı test numunesi

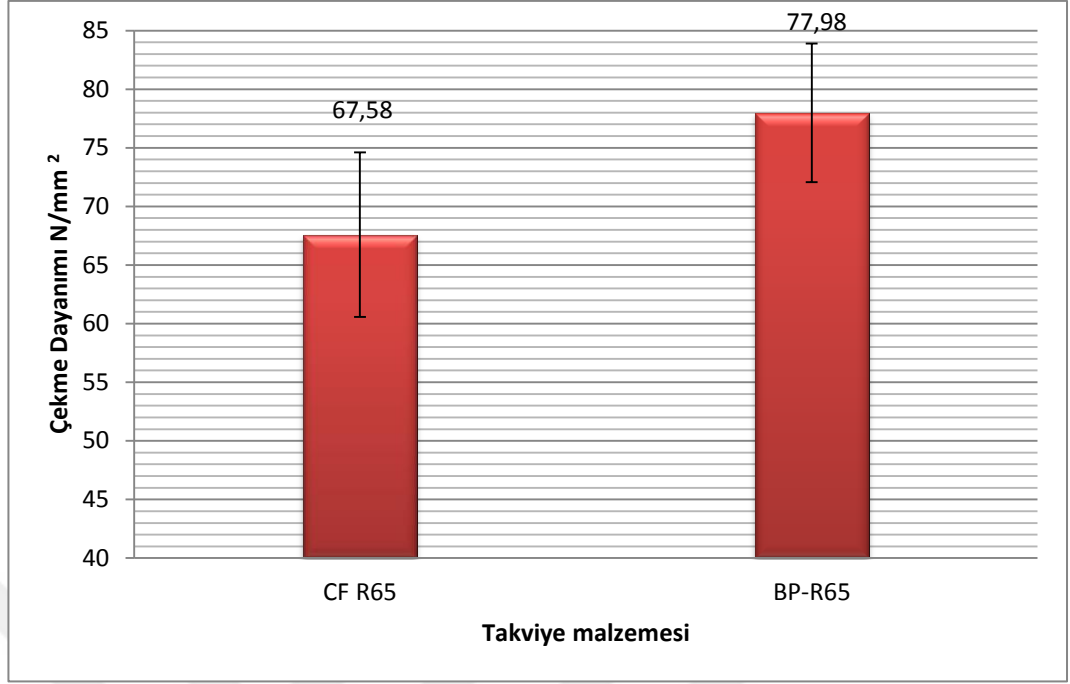
Kompozitlerde asıl mukavemeti sağlayan malzeme takviye malzemesidir. Bu bölümde bütün SMC kompozit plakalarda takviye malzemesi olarak cam elyaf kullanılmıştır. Bu nedenle çalışmada asıl incelenen takviye malzemesinin etkisi değil matris malzemenin mukavemet artışı ile kompozitin mukavemet değerine sağladığı katkıdır. Test sonuçları incelendiğinde çekme gerilmesinin değeri yaklaşık %15 artmıştır (Çizelge 4.20 ve Şekil 4.56).

Çizelge 4.20. CaCO₃ ve bazalt katkılı SMC numunelerin çekme deneyi sonuçları

Malzeme*	Çekme gerilmesi N/mm² (MPa)	Standart Sapma	Uzama %
CF R65	67,58	7,02	3,62
BP-R65	77,98	5,91	4,04

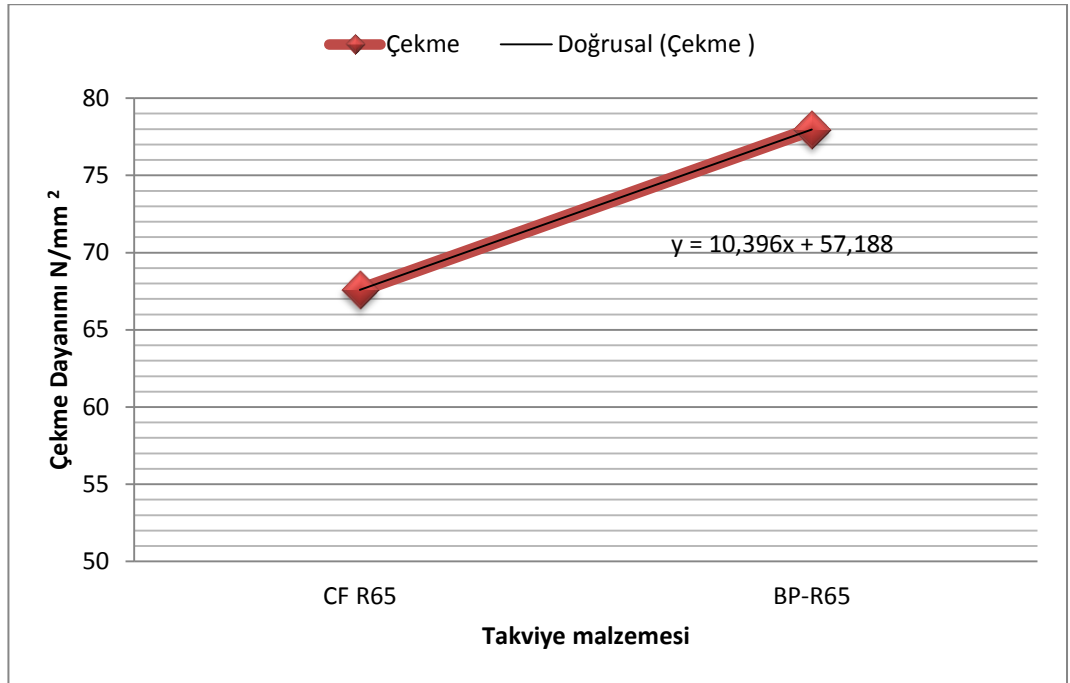
*Tüm sonuçların ortalama değerleri verilmiştir

Takviye malzemesi değiştirilmeden matris içerisindeki malzeme modifikasyonu yapılarak mukavemetin artırılması önemli bir sonuçtur. Böylelikle esas olarak nispeten matris malzemenin mukavemeti artırılmıştır.



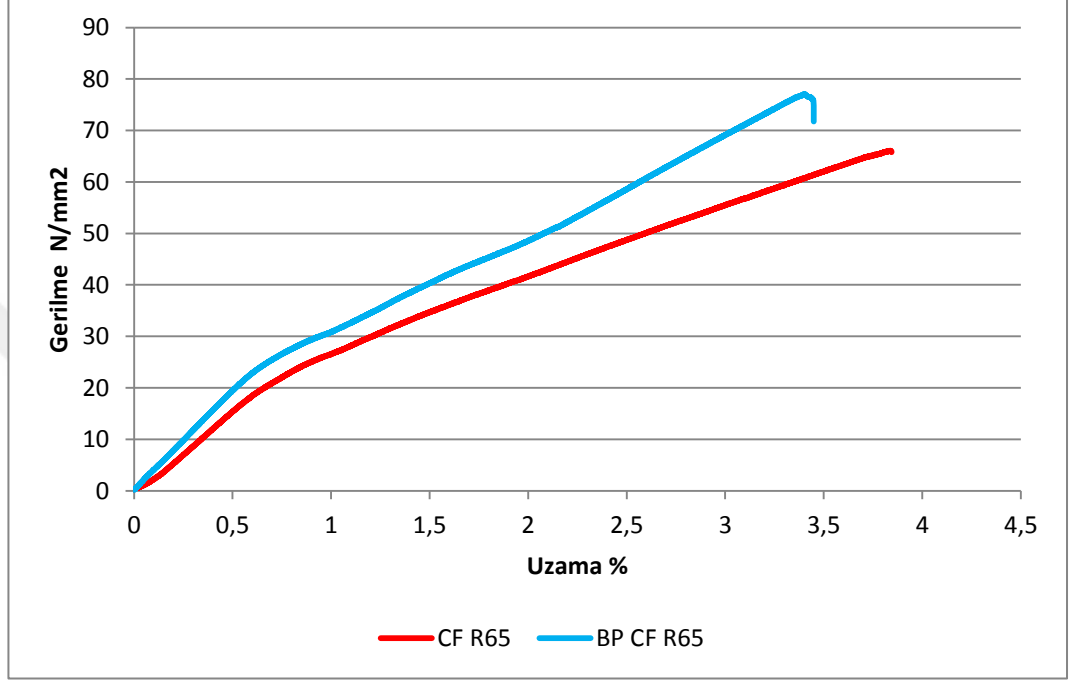
Şekil 4.56. CaCO₃ ve bazalt katkılı kompozitlerin ortalama çekme deneyi sonuçları

Bazalt partikül katkısı ile çekme gerilmesindeki artış Şekil 4.57'de daha açık görülmektedir.



Şekil 4.57. CaCO₃ ve bazalt katkılı kompozitlerin ortalama çekme deneyi sonuçları

Bazalt partikül katkısı matris malzemeyi daha iyi bir arada tuttuğu için mikro çatlakları engellemeye eğilimlidir. Bazalt partikül katkısı ile elde edilen numunelerin ortalama değerlerini temsil eden bir numuneye ait gerilme-birim deformasyon eğrileri Şekil 4.58’de görülmektedir.



Şekil 4.58. CaCO₃ ve bazalt katkılı kompozitlerin çekme gerilmesi-birim deformasyon eğrileri

Çekme gerilmesi-birim deformasyon eğrileri incelendiğinde bazalt partikül katkısı ile çok fazla birim deformasyon değeri değişmezken çekme gerilmesi değeri ve buna bağlı olarak kompozit malzemenin tokluk değeri artmıştır.

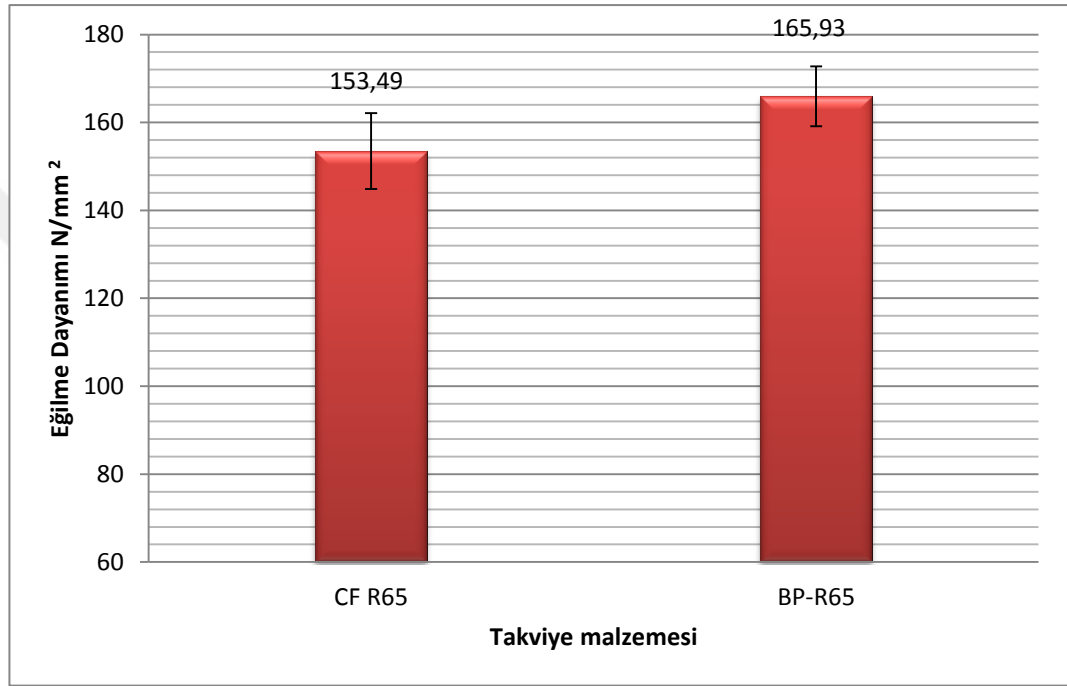
4.8.2. Farklı dolgu maddesi kullanılarak yapılan SMC kompozitin eğilme deney sonuçları

Bazalt partikül katkılı cam elyaf takviyeli SMC kompozitin eğilme deney sonuçları, çekme gerilmesi sonuçlarına benzer olarak artmıştır ve bu sonuçların ortalama değerleri Çizelge 4.21 ve Şekil 4.59’ da verilmiştir.

Çizelge 4.21. CaCO₃ ve bazalt katkılı SMC numunelerin eğilme deneyi sonuçları

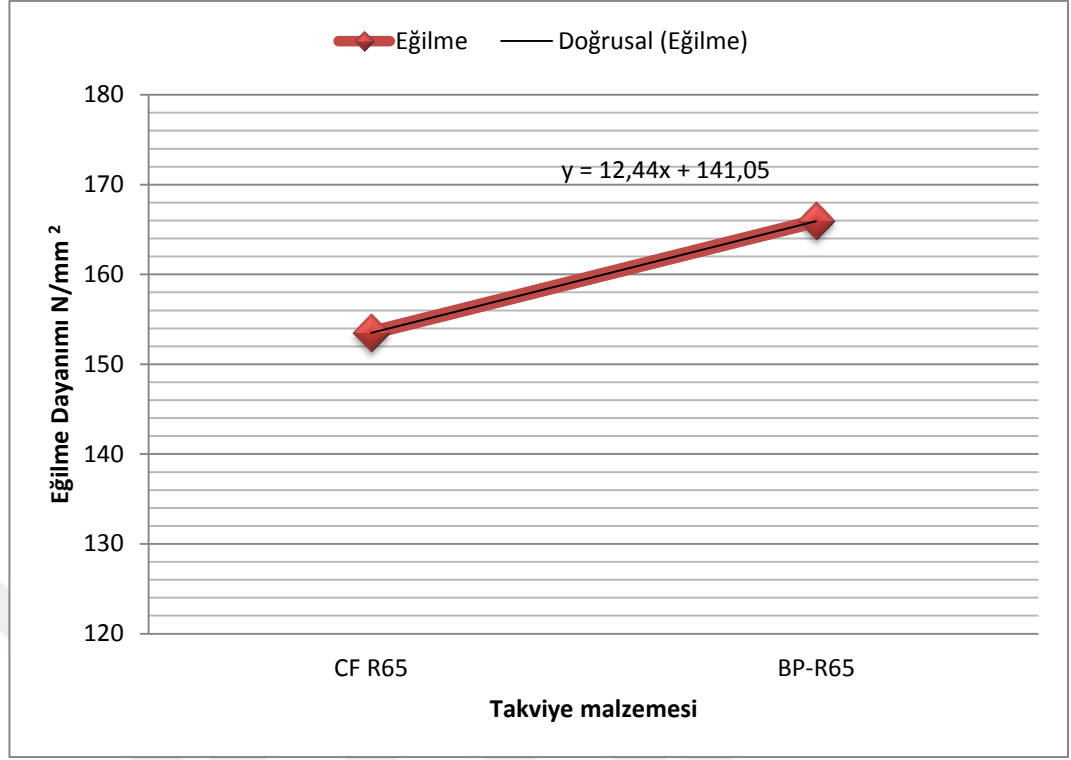
Malzeme*	Eğilme gerilmesi N/mm ² (MPa)	Standart Sapma
CF R65	153,49	8,61
BP-R65	165,93	6,82

*Tüm sonuçların ortalama değerleri verilmiştir



Şekil 4.59. CaCO₃ ve bazalt katkılı kompozitlerin ortalama eğilme deneyi sonuçları

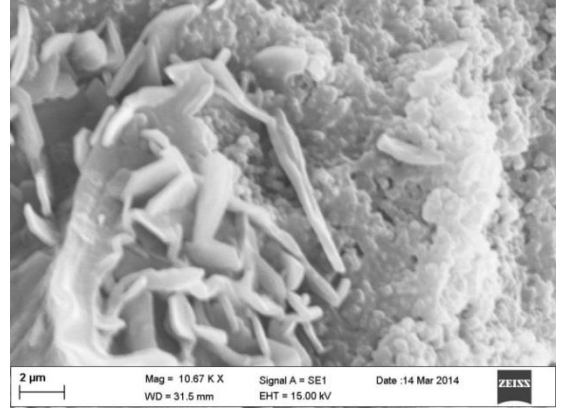
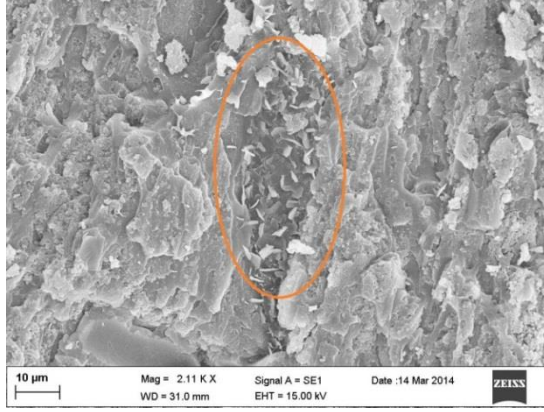
Eğilme gerilmesindeki artış eğilimi çekme gerilmesindeki artış eğilimi kadar olmamıştır. Bu durumu gösteren grafik Şekil 4.60' da görülmektedir. Bazalt partikül katkısı ile eğilme dayanımında %8'lik bir artış olmuştur.



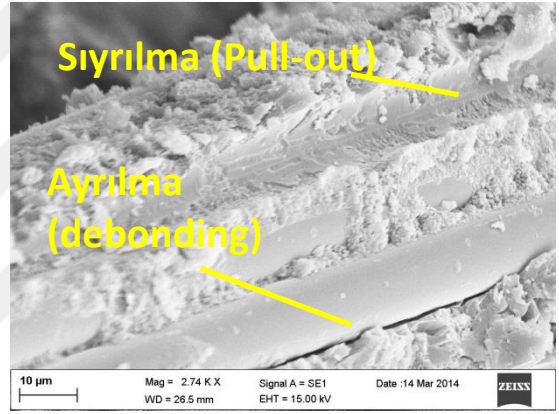
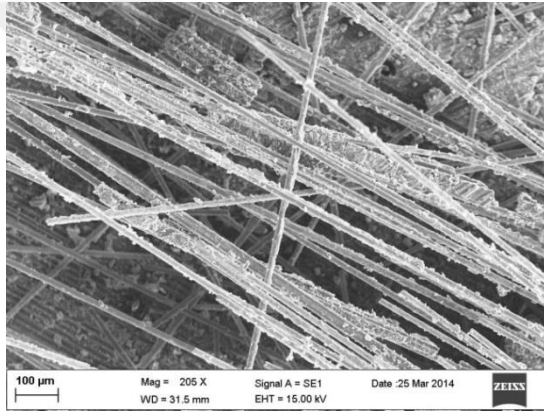
Şekil 4.60. CaCO₃ ve bazalt katkılı kompozitlerin ortalama eğilme deneyi sonuçları

4.8.3. Farklı dolgu maddesi kullanılarak yapılan SMC kompozitin yüzey karakterizasyonu

SEM cihazı ile test numunelerinin kırılma yüzeyleri incelendiğinde; bazalt partikül katkılı kompozit malzemeler içerisindeki partiküller matris içerisinde takviye malzemesi bir elyaf gibi matrisi bir arada tutmaktadır. Böylelikle partiküller ilk hasar oluşum aşamalarından olan matristeki mikro çatlakların oluşmasını nispeten geciktirmiş veya engellemiş olmaktadır. Hasar mekanizmasının gecikmesinin sonucu olarak kompozitin mekanik özelliklerinde artış gerçekleşmektedir. Bu durum Şekil 4.61’de açıkça görülmektedir.



Şekil 4.61. Bazalt partikül katkı SMC kompozit malzemelerin belli oranlarda büyütülmüş SEM görüntüleri



Şekil 4.62. CaCO₃ dolgu maddeli SMC kompozitin belli oranlarda büyütülmüş SEM görüntüsü

Dolgu maddesi olarak CaCO₃ kullanıldığında elde edilen çekme numunelerinin test sonucu kırılma yüzeyleri incelendiğinde elyaf üzerinde yüzeyi saran dolgu maddesi görülmektedir (Şekil 4.62 a). Bu dolgu maddesi Şekil 4.62 b' de görüldüğü gibi elyafla matris arasındaki ara yüzey dayanımını azaltmaktadır. Yetersiz ara yüzey dayanımı ile elyafın matristen daha kolay biçimde sıyrıldığı (pull-out) veya ayrıldığı (debonding) düşünülmektedir. Bu olayda mukavemet değerlerinde azalmaya neden olmaktadır.

5. SONUÇ

Modern imalatlarda yüksek mekanik ve teknolojik özelliklere ihtiyaç olduğunda geleneksel malzemeler bunlara cevap veremez. Yüksek mukavemet ve düşük kütle talepleri birbiri ile çelişen iki mühendislik isteği olup ancak kompozit malzemeler bunları sağlarlar. Bu nedenle kompozit malzemelerin endüstride kullanımları giderek zorunlu hale gelmiştir.

SMC yüksek mukavemetli parçaların seri olarak üretildiği başta otomotiv olmak üzere birçok alanda kullanılan termoset bir polimer kompozit yöntemidir. Kompozit malzemeler matris ve takviye malzemesi olarak iki ana bileşenden oluşmaktadır. Kompozitlerde mukavemeti sağlayan malzemeler elyaflardır ve mekanik özellikleri iyileştirmek için genellikle elyaf takviye malzemeleri modifiye edilmektedir. Bundan dolayı bu çalışmada SMC yöntemi ile üretilen polimer kompozit plakalarda cam elyaf için farklı uzunluk, oran ve tipteki elyaflar kullanılmıştır. Çalışılan laboratuvar koşullarında farklı elyaf oranlarında üretilen plakalardan en iyi ıslanma %20 oranında sağlandığı için sadece bu orandaki sonuçlar verilip diğerlerinin verilmesine gerek görülmemiştir. Kompozitin performansını daha iyi arttıran ileri elyafların (bazalt, karbon, aramit) yine farklı tipleri kullanılarak SMC plakalar üretilmiştir. Çalışmaların hepsinin birbiri ile kıyaslanabilir olması için bütün SMC plakalarda elyaf oranı ağırlıkça %20 alınmıştır.

SMC malzeme ile yapılan kompozitlerin içerisine birçok farklı malzeme bulunmaktadır ve içeriğindeki bu malzemelerin standart bir formülasyonu yoktur. Firmalar kendi ihtiyaçlarına yönelik hazırladıkları formüllerle üretim yapmaktadır. Literatürdeki yapılan çalışmalarda da formülasyon içeriğinin tamamı verilmemekle birlikte üretim koşulları değişebilmektedir. Bunun yanı sıra kullanılan malzemelerin özellikleri de farklılık gösterebilir. Tüm bu koşulları sağlamak pek mümkün değildir. Bu sebeple literatürde verilen test sonuçlarını kullanmak yerine aynı formülasyon ve üretim koşulları ile bu testlerde tekrar edilmiş böylece daha gerçekçi karşılaştırmalar yapılabileceği düşünülmüştür.

Elyaf modifikasyonu için ilk olarak kesikli rasgele cam elyaflar kullanılmıştır. Normalde elyaf uzunluğu arttıkça malzeme mukavemeti de artmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde bu durum 65 mm elyaf uzunluğuna kadar devam ederken bu değerden sonra 75 mm elyaf uzunluğuna kıyasla çekme gerilmesi değerinde yaklaşık %20'lik bir düşüş söz konusu olmuştur. Bu durumun basınç etkisi ile şekillendirilen SMC plaka içinde uzun elyafların bükülmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bükülen elyaflar, hem düzensiz takviyelendirme yapar hem de yükleme doğrultusuna dik yönde olmadığı için daha düşük gerilmeler altında kayma gerilmelerinin etkisi ile malzeme hasara uğramaktadır.

Kompozit malzemeler heterojen ve anizotrop malzemelerdir. Kesikli rasgele elyaf dağılımlı SMC kompozit malzemenin dik yönde kırık yüzey görüntülerinde elyafların mikro ölçekte heterojen ve anizotrop olduğu görülür. Parçanın kırık yüzeyi incelendiğinde malzeme içerisinde kimi bölgelerde elyaf yığılmaları olurken kimi bölgelerde sadece matris malzeme bulunmaktadır. Elyafların yığılmaları matrisin elyafı iyi ıslatamamasından dolayı pek istenen bir durum değildir. Ayrıca SMC kompozit malzeme hazırlanırken dolgu maddesi reçine ile homojen bir şekilde karıştırıldığı için plakalar üretildikten sonra malzeme iç yapısında bu dolgu maddesinin homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Bunların dışında matris ile elyafın birbiri ile olan ilişkisine bakılırsa elyafların bir kısmı zayıf ara yüzey bağından dolayı sıyrılıp çıkarken (pull-out), bir kısmı ise güçlü ara yüzey bağından dolayı koparak ayrılmıştır. Ayrıca matris içerisinde mikro boşluklar gözlemlenmiştir. Diğer taraftan numunenin iç yapısında elyafların farklı yönlerde rasgele dağılımı görülmüştür. Elyafların sadece bir kısmı kuvvet yönünde olduğu için yük etkisinde sürekli ve dokuma elyaflara göre daha düşük mekanik özellikler ortaya çıkmaktadır.

Sonraki çalışmada daha önceki cam elyaf çalışmasında elyaf uzunluğu olarak en iyi performansı kesikli 65 mm'lik elyaf verdiği için farklı ileri elyaflarda da 65 mm uzunluk tercih edilmiş, rasgele dağıtılarak üretilen kesikli elyafı SMC kompozit plakalar yukarıda anlatıldığı gibi standartlara uygun olarak test edilmiştir. Kompozitlerde asıl mukavemeti sağlayan takviye malzemesinin görevini tam olarak yerine getirmesi için matris ile uyumlu olmalı ve üretim koşullarına uygun olarak

malzemeler birleştirilmelidir. Daha iyi özelliklere sahip bazalt, aramit ve karbon elyafın çekme gerilmesi değerinin çok daha yüksek olması gerekirken aksine beklenenden düşük çıkmıştır.

Bu matris ile elyafın tam olarak iyi ara yüzey bağı kuramamasından kaynaklanmaktadır. Elyafı bir arada tutan matris, elyafarla fiziksel ve kimyasal olarak iyi bağlanmadığı için nispeten daha düşük kuvvetlerde kırılarak daha sonra bu elyafı bir arada tutamamaktadır. Ayrıca elyaf çaplarındaki farklılıklar ve elyaf yüzey alanını çok fazla artması ile böylelikle dolgu oranı yüksek SMC reçine ile cam elyaf dışında kalan diğer elyafı ıslatmak da çok daha zordur. Elyaf arasındaki reçine yığılmaları da kesit üzerindeki dayanım değerini düşürecektir. Tüm bu faktörler neticesinde ileri elyafı SMC kompozitler için sonuçlar beklenenin aksi yönde çıkmıştır. Sonuç olarak piyasada bulunan mevcut karbon ve aramit elyafının vinil ester reçine ve yüksek dolgu oranı ile SMC yöntemi için kullanımının daha fazla geliştirilmesi gerektiği düşünülmektedir. Yapılan son çalışmalarda SMC'ye uygun geliştirilen epoksi reçine ile bu durum biraz daha geliştirilmeye çalışılmıştır.

Sürekli elyaf takviyeli SMC kompozitlerde malzeme basınç etkisi altında şekillendiği için elyafı yüzde yüz kontrol etmek mümkün değildir. Normalde elyaf (pestil malzeme içerisinde daha önce yönlendirilmiş) kalıp kenarına 0° paralel olacak şekilde kalıba yerleştirilmesine rağmen basınç etkisi ile elyafın açılarında kayma olmuştur. Elyafın açılarının değişmesinden dolayı normal gerilmenin yanında kayma gerilmelerinin de etkisi ile çok eksenli gerilmeye maruz kalan matriste kayma gerilmesi çatlakları da oluşmuştur. Matris çatlağı elyaf doğrultusunda boyuna ilerleyerek malzeme hasara uğramıştır. Numunelerin ortalama değerlerini incelendiğinde 69,64 MPa ile bazalt elyaf en düşük değerde çıkarken 260,54 MPa ile karbon elyaf en yüksek değerde çıkmıştır. Aynı üretim koşulları ve formülasyon kullanılmasına rağmen farklı elyafın kullanımı ile çekme dayanımı yaklaşık %376 artmıştır. Normalde epoksi reçine ve basınçsız kompozit üretim yöntemleri ile elde edilen karbon elyaf takviyeli kompozitlerin çekme dayanım özellikleri literatürde daha yüksek verilmiştir. SMC yöntemi ile üretilen karbon elyaf takviyeli kompozitler hem daha ucuz olan vinil ester reçine hem de dolgu maddesi kullanılarak daha ucuz malzemelerin elde edileceği

düşünülmektedir. Ayrıca özellikle otomotiv sektöründe hayati önemi olan kısa çevrim süresi ile çok daha kısa sürede parçalar üretilebilmektedir.

Farklı kat sayılarında yapılan dokuma cam elyaf takviyeli SMC kompozit sonuçları incelendiğinde en fazla birim deformasyon altı kat cam dokuma elyaf ile üretilen SMC kompozitte bulunmaktadır. Ayrıca buna bağlı olarak en yüksek çekme gerilmesi ve elastisite modül değeri de yine bu kompozite aittir. Dokuma elyafı SMC kompozitin hasar mekanizması incelenirse; elyaflar numune boyunca sıra ile dizildiği için yük numune kesiti boyunca dağılmakta matris belli bir noktadan kırılmaktan çok uzunluk boyunca çatlak oluşturma eğilimli olmaktadır. Uygulanan kuvvet etkisi ile elyaflara normal yönünde gerilme oluştururken aynı zamanda kayma gerilmeleri etkisinde enine çatlaklar da oluşturmaktadır. Ayrıca dokuma elyaftaki bağlantı noktalarında reçine havuzları, boşluklar ve düşük ıslanma eğilimi vardır. Gerilme etkisi altında normal ve kayma gerilmeleri etkisi altında ilk önce matris çatlakları oluşacak. Bahsedilen kusurlardan dolayı matris ile elyaf arasında lokal ayrılmaların yanında ara yüzey dayanımı kötü olan elyaflar sıyrılacak (pull-out) iyi olanlar kopacaktır. Bunların dışında üst üste yerleştirilen dokuma elyaf tabakaları arasında hem reçine havuzlarının olması hem de eğilme cevabı uyumsuzluğu sebebiyle tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) gerçekleşerek en son malzeme hasara uğrar.

Altı kat Dokuma cam elyafı SMC kompozit malzemelerin SEM görüntüleri incelenirse elyaf ve matris ara yüzey yapışması iyi olduğu için malzeme yükleme esnasında belli bir miktar uzayarak plastik deformasyona uğramıştır. Hasar küçük matris çatlakları ile başlayıp kuvvet arttıkça aynı zamanda plastik deformasyon artmış, tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) ile beraber matristeki çatlaklar büyüyüp bazı yerlerinde parçalanarak malzeme hasara uğramıştır. Kuvvete karşı olan bu direnç hem elyafların sıyrılmamasından (pull-out) hem de çok az elyafların kopmasından kaynaklanmaktadır. Hatta matrisin çatlayarak parçalanmasına rağmen bazı elyafların üzerinde yapışık kalması iyi ara yüzey dayanımını desteklemektedir. Elyaflar 0° ve 90° (enine ve boyuna) dokunmuştur. Bu malzemenin iki boyutta mukavemetli olmasını sağlamaktadır. Uygulanan kuvvet yönünde olan elyafların olması matris malzemenin yükü elyaflara ileterek malzemenin daha yüksek dayanımlara ulaşmasını sağlamaktadır.

İleri elyafli dokuma elyaf takviyeli SMC kompozitlerde ise en yüksek çekme gerilmesi, birim deformasyon değerinin ve buna bağlı olarak en yüksek elastisite modülü ve tokluk değerinin bazalt dokuma elyafli SMC kompozit numunede çıkmıştır. Bu en sert ve sağlam malzemenin olduğu anlamına gelir. Maliyet olarak düşük değere sahip, çevreci bir malzeme bazalt dokuma elyaf SMC kompozitlerde tercih edilebilir. Grafikler ve çizelgeler incelendiğinde alışılmamış sonuçlar ortaya çıkmıştır. Çekme dayanımı ve elastisite modülü en yüksek olan karbon ve aramit elyafın, SMC kompozitte kullanıldıktan sonra kompozitin çekme dayanımının deney sonucunda en yüksek çıkması beklenirken cam elyaftan bile daha düşük çıkmıştır. Cam ve bazalt elyafli SMC kompozitlerin sonuçları beklenen düzeylerde dir. Bu sonuçların sebepleri incelenirse; daha fazla kat sayısı olan karbon elyafı matris malzemenin yeterince ıslatamadığı için yeterli elyaf-matris ara yüzey dayanımı elde edilememiştir. Tabakalar arası yeterli miktarda matris olmadığı için bağlanma iyi sağlanamaz ve neticede gerilme etkisinde başlayan matris çatlakları ve devamında tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) ile malzeme hasara uğrar. Aramit elyaflar ise elyaf yüzeylerinin diğer elyaflara göre daha kaygan olması yine yeterli ara yüzey dayanımı sağlayamamaktadır. Böylelikle yüklemeye esnasında normal ve kayma gerilmeleri etkisinde matris çatlakları daha kolay oluşmakta matris yükü elyaflara tamamıyla iletemeden malzeme hasara uğramaktadır.

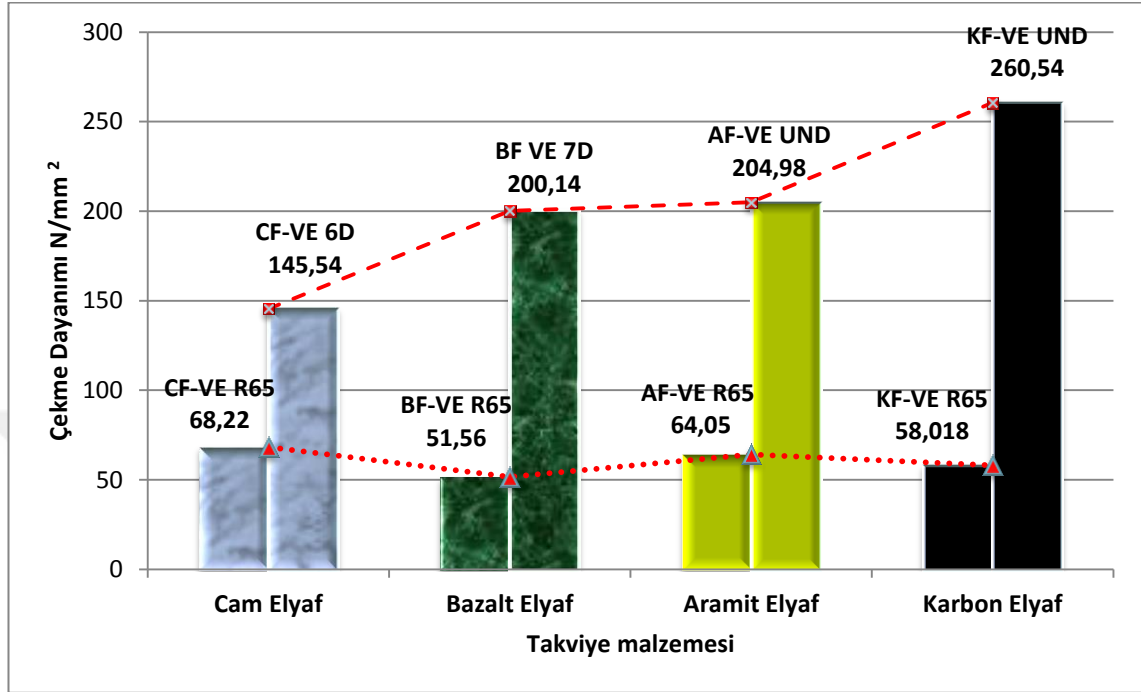
Cam elyafın çeşitli uzunluk, oran ve tipleri için elde edilen sonuçların hepsi kendi aralarında değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda en yüksek değerin vinil ester reçine ile üretilen altı kat cam elyaf dokumalı SMC kompozit numunenin verdiği görülür. Öte yandan hem kesikli rasgele hem de dokuma elyaf ile üretilen SMC plakalarda farklı reçine kullanımının mekanik özelliklere çok ciddi bir katkısının olmadığı görülmüştür. Tasarımlarda malzeme seçimi yapılırken maliyeti daha yüksek olan vinil ester reçine ile reçinenin kürleşme süresi (SMC yöntemi için polyesterin iki katı) dikkate alınmalıdır. Bu farka değecek düzeyde ise seçim yapılır değilse gerek yoktur.

Ayrıca bazalt, aramit, karbon elyafların çeşitli uzunluk, oran ve tipleri için elde edilen sonuçların hepsi kendi aralarında değerlendirilmiştir.

Son yıllarda birçok kompozit malzeme üretim yönteminde kullanılan malzemelerden biri olan bazalt, cam elyafa göre daha iyi mekanik özellikler, karbon elyafa göre düşük üretim maliyetlerinden dolayı kullanılmaya başlanmıştır. Bazalt elyaf, yüksek tokluk, iyi mekanik ve termal özellikleri, çevreye duyarlı olmasından dolayı tercih edilen bir elyaf olmaya başlamıştır. Bu tez çalışması kapsamında SMC kompozit üretim yönteminde ilk kez kullanılan bazalt elyafın her tipi kullanılmaya çalışılmıştır. Bazalt elyaf daha sonra diğer elyaflarla kıyaslanmıştır.

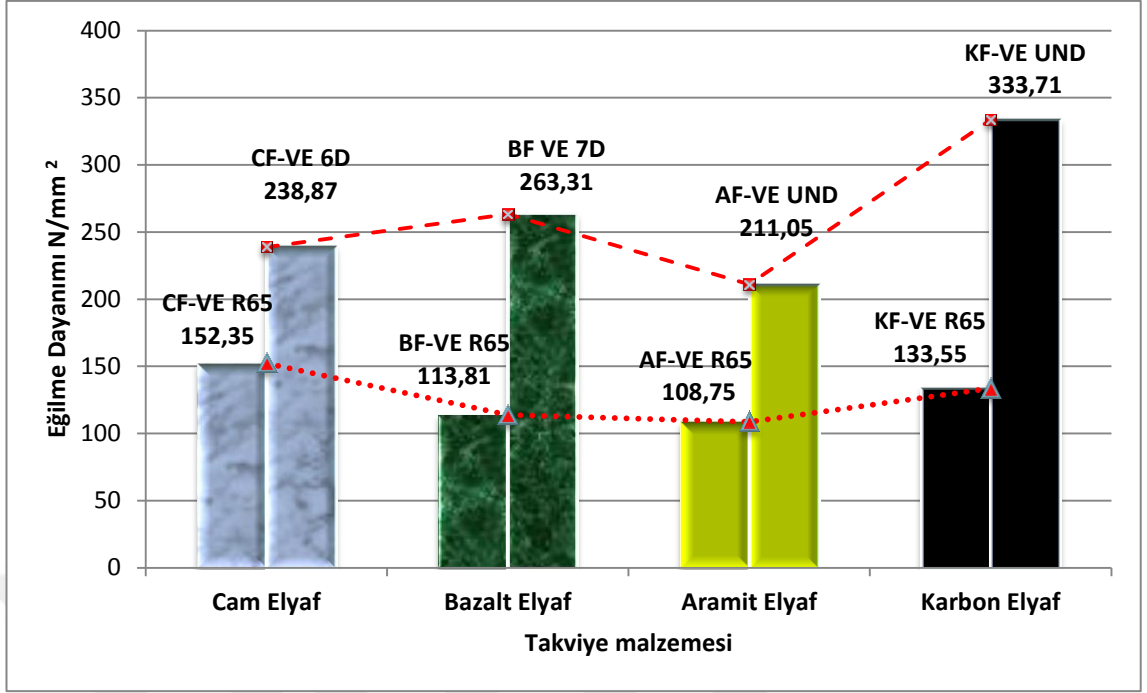
Kompozit malzemelerde hasar genellikle matris malzemede oluşan çatlaklar ile başlamaktadır. Daha sonra çatlaklar ilerleyerek matris ile elyaf ayrılmakta en son elyaflar kırılarak malzeme hasara uğramaktadır. Bu nedenle sadece elyafların modifikasyonu ile yetinilmeyip ayrıca matrisin mekanik özelliklerini iyileştirmek için matris malzeme modifikasyonu da yapılmıştır. Bu amaçla dolgu malzemesi kalsiyum karbonat (CaCO_3) yerine bazalt partikül kullanılarak daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Kompozitlerde asıl mukavemeti sağlayan malzeme takviye malzemesidir. Farklı dolgu maddesi ile üretilen SMC kompozit plakalarda takviye malzemesi olarak cam elyaf kullanılmıştır. Bu nedenle çalışmada asıl incelenen takviye malzemesinin etkisi değil matris malzemenin mukavemet artışı ile kompozitin mukavemet değerine sağladığı katkıdır. Test sonuçları incelendiğinde çekme gerilmesinin değeri yaklaşık %15 artmıştır. Takviye malzemesi değiştirilmeden matris içerisindeki malzeme modifikasyonu yapılarak mukavemetin artırılması önemli bir sonuçtur. Böylelikle esas olarak nispeten matris malzemenin mukavemeti arttırılmıştır. Bazalt partikül katkılı SMC kompozit numunelerin kırılma yüzeylerinin mikro yapısı SEM cihazı ile incelendiğinde; bazalt partikül katkılı kompozit malzemeler içerisindeki partiküller matris içerisinde takviye malzemesi bir elyaf gibi matrisi bir arada tutmaktadır. Böylelikle partiküller ilk hasar oluşum aşamalarından olan matristeki mikro çatlakların oluşmasını nispeten geciktirmiş veya engellemiş olmaktadır. Hasar mekanizmasının gecikmesinin sonucu olarak kompozitin mekanik özelliklerinde artış gerçekleşmektedir. Özetle bu çalışmada; SMC yönteminde geleneksel takviye malzemesi olarak kullanılan cam elyafla, araştırılma aşamasında olan karbon elyaf ve daha önce hiç kullanılmamış bazalt, aramit, elyaf tiplerinin farklı uzunluk, oran ve tipleri kullanılarak üretilen numunelerin mekanik özellikleri incelenmeye çalışılmıştır. Yani elyafların SMC

kompozitlere olan etkisinin incelenmeye çalışılmasının yanı sıra aynı zamanda mekanik özelliklerin ise iyileştirilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 5.1. Farklı elyaflarla üretilen SMC kompozit numunelerin ortalama çekme deney sonuçlarının minimum ve maksimum değerleri

SMC kompozit numunelerin çekme ve eğilme deneyleri sonucunda elde edilen çekme gerilmesi değerlerin maksimum ve minimum değerleri Şekil 5.1’de, eğilme gerilmesi değerleri ise Şekil 5.2’de özetlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 5.2. Farklı elyaflarla üretilen SMC kompozit numunelerin ortalama eğilme deney sonuçlarının minimum ve maksimum değerleri

KAYNAKLAR

- Abrams, L.M., Castro, J.M., 2003.** Predicting molding forces during sheet molding compound (SMC) compression molding. I: Model development. *Polymer Composites*, 24: 291-303.
- Åkermo, M., Åström, B.T., 2000.** Modelling component cost in compression moulding of thermoplastic composite and sandwich components. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31: 319-333.
- Akinci, A., Ercenk, E., Yilmaz, S., Sen, U., 2011.** Slurry erosion behaviors of basalt filled low density polyethylene composites. *Materials & Design*, 32: 3106-3111.
- Akinci, A., Yetgin, H.S., Yilmaz, S., Sen, U., 2009.** The variation of pin-on-disc wear properties of particle filled polymer matrix composites with applied loads. *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 27: 129-138.
- Anonim, 2015a.** Bilim ve Teknoloji Yüksek Kurulu Onbirinci Toplantısı. http://tubitak.gov.tr/tubitak_content_files/BTYPD/btyk/11/11btyk_karar.pdf (Erişim tarihi 08.07.2015).
- Anonim, 2015b.** Onuncu Kalkınma Planı <http://www.kalkinma.gov.tr/Lists/Kalkinma%20Planlar/Attachments/12/Onuncu%20Kalkinma%20Plan%20C4%B1.pdf> (Erişim tarihi: 08.07.2015)
- Anonim, 2015c.** Polipol-347 doymamış polyesterin özellikleri. http://www.poliya.com/en/products/polipol_polyester/hot_press_smc_bmc/ Erişim tarihi: (09.10.2015).
- Anonim, 2015d.** Polives 701 vinil ester reçinenin özellikleri https://www.poliya.com/tr/products/polives_vinyl_ester/ (Erişim tarihi: 09.10.2015).
- Anonim, 2015e.** SMC-3 cam elyafın özellikleri. <http://www.camelyaf.com.tr/urunlerimiz/detay.aspx?SectionID=PYoNapf6S%2FE8Lu%2FvXwenLg%3D%3D&ContentID=WISf6dXFompSGwbE%2Bg%2FV6g%3D%3D> (Erişim tarihi: 09.10.2015).
- Anonim, 2015f.** Karbon elyaf bobinin özellikleri <http://www.dowaksa.com/products> (Erişim tarihi: 12.10.2015).
- Anonim, 2015g.** Aramit elyafın özellikleri <http://www.tejinaramid.com/aramids/twaron/twaron-yellow-filament-yarn/> (Erişim tarihi: 12.10.2015).
- Anonim, 2016a.** Bazalt elyafın kimyasal bileşimi. http://www.basaltex.com/files/cms1/basalt-fibres-as-reinforcement-for-composites_ugent.pdf. (Erişim tarihi: 22.03.2016).
- Anonim, 2016b.** Bazalt elyaf bobinlerin özellikleri <http://www.basaltex.com/en/products.aspx> (Erişim tarihi: 22.03.2016).
- Anonim, 2016c.** Bazalt partikül katkısının özellikleri <http://www.basaltex.com/en/category5.aspx> (Erişim tarihi: 22.03.2016).
- Anonim, 2016d.** Kimyasal Dolgu Maddeleri. https://www.poliya.com/tr/products/chemicals/fillers_additives/ (Erişim tarihi: 12.04.2016).
- Anonim, 2016e.** Çekme deney numunesi boyutları http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=4595 (Erişim tarihi: 03.05.2016).
- Anonim, 2016f.** Eğilme deney numunesi boyutları http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=45091 (Erişim tarihi: 03.05.2016).

- Ary Subagia, I.D.G., Kim, Y., Tijing, L.D., Kim, C.S., Shon, H.K., 2014a.** Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybrid composites reinforced with carbon and basalt fibers. *Composites Part B: Engineering*, 58: 251-258.
- Ary Subagia, I.D.G., Tijing, L.D., Kim, Y., Kim, C.S., Vista Iv, F.P., Shon, H.K., 2014b.** Mechanical performance of multiscale basalt fiber–epoxy laminates containing tourmaline micro/nano particles. *Composites Part B: Engineering*, 58: 611-617.
- Asadi, A., Miller, M., Sultana, S., Moon, R.J., Kalaitzidou, K., 2016.** Introducing cellulose nanocrystals in sheet molding compounds (SMC). *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 88: 206-215.
- Asprone, D., Cadoni, E., Iucolano, F., Prota, A., 2014.** Analysis of the strain-rate behavior of a basalt fiber reinforced natural hydraulic mortar. *Cement and Concrete Composites*, 53: 52-58.
- Ataş, A., 2007.** Doküman Fiber Takviyeli Paralel Pim Delikli Tabakalı Polyester Kompozit Plakaların Statik Yük Altındaki Davranışlarının İncelenmesi. *Yüksek lisans tezi*, BÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir.
- Bader, M.G., 2002.** Selection of composite materials and manufacturing routes for cost-effective performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33: 913-934.
- Bledzki, A.K., Gassan, J., 1999.** Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*, 24: 221-274.
- Cabrera-Ríos, M., Castro, J.M., 2006.** An economical way of using carbon fibers in sheet molding compound compression molding for automotive applications. *Polymer Composites* 27: 718-722.
- Caprino, G., 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: 893-897.
- Cavdar, K., Bingol, M., 2016.** Investigation of Mechanical Properties of Basalt Particle-Filled SMC Composites. *International Journal of Polymer Science*, 2016: 6.
- Colombo, C., Vergani, L., Burman, M., 2012.** Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites. *Composite Structures*, 94: 1165-1174.
- deMarco, I., Legarreta, J.A., Laresgoiti, M.F., Torres, A., Cambra, J.F., Chomon, M.J., Caballero, B., Gondra, K., 1997.** Recycling of the products obtained in the pyrolysis of fibre-glass polyester SMC. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 69: 187-192.
- Dumont, P., Orgéas, L., Favier, D., Pizette, P., Venet, C., 2007.** Compression moulding of SMC: In situ experiments, modelling and simulation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38: 353-368.
- Dumont, P., Orgéas, L., Le Corre, S., Favier, D., 2003.** Anisotropic viscous behavior of sheet molding compounds (SMC) during compression molding. *International Journal of Plasticity*, 19: 625-646.
- Eslami-Farsani, R., Reza Khalili, S.M., Hedayatnasab, Z., Soleimani, N., 2014.** Influence of thermal conditions on the tensile properties of basalt fiber reinforced polypropylene–clay nanocomposites. *Materials & Design*, 53: 540-549.
- Feuillade, V., Bergeret, A., Quantin, J.C., Crespy, A., 2006a.** Relationships between the glass fibre sizing composition and the surface quality of sheet moulding compounds (SMC) body panels. *Composites Science and Technology*, 66: 115-127.

- Feuillade, V., Bergeret, A., Quantin, J.C., Crespy, A., 2006b.** Characterisation of glass fibres used in automotive industry for SMC body panels. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37: 1536-1544.
- Fujitani, R., Okubo, K., Fujii, T., 2016.** Improvement of fatigue life and prevention of internal crack initiation of chopped carbon fiber reinforced plastics modified with micro glass fibers. *Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites*, vol. 9800
- Gedan-Smolka, M., Müller, A., Gohs, U., Calvimontes, A., 2011.** Electron pretreatment of sheet molding compounds (SMC). *Progress in Organic Coatings*, 72: 159-167.
- Guiraud, O., Dumont, P.J.J., Orgéas, L., Favier, D., 2012.** Rheometry of compression moulded fibre-reinforced polymer composites: Rheology, compressibility, and friction forces with mould surfaces. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43: 2107-2119.
- Gülten, Z., 2003.** SMC ile Kompozit Üretimi. *Doktora tezi*, YTÜ FBE Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Programı, İstanbul
- Hosseinzadeh, R., Shokrieh, M.M., Lessard, L.B., 2005.** Parametric study of automotive composite bumper beams subjected to low-velocity impacts. *Composite Structures*, 68: 419-427.
- Huang, B.-Z., Zhao, L.-J., 2012.** Bridging and toughening of short fibers in SMC and parametric optimum. *Composites Part B: Engineering*, 43: 3146-3152.
- Jendli, Z., Fitoussi, J., Meraghni, F., Baptiste, D., 2005.** Anisotropic strain rate effects on the fibre–matrix interface decohesion in sheet moulding compound composites. *Composites Science and Technology*, 65: 387-393.
- Jendli, Z., Meraghni, F., Fitoussi, J., Baptiste, D., 2004.** Micromechanical analysis of strain rate effect on damage evolution in sheet molding compound composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35: 779-785.
- Katayama, T., Shinohara, M., Hakotani, M., Nishii, K., 2003.** Effect of curing condition on the temperature of test piece in curing process of SMC roll forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 143–144: 673-676.
- Kaw, A.K., 2006.** Mechanics of Composite Materials. CRC Press LLC, Boca Raton, FL, 490 pp.
- Kia, H.G., 1993.** Sheet Molding Compound Materials: Science & Technology. Hanser Gardner Pubns. Ohio USA, 257 pp.
- Kim, K.-T., Jeong, J.-H., Im, Y.-T., 1997.** Effect of molding parameters on compression molded sheet molding compounds parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 67: 105-111.
- Kim, M.-S., Lee, W.I., Han, W.-S., Vautrin, A., 2011.** Optimisation of location and dimension of SMC precharge in compression moulding process. *Computers & Structures*, 89: 1523-1534.
- Kim, S.-Y., Im, Y.-T., 1997a.** Three-dimensional finite-element analysis of the compression molding of sheet molding compound. *Journal of Materials Processing Technology*, 67: 207-213.
- Kim, S.Y., Im, Y.T., 1997b.** Three-dimensional thermo-viscoplastic analysis of compression molding of sheet molding compounds with fiber volume fraction prediction. *Journal of Materials Processing Technology*, 63: 631-636.

- Kotsikos, G., Gibson, A.G., 1998.** Investigation of the squeeze flow behaviour of Sheet Moulding Compounds (SMC). *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29: 1569-1577.
- Le Corre, S., Orgéas, L., Favier, D., Tourabi, A., Maazouz, A., Venet, C., 2002.** Shear and compression behaviour of sheet moulding compounds. *Composites Science and Technology*, 62: 571-577.
- Le, T.H., Dumont, P.J.J., Orgéas, L., Favier, D., Salvo, L., Boller, E., 2008.** X-ray phase contrast microtomography for the analysis of the fibrous microstructure of SMC composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39: 91-103.
- Lee, S.-M., Cheon, J.-S., Im, Y.-T., 1999.** Experimental and numerical study of the impact behavior of SMC plates. *Composite Structures*, 47: 551-561.
- Lindström, A., Hallström, S., 2010.** Energy absorption of SMC/balsa sandwich panels with geometrical triggering features. *Composite Structures*, 92: 2676-2684.
- Lopresto, V., Leone, C., De Iorio, I., 2011.** Mechanical characterisation of basalt fibre reinforced plastic. *Composites Part B: Engineering*, 42: 717-723.
- Mallick, P.K., 2007.** Fiber reinforced Composites Materials, Manufacturing and Design. CRC Press LLC, USA, 638 pp.
- Marissen, R., Linsen, J., 1999.** Variability of the flexural strength of sheet moulding compounds. *Composites Science and Technology*, 59: 2093-2100.
- Marzbanrad, J., Alijanpour, M., Kiasat, M.S., 2009.** Design and analysis of an automotive bumper beam in low-speed frontal crashes. *Thin-Walled Structures*, 47: 902-911.
- Massardier-Nageotte, V., Cara, F., Maazouz, A., Seytre, G., 2004.** Prediction of the curing behavior for unsaturated polyester–styrene systems used for monitoring sheet moulding compounds (SMC) process. *Composites Science and Technology*, 64: 1855-1862.
- Massardier-Nageotte, V., Maazouz, A., Peix, G., Bres, S., 2003.** Methodologies for the characterisation of glass fibre orientation and distribution in large components moulded from sheet molding compounds (SMC). *Polymer Testing*, 22: 867-873.
- Mazumdar, S.K., 2002.** Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering. CRC Press LLC, Florida, USA, 416 pp.
- Merle, G., Allemand, J., Camino, G., Luda, M.P., Revellino, M., Blancon, R., 1998.** Morphology analysis of microvoids in SMC: ageing effects. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29: 1535-1543.
- Müssig, J., Schmehl, M., von Buttlar, H.B., Schönfeld, U., Arndt, K., 2006.** Exterior components based on renewable resources produced with SMC technology—Considering a bus component as example. *Industrial Crops and Products*, 24: 132-145.
- Nicoletto, G., Riva, E., Stocchi, A., 2016.** Mechanical Characterization of Advanced Random Discontinuous Carbon/Epoxy Composites. *Materials Today: Proceedings*, 3: 1079-1084.
- Odenberger, P.T., Andersson, H.M., Lundström, T.S., 2004.** Experimental flow-front visualisation in compression moulding of SMC. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35: 1125-1134.
- Ogi, K., Yamanouchi, M., 2011.** Temperature Dependence of Flexural Strength of a CF-SMC Composite. *Applied Composite Materials*, 18: 397-408.
- Oldenbo, M., Fernberg, S.P., Berglund, L.A., 2003.** Mechanical behaviour of SMC composites with toughening and low density additives. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34: 875-885.

- Orgéas, L., Dumont, P.J.J. (2012).** Sheet Molding Compounds. Wiley Encyclopedia of Composites, John Wiley & Sons, Inc.
- Palmer, J., Savage, L., Ghita, O.R., Evans, K.E., 2010.** Sheet moulding compound (SMC) from carbon fibre recycle. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41: 1232-1237.
- Perrin, D., Clerc, L., Leroy, E., Lopez-Cuesta, J.M., Bergeret, A., 2008.** Optimizing a recycling process of SMC composite waste. *Waste Management*, 28: 541-548.
- Peters, S.T., 1998.** Handbook of Composites. Chapman & Hall London UK., 1118 pp.
- Peterson, C.W., Ehnert, G., Liebold, R., Hörsting, K., Kühfusz, R., 2001.** ASM Handbook Volume 21: Composites. Ed.: Miracle, D.B., Donaldson, S.L. ASM International, Materials Park, OH, 1201-1223.
- Petrucci, R., Santulli, C., Puglia, D., Sarasini, F., Torre, L., Kenny, J.M., 2013.** Mechanical characterisation of hybrid composite laminates based on basalt fibres in combination with flax, hemp and glass fibres manufactured by vacuum infusion. *Materials & Design*, 49: 728-735.
- Pickering, S.J., 2006.** Recycling technologies for thermoset composite materials - current status. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37: 1206-1215.
- Rambo, D.A.S., de Andrade Silva, F., Toledo Filho, R.D., da Fonseca Martins Gomes, O., 2015.** Effect of elevated temperatures on the mechanical behavior of basalt textile reinforced refractory concrete. *Materials & Design*, 65: 24-33.
- Rosato, D.V., Rosato, D.V. (2005).** Chapter 4 - Compound constructions. Reinforced Plastics Handbook (Third Edition). Amsterdam, Elsevier Science: 212-253.
- Saçak, M., 2005.** Polimer Teknolojisi. Gazi Kitabevi: 431 s.
- Saha, G.C., 2005.** Experimental, Numerical and Analytical Studies of Smart Composite Materials and Their Applications. *Ph.D Thesis*, Dalhousie University, Mechanical Engineering, Canada.
- Shirinbayan, M., Fitoussi, J., Meraghni, F., Surowiec, B., Bocquet, M., Tcharkhtchi, A., 2015.** High strain rate visco-damageable behavior of Advanced Sheet Molding Compound (A-SMC) under tension. *Composites Part B: Engineering*, 82: 30-41.
- Singha, K., 2012.** A short review on basalt fiber. *International Journal of Textile Science*, 1: 19-28.
- Smith, W.F., 2001.** Malzeme Bilimi ve Mühendisliği. Literatür Yayıncılık Dağıtım İstanbul, Türkiye, 900 s.
- Strong, A.B., 2008.** Fundamentals of Composites Manufacturing Materials, Methods, and Applications. Society of Manufacturing Engineers. Michigan, USA, 640 pp.
- Şahin, Y., 2006.** Kompozit Malzemelere Giriş. Seçkin Yayıncılık. İstanbul, Türkiye, 424 s.
- Şardan, B., 2009.** Plastik Matrisli Hibrit Kompozitlerde Doku Bileşenlerinin Mekanik Özelliklere Etkisi. *Yüksek lisans tezi*, YTÜ FBE Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Programı, İstanbul.
- Taketa, I., Okabe, T., Kitano, A., 2008.** A new compression-molding approach using unidirectionally arrayed chopped strands. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39: 1884-1890.
- Taketa, I., Okabe, T., Matsutani, H., Kitano, A., 2011.** Flowability of unidirectionally arrayed chopped strands in compression molding. *Composites Part B: Engineering*, 42: 1764-1769.

- Tatara, R.A. (2011).** 17 - Compression Molding A2 - Kutz, Myer. Applied Plastics Engineering Handbook. Oxford, William Andrew Publishing: 289-309.
- Todic, A., Nedeljkovic, B., Cikara, D., Ristic, I., 2011.** Particulate basalt–polymer composites characteristics investigation. *Materials & Design*, 32: 1677-1683.
- Torres, A., de Marco, I., Caballero, B.M., Laresgoiti, M.F., Cabrero, M.A., Chomón, M.J., 2001.** GC-MS analysis of the liquid products obtained in the pyrolysis of fibre-glass polyester sheet moulding compound. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 58–59: 189-203.
- van Voorn, B., Smit, H.H.G., Sinke, R.J., de Klerk, B., 2001.** Natural fibre reinforced sheet moulding compound. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 32: 1271-1279.
- Wang, Q.-h., Zhang, X.-r., Pei, X.-q., 2010.** Study on the friction and wear behavior of basalt fabric composites filled with graphite and nano-SiO₂. *Materials & Design*, 31: 1403-1409.
- Wei, B., Cao, H., Song, S., 2011a.** Surface modification and characterization of basalt fibers with hybrid sizings. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42: 22-29.
- Wei, B., Song, S., Cao, H., 2011b.** Strengthening of basalt fibers with nano-SiO₂–epoxy composite coating. *Materials & Design*, 32: 4180-4186.
- Witik, R.A., Payet, J., Michaud, V., Ludwig, C., Manson, J.-A.E., 2011.** Assessing the life cycle costs and environmental performance of lightweight materials in automobile applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42: 1694-1709.
- Wu, Q., Chi, K., Wu, Y., Lee, S., 2014.** Mechanical, thermal expansion, and flammability properties of co-extruded wood polymer composites with basalt fiber reinforced shells. *Materials & Design*, 60: 334-342.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Mahmut BİNGÖL
Doğum Yeri: Erzurum
Yabancı Dili: İngilizce

Eğitim Durumu

Lise: Ilıca Lisesi 1996-2000
Lisans: Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü 2001-2005
Lisans: Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü 2001-2005
Yüksek Lisans: Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü/ 2005-2009
Çalıştığı Kurum: Yalova Üniversitesi Öğr.Gör.
İletişim (e-posta): mahmutb25@hotmail.com

Yayınları:

- Bingöl, M., Yağcı, Y.E., Kurt., R., Cavdar, K. 2012.** Farklı Takviye Malzeme Kombinasyonları ile Güçlendirilen SMC Numunelerin Karşılaştırılması. Uluslar arası Polimerik Kompozitler Sempozyumu, 9-11 Kasım 2012, İzmir, Türkiye.
- Bingöl, M., Cavdar, K. 2012.** Sheet Molding Compound (SMC) Yöntemi ile Kompozit Malzeme Tasarımı ve Üretimi. Ulusal Tasarım İmalat Analiz (TİMAK) Kongresi 29-30 Kasım 2012, Balıkesir, Türkiye.
- Bingöl, M., Yağcı, Y.E., Cavdar, K., 2013.** New SMC Application for Automotive Seat. Uluslararası 13th-annual SPE Automotive Composites Conference & Exhibition (SPE ACCE), 11-13 Eylül 2013, Michigan, USA.
- Cavdar, K., Bingol, M., 2016.** Investigation of Mechanical Properties of Basalt Particle-Filled SMC Composites. *International Journal of Polymer Science*, 2016: 6.
- Bingol, M., Cavdar, K., 2016.** Farklı Takviye Malzemelerinin Kompozit Malzeme Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesine Etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 21(2): 123-132.