



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HİBRİT LİF VE MİNERAL TAKVİYELİ YÜKSEK
PERFORMANSLI POLİMER KOMPOZİT MALZEME
ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

ŞEVKİ EREN

**DOKTORA TEZİ
DİSİPLİNLERARASI KOMPOZİT MALZEME TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. SERKAN SUBAŞI**

DÜZCE, 2018

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİBRİT LİF VE MİNERAL TAKVİYELİ YÜKSEK
PERFORMANSLI POLİMER KOMPOZİT MALZEME
ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI

Şevki EREN tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Disiplinlerarası Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

Düzce Üniversitesi

Yrd.Doç.Dr. Abdulkadir ALLI

Düzce Üniversitesi

Yrd.Doç.Dr. Mustafa ÇULLU

Gümüşhane Üniversitesi

Doç. Dr. Ahmet BEYÇİOĞLU

Düzce Üniversitesi

Yrd.Doç.Dr. Ahmet GÖKDEMİR

Gazi Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 02/02/2018

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

02 Şubat 2018

(İmza)

Şevki EREN

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. Serkan SUBAŞI'ya, deneysel çalışmalarda yardımını, zamanını ve bilgilerini benden esirgemeyen Dr. Bayram POYRAZ'a, deneysel çalışmalarda yardımını esirgemeyen Batuhan AYKANAT'a, bilimsel anlamda değerli bilgi ve tecrübelerini aldığım Doç. Dr. Ahmet BEYCİOĞLU, Yrd.Doç.Dr. Abdülkadir ALLI, Yrd.Doç.Dr. Mustafa ÇULLU, Doç.Dr. Mehmet EMİROĞLU, Doç.Dr.Metin İPEK'e, her zaman yanımda olan ve beni destekleyen Düzce Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanlığını yapan Yrd.Doç.Dr. Latif Onur UĞUR'a, Bölüm Öğretim Üyeleri ve Araştırma Görevlilerine, çalışma ortamlarını benimle paylaşan SUPERLIT BORU SAN. A.Ş. Üretim Direktörü Sayın Özcan ÇAĞLAR'a, Projeler Destek Müdürü Sayın Alperen EROĞLU'na, Kalite Kontrol ve Kalite Güvence Yöneticisi Sayın Neslihan GÖKÇE'ye ve firma çalışanlarına, FİBROBETON A.Ş. Yönetim Kurulu Üyesi Muhammed MARAŞLI'ya, Ar-Ge Şefi Volkan ÖZDAL'a ve Ar-Ge personeli Yasemin YAMAN'a en içten dileklerimle teşekkür ederim. Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, TUBİTAK 1505: Üniversite-Sanayi İşbirliği-5140058 numaralı Projesiyle desteklenmiştir

02 Şubat 2018

Şevki EREN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ŞEKİL LİSTESİ.....	VIII
ÇİZELGE LİSTESİ.....	XII
KISALTMALAR.....	XIV
SİMGELER	XVI
ÖZET	XVII
ABSTRACT	XVIII
EXTENDED ABSTRACT	XIX
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. KOMPOZİT MALZEMELER.....	4
2.2. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER	6
2.2.1. Matris Yapı.....	7
2.2.2. Polimerler	7
2.2.3. Polyesterler	10
2.2.3.1. Doymamış Polyester Reçineleri	10
2.2.4. Katkılar (Modifiye Ediciler)	12
2.2.5. Dolgu Maddeleri	13
2.2.5.1. Plastikleştiriciler (Yumuşatıcılar).....	15
2.2.5.2. Stabilizatörler (Dengeleyiciler)	15
2.2.5.3. Renklendiriciler	16
2.2.5.4. Alev Geciktiriciler	16
2.3. LİF TAKVİYELİ POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER.....	17
2.3.1. Lif Takviyeli Kompozitlerin Mukavemetini Etkileyen Faktörler	18
2.3.1.1. Lif Boyutları ve Kritik Lif Uzunluğu	19
2.3.1.2. Lif Hacim Oranı.....	20
2.3.1.3. Lif Dağılımı ve Yönlenmesi.....	21
2.3.1.4. Liflerin ve Matrislerin Özellikleri.....	24

2.3.1.5. Lif ve Matris Ara-Yüzey Bağı.....	25
2.3.1.6. Lif Takviye Malzemeleri.....	26
2.3.2. Liflerin Birleştirilme Şekilleri.....	28
2.3.3. Lif Takviyeli Kompozitlerin Üretim Teknikleri	29
2.4. CAM LİFİ TAKVİYELİ PLASTİKLER	29
2.4.1. Cam Liflerinin Özellikleri.....	30
2.4.2. Cam Lifi Türleri.....	31
2.4.3. Cam Liflerinin Üretimi	34
2.4.4. CTP'nin Avantajları ve Kullanım Alanları.....	35
2.5. BAZALT LİF TAKVİYELİ PLASTİKLER.....	37
2.5.1. Bazalt ve Oluşumu	38
2.5.2. Bazalt Liflerinin Özellikleri	39
2.5.3. Bazalt Liflerinin Üretilmesi	44
2.5.4. Bazalt Liflerinin Kullanım Alanları.....	45
2.6. HİBRİT KOMPOZİTLER	48
2.6.1. Hibrit Karışımlar	48
2.6.2. Hibrit Etkisi.....	50
2.6.2.1. Kalıntı Gerilmeleri (Residual Stresses)	51
2.6.2.2. Hasar Gelişmesi.....	52
2.6.2.3. Dinamik Gerilme Konsantrasyonları.....	53
2.7. POLİMER KOMPOZİTLERLE İLGİLİ LİTERATÜR TARAMASI.....	54
3. MATERİYAL VE YÖNTEM.....	78
3.1. MATERİYAL	78
3.1.1. Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Matris Malzemeleri	78
3.1.1.1. Doymamış Polyester Reçineleri	78
3.1.2. Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Dolgu Malzemeleri.....	80
3.1.3. Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Takviye Malzemeleri	82
3.2. YÖNTEM	86
3.2.1. Doymamış Polyester Reçine Karışımları Üzerinde Yapılan Çalışmalar.....	87
3.2.1.1. Reçine Karışımlarının Hazırlanması	88
3.2.1.2. Reçine Karışımlarının Fiziksel Özelliklerine Ait Testler	90
3.2.1.3. Reçine Karışımlarının Mekanik Özelliklere Ait Testler.....	93
3.2.2. Dolgulu Kompozitler Üzerinde Yapılan Çalışmalar	97

3.2.2.1. Dolgulu Kompozitlerin Hazırlanması.....	101
3.2.2.2. Dolgulu Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Ait Testler	104
3.2.3. Lifli Kompozitler Üzerinde Yapılan Çalışmalar.....	108
3.2.3.1. Lif Takviyeli Kompozitlerin Hazırlanması.....	111
3.2.3.2. Lifli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Ait Testler.....	114
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	123
4.1. FİZİKSEL VE KİMYASAL TEST BULGULARI.....	123
4.1.1. Doymamış Polyester Reçine Karışımlarına Ait Fiziksel ve Kimyasal Test Bulguları ve Değerlendirme	123
4.2. MEKANİK TEST BULGULARI.....	129
4.2.1. Dolgusuz Reçine Karışımlarının Mekanik Analiz Test Bulgularının Değerlendirilmesi	129
4.2.2. Dolgulu Reçine Karışımlarının Basınç Dayanımı Değerlerine Ait Test Bulgularının Değerlendirilmesi	136
4.2.3. Dolgulu Reçine Karışımlarının Reçine Tüketim Miktarları	149
4.2.4. Dolgulu Reçine Karışımlarının SEM Görüntüleri ve Morfolojik Analizi	150
4.2.5. Lifli Kompozitlerin Mekanik Analiz Test Bulgularının Değerlendirilmesi	154
4.2.5.1. Lifli Kompozitlerin Charpy Testi Sonuçları.....	154
4.2.5.2. Lifli Kompozitlerin Eğilme Testi Sonuçları	163
4.2.5.3. Lifli Kompozitlerin Çekme Testi Sonuçları.....	171
4.2.5.4. Lifli Kompozitlerin SEM Görüntüleri ve Morfolojik Analizi	179
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	197
6. KAYNAKLAR.....	203
ÖZGEÇMİŞ	213

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Matris yapıya göre kompozitlerin sınıflandırılması.	5
Şekil 2.2. Kompozitlerin güçlendirme yöntemlerine göre sınıflandırılması.	6
Şekil 2.3. Farklı türlerde matris ve lif takviyelerinden oluşan polimer kompozitler.	17
Şekil 2.4. Lif takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi.	22
Şekil 2.5. Kompozit malzemelerde kullanılan cam lifi uygulama numuneleri.	32
Şekil 2.6. Cam liflerinin üretim şeması.	34
Şekil 2.7. Cam lifi üretimi.	35
Şekil 2.8. Cam liflerinin kullanım alanlarına ait bazı resimler.	37
Şekil 2.9. Volkanik magma ve taşkın volkanlardan oluşan bazalt kayacı görsel	39
Şekil 2.10. Bazalt liflerinin kompozit içerisindeki temel uygulama biçimleri.	43
Şekil 2.11. Eriyik üfleme ile Junkers tipi bazalt lifin üretim şeması.	44
Şekil 2.12. Bazalt lifi eğirme şeması.	45
Şekil 2.13. Bazalt liflerinin çeşitli kullanım alanlarına ait görseller.	47
Şekil 2.14. Üç ana hibrit birleşimi.	48
Şekil 2.15. Çeşitli derecelerdeki dağılım örnekleri.	49
Şekil 2.16. Hibrit etkisi tanımlarının örneklemeleri.	50
Şekil 3.1. Kullanılan ham reçine, başlatıcı ve hızlandırıcılara ait görsel.	79
Şekil 3.2. Dolgu malzemeleri.	80
Şekil 3.3. Dolgu malzemelerine ait tane dağılımı grafiği.	80
Şekil 3.4. Kırpılmış lif takviye malzemeleri.	82
Şekil 3.5. SEM analiz cihazı.	83
Şekil 3.6. Cam lifinin filament çapı.	83
Şekil 3.7. Bazalt lifinin filament çapı.	84
Şekil 3.8. Cam lifinin kimyasal içeriği.	85
Şekil 3.9. Bazalt lifinin kimyasal içeriği.	86
Şekil 3.10. Kompozit üretiminde kullanılan kimyasalların yapıları.	88
Şekil 3.11. Reçinelerin polimerizasyon ve homojenizasyon işlemi.	89
Şekil 3.12. Viskozimetre cihazı.	91
Şekil 3.13. Reometre cihazı.	91
Şekil 3.14. Termal analiz cihazı.	92
Şekil 3.15. FTIR cihazı.	92
Şekil 3.16. Reçine karışımlarının cam levha kalıba dökülme işlemi.	93
Şekil 3.17. Mekanik deneylere tabi tutulan numune boyutları.	94
Şekil 3.18. Reçine mekanik test numuneleri.	95
Şekil 3.19. Reçine karışımlarının kaşık çekme dayanımı testi.	95
Şekil 3.20. Reçine karışımlarının eğilme dayanımı testi.	96
Şekil 3.21. AFS 40-45, Fuller 0,8 ve Fuller 1,0 denklemlerine göre belirlenmiş malzemelerin tane dağılımı eğrileri.	100
Şekil 3.22. Dolgu malzemeleriyle doymamış polyester reçinenin karışım reaksiyonu.	102
Şekil 3.23. Dolgu malzemelerinin reçine ile karışım işlemi.	103
Şekil 3.24. Hazırlanan dolgulu reçine karışımlarının çelik silindir kalıba döküm işlemi.	103
Şekil 3.25. Kalıp içerisinde jelleşen karışımların post kür işlemi.	104

Şekil 3.26. Kalıptan çıkarılan silindir numuneler ve kesim işlemi.	105
Şekil 3.27. Basınç testinin gerçekleştirilmesi için kesilmiş silindir numuneler.	106
Şekil 3.28. Reçine tüketiminin belirlenmesi için kesilmiş numuneler.	106
Şekil 3.29. Katılaştıran dolgulu reçine karışımları üzerinde basınç testlerinin yapılması işlemi.	107
Şekil 3.30. Dolgulu kompozitlerin reçine tüketim testi.	107
Şekil 3.31. SEM analizi örnekleri.	108
Şekil 3.32. Kompozit levha üretiminde kullanılan kalıplar.	112
Şekil 3.33. Dolgulu reçine karışımı içerisine kırılmış lif takviye edilmesi işlemi.	112
Şekil 3.34. Liflerin el yatırması yöntemiyle reçine içerisine emdirilmesi.	113
Şekil 3.35. Kalıp içerisinde jelleşen karışımların post kür edilmesi işlemi.	113
Şekil 3.36. Kalıptan çıkarılan lifli kompozit levhalar.	113
Şekil 3.37. Lifli kompozit levhaların sulu ve ince kesim işlemi.	114
Şekil 3.38. Charpy test cihazı.	114
Şekil 3.39. Charpy test numuneleri.	115
Şekil 3.40. Charpy testlerine tabi tutulan lifli kompozitler.	115
Şekil 3.41. Standarda göre kesilen eğilme numuneleri.	116
Şekil 3.42. Eğilme testlerine tabi tutulan lifli kompozitler.	116
Şekil 3.43. Çekme testi numunelerine çentik açılması işlemi.	118
Şekil 3.44. Kesilen çentikli çekme numunelere ait görseller.	118
Şekil 3.45. Çekme testlerine tabi tutulan lifli kompozitler.	119
Şekil 3.46. Mekanik testler sonucu kırılan cam lifli kompozitler.	120
Şekil 3.47. Mekanik testler sonucu kırılan bazalt lifli kompozitler.	121
Şekil 3.48. Mekanik testler sonucu kırılan hibrit lifli kompozitler.	122
Şekil 4.1. Doymamış polyester reçinelerin kayma hızına bağlı viskozite değerleri.	125
Şekil 4.2. Ortoftalik ve izoftalik reçinelere ait kütle sıcaklık ilişkisi.	126
Şekil 4.3. Ortoftalik asit polyester reçinesinin polimerleşmesi sonucu elde edilen kompozitlerinin FT-IR spektrumu.	127
Şekil 4.4. İzofthalik asit polyester reçinesinin polimerleşmesi sonucu elde edilen kompozitlerin FT-IR spektrumu.	128
Şekil 4.5. Ortoftalik reçineden üretilen kompozitin çekme gerilmesi birim deformasyon eğrisi.	130
Şekil 4.6. İzofthalik reçineden üretilen kompozitin çekme gerilme-birim deformasyon eğrisi.	130
Şekil 4.7. Ortoftalik ve izofthalik reçineden üretilen kompozitlerin çekme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.	131
Şekil 4.8. Ortoftalik ve izofthalik reçineden üretilen kompozitlerin çekme elastikiyet modülü değerlerinin karşılaştırılması.	131
Şekil 4.9. Ortoftalik ve izofthalik reçineden üretilen kompozitlerin kopma uzama değerlerinin karşılaştırılması.	133
Şekil 4.10. Ortoftalik ve izofthalik reçine karışımlarının eğilme dayanımlarının karşılaştırılması.	134
Şekil 4.11. Ortoftalik ve izofthalik reçine karışımlarının eğilme E modülü değerlerinin karşılaştırılması.	134
Şekil 4.12. Farklı tane dağılımlarına sahip “silis dolgulu” reçine karışımlarının, başlatıcı oranındaki değişime bağlı ortalama basınç dayanımlarındaki değişim.	139
Şekil 4.13. Farklı tane dağılımlarına sahip “bazalt dolgulu” reçine karışımlarının, başlatıcı oranındaki değişime bağlı ortalama basınç dayanımlarındaki değişim.	141

Şekil 4.14. Farklı tane dağılımlarına sahip “kuvars dolgulu” reçine karışımlarının, başlatıcı değişime bağlı ortalama basınç dayanımlarındaki değişim.	142
Şekil 4.15. AFS40-45 tane dağılımına sahip farklı türdeki dolgulu reçine karışımlarının, başlatıcı oranındaki değişime bağlı ortalama basınç dayanımlarındaki değişim.	143
Şekil 4.16. “F0,8” tane dağılımına sahip farklı türdeki dolgulu reçine karışımlarının, başlatıcı oranındaki değişime bağlı ortalama basınç dayanımlarındaki değişim.	144
Şekil 4.17. “F1,0” tane dağılımına sahip farklı türdeki dolgulu reçine karışımlarının, başlatıcı oranındaki değişime bağlı basınç dayanımlarındaki değişim.	145
Şekil 4.18. Farklı karışım oranlarında hazırlanmış “F 0,8 “tane sınıfındaki “hibrit dolgulu” reçine karışımlarının, “%1,0” başlatıcı oranındaki ortalama basınç dayanımlarındaki değişim.	146
Şekil 4.19. İlk beş sıradaki dolgulu kompozitlerin basınç dayanımları sıralaması.....	147
Şekil 4.20. “F 0,8” tane dağılımlı silis kumu ile polyester reçinenin “% 1,0” başlatıcı oranıyla etkileşimi sonrasında elde edilen kompozitin SEM görüntüsü.	150
Şekil 4.21. “AFS 40-45” tane dağılımlı bazalt kumu ile polyester reçinenin “% 1,0” başlatıcı oranıyla etkileşimi sonrasında elde edilen kompozitin SEM görüntüsü.	150
Şekil 4.22. “AFS 40-45” tane dağılımlı kuvars kumu ile polyester reçinenin “% 1,0” başlatıcı oranıyla etkileşimi sonrasında elde edilen kompozitin SEM görüntüsü.	151
Şekil 4.23. “F 0,8” tane dağılımlı kuvars kumu ile polyester reçinenin “% 1,0” başlatıcı oranıyla etkileşimi sonrasında elde edilen kompozitin SEM görüntüsü.	151
Şekil 4.24. “F 1,0” tane dağılımlı bazalt kumu ile polyester reçinenin “% 1,0” başlatıcı oranıyla etkileşimi sonrasında elde edilen kompozitin SEM görüntüsü.	151
Şekil 4.25. “F 0,8” tane dağılımlı, %60 Bazalt + %40 Kuvars hibrit dolgulu karışımlar ile polyester reçinenin “% 1,0” başlatıcı oranıyla etkileşimi sonrasında elde edilen kompozitin SEM görüntüsü.	152
Şekil 4.26. “F 0,8” tane dağılımlı, %60 Bazalt + %40 Silis hibrit dolgulu karışımlar ile polyester reçinenin “% 1,0” başlatıcı oranıyla etkileşimi sonrasında elde edilen kompozitin SEM görüntüsü.	152
Şekil 4.27. “F 0,8” tane dağılımlı, %60 Kuvars + %40 Silis hibrit dolgulu karışımlar ile polyester reçinenin “% 1,0” başlatıcı oranıyla etkileşimi sonrasında elde edilen kompozitin SEM görüntüsü.	153
Şekil 4.28. AFS 40-45 tane dağılımındaki cam lifli kompozitlerin charpy testi sonuçları.	157
Şekil 4.29. F0,8 tane dağılımındaki cam lifli kompozitlerin charpy testi sonuçları.	157
Şekil 4.30. AFS 40-45 tane dağılımındaki bazalt lifli kompozitlerin charpy testi sonuçları.	158
Şekil 4.31. F0,8 tane dağılımındaki bazalt lifli kompozitlerin charpy testi sonuçları. .	158
Şekil 4.32. F0,8 tane dağılımındaki hibrit lifli kompozitlerin charpy testi sonuçları. ..	159
Şekil 4.33. AFS 40-45 tane dağılımındaki cam lifli kompozitlerin eğilme testi sonuçları.	165
Şekil 4.34. F0,8 tane dağılımındaki cam lifli kompozitlerin eğilme testi sonuçları.	165
Şekil 4.35. AFS 40-45 tane dağılımındaki bazalt lifli kompozitlerin eğilme testi sonuçları.	166
Şekil 4.36. F0,8 tane dağılımındaki bazalt lifli kompozitlerin eğilme testi sonuçları. .	166

Şekil 4.37. F0,8 tane dağılımındaki hibrit lifli kompozitlerin eğilme testi sonuçları. ...	167
Şekil 4.38. AFS 40-45 tane dağılımındaki cam lifli kompozitlerin çekme testi sonuçları.	173
Şekil 4.39. F0,8 tane dağılımındaki cam lifli kompozitlerin çekme testi sonuçları.	173
Şekil 4.40. AFS 40-45 tane dağılımındaki bazalt lifli kompozitlerin çekme testi sonuçları.	174
Şekil 4.41. F0,8 tane dağılımındaki bazalt lifli kompozitlerin çekme testi sonuçları...	174
Şekil 4.42. F0,8 tane dağılımındaki hibrit lifli kompozitlerin çekme testi sonuçları. ..	175
Şekil 4.43. AFS 40-45 tane dağılımlı, silis dolgulu, %5 cam lifli kompozitler.....	180
Şekil 4.44. AFS 40-45 tane dağılımlı, silis dolgulu, %10 cam lifli kompozitler.....	181
Şekil 4.45. AFS 40-45 tane dağılımlı, bazalt dolgulu, %5 cam lifli kompozitler.....	181
Şekil 4.46. AFS 40-45 tane dağılımlı, bazalt dolgulu, %10 cam lifli kompozitler.....	182
Şekil 4.47. AFS 40-45 tane dağılımlı, kuvars dolgulu, %5 cam lifli kompozitler.	182
Şekil 4.48. AFS 40-45 tane dağılımlı, kuvars dolgulu, %10 cam lifli kompozitler.	183
Şekil 4.49. F0,8 tane dağılımlı, silis dolgulu, %5 cam lifli kompozitler.	183
Şekil 4.50. F0,8 tane dağılımlı, silis dolgulu, %10 cam lifli kompozitler.	184
Şekil 4.51. F0,8 tane dağılımlı, bazalt dolgulu, %5 cam lifli kompozitler.	185
Şekil 4.52. F0,8 tane dağılımlı, bazalt dolgulu, %10 cam lifli kompozitler.	185
Şekil 4.53. F0,8 tane dağılımlı, kuvars dolgulu, %5 cam lifli kompozitler.	186
Şekil 4.54. F0,8 tane dağılımlı, kuvars dolgulu, %10 cam lifli kompozitler.	187
Şekil 4.55. AFS 40-45 tane dağılımlı, silis dolgulu, %5 bazalt lifli kompozitler.	187
Şekil 4.56. AFS 40-45 tane dağılımlı, silis dolgulu, %10 bazalt lifli kompozitler.	188
Şekil 4.57. AFS 40-45 tane dağılımlı, bazalt dolgulu, %5 bazalt lifli kompozitler.	189
Şekil 4.58. AFS 40-45 tane dağılımlı, bazalt dolgulu, %10 bazalt lifli kompozitler.	189
Şekil 4.59. AFS 40-45 tane dağılımlı, kuvars dolgulu, %5 bazalt lifli kompozitler.	190
Şekil 4.60. AFS 40-45 tane dağılımlı, kuvars dolgulu, %10 bazalt lifli kompozitler.	190
Şekil 4.61. F0,8 tane dağılımlı, silis dolgulu, %5 bazalt lifli kompozitler.	191
Şekil 4.62. F0,8 tane dağılımlı, silis dolgulu, %10 bazalt lifli kompozitler.	192
Şekil 4.63. F0,8 tane dağılımlı, bazalt dolgulu, %5 bazalt lifli kompozitler.	192
Şekil 4.64. F0,8 tane dağılımlı, bazalt dolgulu, %10 bazalt lifli kompozitler.	193
Şekil 4.65. F0,8 tane dağılımlı, kuvars dolgulu, %5 bazalt lifli kompozitler.	194
Şekil 4.66. F0,8 tane dağılımlı, kuvars dolgulu, %10 bazalt lifli kompozitler.	194
Şekil 4.67. “F0,8” tane dağılımlı, silis dolgulu, hibrit lifli kompozitlerin SEM görüntüleri.	195
Şekil 4.68. “F0,8” tane dağılımlı, bazalt dolgulu, hibrit lifli kompozitlerin SEM görüntüleri.	195
Şekil 4.69. “F0,8” tane dağılımlı, kuvars dolgulu, hibrit lifli kompozitlerin SEM görüntüleri.	196
Şekil 4.70. “F0,8” tane dağılımlı, hibrit dolgulu (%60 bazalt + %40 silis) ve hibrit lifli (%6 cam lifi + %4 bazalt lifi) kompozitlerin SEM görüntüleri.....	196

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1. Tipik dolgu malzemeleri ve özellikleri.....	15
Çizelge 2.2. Tek doğrultuda, lif takviyeli üç kompozitin, lif doğrultusu ve life dik yöndeki tipik çekme dayanımı değerleri. Her birinde lif içeriği yaklaşık % 50.....	24
Çizelge 2.3. Lif formunda kullanılan bazı takviye malzemelerinin özellikleri.	28
Çizelge 2.4. Cam lifi çeşitleri.	33
Çizelge 2.5. Cam lifi ile üretilen çeşitli camların bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.	33
Çizelge 2.6. Bazalt ve diğer önemli liflerin mekanik ve fiziksel özellikleri.	41
Çizelge 2.7. Bazalt liflerinin termal özelliklerinin E-cam lifiyle karşılaştırılması.	42
Çizelge 3.1. Doymamış polyester reçine türlerinin fiziksel ve mekanik özellikleri.	79
Çizelge 3.2. Dolgu malzemelerinin kimyasal analiz sonuçları.....	81
Çizelge 3.3. Dolgu malzemelerine ait fiziksel özellikler.....	81
Çizelge 3.4. Kırpılmış lif takviye malzemelerine ait fiziksel ve mekanik özellikler.....	82
Çizelge 3.5. Reçine karışımları üzerinde yapılan deneysel çalışma planı ve numune sayıları.	87
Çizelge 3.6. Reçine karışımlarına ait fiziksel özellik testleri ve standartları.....	89
Çizelge 3.7. Reçineler üzerinde yapılan mekanik testler, bu testlere ait standartlar ve yükleme hızları.	94
Çizelge 3.8. Dolgulu kompozitler üzerinde yapılan deneysel çalışma planı ve numune sayıları.	98
Çizelge 3.9. AFS 40-45, Fuller 0,8 ve Fuller 1,0 denklemlerine göre belirlenmiş dolgu malzemelerin tane dağılımları.	99
Çizelge 3.10. Hibrit ve hibrit olmayan dolgulu reçine karışımlarının hazırlanma süreci.	100
Çizelge 3.11. Hibrit dolgulu karışımların tane dağılımları.	101
Çizelge 3.12. Hibrit lifli olmayan lif ve mineral takviyeli kompozitlerin hazırlanma prosesi.....	109
Çizelge 3.13. Hibrit lif ve mineral takviyeli kompozitlerin hazırlanma prosesi.....	109
Çizelge 3.14. Hibrit lifli olmayan lifli kompozitler üzerinde yapılan deneysel çalışma planı ve örnek sayıları.	110
Çizelge 3.15. Hibrit lifli kompozitler üzerinde yapılan deneysel çalışma planı ve örnek sayıları.	111
Çizelge 4.1. Farklı reçine, başlatıcı ve hızlandırıcı oranlarında elde edilen polimerlere ait jelleşme süreleri.....	123
Çizelge 4.2. Farklı oranlarda karışımla elde edilen reçinelere ait jelleşme sıcaklıkları.	123
Çizelge 4.3. Farklı oranlarda hazırlanan reçine karışımlarına ait pik ekzoterm sıcaklıkları.	124
Çizelge 4.4. Farklı başlatıcı oranlarında hazırlanan ortoftalik ve izoftalik reçine karışımlarının mekanik özellikleri (7 günlük).....	129
Çizelge 4.5. Silis dolgulu reçine karışımlarının basınç dayanımları.	136

Çizelge 4.6. Bazalt dolgulu reçine karışımlarının basınç dayanımları.	137
Çizelge 4.7. Kuvars dolgulu reçine karışımlarının basınç dayanımları.	138
Çizelge 4.8. Hibrit dolgulu reçine karışımlarının basınç dayanımları.	138
Çizelge 4.9. Farklı tane sınıflarında dökülmüş dolgulu reçine karışımlarının, başlatıcı oranındaki değişime bağlı ortalama basınç dayanımları.	139
Çizelge 4.10. Farklı tane dağılımlarındaki dolgulu reçine karışımlarının reçine tüketim miktarları.	149
Çizelge 4.11. %5 cam ve %5 bazalt lifli kompozitlerin charpy testi sonuçları.	155
Çizelge 4.12. %7,5 cam ve %7,5 bazalt lifli kompozitlerin charpy testi sonuçları.	155
Çizelge 4.13. %10 cam ve %10 bazalt lifli kompozitlerin charpy testi sonuçları.	156
Çizelge 4.14. Hibrit lifli kompozitlerin charpy testi sonuçları.	156
Çizelge 4.15. %5 cam ve %5 bazalt lifli kompozitlerin eğilme testi sonuçları.	163
Çizelge 4.16. %7,5 cam ve %7,5 bazalt lifli kompozitlerin eğilme testi sonuçları.	164
Çizelge 4.17. %10 cam ve %10 bazalt lifli kompozitlerin eğilme testi sonuçları.	164
Çizelge 4.18. Hibrit lifli kompozitlerin eğilme testi sonuçları.	165
Çizelge 4.19. %5 cam ve %5 bazalt lifli kompozitlerin çekme testi sonucunda elde edilen değerler.	171
Çizelge 4.20. %7,5 cam ve %7,5 bazalt lifli kompozitlerin çekme testi sonucunda elde edilen değerler.	172
Çizelge 4.21. %10 cam ve %10 bazalt lifli kompozitlerin çekme testi sonucunda elde edilen değerler.	172
Çizelge 4.22. Hibrit lifli kompozitlerin çekme testi sonucunda elde edilen değerler...	173

KISALTMALAR

ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
AFS	American Faundry Society (Amerikan Dökümcüler Birliği)
ATR FT-IR	Attenuated Total Relectance Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Zayıflatılmış Toplam Yansıma Fourier Dönüşümü Kızıl Ötesi Spektroskopi)
BHV	Brinel sertliği
BPO	Benzoil peroksit(başlatıcı)
CoNp	Kobalt Naftanat
CTE	Termal Genleşme Katsayısı
CTP	Cam Takviyeli Plastik
DMA	Dimetil Anilin (hızlandırıcı)
DOP	Dioktil Fitalat
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
E-modülü	Elastikiyet modülü
F 0,8	Fuller denkleminde n katsayısı değeri 0,8 olan tane dağılımı
F 1,0	Fuller denkleminde n katsayısı değeri 1,0 olan tane dağılımı
FRCs	Tek Yönlü Lif Takviyeli Kompozitler
GFRP	Glass Fiber Reinforced Plastic (Cam Lif Takviyeli Plastik)
GLNFRP	Cam ve Lokal Naylon Hibrit Kompozit
GNFRP	Cam ve Naylon Hibrit Kompozit
HE	High Elongation (yüksek uzamalı)
KFRP	Kevlar kompozit
KGFRP	Kevlar ve Cam Hibrit kompozit
KGNFRP	Kevlar-Cam-Naylon Lifli Hibrit Kompozitler
LCTE	Lineer Termal Genleşme Katsayısı
LDPE	Düşük Yoğunluklu Polietilen
LE	Low Elongation (düşük uzamalı)
LNFRP	Lokal Olarak Dokunmuş Naylon Kompozit
MAN	Maleik Anhidrit
MEKP	Metil etil keton peroksit
NFRP	Naylon Kompozit
NNDA	N, N-Dietil Anilin(hızlandırıcı)
PBMA	Poli Bütil Metakrilat
PET	Polietilen Tereftalat
PM	Polimer Mortar(Polimer Harçlar)
PMMA	Poli Metil Metakrilat
PMK	Polimer Matrisli Kompozitler
PP	Polipropilen
PVA	Polivinil Alkol
RTM	Reçine Transfer Kalıplama
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SEN-T	Tek Kenar Çentikli Çekme
SFRP	Kısa Lif Takviyeli Polimerler

SMC
TEM
TGA
UP
UV
VARI

Saç kalıplama bileşigi
Transmisyon Elektron Mikroskobu
Termogravimetrik Analiz
Doymamış polyester
Ultraviyole
Vakum Yardımlı Reçine İnfüzyon



SİMGELER

B	Bazalt kumu (dolgu maddesi)
C	Kobalt Oktoat
H	Hızlandırıcı (Kobalt Oktoat)
Hv	Vickers sertliği
K	Kuvars kumu (dolgu maddesi)
M	Başlatıcı (Metil Etil Keton Peroksit)
P	Polyester reçinesi
S	Silis kumu (dolgu maddesi)



ÖZET

HİBRİT LİF VE MINERAL TAKVİYELİ YÜSEK PERFORMANSLI POLİMER KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI

Şevki EREN

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

Şubat 2018, 212 sayfa

Bu çalışma kapsamında, yüksek fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip, hibrit lif ve mineral takviyeli, yüksek performanslı, polimer kompozit üretimi gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Üretilen kompozitlerde, matris olarak ortoftalik ve izoftalik doymamış polyester reçinesi, takviye malzemesi olarak cam lifleri ve bazalt lifleri, mineral dolgu malzemesi olarak silis kumu, kuvars kumu ve bazalt kumu kullanılmıştır. Kompozit malzeme üretiminde yapılan deneysel çalışmalar 3 aşamadan oluşmuştur. İlk aşamadaki deneysel çalışmalar, farklı oranlarda başlatıcı ve hızlandırıcı kullanılarak hazırlanmış doymamış polyester reçine kompozit karışımları üzerinde gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada, bu reçine karışımları içerisine farklı türde ve farklı tane dağılımına sahip dolgu malzemeleri tek tek ve hibrit olacak şekilde karıştırılarak kompozit malzemenin özellikleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Üçüncü ve son aşama da ise, kompozit malzemenin her açıdan en iyi özelliklere sahip olmasını sağlamak ve sonuç olarak mevcut piyasada kullanılan malzemelere alternatif bir kompozit malzeme üretmek amacıyla, birinci ve ikinci aşamada yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, optimum reçine tüketimi sağlayan ve aynı zamanda en iyi fiziksel ve mekanik özelliklere sahip dolgulu reçine karışımları içerisine, farklı türde ve farklı hacim oranlarında kırılmış lif takviye malzemeleri ilave edilmiş ve oluşturulan hibrit lif takviyeli kompozit malzemeler üzerinde nihai deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler neticesinde, hem ortoftalik hem de izoftalik reçine için kurlenme ısısının ve polimerizasyonun kontrol edilebildiği optimum reçine karışımının, %1 başlatıcı ve %1 hızlandırıcı oranında elde edildiği belirlenmiştir. Bu karışım oranlarına sahip ortoftalik reçineler ile üretilen F0,8 tane dağılımına sahip silis dolgulu kompozitlerin daha az reçine tükettiği ve daha yüksek mekanik özelliğe sahip olduğu görülmüştür. Lifli kompozitlerde ise, “F0,8” tane dağılımlı *kuvars dolgulu* %10 cam lifli kompozitlerin en iyi mekanik özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir. Ancak, “F0,8” tane dağılımlı *silis dolgulu* %10 cam lifli kompozitlerin mekanik özelliklerinin de makul derecede iyi olması ve en az reçine tüketen karışım olması nedeniyle tercih edilebileceği kanaatine varılmıştır.

Anahtar sözcükler: Bazalt lifi, Cam lifi, Hibrit lif, Polimer kompozit, Polyester.

ABSTRACT

A RESEARCH ON THE PRODUCTION OF HYBRID FIBER AND MINERAL REINFORCED HIGH PERFORMANCE POLYMER COMPOSITE MATERIAL

Şevki EREN

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Composite Material
Technologies

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

February 2018, 212 pages

Within the scope of the study, it has been tried to produce high performance polymer composite with high physical, chemical and mechanical properties, hybrid fiber and mineral reinforced. In the produced composites, orthophthalic and isophthalic unsaturated polyester resin as matrix, glass fibers and basalt fibers as reinforcing material, silica sand, quartz sand and basalt sand as mineral filler material were used. Experimental studies in the production of composite materials have been made in 3 stages. Experimental studies at the first stage were carried out on unsaturated polyester resin composite mixes prepared using initiator and accelerator at different ratios. In the second step, the properties of the composite materials were tried to be improved by mixing the filler materials having different types and different particle distributions into these resin mixtures individually and as a hybrid. In the third and final stage, in order to make the composite material have the best properties in all respects and consequently to produce an alternative composite material to the materials used in the existing market, as a result of the experimental studies made in the first and second stages, chopped fiber reinforcement materials of different types and different volume ratios were added in to the filled resin mixtures having the best physical and mechanical properties and providing optimum resin consumption and the ultimate experimental work was carried out on the formed hybrid fiber reinforced composite materials. As a result of the analyzes made, it has been determined that the optimum resin mixture for both orthophthalic and isophthalic resins, in which the curing temperature and polymerization can be controlled, is obtained at the rate of 1% initiator and 1% accelerator. It has been found that silica filled composites with F0,8 grain size distribution produced with orthophthalic resins with such mixing ratios consume less resin and have higher mechanical properties. In fibrous composites, it was determined that 10% glass fiber composites with "F0.8" dispersed *quartz filled* have the best mechanical properties. However, it has been concluded that the "F0.8" dispersed *silica filled* 10% glass fiber composites may be preferred due to their mechanical properties being good at reasonable rates and being the least resin consuming mixture.

Keywords: Basalt fiber, Glass fiber, Hybrid fiber, Polymer composite, Polyester.

EXTENDED ABSTRACT

A RESEARCH ON THE PRODUCTION OF HYBRID FIBER AND MINERAL REINFORCED HIGH PERFORMANCE POLYMER COMPOSITE MATERIAL

Şevki EREN

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Composite Material
Technologies

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

February 2018, 212 pages

1. INTRODUCTION

Within the scope of the study, it has been tried to produce polymer composite with high mechanical, physical and chemical properties, hybrid fiber and mineral reinforced. It is predicted that the produced composites will bring some important advantages in terms of both technical and economical aspects. The most important of these is to achieve a more economical gain through the reduction of the resin which is the most influential parameter in the cost of the composite production with optimization of the mixture. Technically, it is aimed to achieve a significant sectoral advantage by improving the mechanical properties of mineral filler materials and fiber reinforcement materials used as hybrids.

2. MATERIAL AND METHODS

Experimental studies in the production of composite materials have been made in 3 stages. In the first experimental studies, different resin types (orthophtalic and isophtalic), different initiators (methyl ethyl ketone peroxide: 1%, 1,5%, 2% and 2,5%) and accelerator (cobalt octoate: 1%) ratios were used to prepare resin mixtures. Pretreatments applied on prepared mixtures have been carried out in a more comprehensive way. For this purpose, it has been tried to increase the contact surface, optimize interaction and homogenization by using magnetic stirrer, ultrasonic homogenizer and mechanical stirrer to increase the reaction rate and to realize efficient reaction. Physical, chemical and mechanical tests were performed on the resin mixtures produced. In the second stage,

pressure tests were carried out on the filled composites produced by hybridizing individual and hybrid dispersions (%60 basalt + %40 silica; %60 basalt + %40 quartz; %60 quartz + %40 silica) of mineral fillings of different types (silica, basalt, quartz) and different grain distributions (AFS40-45; F0,8; F1,0) into resin mixtures in order to obtain the best mechanical properties and to reduce the amount of polyester consumed. After the pressure test, SEM images were taken from the broken pieces and morphological analyzes were carried out. In the third and final stage, chopped fiber reinforcement materials of different types (glass fiber, basalt fiber) and different volume ratios (5%, 7,5%, 10% and hybrid fiber mixture: 6% glass fiber + %4 basalt fiber) were added to the filled resin mixtures to ensure that the composite material had the best properties in all respects, and mechanical tests (charpy impact, tensile, flexure) were performed on the formed hybrid fiber reinforced composite materials. After the charpy impact test, SEM images were taken from the broken pieces and morphological analyzes were performed.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

As a result of the study, it was observed that the gelation period decreased and the gelation temperature increased in both types of resins with increasing starter ratio. There was no significant change between peak exotherm temperatures and change in initiator ratio in orthophthalic resin. In isophthalic resin, peak exothermic temperature increased with increasing starter ratio. The viscosity of the isophthalic resin has a higher value than the orthophthalic resin. In the TGA analysis, when the composites obtained from isophthalic and orthophthalic resins containing 1% initiator with optimum parameters were examined, it was observed that the thermal shrinkage of the composite obtained from orthophthalic acid in both the first region and the second region was higher than isophthalic resin. Styrene content of isophthalic resin was higher than orthophthalic resin. The high content of styrene has a positive effect on the mechanical properties. When the spectra of the composites are examined, it is observed that the C = C stretching vibration at 912 cm^{-1} in the resins and the styrene molecule is left behind. As a result, it has been observed that the initiator of MEKP carries out the radical polymerization reaction by opening the existing double bonds in the styrene molecule. In addition, C-H interactions at 1455 cm^{-1} also increased with increasing polymer chain relative to the initial vibration of the starting resin. In the composites produced, it was concluded that the optimum initiator ratio was to be 1,0% for orthophthalic resin and 2% for isophthalic resin in terms of mechanical properties. However, it is thought that the mechanical properties of composites with 1% initiator ratio

in isophthalic resins are also at a reasonable level. However, in both types of resins, it has been found that not only tensile and flexural strengths at higher initiator ratios, but also elongation at break values are reduced.

In all fiber composites, it has been determined that as the fiber ratio is increased, the mechanical properties are increased and the highest mechanical properties are obtained at 10% fiber ratio. In all fiber mixtures, the highest mechanical properties were obtained in quartz-filled mixtures. In all filled mixtures with 10% glass and basalt fiber proportions, the mechanical properties of the composites in the "F0,8" particle distribution were determined to be higher than the mechanical properties of the composites in the "AFS40-45" particle distribution. It has been determined that 10% glass fiber composites with "F0,8" particle distribution *quartz filled* have the best mechanical properties. However, it has been observed that the mechanical properties of "F0,8" particle sized *silica filled* 10% glass fiber composites are also reasonably good. However, this mixture is the least resin consuming mixture and also because of the fact that the silica sand is more easily available in the industrial sector than the quartz sand, the use areas are more, the mineral deposits are higher and the unit price is lower, it has been concluded that, if this mixture is preferred, a composite having the desired mechanical properties can be produced.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

There is not much difference between the mechanical properties of isophthalic and orthophthalic resins. However, when assessed from the perspective of the cost of resins and the low viscosity value that is important for fiber wetting, it was concluded that "the use of orthophthalic resins with an initiator ratio of 1% in composite material production would be more appropriate". It has been found that silica filled composites with F0,8 dispersions produced with orthophthalic resins with such mixing ratios consume less resin and have higher mechanical properties. In fibrous composites, it was determined that 10% glass fiber composites with "F0,8" dispersed *quartz filled* have the best mechanical properties. However, it has been concluded that the "F0,8" dispersed *silica filled* 10% glass fiber composites may be preferred due to their mechanical properties being good at reasonable rates and being the least resin consuming mixture.

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler günümüzde, gemi üretiminden bina yapımına, ev aletleri yapımından uzay teknolojisine kadar, çok geniş bir alanda kullanılmaktadır. Kompozit Malzeme kavramının ortaya çıkması ve mühendislik açısından araştırılmaya başlanması 1940'lı yılların başında gerçekleşmiştir [1]. Kompozit malzemelerin, 21.yüzyılda geniş çapta bir kullanım alanı bulmasıyla, kompozit üretimi için alternatif hammadde arayışı önem kazanmıştır. Ayrıca, kullanım alanının artmasıyla birlikte daha hafif ve daha mukavemetli, korozyona ve kimyasallara dayanaklı, yüksek ve alçak sıcaklıklarda özelliğini kaybetmeden çalışan vb. niteliklere sahip malzemelere ihtiyaç duyulmuş ve bu ihtiyacı karşılayacak bileşenlere olan gereksinim artmıştır [2]. Elbette bütün bu özelliklerin aynı malzemede ve aynı zamanda bir arada bulunması mümkün değildir. İhtiyaca yönelik üstün özellikler elde etmek amacıyla, kimyasal bileşenleri farklı, birbiri içerisinde pratik olarak çözünmeyen iki veya daha fazla malzemenin kullanım yerindeki aranan özellikleri verebilecek en uygun malzemeyi oluşturabilmek için uygun oranlarda birleşimi ile kompozit malzemeler elde edilir [3], [4]. Dünya genelinde havacılık, uzay otomotiv ve savunma gibi endüstrilerdeki teknolojinin hızla gelişmesi ve rekabetin artması daha yüksek performanslı ürünlerin tasarlanması gerekliliğini ortaya koymuş ve bu durum sonucunda hafif ve yüksek mukavemetli malzemeleri gerekli kılmıştır. Bu ihtiyacı karşılayacak şekilde, farklı türde, matris ve takviye elemanı kullanılarak, farklı yapıda kompozitler üretilmiş ve üretilmeye de devam edilmektedir. Artan talep ve üretim doğrultusunda, polimer matrisli kompozit malzeme teknolojisi bugün hızla gelişmektedir ve hemen her gün piyasaya yeni ürünler sunulmaktadır [5]. Ancak plastik malzemelerin mukavemet değerleri genellikle yeterli oranda yüksek değildir ve ayrıca bu malzemelerin sünme değerleri ihmal edilemeyecek düzeyde yüksektir. Plastiklerin, mukavemet değerlerini arttırarak yapıda taşıyıcı eleman olarak kullanılabiliğini sağlamak adına farklı türlerde matris ve takviye malzemelerinin farklı yöntemler kullanılarak bir araya getirilmesiyle farklı yapılarda kompozitler üretilmektedir. Son zamanlarda, hibrit kompozitler üzerinde yapılan araştırmalar gittikçe artmaktadır. Hibritleştirilmenin amacı, birleştirilen malzemelerin özelliklerinin uyumlu olduğu bir kompozit yapıya ulaşmak ve takviye maddelerinden biri genellikle diğerinden daha ucuz olduğundan mekanik

özellikler ve belirli tasarım gereksinimlerini karşılama maliyeti arasında bir uyuşma sağlamaktır. Hibrit kompozitlerde pek çok lif ve dolgu malzemeleri kullanılmakla birlikte son zamanlarda, cam ve bazalt lif laminatları ve diğer doğal veya sentetik liflerin kullanımıyla hibrit kompozit üretimine yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasının ortaya çıkmasındaki en önemli etken, kompozit üretiminde yüksek miktarlarda reçine tüketiminin olması ve bu tüketimin getirdiği ekonomik yükümlülüğün artmasıdır. Bununla birlikte, sektöre kompozit performansını artırıcı yeni hammadde kaynaklarının (farklı lif ve mineral dolgu malzemeleri gibi) entegre edilmesi gerekliliğinin artması ve özellikle kompozit üretiminde dolgu malzemesi olarak kullanılan silis kumunun çok çeşitli alanlarda kullanılıyor olması ve ilerleyen zamanlarda hammadde sorunun yaşanması riskinin bulunmasıdır. Ayrıca Üniversite-Sanayi işbirliği çalışmaları kapsamında üniversitelerde var olan akademik bilginin kompozit üretim sektörüne aktarılması ile oluşacak ortak Ar-Ge çalışmaları neticesinde katma değeri yüksek ve sektörün beklentilerine cevap verebilen yeni nesil kompozit üretilmesinin mümkün olacağı öngörülmüştür. Bu nedenlerden dolayı çalışma kapsamında, optimum oranda reçine kullanarak, yüksek mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip, hibrit lif ve mineral takviyeli, yüksek performanslı, polimer kompozit üretimi gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla üretilen kompozitlerde, bağlayıcı olarak ortoftalik ve izoftalik doymamış polyester reçinesi, takviye malzemesi olarak cam lifleri ve bazalt lifleri, mineral dolgu malzemesi olarak silis kumu, kuvars kumu ve bazalt kumu kullanılmıştır. Ortaya konulan hibrit lif ve mineral takviyeli yüksek performanslı kompozitlerin, gerek teknik ve gerekse ekonomik açıdan önemli bazı avantajlar getireceği öngörülmüştür. Bunlardan en önemlisi, karışımdaki optimizasyon ile kompozit üretimindeki maliyeti en fazla etkileyen parametre olan reçinenin azaltılması sayesinde daha ekonomik bir kazanım sağlanmasıdır. Teknik açıdan sağlayacağı avantajlar değerlendirildiğinde ise, mineral dolgu malzemelerinin ve lif takviye malzemelerinin hibrit olarak kullanılması ile mekanik özelliklerde elde edilecek iyileştirmeler sayesinde sektörel açıdan önemli bir kazanımın elde edilmesi hedeflenmiştir.

Yapılan bu tez çalışmasıyla, kompozitlerin fiziksel özelliklerinin araştırılmasıyla birlikte kimyasal ve mekanik özelliklerinin de geniş spektrumda incelenmesinden dolayı literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmada, mevcut literatürden farklı olarak, farklı başlatıcı ve hızlandırıcı oranları kullanılarak hazırlanan karışımlar üzerinde uygulanan ön işlemler daha kapsamlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Bu amaçla, reaksiyon hızını artırmak ve verimli reaksiyon gerçekleştirmek için manyetik karıştırıcı ile birlikte ultrasonik homojenizatör ve mekanik karıştırıcı kullanmak suretiyle temas yüzeyinin artırılması, optimum etkileşme ve homojenizasyon sağlanmaya çalışılmıştır. Ayrıca, maksimum kompasiteyi sağlayacak ve polyester tüketim miktarını minimize edecek şekilde tane dağılımlarının belirlenmesi ve böylelikle, daha ekonomik kompozit üretiminin gerçekleştirilmesine çalışılmıştır. Bununla birlikte, mekanik özelliklerin arttırılmasını sağlamak amacıyla, farklı minerallerin ve farklı lif takviye malzemelerinin tek başına veya hibrit kullanımına yönelik karışım optimizasyonları gerçekleştirilmiştir.



2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemelerin avantajı, yapı bileşenlerinin en iyi kalitede seçilebilmesidir. Kompozit malzemelerde, yüksek mukavemete veya yüksek E-modülüne sahip olan “takviye edici” olarak adlandırılan malzeme ile “matris” olarak adlandırılan diğer bir malzeme bir araya getirilir. Örneğin; çelik takviyeli çimento, cam lif takviyeli plastikler ve naylon takviyeli kauçuk bir kompozittir [6].

Kompozit malzeme üretilmesi ile aşağıdaki bazı özellikler geliştirilebilmektedir. Bu özellikler genel olarak şöyle sıralanabilir [4], [7], [8].

- Yüksek dayanım,
- Yüksek rijitlik,
- Yüksek yorulma dayanımı,
- Mükemmel aşınma direnci,
- Yüksek sıcaklık kapasitesi,
- İyi korozyon direnci,
- İyi termal ve ısı iletkenliği,
- Düşük ağırlık,
- Çekicilik ve estetik görünüm vb.
- Akustik iletkenliğin (ses tutuculuğu) iyileştirilmesi
- Elektrik iletkenliğinin veya elektrik direncin iyileştirilmesi

Kompozit malzemelerin bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da mevcuttur, bunlarda [4];

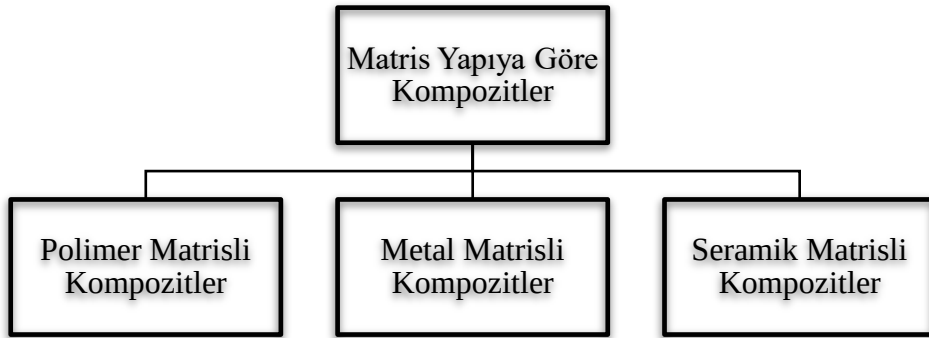
- Üretimin güçlüğü,
- Pahalı olması,
- İşlenmesinin güç oluşu ve gerekli yüzey kalitesinin elde edilemeyebilişi,

- Diğer malzemeler gibi geri dönüşümün (recycle) olmayışı,
- Kırılma uzamasının az oluşu gibi faktörler sayılabilir.

Yeni gelişen bir malzemeyi modern bir kompozit olarak adlandırmak için aşağıdaki kriterleri taşımalıdır.

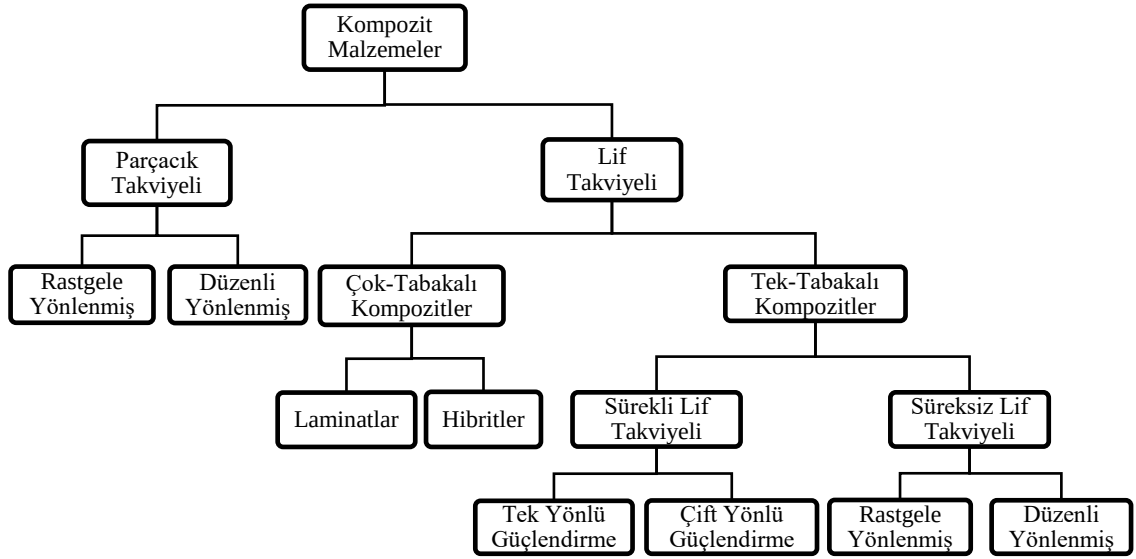
- İnsan yapısı olmalı,
- En az iki veya daha fazla fiziksel ve mekanik özelliği ayrı olan malzemelerin birleştirilmesi ve farklı ara yüzeye sahip olmaları,
- Herhangi bir, tek bileşenle elde edilemeyen mekanik özelliklerin gerçekleştirilmesi,
- Optimum özellikler elde etmek için, bir malzemenin diğer malzeme içine kontrollü şekilde dağıtılmasıyla, iki ayrı malzeme karıştırılarak, kompozit (karma) bir malzeme oluşturulmalı,
- Kompoziti oluşturan elemanların en iyi özelliklerinin bir araya toplanması gereklidir [4].

Kompozit malzemeler, matris fazına göre 3 ana sınıfa ayrılırlar. Matris fazına göre kompozitlerin genel olarak sınıflandırması Şekil 2.1’de gösterilmiştir [4], [9], [10].



Şekil 2.1. Matris yapıya göre kompozitlerin sınıflandırılması.

Lif takviyeli kompozit malzemeler, bu üç grup malzemedan herhangi birinin lifle takviye edilmesiyle elde edilirler. Kompozit malzemelerin güçlendirme yöntemlerine göre genel olarak sınıflandırılması Şekil 2.2’de gösterilmektedir [11], [12], [8], [7].



Şekil 2.2. Kompozitlerin güçlendirme yöntemlerine göre sınıflandırılması.

Beton; çimento ve agrega karışımından oluşan parçacık takviyeli kompozitler grubuna, fiberglass; polimer içerisine cam liflerinin gömülmesinden oluşan lif takviyeli kompozitler grubuna, plywood; ahşap kaplamaların birbirini izleyen tabakalar halinde döşenmesiyle oluşan tabakalı kompozitler grubuna örnek olarak gösterilebilirler [7].

2.2. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Yaygın olarak kullanılan kompozit türlerinden biri olan polimer matrisli kompozitler (PMK), matris yapı olarak polimer reçinenin, takviye elemanı olarak liflerin kullanıldığı kompozitlerdir. Bu malzemelerin oda sıcaklığındaki üstün özelliklerinin yanı sıra kolay üretimi ve düşük maliyeti sebebiyle, kompozitler arasında en çok uygulama çeşitliliğine sahip olan kompozitlerdir [9]. Ayrıca, PMK'lar, yüksek mukavemet, sertlik, aşınmaya karşı dayanıklılık, boyut ve termal kararlılık gibi pek çok avantajlara sahiptirler [13].

Son zamanlarda, polimer matris kompozitler otomotiv parçaları, uçak iç parçaları, ev aletleri ve inşaat malzemeleri gibi pek çok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır [10].

PMK'i daha iyi anlayabilmek için matris malzemesinin tanımı ve görevleri, matris olarak kullanılan polimerlerin yapısı ve özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu kısımda, matris yapı ve matris yapıyı oluşturan polimerler hakkında bilgi verilmiş ve daha sonra çalışmada kullanılan doymamış polyester reçinelerinin özellikleri tanıtılmıştır.

2.2.1. Matris Yapı

Lif takviye malzemelerinin gömülü olarak bulunduğu bağlayıcı malzemeye matris malzemesi denir. Kompozit malzemelerde matrisin bazı görevleri vardır. Bunlar, lifleri bir arada tutmak, yükü liflere dağıtarak iletmek, bazı durumlarda gevrek kırılmayı azaltmak ve lifleri çevresel faktörlerden korumaktır [14], [15], [16], [7]. İdeal bir matris malzemesi, düşük viskoziteli yapıda iken, lifleri sağlam ve uygun bir şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmeli, takviye bileşenini tam olarak ıslatabilmeli ve boşluksuz iyi bir ara yüzey oluşturmalıdır [3].

Polimer matris malzemeleri, termoset veya termoplastik yapıda olabilir. Termoset matris malzemeleri, polyester, vinil ester, bisfenol, epoksi reçine ve fenolik reçinelerden meydana gelmektedir. Termoplastik matris malzemeleri ise, poliamid, polipropilen vb. reçinelerin yanı sıra hibrit formda, polietilen ve polibutilen tereftalat, polieterketon ve polietersülfon gibi reçineler kullanılmaktadır [17].

Termoset kompozitler, termal işlemlerde 10-14 saat gibi bir kür süresini gerektirir. İşlem iki aşamalı olarak incelenmektedir. Birincisinde, çapraz bağlı ağ şeklindeki yapı içinde reçine jelleşir. Jelleşme aşaması çok önemlidir. Sınırlı bir ortalama moleküler ağırlık, tam sınırsız bir ortalama moleküler ağırlığa geçiş yapar. Arkasından matris yapı camlaşır. Bu evre başarılı olursa malzemedan istenilen dayanım elde edilebilir [18].

Matris seçiminde, malzemenin nem ve su alma özelliklerinin de göz önünde bulundurulması gereklidir. Ayrıca, kayma sertliği, basınç mukavemeti, uzama, kopma, yorulma ve darbe özellikleri de çok önemlidir. Matrisin yüksek bir kayma modülüne sahip olması istenir. Böylece, kompozitten elde edilen kayma katılığı sağlanmış olur. Kayma gerilmesi ve kayma modülü, matris yapı için mukavemetten daha önemli bir unsurdur. Matrislerin çoğu sıvı halde kullanıldığı için viskozite de önemli bir unsurdur [18].

2.2.2. Polimerler

Polimerler; plastikler, kauçuklar ve yapıştırıcıları içine alan büyük organik molekülü malzemelerdir [11]. Polimer malzemeler içinde, en büyük polimer çeşitliliğine sahip grup plastiklerdir [12]. Plastik şekil değiştirdikleri için, plastiklere bu isim verilmiştir [19]. Plastiklerin ana ilkel maddesi doymamış hidrokarbonlardır. Doymamış hidrokarbonlarda C atomları arasında iki veya daha fazla kovalent bağ vardır. C atomlarının yanında genellikle H, bazılarında Cl, F, O, N ve S atomları bulunur. C atomları arasındaki çift

kovalent bağdan biri, sıcaklık, basınç veya katalizör yardımıyla koparılarak iki reaksiyon bağı oluşturulur [12]. Polietilen, polipropilen, polivinil klorür, polistiren ve florokarbonlar, epoksiler, fenolikler ve polyesterlerin tümü plastikler olarak sınıflandırılabilirler. Çok değişik özellik kombinasyonlarına sahip olabilirler [9].

Polimerik bir malzemenin yapısı, onun oluşturulmasında yer alan polimerizasyon mekanizması ile yakından ilgilidir [20]. Polimerlerde, moleküler yapı, polimerizasyon derecesi, dallanma ve çapraz bağ oluşumu gibi unsurlar, üretim koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterebileceğinden dolayı, oluşan polimerin özellikleri de çok farklı olabilir [12]. Termoplastiklerin çoğu, zincir büyüme polimerleşmesiyle oluşur. Bu süreçte, çok sayıda küçük molekül, birbirine ortaklaşım bağıyla bağlanarak uzun molekül zincirleri meydana getirir. Ortaklaşım bağıyla birbirine bağlanan basit moleküllere monomer adı verilir (yunanca “tek” anlamındaki mono ile “parça” anlamındaki meros’tan). Monomer birimlerinden oluşan uzun molekül zincirlerine ise polimer adı verilmektedir (yunanca “çok” anlamına gelen poly ile “parça” anlamına gelen meros’tan). Monomerlerin, kimyasal olarak uzun molekül zincirleri halinde bir araya gelmesine zincir büyümeli polimerleşme (polimerizasyon) adı verilir [21]. Polimerizasyon derecesi, bir polimer zincirindeki “mer” sayısı ile ölçülür. Polimerin molekül ağırlığı, zincirdeki mer sayısı ve bir merin molekül ağırlığı ile çarpımına eşittir [12]. Polimerleşmeyi meydana getiren reaksiyonlar ilave (katılım, addition) ve yoğunlaşma (condensation) olmak üzere iki ana gruba ayrılır [19], [22].

Katılım polimerizasyonu (zincir reaksiyonu polimerizasyonu): Monomer birimleri, lineer makro moleküller meydana getirmek üzere, her defasında bir adet olacak şekilde, zincire bağladığı reaksiyondur. Sonuçta oluşan ürün molekülünün bileşimi, reaksiyona giren orijinal monomerlerin tam olarak çoğaltılmış halidir. Katılım reaksiyonu, polietilen, polivinil klorür, polistiren ve birçok polimerin sentezinde kullanılır [9], [20].

Yoğunlaşma polimerizasyonu (adım reaksiyonu): Polimerlerin, birden fazla monomerin katıldığı ve adım adım gerçekleşen, moleküller arası reaksiyonla meydana geldiği işlemdir. Sonuçta, genellikle su gibi küçük molekül ağırlığındaki yan ürün açığa çıkar veya yoğunlaşır. Tekrarlayan birimin kimyasal formülü, reaksiyona giren taraflarla aynı değildir ve her moleküller arası reaksiyonun gerçekleştiği yeni bir tekrarlayan birim oluşur. Bu adım adım gerçekleşen işlem, zincirleme olarak tekrarlanarak lineer bir molekül meydana getirir. Yoğunlaşma reaksiyonu için gerekli olan zaman, katılım

reaksiyonundan uzundur. Termoset polyesterler, yoğunlaşma polimerizasyonu ile üretilirler [9], [20].

PMK’de, matris malzemesi için en çok kullanılan malzeme termoset esaslı malzemelerdir [23]. Bu malzemeler, bir defaya mahsus ısıtıldığında istenilen biçim verilebilen, ancak katılaştıktan sonra tekrar ısı verildiğinde şekil verilemeyen malzemelerdir [23], [24].

Bunun nedeni, termoset matrisli malzemelerin moleküllerinin birbirlerine çapraz bağlı olmalarıdır. Çapraz bağlı yapıda, bu moleküller ısıtıldığında atomlar birbirlerinin üzerine kaymazlar. Ayrıca bu malzemeler çözünmezler. Bu durumdan dolayı, bu malzemelerin geri dönüşümü yoktur ve tekrar kullanılamazlar. Termoset plastikler, mukavemet ve sıcaklığa karşı dayanımları yönünden termoplastiklerden daha üstündürler [23]. Ancak aşırı sıcaklık, kovalent bağların kopmasına veya kavrulmasına, dolayısıyla malzemenin tahrip olmasına neden olur [12]. Termoset polimerler, dökme demir gibi gevrek malzemelerdir. Çok az bir şekil değiştirmenin ardından kırılırlar [11], [12]. Sıcaklık artınca mukavemetleri azalır fakat yumuşamazlar. Aşırı sıcaklıkta ayrışır ve kavrulurlar. Plastiklerin E-modülleri düşüktür ve bu değer genellikle metallerin 1/100’ü kadardır [12]. Metallerin elastikiyet modülü genel olarak $7 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ üstündedir. Buna karşılık, plastiklerin elastikiyet modülü, genellikle 70.000 kg/cm^2 ’dir [19]. Ayrıca, çevresel faktörlere ve asitlere daha dayanıklı olduklarından koruyucu kaplama ve dekorasyon amacı için kullanılmaya elverişlidirler [12]. Termosetler için, uzun kurulmuş ve nispeten basit işlem süreçleri; döküm, basınç ve aktarmalı kalıplamayı kapsar. Yakın zamanda, termosetlerin enjeksiyon kalıplanması başarılı şekilde geliştirilmiş ve günümüzde geniş çapta kullanılmaktadır [24].

Termoplastik matrisler, termoset plastik matrislerin aksine geri dönüşümü olan malzemelerdir. Bu malzemeler, üretimin sonunda da ısıtma soğutma yapıp tekrar şekil verilebilir duruma getirilebilirler. Termoplastik matrislerin bu özellikleri, esasen moleküllerinden kaynaklanmaktadır. Bu malzemelerin molekülleri, düz zincirli polimerlerdir. Bundan dolayı, termoplastik matris malzeme ısıtıldığında yapısındaki atomlar birbirlerinin üzerine kayarlar. Isıtma soğutma işlemlerinde, termoplastik matrislerin sadece fiziksel özellikleri değişirken, kimyasal özelliklerinde bir değişiklik oluşmaz [23]. Termoset reçinelerin, termoplastiklerden üstün olduğu zannedilirse de, bu durum her zaman geçerli değildir. Kullanılacakları yerde, ısı ve mekanik özellikler ikinci derecede önemli ise şekil verme kolaylığı nedeniyle termoplastik malzeme kullanımı öngörülür. Çünkü termoplastik malzemeler komplike kalıpları daha kolay doldurur [19].

En yaygın kullanılan ve en ucuz polimer matris reçineleri, polyesterler ve vinil esterlerdir. Bu matris malzemeleri, yaygın olarak cam lif takviyeli kompozitlerde kullanılır. Bu tür polimerlerde değişik reçine formülasyonları kompozitin çok geniş bir aralıkta farklı özelliklere sahip olmasını sağlar [9].

Tez çalışması kapsamında, matris malzemesi olarak termoset reçine olan doymamış polyester reçinesi kullanılmıştır. Bu nedenle, bu kısımda, öncelikle genel olarak polyesterlerden söz edildikten sonra, doymamış polyester reçinelerinin özellikleri açıklanmıştır.

2.2.3. Polyesterler

Polyesterler, polimer zincirinde tekrarlanan birim olarak ester grubu ($-C=O-O-$) içeren ve çok sayıda üyesi bulunan bir polimer ailesi olup, ilk olarak 1938 yılında Carothers ve Hill tarafından, dikarboksilik asitler ve alifatik diollerin polikondenzasyonu ile sentezlenmiştir [25], [26]. Ester gruplarını bağlayan yapısal birimlerin kimyası, polyesterleri, kararsız biyomedikal matrislerden sıvı kristallere, liflere ve ısıya dayanıklı performans malzemelerine kadar her şeyi kapsayan farklı gruplar haline getirerek, son derece geniş bir aralık içinde değiştirebilir. Esterleşme, termodinamik olarak geri dönüşümlü (tersinir) bir reaksiyondur. Bu nedenle, tüm polyesterler teorik olarak ana zincir ester bağlarının bölünmesine neden olan suyun varlığında potansiyel olarak bozunabilir [25]. Bu polimerler ilk zamanlar düşük molekül ağırlıkları nedeniyle ortaya çıkan düşük ergime sıcaklığı ve organik çözücülerde kolay çözünme probleminden dolayı geniş kullanım alanı bulamamıştır. Polyesterler, 1940'lı yıllarda, yüksek molekül ağırlığına sahip ve kimyasal direnci yüksek olan yeni polyesterlerin sentezlenmesi ile ticari pazarda yerini almış ve 1950'li yıllarda PET üretimi ile polyester üretimi önemli ölçüde artış göstermiştir [26].

2.2.3.1. Doymamış Polyester Reçineleri

Doymamış polyester reçineleri; düşük maliyeti, kısa zamanda kür edilebilmesi, hava koşullarına ve kimyasallara karşı dirençli olması, kolaylıkla işlenebilmeleri, iyi bir elektriksel yalıtkan olmaları, sıvı formundayken kolaylıkla liflerle takviye edilebilmeleri, oda sıcaklığında ve atmosfer koşullarında sertleşebilmeleri, hızlı çapraz bağlanmaları ve bu malzemeden üretilen ürünlerin çok iyi mekanik ve kimyasal özelliklere sahip olması gibi pek çok avantaja sahip olmalarından dolayı tüm dünyada yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar [26].

Doymamış polyester reçinesi, bir dizi (C=C) çift bağı içerir [27]. Doymamış polyesterler, iki işlevli bir alkol ile doymamış iki işlevli organik asitlerin reaksiyona sokulması ile elde edilir. Kullanılan asitler, maleik, fumarik, fitalik ve tereftalik asitleri içerir. Alkoller; etilen glikol, propilen glikol ve halojenli glikolü kapsar [16]. “Doymamış” terimi molekül içerisindeki reaktif (tepkin) bölgelerin olduğunu ifade eder [27].

Tipik bir polyester, en az üç içerikten meydana gelir: bir polyester, bir çapraz bağlayıcı ajanı ve bir başlatıcıdır [15]. Doymamış polyester reçinesinin kürleşme reaksiyonu, doymamış polyester reçinesi (UP) ile viskoziteye ve işleme koşullarına bağlı olarak, ağırlıkça %35–45 (ya da, %30-50 [16]) oranında kullanılan çapraz bağlayıcı- monomer arasındaki serbest radikal zincir büyümesi çapraz bağ polimerizasyonudur [26], [28]. Çapraz bağlayıcı monomer olarak, genellikle stiren kullanılır. Stiren, ayrıca, işlenebilirliği geliştirmek için viskoziteyi düşürür [15]. Stiren; ucuzluğu, yüksek reaktivitesi ve esnekliği gibi avantajlarından dolayı tercih edilmektedir [26]. Diğer monomerler, vinil toluen, klorostiren (alev geciktirici özelliği kazandırıcı), metil metakrilat (hava koşullarına dayanıklı) ve dialil fitalat (düşük viskoziteli ve önceden reçine emdirmeye (prepreg) için kullanılan) kapsamaktadır. Oluşan polyesterin özellikleri büyük oranda çapraz bağa ve kür malzemesine bağlıdır. Polyester reçinelerinin asıl avantajlarından biri, işlem sürelerinde çok yönlülüğe izin vererek ya oda sıcaklıklarında ya da yükseltilmiş sıcaklıklarda kür için formüle edilebilmeleridir [15].

Polyester ve stiren çözeltisi, tek başına, pratik amaçlar için çok yavaş polimerize olur. Bu nedenle, tepkimeyi hızlandırmak için küçük miktarlarda başlatıcılar ve hızlandırıcılar eklenir. Başlatıcılar, polimerizasyon reaksiyonunu başlatmak için kullanımdan hemen önce reçineye ilave edilirler. Başlatıcılar, gerçekte kimyasal reaksiyona katılmazlar ancak işlem etkinliğini basitleştirirler. Polyester reçinelerinin polimerizasyonunda, başlatıcı olarak peroksit esaslı yapılar kullanılır. Siklo hegzano peroksit, metil etil keton peroksit (hidroperoksitler), benzoil peroksit ve akil peroksitler bunların başlıcalarıdır. Stiren ve reçine içeriğine bağlı olarak, %2,5–4 oranlarında başlatıcı kullanılır. En çok tercih edilen hızlandırıcılar, kobalt naftalat ve kobalt oktoat olup, ayrıca dietil anilin ve dimetil anilin gibi hızlandırıcılar, tepkimeyi hızlandırmak için uygulamadan kısa süre önce eklenebilirler [26], [28].

Doymamış polyesterler, 80 °C’ye kadar dayanabilirler ve cam lifleriyle kolaylıkla birleştirilebilirler. Polyester reçineleri, kür edildiğinde %4 ila %8 arasında büzülürler [27].

Doymamış polyesterler, birçok şekilde işlenebilmekle birlikte, çoğunlukla herhangi bir şekilde kalıplanırlar. Açık kalıba döşemek veya püskürtmeyle doldurmak, küçük hacimli parçaların birçoğu için kullanılan yöntemdir [21].

Doymamış polyesterler, temel yapıtaşının yapısına bağlı olarak tiplere ve sınıflara ayrılır. Bunlar, ortoftalik anhidrit, izoftalik anhidrit, tereftalik anhidrit, bisfenol-fumarat, klorendik ve disiklopentadiendir [29], [30]. Tez çalışması kapsamında, matris malzemesi olarak ortoftalik ve izoftalik reçineler kullanıldıkları için bu kısımda ortoftalik ve izoftalik reçineler hakkında bilgi verilmiştir.

Ortoftalik (Orthophthalic) Reçineler

Bunlar, yaygın olarak orto ya da genel amaçlı reçineler olarak adlandırılır ve ftalik anhidrid, maleik anhidrid ve propilen glikol esaslıdırlar. Ftalik anhidrid içindeki asit grupları, benzen halkasının bitişik karbon atomları üzerinde olduğundan izoftalik ve tereftalik asit ile elde edilenler kadar yüksek moleküler ağırlıklı reçine üretmek çok zordur. Bu duruma göre, ftalik anhidridten yapılmış reçineler, izo/tera muadillerine göre daha kötü termal stabilite ve kimyasal dirence sahiptir. Rijittirler, çatlamalara karşı dirençlidirler ve açık renklidirler [29].

İzoftalik (Isophthalic) Reçineler

Bu reçineler, izoftalik asit ve maleik anhidrite dayanmaktadırlar ve yüksek mukavemet, kimyasal ve termal direnç, tokluk ve esneklik özelliklerine sahiptirler [29], [31]. İzoftalik reçineler, ortoftalik reçinelerden daha yüksek çekme ve eğilme dayanımı gösterirler. Bu durum, izoftalik reçinelerin ortoftalik reçinelerden genellikle daha lineer biçimde ve daha yüksek moleküler ağırlıklı polimerler olmalarından kaynaklanabilir [31]. İzoftalik asit olarak asit grupları, esterleşme reaksiyonunda daha büyük doğrusallığa sahip ve daha yüksek moleküler ağırlıklı polimerler üretme fırsatını arttıran benzen halkasının tek bir karbonuyla ayrılırlar [29]. İzoftalik asit, çok kullanılan bir doymamış asittir. Sertleşmiş reçineye su dayanımı sağlar. Kimyasal maddelere karşı dayanım aranan polyester üretiminde kullanılır [5].

2.2.4. Katkılar (Modifiye Ediciler)

Katkısız haldeki polimerlerin; mekanik, kimyasal, termal ve fiziksel özellikleri geleneksel malzemelere göre kötüdür [5]. Bu amaçla, katkısız polimerlere, işlenebilirliğini (şekillenebilirlik) arttırmak, oksidasyonu (korozyonu) azaltmak, renk vermek,

moleküler ağırlığı azaltmak, esnekliği arttırmak, takviye etmek, alevlenmeyi geciktirmek veya elektriksel iletkenliği arttırmak, polimerin maliyetini azaltmak vb. özellikler için çeşitli katkılar ilave edilerek polimerin kullanım alanı daha da genişletilmiş olur [32], [33]. Katkılar iki gruba ayrılırlar: birincisi, hedeflenen amaca göre performans ile ilgili katkılar, ikincisi ise, işleme ile ilgili katılardır [33]. Tipik katkılar, dolgu malzemeleri, plastikleştiriciler (yumuşatıcılar), stabilizatörler (dengeleyiciler), renklendirici maddeler ve alev geciktiriciler olarak adlandırılırlar [9].

2.2.5. Dolgu Maddeleri

Kompozit üretiminde kullanılan dolgu maddeleri farklı tane çaplarında ve matris yapı içerisinde dağınık olarak bulunmaktadır. Taneli (agrega) kompozitlerde kullanılan tane çapı genel olarak $1\mu\text{m}$ 'den daha büyüktür. Taneciklerle (dolgu malzemeleri) güçlendirilmiş kompozitlerde ise tanecik boyutu, $0,01-0,1\mu\text{m}$ arasında değişmektedir. Taneli kompozit olarak en çok kullanılan malzemelerden biri olan betonda, tüm hacmin yaklaşık olarak %60-%80 kadarını taneler oluştururken dolgulu kompozitlerde ise, dolgu malzemelerinin hacim oranı, toplam hacmin %25'i ve üstünde değerler almaktadır [1], [34].

Taneli kompozitler, genel olarak sert yapıdaki tanelerin, sünek bir matris malzemesine bağlanmasıyla üretilmektedir. Bu türden kompozit malzemelere örnek olarak, çimento ile agrega karışımlarından oluşan betonlar, polimer bağlayıcı ve agrega karışımlarından oluşan polimer betonlar gibi malzemeler verilebilir [1].

Dolgulu kompozitlerde, matris malzemesi asıl yük taşıyıcı faz olmasına rağmen, kompozit içerisinde dağınık olarak bulunan dolgu malzemeleri genel olarak dislokasyonların hareketini engelleyerek matrisin dayanımını artırır ve neticede daha güçlü bir kompozit elde edilmesine olanak sağlar. Taneli kompozitlerde ise, matris malzemesi genellikle yardımcı yük taşıyıcı olarak görev alırken matris yapı içerisinde dağınık olarak bulunan taneler matrisin şekil değiştirmesini engellerler [1].

Dolgu malzemeleri, özelliklerindeki gelişmeler sayesinde kompozit ürün uygulamalarında eskiye oranla daha yüksek miktarda kullanılmaktadır. Maddesel, bitkisel, sentetik kökenli, toz, yaprak, kristal halinde, tercihen reçineye göre hareketsiz ve nihai ürüne yeni özellikler getiren ürünlerdir [5].

Toz, bez (fabric), lif ve benzeri gibi dolgular, polimerlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılırlar [33]. Dolgular, özgül ağırlığı ya azaltır ya da

arttırırken, hacmi, çekme dayanımını, sertliği, aşınma direncini ve rijitliği arttırarak, plastikleri geliştirmelerinin yanı sıra elektriksel ve termal özellikleri, görünüşü ve kimyasal direnci de iyileştirirler [32].

Dolgular, ürünün fiyatına ve istenilen özelliklerine bağlı olarak çeşitli oranlarda kullanılırlar [33]. Bu oranlar, mevcut ağırlığın %80'ine kadar çıkabilir [35]. Eğer dolgular çok yüksek miktarlarda kullanılırlarsa, kümelenerek zayıf noktalar ve boşluklar meydana getirirler. Böylece kendilerinden beklenen hedefi gerçekleştiremezler. Dolguların birincil amacı, polimer zincirinin hareketini kısıtlamaktır, böylece dayanımı arttırırlar fakat sünekliği (düktilite) azaltırlar. Ayrıca, ürünün maliyetini azaltmak, ürünün büzülmesini kontrol etmek veya malzemenin biçimlendirilebilmesini arttırmak için kullanılabilirler [33].

Lifli dolgular, ürünün dayanımını arttırmada özellikle etkilidir. Bu dolgular cam lifleri, organik tekstil lifleri veya asbest (kayalifi) gibi mineral lifler olabilir. Lifli dolgular, sonradan lif takviyeli plastikler olarak kalıplanan polimerik malzemeler ile karıştırılabilmesi için sıklıkla kısa boylarda kırılırlar [36].

Dolgu malzemeleri, düşük nem alma özelliğine sahip olmalıdır. Nem ürünün sonlanmış yüzey rengini etkiler [35]. Dolguların boyama etkisi de önemlidir. Boya yerine de kullanılırlar fakat bazı hallerde iyi renk vermezler [5]. Çinko oksit ve titanyum oksit, asıl polimere renk vermek için pigment olarak kullanılırlar [37].

Genel olarak kullanılan dolgu maddeleri; odun unu (wood flour: çok ince toz haline gelmiş testere tozu), silika unu ve kum, kuvars, cam küreler (glass spheres), talk pudrası, doğal kalsiyum silikat (wollastonite, CaSiO_3), kalsiyum karbonat (CaCO_3), karbon siyahı, kil ve alüminyum trihidrat, kırpıntı bez, kırpıntı kâğıt, mika tanecikleri, asbest ve hatta bazı sentetik polimerler vb. maddelerdir [32], [35], [9]. Parçacık boyutları 10nm (nanometre)'den makroskobik boyutlara kadar değişir. Dolgu içeren polimer malzemeler, ayrıca kompozit malzemeler olarak da sınıflandırılır [9]. Örneğin, cam küreler, kil veya kalsiyum karbonat, polyester reçinelerin rijitliğini arttırırken, fiyatı azaltmak için hazır kalıplama bileşenli levhalara veya dökme kalıplı bileşenlere eklenirler [32]. Tipik dolgu malzemeleri ve özellikleri Çizelge 2.1'de belirtilmektedir [35].

Çizelge 2.1. Tipik dolgu malzemeleri ve özellikleri.

Dolgu Malzemeleri	Özellikleri
Cam dolgu	İyi elektrik yalıtım özelliği
Ahşap tozu, Kalsiyum karbonat	Düşük maliyet ve dayanım, büyük sudeler için uygundur
Asbest	Yüksek ısı direnci (sağlığa zararlı olduğundan tavsiye edilmez)
Alüminyum tozu	Yüksek mekanik dayanım
Kırpıntı kâğıt, Kırpıntı bez, Mika tanecikleri	Makul seviyede elektrik yalıtım özelliği ile birlikte iyi dayanım

2.2.5.1. Plastikleştiriciler (Yumuşatıcılar)

Polimerlerin; esneklik, süneklik ve tokluğu, plastikleştirici (yumuşatıcı) denilen katkılarla iyileştirilebilir. Yumuşatıcıların ilavesi, aynı zamanda sertlik ve rijitliği de düşürür. Yumuşatıcılar, genellikle sıvı haldedir ve düşük buharlaşma basıncı ve molekül ağırlığına sahiptirler. Küçük yumuşatıcı moleküller, büyük polimer zincirleri arasına yerleşerek ve zincirler arası mesafeyi uygun şekilde arttırarak moleküller arası ikincil bağ kuvvetlerini düşürürler. Yumuşatıcılar, polimerlerin camsı geçiş sıcaklığını düşürerek polimerlerin ortam şartlarında, sünek ve esneyebilir olması istenen uygulamalar için uygun hale gelmesini sağlar. Bu uygulamalardan bazıları; ince film, boru, yağmurluk ve perdelerdir [9].

2.2.5.2. Stabilizatörler (Dengeleyiciler)

Bazı polimer malzemelerin mekanik bütünlüğü, normal atmosfer şartlarında hızlı bir bozulmaya uğrar. Plastiklik özelliğinin zayıflaması; renk değişimi, mekanik özelliklerin yitirilmesi, çatlamlar ve yüzey çatlakları ile kendini gösterir [35]. Bu bozulmayı engelleyen katkılara, dengeleyici adı verilir [9]. Dengeleyiciler, plastiklerin özelliklerini yitirmelerini azaltan veya önleyen antioksid, antiozon (ozona karşı koruyucu) maddeleri içeren ve ultraviyole ışınları absorbe eden maddeler olarak, plastik içine ilave edilirler [35].

Polimerin ışığa özellikle de ultraviyole (UV) ışınmasına maruz kalması, yaygın olarak bilinen bir bozulma şeklidir. UV ışınlar, molekül zincirindeki kovalent bağlarla

etkileşime girerek bunların kopmasına, bazılarının da çapraz bağlanmasına neden olabilir. UV kararlılığının sağlanması için iki yaklaşım vardır. Birincisi, yüzeyi ince bir tabaka halinde, UV-emici malzeme ile kaplamaktır. Bu çözüm, aslında güneş ışınlarını engelleyici olarak davranır ve UV ışınlarının önceden içeri girerek zarar vermelerini engeller. İkinci yaklaşımda ise, UV ile kırılan bağlarla reaksiyona girerek, polimerin daha fazla zarara uğramasına neden olacak reaksiyonları engelleyici malzemeler ilave etmektir [9].

Bir başka önemli bozulma türü ise oksidasyondur. Oksidasyon, oksijen (bu çift atomlu oksijen (O_2) veya ozon (O_3) olabilir) ile polimer molekülleri arasındaki kimyasal etkileşimin bir sonucudur. Dengeleyiciler; oksijeni, polimere ulaşmadan tüketerek ve/veya oksidasyon reaksiyonunun oluşumunu engelleyerek malzemenin daha fazla zarar görmesini engeller [9].

2.2.5.3. Renklendiriciler

Renklendiriciler, boya ve pigment şeklinde ilave edilerek polimerin belirli bir renge sahip olmasını sağlarlar. Boya molekülleri, polimer içerisinde tam olarak çözünür [9]. Boyalar, mineral veya organik kökenli ürünlerdir. Reçinenin ve jelkotun boyanmasında kullanılırlar. Çeşitli boya tipleri ve madensel boyalar, genellikle metal oksitleridir. En tanınmış olan titan oksit (TiO) beyaz renk verir. FeO , siyah renk verir. Bazı ürünlerin ağırlaştırıcı etkisi de vardır [5]. İnorganik pigmentler genellikle kömürleşme olmadan veya rengi solmadan yüksek sıcaklıklara dayanabilir. Pigmentler, polimerler içerisinde çözünen katkı maddeleri değildir, daha çok dağılmış halde bulunurlar ve malzemenin geçirgenlik özelliğini azaltırlar. Pigmentler ayrıca, kaliteyi değerlendirmeyi güçleştiren hava boşlukları gibi kusurları gizlerler. Neredeyse sınırsız sayıda bir renk yelpazesi, şeffaflık, yarı saydamlık ve opaklık mümkündür [32].

2.2.5.4. Alev Geciktiriciler

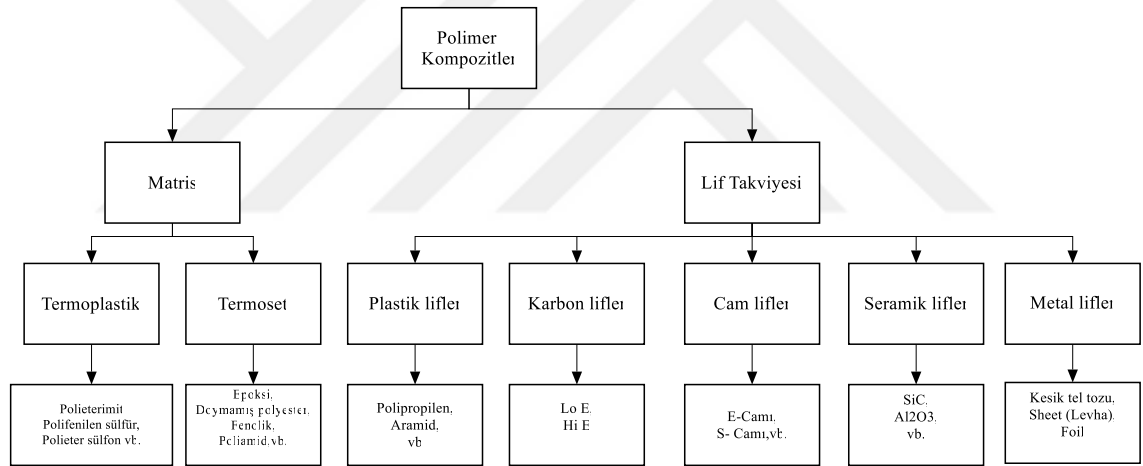
Pek çok polimer, doğal (saf) haliyle alevlenme özelliğine sahiptir. Yanıcı polimerlerin alevlenme direnci alev geciktirici katkı ile artırılır. Bu geciktiriciler, gaz fazı boyunca, yanma olayıyla etkileşime girerek veya daha az ısı oluşturan bir reaksiyon meydana getirerek mevcut sıcaklığı düşürür ve yanmanın yavaşlamasını veya ara vermesini sağlayarak iş görürler [9].

2.3. LİF TAKVİYELİ POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Bölüm 1’de açıklandığı üzere, kompozitler, mevcut temel malzemelerin olumsuz yanlarının iyileştirilerek kompozitin kullanım alanının genişletilmesi amacıyla üretilen malzemelerdir [1]. Takviye edici faz, ya doğada lifli ya da lif olmayan (parçacıklar) şeklinde olabilir ve lifler bitkilerden ya da başka bazı canlı türlerden türetilirse doğal lif olarak adlandırılırlar [38]. Kimyasallardan üretilen liflere sentetik lifler denir [10].

Lifler, özellikle uzun ve sürekli şekillerde, malzemelerin en rijit ve en güçlü olmasını sağlar ve bu sebeple, lifler; güçlendirmede en yaygın olarak kullanılan yöntemdir [39].

Lif takviyeli kompozit malzeme iki fazdan oluşur. Kompozitin sürekli fazını matris malzemesi oluştururken, matris yapı içerisinde takviye olarak kullanılan lif malzemeleri ise ikinci fazı oluşturur [1]. Şekil 2.3’te, farklı türlerde matris malzemeleri ve lif takviyeleri seçilerek üretilen polimer kompozitler gösterilmiştir [40].



Şekil 2.3. Farklı türlerde matris ve lif takviyelerinden oluşan polimer kompozitler.

Lif takviyeli plastiklerin temel avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir [41], [39].

- Tasarım serbestliği,
- Çok çeşitli malzemeler,
- Çok çeşitli özellikler,
- Düşük yoğunluk,
- Yüksek özgül mukavemet ve özgül rijitlik,
- İyi korozyon ve elektrik direnci,

- Üretim yollarının çeşitliliği,
- Ağ şeklinde üretim,
- Limitsiz şekil potansiyeli,
- Kısmi birleştirme sayesinde montaj süresinin kısalığı ve fiyatların düşüklüğü,
- Malzemeyi, verilen uygulamaya uygun hale getirebilme yeteneği,

Lif takviyeli plastiklerin ana dezavantajları; çelik ve alüminyum ile karşılaştırıldığında, düşük modüle sahip olması, tasarım verilerinin elde edilme maliyeti ve tasarım yöntemlerinin gelişim maliyeti, yeni yapım ve üretim tekniklerinde yatırım ve geliştirme ihtiyacı ve başarılı üretimler geliştirmek için hazırlık süreci ve maliyet olarak sıralanabilir [41].

2.3.1. Lif Takviyeli Kompozitlerin Mukavemetini Etkileyen Faktörler

Lif takviyeli kompozitler ile tasarımda gerilme analizini gerçekleştirmeden önce, bir üretim yöntemi tasarlamak ve bir güçlendirme yöntemi seçmek gereklidir. Malzeme yapısı ve dolayısı ile performans, kritik olarak bu seçimlere bağlıdır ve daha sonra, yöntemlerde veya malzemelerde yapılan değişiklikler, önceki gerilme analizi yöntemini geçersiz kılabilir. Mühendisler, özellikleri açısından en uygun olan ve istenilen tasarımı elde etmek için en düşük fiyatlardaki malzemeleri seçmelidirler [41].

Lif takviyeli kompozitlerin termal genleşme katsayıları (CTE) kompozit yapıların tasarımındaki ve analizindeki çok önemli parametrelerdir. Polimer matrisinin CTE'si tipik olarak liflerinkinden çok daha yüksek olduğundan ve lifler genellikle anizotropik termal ve mekanik özellikler sergilediğinden, sıcaklık değişiminden dolayı kompozitlerden kaynaklanan gerilme çok karmaşıktır [42]. Tek bir lifin enine CTE'sini değerlendirmek için literatürde bugüne kadar kullanılan az sayıda deneysel ve analitik yaklaşımlar vardır. Bunlar; sıcak preslenmiş lif demetlerinin doğrudan ölçümü, kompozit özelliklerden ekstrapolasyon, taramalı elektron mikroskobu (SEM), transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ve lazer kırınımı yöntemleridir [43].

Başlangıç elastik deformasyondan sonra bir kompozitte meydana gelebilen beş temel mekanik kırılma şekli mevcuttur [14]. Bunlar;

- Lif kopması ve kırılması,
- Reçine çatlaması, mikro çatlak ve büyük kırılma,

- Lif ve matris arasında sıyrılma,
- Bir laminatta bitişik katların sıyrılması,
- Matristen lifin çekilmesi ve gerilme yumuşamasıdır.

Lif takviyeli plastikleri kullanan bir tasarımcı, şekil ve üretim gerekliliklerine bağlı olarak, yöntemlerin seçimini ve istenilen özelliklere bağlı olarak bileşenlerin seçiminde, aşağıdaki faktörleri ayrıca dikkate almalıdır [39], [7].

- Lif boyutları (uzunluk, çap) ve kritik lif uzunluğu
- Lif hacim oranı,
- Liflerin dağılım ve yönelimi,
- Liflerin ve matrisin özellikleri,
- Lif ve matris arasındaki yapışma (ara-yüzey bağı),
- Lif takviye malzemeleri

2.3.1.1. *Lif Boyutları ve Kritik Lif Uzunluğu*

Lifler, değişik kaynaklarda, fiberler veya elyaflar olarak da adlandırılmaktadır. Lif terimi, uzun eksenli, çapından çok daha büyük olan malzemelerin genel bir ifadesidir [15].

Kompozit içerisinde, güçlendirme amacıyla kısa veya uzun lifler kullanılabildiği gibi, kompoziti tümüyle çevreleyen sürekli lifler de kullanılabilmektedir. Dolayısıyla, lif uzunlukları farklılıklar gösterebilmektedir [1]. Amerikan Beton Enstitüsünün (ACI), lif takviyeli beton konusunda çalışan 544 sayılı komitesi' ne göre, bir lifi tanımlayan en uygun sayısal parametrenin "lif narinlik oranı" olduğunu belirtmiştir [1]. Narinlik oranı ifadesi, lif uzunluğunun, çapa oranıdır (l/d) ve sıklıkla kısa lif uzunluklarını belirtmek için kullanılır. Lifler için, narinlik oranları (l/d), normal olarak 100'den büyük olmalıdır [15], [37]. Lifler, tellere kıyasla, çok daha narin olan güçlendirme malzemeleridir [1].

Tipik lifler, 10 μm (10×10^{-4} cm)'den, 150 μm (150×10^{-4} cm)'ye kadar değişen çaplara sahiptir [7]. Diğer bir kaynakta ise, liflerin, genellikle 5-10 μm çapa sahip olduğu, bununla birlikte bazı türler için (örnek; boron) çapları 100 μm 'ye, modül ve dayanımlarının sırasıyla, 70-800 GPa ve 1-7 GPa'a kadar çıkabildiği belirtilmiştir. Kopma uzaması %0,27-%5 arasındadır [14].

Lif uzunluğunun çapa oranı (l/d) büyüdüğü zaman kompozitin dayanımı yükselir. Lifler, yüzey kusurundan dolayı sık sık kırılır. Lif çapını mümkün olduğunca küçük tutmak lifin yüzey alanını düşürür ve bunun sonucunda kusurlar azalır. Ayrıca, uzun lifler de tercih edilebilir. Lifin uçları, lifin geri kalanından daha az yük taşır, bunun sonucunda, ne kadar az sayıda uç olursa, liflerin yük taşıma kabiliyeti o kadar yükselir [7], [37].

Kompozit malzemenin, dayanım ve rijitliğinin belirgin bir şekilde artması için, lif boyunun kritik bir değerden uzun olması gereklidir. Bu kritik lif boyu (l_{kri}), lif çapı (d), lifin çekme dayanımı (σ_e) ve lif-matris ara-yüzey bağı dayanımına (τ_c) veya matrisin kayma akma dayanımına (matrisin deformasyona başladığındaki gerilme), hangisi küçükse, bağlıdır. Kritik lif boyunun hesaplanmasında Denklem (2.1) kullanılmaktadır [8, Denklem (16,3)], [6, Denklem (17-9)], [36, Denklem (16-6)].

$$l_{kri} = \frac{\sigma_e \times d}{2\tau_c} \quad (2.1)$$

Birçok cam lifi-matris ve karbon lifi-matris kombinasyonları için, bu kritik uzunluk, lif çapının 20 ila 150 katı civarında olup, 1mm mertebelerindedir [9].

2.3.1.2. Lif Hacim Oranı

Lif takviyeli kompozit malzemeler, matris ve lif fazının özelliklerine bağlı olarak, sünek matrisli ve kırılğan lifli kompozitler ile kırılğan matrisli ve sünek lifli kompozitler olmak üzere iki ana başlık altında ele alınabilir. Matris ve lif fazının özelliklerine göre, kompozit içerisindeki lif hacim oranları da değişmektedir [1].

Sünek matrisli ve kırılğan lifli kompozitlerde, malzemenin matris fazını; epoksi, polyester, fenolik reçine, melamin reçinesi gibi organik maddeler oluşturur. Bu kompozitlerde matris malzemesine göre daha kırılğan olan cam ve seramik esaslı lifler, asbest lifleri, yüksek dayanımlı çelik teller kullanılır. Takviye olarak kullanılan lifin hacim oranı diğer gruba göre daha yüksektir ve hacim olarak %20-80 arasında kullanılmaktadır. Cam lifi takviyeli polyester reçineleri, bu tip sünek matrisli ve kırılğan lifli kompozitlere örnek olarak gösterilebilir [1].

Matris olarak, çimento, alçı gibi inorganik bağlayıcılar kullanılarak üretilen kompozitler, genel olarak kırılğan matrisli ve sünek lifli kompozitleri oluşturmaktadırlar. Bu tür kompozitlerde, çeşitli organik veya inorganik esaslı liflerin kullanımının yanı sıra özellikle metal ve cam lifleri de yaygın olarak kullanılmaktadır. Kırılğan matrisli bu

kompozitlerde kullanılan lif takviyesinin hacim oranları, sünek matrisli kompozitlerdeki lif hacim oranlarından çok daha azdır. Bazı özel uygulamalar dışında, metal, cam ve bitkisel esaslı lifler için bu oran %0,5-%5 arasında değişmektedir [1].

Liflerin hacim oranları arttıkça, karışım kurallarından beklenildiği gibi kompozitin dayanım ve rijitliği de artar [7].

➤ Tipik lif hacim oranları;

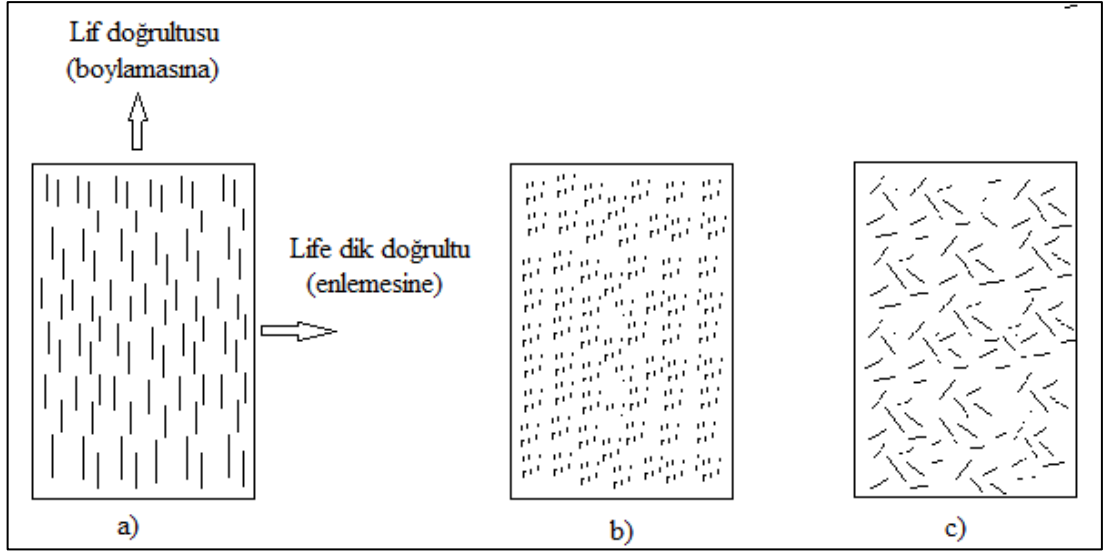
- Tek yönlü, %50-70 [39] (ya da, %65 [27])
- Çift yönlü, %30-55 [39] (ya da, %50 [27])
- Rastgele yönlenmiş, %15-35 [39] (ya da, %30 [27])

2.3.1.3. *Lif Dağılımı ve Yönlenmesi*

Liflerin yönlenmesi; kompozitin dayanımı ve liflerin yük taşıma performansına katkısı açısından önemli bir faktördür [1]. Lifler, boyuna doğrultularda (life paralel) ve enlemesine doğrultularda (life dik) farklı özelliklere sahiptirler. Ayrıca, tüm bu lifler çekmede, kırılma noktasına kadar elastik davranış gösterirler. Akma noktası yoktur ve çok düşük kopma uzaması vardır [39].

Lif takviyeli polimer matrisli kompozitler, liflerin kısa (süreksiz) veya sürekli olmasına göre sınıflandırılabilir [44]. Kısa lifler, bazen kırılmış lifler olarak adlandırılır [45].

Yönlenme konusunda; lifin paralel olarak sadece çekme yönünde yönlenmesi ve tamamen rastgele yönlenmesi olmak üzere iki sınır durum söz konusu olabilir. Sürekli lif, uygulanan gerilmeyle aynı yönde (Şekil 2.4.a) süreksiz (kısa) lif aynı yönlü (Şekil 2.4.b), süreksiz (kısa) lif rastgele (Şekil 2.4.c) veya kısmi yönlenmeye sahip olabilir. Lif dağılımının düzgün olması durumunda, kompozitten çok daha iyi özellikler elde edilebilir [9].



Şekil 2.4. Lif takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi; (a) Sürekli ve çekme doğrultusunda yönlendirilmiş, (b) Süreksiz ve çekme doğrultusunda yönlendirilmiş, (c) Süreksiz ve rastgele yönlendirilmiş.

Süreksiz ve Düzenli Yönlendirilmiş Lifli Kompozitler

Süreksiz (kısa lifli; chopped fiber) kompozitler genellikle, bir bulamaç biçimi vermek için liflerin sıvı reçine ile karıştırılması ve sonra kompozitin şeklinde kalıplanmasıyla üretilirler [44]. Bu lifler, basınç veya enjeksiyon kalıplama işlemi süresince akan malzemenin yönüne paralel yönelme eğilimindedirler. Bu durumda üretilen kompozitler izotropik değildir. Özellikleri, üretim işlemi süresince tercih edilen yöneline ulaşma derecesine bağlıdır [45].

Süreksiz ve düzenli yönlendirilmiş lifli kompozitlerin dayanımında sağlanabilecek artış oranı, sürekli lif takviyeli yapılara göre düşük olsa da bu kompozitler (Şekil 2.4.b), üretim işleminin hızlı, maliyetinin düşük oluşu ve şekil verme yeteneğinin yüksek olması nedeni ile ticari pazarda gittikçe daha önemli hale gelmektedir [9], [4]. En yaygın olarak kullanılan kırılmış cam lifidir ancak bunun dışında, kırıntı şeklindeki karbon ve aramid lifi de kullanılabilir. Kısa lifin dayanımı ve elastikiyet modülü değerleri sırasıyla, uzun olanların %90 ve %50'sine yaklaşır [9].

Süreksiz ve Rastgele Yönlendirilmiş Lifli Kompozitler

Kısa veya süreksiz liflerin yönelimi, kompozit malzeme içerisinde kolaylıkla kontrol edilemez. Birçok durumda, liflerin kompozit içerisinde rastgele yönlendiği kabul edilir [45].

Lifin rastgele yönlendiği uygulamalarda kısa ve süreksiz lifler kullanılır. Bu durumdaki bir takviye uygulaması Şekil 2.4.c' de gösterilmiştir [9]. Liflerin, kompozit içerisinde rastgele yerleştirilmeleri ne kadar düzenli olursa lif hacim oranı o kadar artar. Kompozitin tüm yönlerdeki mekanik özellikleri liflerin yerleştirilmelerine bağlı olarak değişir [4]. Liflerin matris içerisinde rastgele dağılı olmasi halinde, malzeme izotrop kabul edilir [1], [7]. Bu durumda, kompozitin özellikleri yöne bağıli olarak değişmez [1]. İşlem düzgün yapılırsa, tüm yönlerde aynı mekanik özellikler elde edilebilir [4].

Alternatif olarak; kırılmış lifler, tek tabakalı kompozitler üretmek için sonradan reçine ile emdirilebilen, hafifçe bağıli, ön şekle veya keçeeye dönüştürülebilir. Tüm bu işlemlerde kırılmış lifler genellikle kalıp yüzeyine paralel olarak uzanır ve yüzeye paralel düzlemlerde rastgele yönlendirilir [45].

Sürekli ve Çekme Doğrultusunda Yönlendirilmiş Lifli Kompozitler

Sürekli lifler (continuous fibers); kompozitin mekanik özellikleri, elektrik direnci, termal iletkenliği ve diğeri özellikleri üzerinde, kısa liflerden daha büyük bir etkiye sahiptir. Bununla birlikte, kompozitin daha anizotropik olmasına sebep olur. Sürekli lifler, tek yönlü hizalanmış şerit (tape) şeklinde veya dokunmuş kumaş (woven mat) şeklinde değerlendirilebilir [44].

Kompozitin kullanıldığı yer ve üzerine gelen yüklemde; çekme, basınç ve eğilme gerilmeleri için istenilen dayanıma ulaşılabilir [4]. Tek yönde çekme dayanımına maruz kalan bölgelerde, yönlendirilmiş uzun lifler nedeniyle lif doğrultusunda maksimum performans gösterirler. Bazen çalışma sırasında, lif doğrultusuna dik yönde de yük etkiyebilir. Bu durumda, kompozitlerin, life dik doğrultudaki dayanımlarının son derece düşük olduğu ve hatta kimi zaman matris dayanımının bile altına düştüğünden beklenmedik erken hasarlar meydana gelebilir. Yani; lif takviyesi, kompozitin dayanımını arttırmak yerine tersine azaltıcı yönde olur [9], [45], [4]. Bu eksikliği gidermek için, hem lif eksenine dik, hem de lif eksenine paralel kuvvet uygulandığında, mekanik özellikleri iyileştirmek için değişik açılarda takviyelendirme yapmak ve matris özelliklerini iyileştirmek suretiyle bu doğrultularda daha yüksek özelliklerin elde edilmesi mümkün olabilmektedir [4], [9]. Çizelge 2.2'de, yaygın olarak bilinen üç lif takviyeli kompozit için takviye doğrultusundaki çekme dayanımı değerleri verilmiştir. Bu tür kompozit malzemelerin hasarı diğeriğine göre daha karmaşıktır ve birkaç farklı hasar şeklinin gözlenmesi mümkündür [9].

Çizelge 2.2. Tek doğrultuda, lif takviyeli üç kompozitin, lif doğrultusu ve life dik yöndeki tipik çekme dayanımı değerleri. Her birinde lif içeriği yaklaşık %50.

Malzeme	Lif doğrultusundaki çekme dayanımı (MPa)	Lif doğrultusuna dik yöndeki çekme dayanımı (MPa)
Cam polyester	700	20
Karbon (Yüksek Modül)-Epoksi	1000	35
Kevlar-Epoksi	1200	20

Özetlenirse, yönlenmiş lifli kompozitler, doğası gereği, yöne bağımlı olduğundan en yüksek dayanım artışı lif doğrultusundaki zorlanma durumunda elde edilir. Lif doğrultusuna dik yöndeki zorlanmada ise oluşan hasar gerilmenin çok düşük değerlerinde gerçekleştiğinden dayanım artışı yok kabul edilir. Gerilmenin uygulandığı diğer yönlerde ise dayanım bu iki sınır değer arasında yer alır [9].

2.3.1.4. Liflerin ve Matrislerin Özellikleri

Bir kompozit malzemenin, kendisinden beklenen özellikleri karşılaya bilirliğini anlamak için kompozit malzemedeki liflerin ve matris malzemelerinin görevlerinin iyi bilinmesi gerekir. Matris yapının görevleri Bölüm 2.2.1’de açıklanmıştır.

Bir kompozit malzemedeki liflerin görevleri sıralanacak olursa [23], [4], [46];

- Bir kompozit malzemeye uygulanan yükün yaklaşık %90’ı, lifler tarafından taşınır.
- Lifler; yüksek elastikiyet modülü, sertlik, yüksek sıcaklık dayanımları vb. özellikleriyle kompozit malzemeyi kararlı kılar. Matrisin dayanım ve rijitliğini artırır.
- Kompozit malzemenin elektrik iletkenliği ya da yalıtım özellikleri kullanılan lif malzemelerinin özelliğine bağlıdır.

Etkili bir güçlendirme için, takviye malzemesinin Elastikiyet (E) modülünün, matris yapının E-modülünden çok daha yüksek olması gereklidir. Matris fazı ve lif fazının, E-modülü değerlerinin birbirine yakın olması halinde lif fazı, güçlendirme görevini

yeterince yerine getirememekte ve dolayısıyla üretilen kompozit kendisinden beklenen özelliklere sahip olamamaktadır [1].

Çoğu lif takviyeli kompozitler; güçlü, sert, fakat gevrek liflerin; daha yumuşak, daha sünek matris içerisinde bir araya getirilmesiyle, dayanımın, yorulma direncinin, rijitliğin, elastikiyet modülünün ve dayanım/ağırlık oranının artmasını sağlarlar. Hem oda sıcaklığında hem de yükseltilmiş sıcaklıklarda, kompozitin dayanımı yükseltilebilir [7]. Bu nedenle, liflerin özgül dayanımı ve özgül modülü, önemli karakteristikleridir [7], [9].

$$\text{Özgül dayanım} = \text{çekme dayanımı} / \text{özgül ağırlık}$$

$$\text{Özgül modül} = \text{E-modülü} / \text{özgül ağırlık}$$

2.3.1.5. Lif ve Matris Ara-Yüzey Bağı

İstenilen özellikte kompozit elde etmek için, uygun matris ve takviye elemanı seçimi üretim tekniği, bileşenlerin optimizasyonu, mukavemet özellikleri ve diğer faktörler göz önüne alınarak üretim yapılması gereklidir. Özellikle, uygun matris/takviye elemanı seçiminin, sistemin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine etkisi büyüktür. Çünkü kompozit içerisinde matris tarafından yükün takviye elemanına iletilmesinde matris ile takviye elemanı arasındaki ara-yüzey bağının da kuvvetli olması gerekmektedir. Ara-yüzey bağının kuvvetli olması ise, kompoziti oluşturan bileşenlerin uyumuna ve matrisin takviye bileşenini ıslatabilme özelliğine bağlıdır [4]. Reçine maddesi, takviye elemanını çok iyi ıslatamaz ise, zayıf bir ara-yüzey meydana gelir. Ayrıca, reçinenin ani dökülmesi takviye elemanının yüzeyinde hava kabarcıkları oluşmasına ve dolayısıyla zayıf ara-yüzey oluşumuna sebep olur. Zayıf olan ara-yüzeylerde zamanla çatlaklar oluşur, bu çatlaklar zamanla büyür ve sonuç olarak kompozitin dayanımının düşmesine neden olur [18].

Matris malzemesi ile takviye elemanının birbiriyle iyi bir ara-yüzey oluşturacak şekilde bir araya gelmesi için gerekli olan bir başka faktör de, uygun bir kür ortamının oluşturulması gerekliliğidir. Uygun kür ortamı için ise, uygun süre ve sıcaklıklar seçilmelidir [18].

Dikkat edilmesi gereken diğer bir özellik ise, ısı genleşme katsayısıdır. Eğer lif takviye malzemesi, matris malzemedan daha fazla uzar veya matris malzemenin uzamasına engel olmaya çalışır ise, matris ile lif arasındaki bağlar kopabilir [11].

2.3.1.6. Lif Takviye Malzemeleri

Liflerle güçlendirilmiş kompozitlerin üretiminde, değişik kaynaklardan elde edilen, farklı özelliklere sahip lifler kullanılmaktadır [1].

Lif takviyeli kompozitlerde, takviye malzemesi olarak; lifler (fiber, elyaf), lif parçacıkları (lif dolguları, filler), kıllar (whiskers) ve tel gibi çeşitli türde güçlendirme malzemeleri kullanılmaktadır [39], [9].

Lif Dalguları

Lif dolguları, Bölüm 2.2.5'te söz edildiği gibi, parçacık takviyesi olarak da kompozit içerisinde güçlendirme amaçlı kullanılabilir.

Kıllar (Whiskers)

Whisker'lar, güçlendirmede kullanılan en ince malzemedir [1]. Çok kısa ve küt olduklarından dolayı uzunluğunun çapa oranı yüzlerce olabilmektedir [8]. Whisker'lar, kristallerin neredeyse mükemmel hizalanmasıyla sonuçlanan, çok küçük ölçekteki kristalleşme ile elde edilen çok saf, tek yönlü tek kristallerdir [8], [37], [9]. Bu lifler, tipik olarak sadece birkaç mikron en kesitlerindedirler ve alışlagelmiş çok kristalli malzemelerin içerisinde bulunan kristalografik kusurların hiçbirini neredeyse içermezler. Whisker'lar, bu tür kusurlar içermediklerinden dolayı henüz maksimum teorik yapışma dayanımlarına ulaşmamış olmalarına rağmen, kusur içerenlere göre, çok yüksek dayanım ortaya koyarlar [37], [9].

Doğal olarak, lifler ve whisker'lar, yükleri taşıyabilen bir yapısal elementin şeklini alan matris yapı ile yapıştırılmadıkları sürece, çok az kullanımları mevcuttur. Genellikle, matris yapı; liflerden ve whisker'lardan oldukça daha düşük yoğunlukta, rijitlikte ve dayanımdadırlar. Bununla birlikte, lif veya whisker takviyeleri ile bir matrisin birleşmesi çok yüksek dayanıma ve rijitliğe sahip olabilir ancak yine de düşük yoğunluğa sahiptir [8].

Teller

İnce teller göreceli olarak kalın çaplı olup, genellikle çelik, tungsten ve molibdenden yapılırlar. Teller, otomobil lastiklerinde radyal çelik takviye olarak, roket gövdesinde elyaf sarma ile hazırlanarak ve yüksek basınç hortumlarında tel sarma ile hazırlanarak kullanılır [9].

Bazı lifler, doğası gereği, diğer liflerden daha güçlüdürler. Daha zayıf lifler önce kırılır, geri kalan lifler üzerindeki yükler artar. Kırılmayan lifler güçlü olsa bile sayıları azdır ve yük arttığından dolayı kırılma ilerleyerek devam eder. Eğer bu süreç devam ederse neticede kompozitin efektif dayanımı, uygulanan yükü karşılamak için yetersiz kalır ve kompozit malzeme kırılır [37].

Kompoziti tasarlamak ve üretmek için hali hazırda mevcut olan çok sayıda lif takviye malzemeleri bulunmaktadır [37]. En yaygın olarak kullanılan lifler, cam, karbon ve aramid lifleridir [9]. Doymamış polyesterler, %80'e varan miktarlarda cam lifiyle güçlendirilebilir [21]. Polyesterin mukavemeti, 42-95 MPa arasında iken, cam lifleri ile güçlendirilince, bu mukavemet değeri, 200-345 MPa (ya da 172-344 MPa, [21])'a kadar çıkarılabilir ve böylelikle, üretilen kompozit malzeme, daha iyi bir darbe dayanımına ve kimyasal dirence sahip olabilir [12], [21]. Çok yüksek mekanik mukavemete sahip olan karbon lifinin geliştirilmesi, özellikle mukavemet ve hafifliğin önem kazandığı havacılık endüstrisine yeni kazanımlar getirmiştir. Bir diğer lif malzemesi, aromatik poliyamid lifi (kevlar)'dır. Bu lifin kullanılması, cam lifine oranla, %30 civarında ağırlık tasarrufu sağlamaktadır [5]. Bor, silisyum karbür ve alüminyum oksit gibi diğer lif türleri, daha az kullanılmaktadır [9]. Doğal kimyasallardan (selüloz, hemiselüloz, lignin, pektin, balmumu ve nemden) elde edilen liflere doğal lifler denir ve bunlar; jüt (jüte), keten (flax), kenevir (hemp), sisal, hindistancevizi lifi (coir), muz, sabır otu (agave), yılan çimi lifi (snake grass fiber) ve benzeri olabilir [10], [47]. Kırılgan lifler ve sünek organik lifler; hibrit kompozitler üretmek için palmye-cam, tong camı-mineral lifler, aramid-cam vb. olacak şekilde sıklıkla birleştirilebilirler [48], [49], [50]. Bu liflerin dışında, diğer bazı maddeler de lif takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılmaktadır. Yerel kaynakların veya atık malzemelerin değerlendirilmesi çok ekonomik takviye malzemesi kullanımı gibi amaçlarla veya yerel kaynaklara ve koşullara bağlı olarak, teknolojik olanaklardan yararlanılarak uygulamada birçok değişik lif denenmekte ve başarılı sonuçlar veren türler kullanılmaktadır [1]. Çizelge 2.3'te lif formunda kullanılan bazı malzemelerin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.3. Lif formunda kullanılan bazı takviye malzemelerinin özellikleri.

Yapısal Özellik	Malzeme	Özgül Ağırlık	Çekme Dayanımı (GPa)	Özgül Dayanım (GPa)	Özgül Modül (GPa)	Elastikiyet Modülü (GPa)
Whisker	Grafit	2,2	20	9,1	700	318
	Silisyum nitrür	3,2	5-7	1,56-2,2	350-380	109-118
	Alüminyum oksit	4,0	10-20	2,5-5,0	700-1500	175-375
	Silisyum karbür	3,2	20	6,25	480	150
Lif	Alüminyum oksit	3,95	1,38	0,35	379	96
	Aramid (Kevlar 49)	1,44	3,6-4,1	2,5-2,85	131	91
	Karbon	1,78-2,15	1,5-4,8	0,70-2,70	228-724	106-107
	E-camı	2,58	3,45	1,34	72,5	28,1
	Bor	2,57	3,6	1,40	400	156
	Silisyum karbür	3,0	3,9	1,30	400	133
	UHMWPE (Spectra 900)	0,97	2,6	2,68	117	121
Metalik Teller	Yüksek dayanımlı çelik	7,9	2,39	0,30	210	26,6
	Molibden	10,2	2,2	0,22	324	31,8
	Tungsten	19,3	2,89	0,15	407	21,1

2.3.2. Liflerin Birleştirilme Şekilleri

Ayrıca, kompozitin güçlendirilmesi amacıyla, takviye malzemesi olarak kullanılan lifler, kompozit içerisinde pek çok farklı uygulama biçimlerinde de kullanılabilmektedirler. Bunlar; iplikçik (filament), uç (end), demet halindeki lifler (strand), kırılmış demet (chopped strands), kırılmış demet keçe (chopped strand mat), sürekli lif takviyeli keçe (continuous fibre-reinforced mat), iğneli keçe (needled mat), bükülmemiş demet (tow), fitil (roving), bükülmüş demet (yarn), sargı (band), şerit, biye (tape), bez dokuma, dokuma kumaş (woven cloth or woven fabric), dokunmamış kumaş (non woven fabric), triko kumaşlar (knitted fabrics), örgülü şerit (braids), hibritler (hybrids), laminasyon kombinasyonları, ön biçimlendirilmiş lifler (preforms) şeklindeki uygulama biçimleridir [39], [15], [23], [21].

2.3.3. Lif Takviyeli Kompozitlerin Üretim Teknikleri

Lif takviyeli plastiklerin, çok geniş çapta çeşitliliğe sahip üretim işlemleri vardır. İşlemlerin seçimi; güçlendirme tipi ve matris malzemeleri, boyut, şekil, miktar ve fiyat gibi pek çok faktöre bağlıdır. En yaygın olarak kullanılan ticari işlemler, el yatırması (hand lay-up), ıslak laminasyon (wet laminating), kuru veya önceden emprenye edilmiş (prepreg) laminasyon, püskürtme ile kalıplama (spray up molding), basınçlı kalıplama (press molding), sızıntılı kalıp tekniği (leaky mould technique), eşleşen kalıp tekniği (matched die technique), vakumda torbalı kalıplama (vacuum bag veya autoclave kalıplama), reçine transfer kalıplama (resin transfer moulding), enjeksiyon kalıplama (injection moulding), sürekli sarma (filament winding), mandrele tel sarma (mandrel wrapping) ve profil çekme (pultrusion) işlemleridir [39], [4], [27], [16], [40], [21], [10].

Lamine lif takviyeli kompozit malzemeler, çevre koşullarına karşı dirençli olması, darbe yüklemelerine dayanıklı ve aynı zamanda yüksek özgül mukavemet ve sertliğe sahip olduğu için deniz endüstrisinde, boru hatları ve boru endüstrilerinde ve diğer birçok uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [51].

2.4. CAM LİFİ TAKVİYELİ PLASTİKLER

Plastik malzemelerin mukavemet değerleri genellikle yeterli oranda yüksek değildir ve ayrıca bu malzemelerin sünme değerleri ihmal edilemeyecek düzeyde yüksektir. Plastiklerin, özellikle çekme, eğilme gibi mukavemet değerlerini arttırarak yapıda taşıyıcı eleman olarak kullanabilirliğini sağlamak adına cam liflerinin de arasında bulunduğu birçok takviye malzemesiyle çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde, özellikle polyester reçinesiyle cam liflerinin birleştirilmesiyle sağlanan uyum bu iki bileşenin en çok tercih edilen kompozit malzemeler arasında yer almasını sağlamıştır [52].

1940'lı yılların sonlarında geliştirilen cam lifi takviyeli plastikler, sürekli veya süreksiz cam lifleri ile polimer matristen oluşan ve en yaygın olarak kullanılan lif takviyeli kompozite verilen isimdir [9], [13]. Türkçede, cam takviyeli plastik (CTP), İngilizcede ise glass fiber reinforced plastic (GFRP) olarak adlandırılmaktadırlar [5]. Özellikleri açısından, lif takviyeli harç ve betonlara göre farklılık gösteren bu malzemenin en tanınmış grubunu “cam lifi takviyeli polyester reçinesi kompoziti” oluşturmaktadır. Bu kompozit malzeme, Ülkemizde, 1960'lı yılların başından itibaren; sıvıların depolanması,

çatı kaplama levhaları ve küçük boyda deniz teknelerinin yapımı gibi alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca, ülkemizde seri üretimi yapılmış ilk yerli otomobil olan “Anadol”unda kaportası bu malzemeden üretilmiştir [1].

Polyester reçineleri, ekonomik olmalarından dolayı tüm CTP’lerde, yaklaşık olarak %85 oranında kullanılır [53]. CTP üretiminde, polyesterin yanı sıra günümüzde diğer bazı termoset ve termoplastik reçineler de kullanılmaktadır [1]. Diğer termoset reçineleri olarak; epoksiler, fenolikler, silikonlar, melaminler, akrilikler ve akrilikler ile modifiye edilmiş polyesterler kullanılmaktadır. Termoplastik reçineler olarak ise; naylon, polistren, polikarbonat ve florokarbonlar, cam lifleriyle takviye edilmektedirler [53].

2.4.1. Cam Liflerinin Özellikleri

Cam lifleri, büyük oranda silis kumu (SiO_2) ile birlikte, kireç taşı, sodyum, alüminyum, demir, borik asit ve diğer düşük miktarlardaki kıl, kömür ve flüorit gibi bileşenlerden meydana gelir [15], [4], [54]. Cam lifleri, polimer esaslı kompozitlerde kullanılan en ucuz takviye elemanıdır [4]. Lif kalınlığı genelde, 3 ile 20 μm arasındadır [9]. Kompozitin dayanımı, direk olarak kompozit içerisindeki cam lifi miktarı ile ilgilidir. Genel olarak dayanım, cam lifi miktarının artmasıyla ilişkili olarak doğrudan artar [1], [7], [21]. Ağırlıkça, %80 cam lifi ve %20 reçine içeriğine sahip olan kompozitin dayanımı, bu iki malzeme miktarının karşıt içeriğine sahip olan (%80 reçine ve %20 cam lifi) kompozitin dayanımından 4 kat daha fazladır [53], [21].

Camın, yaygın bir lif takviye malzemesi olmasının nedenlerinden bazıları şunlardır [9], [23]:

- Eriyik durumdan yüksek dayanımlı lif haline kolayca çekilerek üretilebilir [9].
- Kolaylıkla temin edildiklerinden dolayı, CTP’ler çeşitli kompozit üretim yöntemleriyle ekonomik olarak üretilebilirler [9].
- Lif şeklindeyken, çok hafif ve aynı zamanda iyi derecede mukavemete sahip olduğu için matris içine gömülerek çok yüksek özgül dayanıma sahip kompozit elde edilebilir [9].
- Birçok termoset ve termoplastik reçineler ile birlikte, korozyona maruz kalınan ortamlarda kullanılabilecek bir kompozit haline gelebilir [9].
- Elektrik iletmediklerinden dolayı, elektrik yalıtımının gerekli olduğu şartlarda, cam lifli kompozitlerin kullanılmasına olanak tanırırlar [23].

Cam lifli kompozit malzeme grubunun çeşitli uygulama alanlarındaki kullanımlarına yönelik bazı sınırlamalar bulunmaktadır. Örneğin; cam lifleri, yüksek dayanıma sahip olmalarına rağmen, uçak ve köprü gibi yapı elemanlarında kullanılabilecek kadar yeterli rijitliğe sahip değildirler. Ayrıca, pek çok cam lifi malzemesinin kullanım sıcaklığı 200 °C'nin altındadır ve daha yüksek sıcaklıklarda çoğu polimer bozulmaya ve akmaya başlar. Poliamid reçineleri gibi yüksek sıcaklık polimerleri ve yüksek saflıktaki silisyumdan üretilen lifler için kullanım sıcaklığı, 300 °C'ye kadar çıkabilir [9].

Cam lifinin yüzey özellikleri son derece önemlidir. Yüzeydeki en küçük bir kusurun varlığı, çatlak oluşumunu arttırarak lifin çekme dayanımının azalmasına sebebiyet verir. Yüzey kusurları, lifin başka bir sert yüzeye sürtünmesi ile kolaylıkla oluşabilir. Ayrıca, cam lif yüzeyi çok kısa bir süreliğine dahi normal atmosfer koşullarına maruz bırakılırsa, matris ile oluşan ara-yüzey bağı zayıflar. Bu nedenle, lifler çekildikten sonra en kısa sürede, lif yüzeyleri darbe ve istenmeyen çevresel etkilerden koruma amacıyla kaplama malzemeleriyle (coupling agents) kaplanır ve yapılan bu işlemin adı “sizing (kaplama)” olarak bilinir [9].

2.4.2. Cam Lifi Türleri

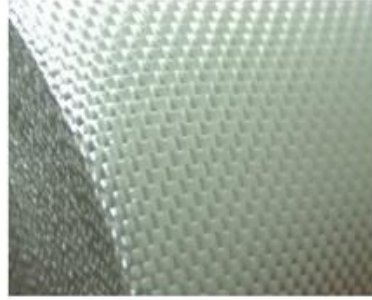
Cam liflerinin, kompozit içerisindeki temel uygulama biçimleri, cam lifi fitil (fiberglass roving), örgülü fitil (woven roving), kırılmış demet keçe (chopped strand mat), sürekli demet keçe (continious strand mat), kaplama keçe (surfacing or veil mat), tekstil cam ipliği (textile fiberglass yarn), düz dokuma (plain weave), sepet örgüsü (basket weave), dişi örgü (twill weave), tek yönlü kumaşlar (unidirectional fabrics), örgüsüz (non-woven) vb. şeklinde olabilmektedir [53], [54], [41], [37], [45], [40], [21], [15]. Şekil 2.5'te kompozit malzeme içerisinde farklı türlerde bulunan cam liflerine ait bir örnek resim görülmektedir. Çizelge 2.4'de yaygın olarak kullanılan ticari sınıflardaki bazı cam lifleri çeşitleri ve özellikleri gösterilmektedir [39], [10], [54], [21]. Çizelge 2.5'te cam lifi ile üretilen çeşitli camların bazı fiziksel ve mekanik özellikleri verilmektedir [1].



cam lifi fitil(fiberglass roving)



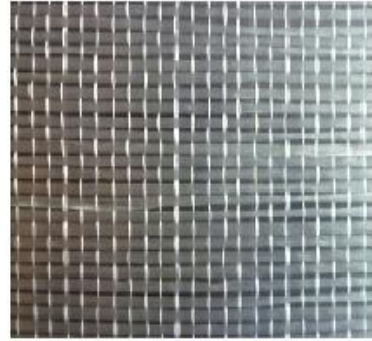
kırpılmış lif(chopped fiber)



örgülü fitil(woven roving)



cam keçe(strand mat)



E-camı tek yönlü kumaş
(E-glass unidirectional fabric)



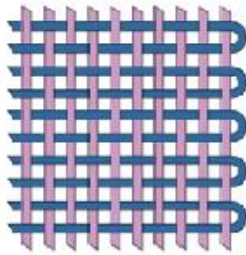
örgüsüz(non-woven)



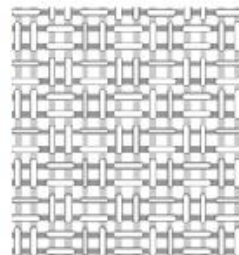
kaplama keçe(surfacing mat)



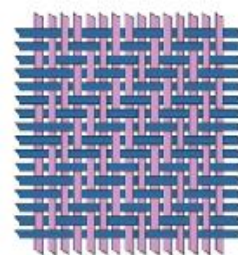
tekstil cam ipliği(textile fiberglass yarn)



düz dokuma
(plain weave)



sepet örgüsü
(basket weave)



dimli örgü
(twill weave)

Şekil 2.5. Kompozit malzemelerde kullanılan cam lifi uygulama numuneleri.

Çizelge 2.4. Cam lifi çeşitleri.

Cam lifi türü	Özellik
E-camı	İyi elektrik yalıtımı ve yüksek dayanım sağlarlar.
A-camı	Yüksek oranda alkali içerir (%10-15). Kimyasallara dirençlidir, daha yüksek durabilite, dayanım ve elektrik direnci sağlar.
C-camı	E camına göre yüksek korozyon direnci sağlar.
S-camı	Yüksek sıcaklık performansı, yüksek dayanım (en yüksek çekme dayanımı) ve rijitlik (en düşük seviyede) ile birlikte yüksek silika içeriğine sahiptir.
S-2- camı,	Yüksek dayanım, modül ve stabilite sağlar.
L-camı	Radyasyon koruma için yüksek kurşun içeriğine sahiptir.
D- camı	Düşük dielektrik (elektrik yalıtımı) ve düşük yoğunluğa sahiptir.
AR- camı	Alkali direncine sahiptir.
R-camı	Daha yüksek dayanım ve asit korozyon direncine sahiptir.

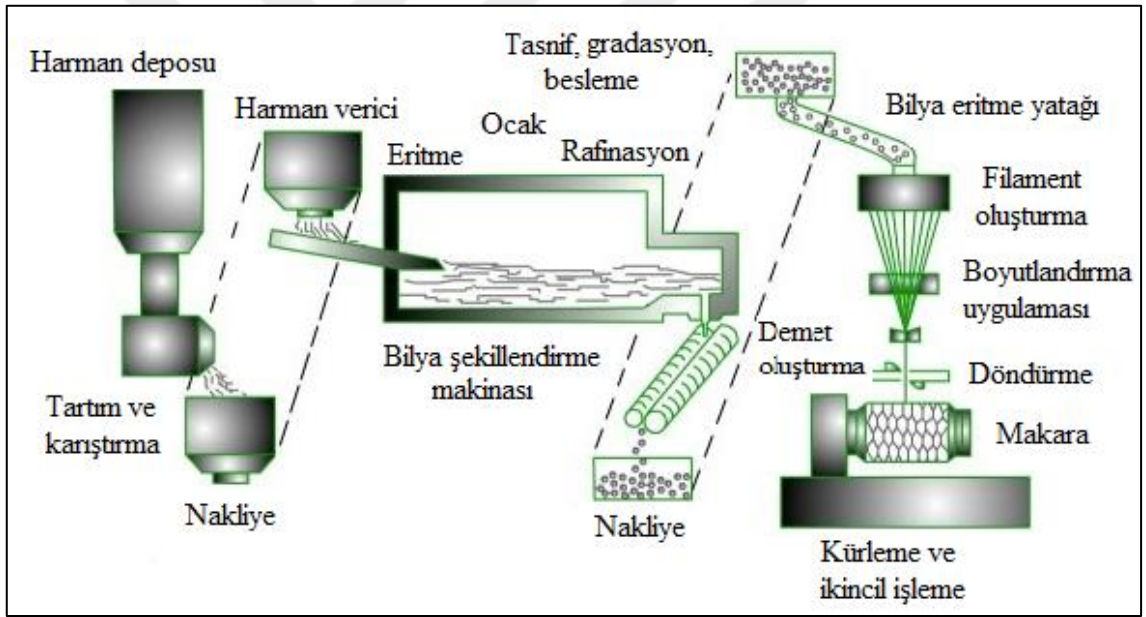
Çizelge 2.5. Cam lifi ile üretilen çeşitli camların bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.

Özellikler	E-Camı	A-Camı	M-Camı	S-Camı	C-Camı	D-Camı	R-Camı
Özgül ağırlık	2,54	2,45	2,89	2,49	2,45	2,16	2,58
Çekme dayanımı (Mpa)	3600	3100	3500	4500	3400	2450	4400
Kopma uzama oranı (%)	4,8	-	-	5,4	4,8	-	-
Çekme E-Modülü (Gpa)	76	72	11,3	86	70	53	85
Kırılma indisi	1,548	1,512	1,635	1,523	-	1,47	-
Isıl genleşme katsayısı (cm/cmK ⁰)	1,6x10 ⁻⁶	-	-	1,7x10 ⁻⁶	2,2x10 ⁻⁶	3,1x10 ⁻⁶	-
Lif çapı (mm)	3-20x10 ⁻³	-	-	3-13x10 ⁻³	-	-	-

Kompozitlerde en geniş çapta kullanılan cam lifi sınıfı, toplam cam lifi üretiminin neredeyse %95'i ile E-camıdır. Fakat bu lifin, sadece küçük bir miktarı elektriksel amaçlar için kullanılır [39].

2.4.3. Cam Liflerinin Üretimi

Cam lifleri, ham maddelerin eritilmesiyle veya kırık camların (cullet) veya cam bilyaların tekrar eritilmesiyle ve bir dizi delik içeren platinyum/rodyum yataklarının altından geçerek, dikkatlice kontrol edilen sıcaklıkta eritilmiş camın yerçekimiyle akmasına izin verilmesiyle üretilirler. Ortaya çıkan cam taneleri aşağı çekilir ve dönen sarma tamburunda toplanır ve böylece ince liflere çekilirler. E-camları, genellikle çok yataklı endüstriyel fırınlarda üretilirler. Cam lifleri genellikle lifleri aşınmadan koruyan, nem direncini arttıran ve birlikte yapışmalarına sebep olan “size” adında sulu kimyasal bir çözelti ile kaplanırlar. Bu kaplama çözeltileri, matris ve cam lifi yüzeyinde yapışmayı sağlamak için genellikle, “sılan” adında bir bağlayıcı madde içerirler [41], [7], [45], [9], [54], [21], [15]. Cam liflerinin üretim şeması ve cam lifi üretime ait görseller sırasıyla Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Cam liflerinin üretim şeması.



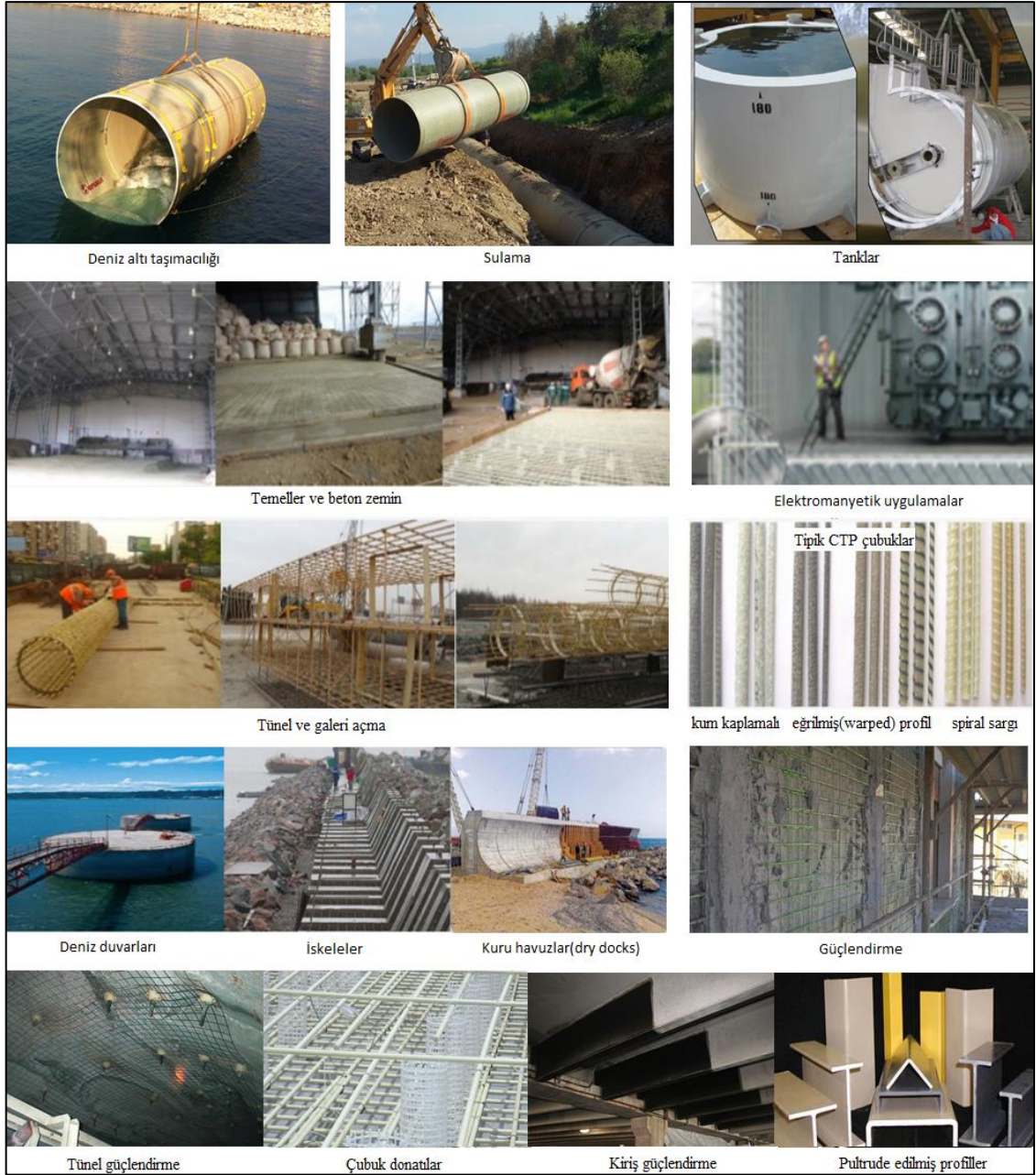
Şekil 2.7. Cam lifi üretimi.

2.4.4. CTP'nin Avantajları ve Kullanım Alanları

CTP'ler, iyi bir elektrik yalıtkanadırlar ve ayrıca, düşük termal genleşme katsayısı ve yüksek termal iletkenlik katsayısı ile birlikte, yüksek ısı ve yangın dirençlerine sahip olmalarından dolayı termal koşullarda çok iyi performans göstermektedirler. Bununla birlikte, kimyasallara karşı dayanıklılığı, boyutsal kararlılıkları ve düşük nem emme özelliklerinden dolayı uzun yıllar bakıma ihtiyaç duymamaktadırlar. Ayrıca, hafifliği, düşük yoğunluğu, kolay kesilebilir ve işlenebilir olması gibi özelliklerinden dolayı istenilen şekillerde üretim düşük iş gücü ile yapılabilir. Mekanik özellikler

bakımından ise CTP'ler, yüksek çekme dayanımı ve özgül dayanımlara sahiptirler ve farklı mekanik özellikler elde etmek için, farklı lif katmanları ve kombinasyonları ile üretilmektedirler [55], [54], [21], [47]. Bütün bu özelliklerinden dolayı CTP'ler; inşaat sektöründe, elektrik/elektronik alanlarında; elektrik motor aksamları, cihaz şasileri, kondenser kapları, LED görüntüleri, elektronik cihazların havalandırma panelleri, bağlantı serileri, bobinler, lamba prizleri, duylar, adaptörler, el feneri kapları, projektör ışıkları, telefon dağıtım kutuları gibi ısıya dayanıklı parçaların üretiminde, bilgisayar klavyeleri, faks makineleri, mutfak robotları, kahve makineleri, makas sapları, vakum temizleme parçaları, saç kurutucuları, telefonlar gibi yüksek hassasiyet, parlak yüzey ve kaygan özelliklere sahip olması istenen uygulamalarda kullanılmaktadırlar [56], [57]. Ayrıca, otomobil ve gemi gövdesi, plastik borular, saklama kapları ve endüstriyel yer döşemeleri de sayılabilir [51], [47]. CTP'ler, ulaşım endüstrisinde; araç ağırlığını azaltmak ve yakıt ekonomisi sağlamak amacıyla giderek daha da artan miktarda, cam lif takviyeli plastikler kullanılır hale gelmiştir. Daha önce otomotiv sanayinde kullanılmış veya kullanılması düşünülen birçok yeni uygulama konusunda çalışmalar günümüzde de devam etmektedir [9].

CTP malzemeleri, geleneksel inşaat sektöründe kullanılan çelikler ve betonarme yapılarla kıyaslandığında; bu malzemelerin yaklaşık maliyete sahip oldukları görülmektedir. Fakat kısa vadede arz-talep dengesine bağlı olarak üretim artışı ile beraber, CTP malzemelerinin ürün maliyetinin düşeceği kesindir. Malzeme olarak hafif bir yapıya sahip olan CTP ile, nakliye giderleri azalacak ve yine hafif olması sebebi ile büyük ebatlı parçaların montajı, vinç yerine işçiler ile rahatlıkla yapılabilecektir [13]. Cam liflerinin çeşitli kullanım alanlarına ait görseller Şekil 2.8'de gösterilmiştir [58].



Şekil 2.8. Cam liflerinin kullanım alanlarına ait bazı resimler.

2.5. BAZALT LİF TAKVİYELİ PLASTİKLER

Ekonomik ve çevresel gereksinimler, yük taşıyıcı polimer yapı malzemelerinin takviye edilmelerinde, araştırmacıları; yeni, yüksek mukavemetli takviye malzemelerini ve yapılarını geliştirmeye teşvik etmektedir. Bunun bir sonucu olarak, son yıllarda tüm dünyada, polimer matrislerde, farklı organik ve inorganik takviye edici liflerin uygulanabilirliği ile ilgili yoğun araştırmalar başlamıştır. Bu nedenle, geleneksel cam ve

karbon lifleri ile karşılaştırıldığında takviye malzemesi olarak mineral kökenli bazalt lifleri üzerindeki ilgi artmıştır [59], [60].

İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra, bazalt liflerinin kullanımı, kompozit malzemelerin güçlendirilmesi için bazalt liflerinin kullanılması fikrinin ortaya çıkmasından itibaren eski SSCB savunma ve havacılık uygulamaları araştırma programlarının konuları olmuştur. Ayrıca bugün, sürekli bazalt lifler ağırlıklı olarak ABD, Çin ve Doğu Avrupa ülkelerinde üretilmektedir [61].

2.5.1. Bazalt ve Oluşumu

Bazalt, yerkabuğunun altındaki volkanik magma ve taşkın volkanlardan çok sıcak bir sıvı veya yarı sıvı maddenin açık havada katılaşmasından oluşan, genellikle koyu gri renkteki çeşitli volkanik kayalar için kullanılan ortak bir terimdir [48], [62]. Bazalt, neredeyse dünyanın tüm ülkelerinde bulunmaktadır [58]. Bazaltların, çoğunlukla %80'i iki önemli mineralden oluşmaktadır. Bu mineraller, plagiocene ve piroksendir. Kimyasal bileşimi incelendiğinde, SiO_2 'nin (%45-52 oranında) ana bileşen olduğu ve Al_2O_3 'ün ise ikinci bileşen (%11-13 oranında) olduğunu gözlemlemek mümkündür [63], [59], [64]. Bazalt rengi, demir içeriğine bağlı olarak mat yeşil ile kahverengi arasındadır [65]. Volkanik magma ve taşkın volkanlardan oluşan bazalt kayalarına ait görsel Şekil 2.9'da verilmiştir [66], [67], [68], [69].



Hawai'de akan bazalt lavlar(Kilauea yanardağı)



Bazalt sütunlar. Giant's Causeway, Kuzey İrlanda



Kıbrıs'taki tabakalı daykılar bir zamanlar okyanus tabanında yanardağları beslemiştir.



İnce taneli magmatik kayalar

Şekil 2.9. Volkanik magma ve taşkın volkanlardan oluşan bazalt kayacı görsel

2.5.2. Bazalt Liflerinin Özellikleri

Bazalt lifleri, yüksek dayanım, yüksek E-modülü ve mükemmel ısı direnci yanında akustik direnç yeteneğine sahip olmalarının yanı sıra üstün titreşim yalıtkanındırlar ve darbelere karşı dirençlidirler. Ayrıca, bazalt lifleri; su emmesi düşük, polimerlere iyi yapışabilen, yanmaz özellikte, yüksek kimyasal dirençli, korozyona dayanıklı, alkali ve asitlere karşı dayanıklı, biyolojik olarak kararlı, daha geniş çalışma sıcaklık aralığına sahip olmaları ile birlikte, karbon liflerine göre daha ucuz olmaları ve geleneksel araçlar kullanılarak kolaylıkla işlenebilmelerinden dolayı yaygın kullanım alanları vardır [59], [63], [70], [61], [71], [62], [65], [72], [73].

Bazalt lif parçalarının, en/boy oranı (L/D), 20,8'e eşittir ve bu değer kritik değerden daha yüksektir [63]. Bazalt lifleri, keçe, kumaş, şerit, bar, ağ, kafes, sarmal ve kırpılmış lif gibi çeşitli şekillerde yapısal kompozitler üretmek için kullanılabilir [74], [62]. Bazalt lifinden hafif beton elde edilebildiğinden, bazalt bazlı kompozitler çeliğin (1 kg'lık bazaltın güçlendirmesi, 9,6 kg'lık çeliğin güçlendirmesine eşittir) yerini alabilir [48]. Bazalt lifinin mukavemetini, lif çapı etkiler. Lif çapı, 7 μm 'den, 13 μm 'ye çıkarıldığında, lifin mukavemeti, 2800 MPa'dan, 2000 MPa'a kadar azalır [70].

Bazaltın kimyasal bileşimi, belli bir dereceye kadar değişmektedir. Kimyasal bileşenlerinin yanında farklı kaynaklardan elde edilen bazalt liflerinin muhtemel sıcaklıkla çekme gibi işlem koşullarının da etkisiyle mekanik özellikleri değişmektedir [65], [75], [76]. Bazalt liflerin mekanik özellikleri, E-camı ve S-camı arasında yer almaktadır [59], [60]. Bazalt lifleri, E-cam liflerinden daha yüksek çekme ve basınç mukavemetine sahiptir ve kopma uzamaları karbon liflerinden daha geniştir [77].

Bazalt lifin E-modülü, E-camının modül değerinden 68-73 GPa daha yüksek bir modüle, farklı kaynaklardan gelen bazalt lifleri için 78 GPa ve 90 GPa arasında değişiklik gösterir [65], [70].

Bazaltın elektriksel yalıtım özellikleri, camdan 10 kat daha iyidir. İkinci olarak, bazaltlar, özellikle güçlü alkalilere karşı, cam lifinden çok daha iyi kimyasal dirence sahiptirler. Bazalt kompozit borular, korozyon sıvıları ve gazları nakledebilirler [65].

Cam lifinin, bazalt lifi ile yer değiştirmesi, cam lifi üretiminde ortaya çıkan yüksek toksik metaller ve oksitler gibi çevresel kirlenme riskini azaltabilir. Ayrıca, bazalt lifleri, hem polimer bazlı hem de seramik bazlı betonlarda, çok daha geniş çapta çalışılmaktadır. Bazı durumlarda, bazalt lifleri, hibrit bir kompozit oluşturmak için matris içerisinde, başka bir lif ile karıştırılabilir. Bazı araştırmalar, bazalt lifi ve polimer matris arasındaki ara-yüzey bağının zayıf olduğunu belirtirken diğer bazı çalışmalar ise, ara-yüzey bağının iyi olduğunu ve hatta bazalt lifinin polimerizasyonu etkileyici bir etkinleştirmeye sahip olduğunu belirtmektedir [65].

Bazalt, karbon lifinden daha ucuz ve cam lifinden yüksek dayanımlı olmasına rağmen; metalden (çelik) çok daha düşük yoğunlukta olan ve cam ve karbon liflere göre ise, daha yakın yoğunluk değerine sahip olan, 2,8 g/cm³ ile 2,9 g/cm³ gibi düşük bir yoğunluğa sahiptir. Bu nedenle bazalt; düşük ağırlıklı, daha ucuz, sağlam bir kompozit malzeme olarak uygundur [48].

Bazalt liflerin nem içeriği % 1'den azdır. Bazalt liflerin asıl avantajı, 13-14 pH'a kadar direnebildiğinden, alkali ortama karşı dirençlidir ve güçlü asitlere karşı nispeten daha az kararlıdır. Bazalt lifleri, 2 (N) NaOH' da, özelliklerinin %92' sine kadarını ve 2 (N) HCl' de, özelliklerinin % 75'ine kadarını muhafaza edebilir ve ağırlık kayıpları sırasıyla, sadece %5 ve %2,2 olarak sonuçlanır, ancak bu koşullar, cam lifleri olması halinde, şiddetli hasara yol açar [48].

Bazalt malzemeleri, mantar ve mikroorganizmaların etkisine karşı güçlü dirence sahiptir. Bazalt malzemesi, son derece serttir ve Mohr ölçeğinde, 5-9 arasında sertlik değerlerine sahiptir. Bu durum, daha iyi aşınma özellikleri sonucunu doğurur [48].

Bazalt lifleri, E tipi cam liflerine kıyasla, mükemmel termal özelliklere sahiptir [78], [63]. 700 °C'de bazalt liflerinin dayanımı (cam lifleri bu sıcaklıkta tahrip olur) başlangıç dayanımına göre, %50 oranında azalır [70]. Saf bazalt liflerinin çekme mukavemeti çekme koşullarına bağlı olarak, 2,0-4,0 GPa aralığında değiştiği belirtilmektedir [74]. Kompozitler için bazalt ve diğer önemli liflerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması Çizelge 2.6'da verilmiştir [48], [60], [65], [78], [63]. Bazalt liflerinin termal özelliklerinin E-cam lifiyle karşılaştırılması ise Çizelge 2.7'de verilmiştir [48], [60], [65]. Şekil 2.10'da, bazalt liflerinin, kompozit içerisindeki temel uygulama biçimlerine ait bir örnek resim görülmektedir [79].

Çizelge 2.6. Bazalt ve diğer önemli liflerin mekanik ve fiziksel özellikleri.

Özellikler	Sürekli Bazalt lifi	Cam lifi (E-camı)	Cam lifi (S-camı)	Karbon lifi
Kırılma dayanımı (Mpa)	3000-4840	3100-3800	4020-4650	3500-6000
Çekme dayanımı (Mpa)	4840	3450	4580-4710	3500
Basınç dayanımı (Mpa)	3792	3033	3033	?
E-modülü (Gpa)	79,3-93,1	72,4-77	83-89	230-600
Kırılma uzaması (%)	3,15	4,7	5,3-5,6	1,25-2,0
Lif çapı (µm)	6-23	6-21	6-21	5-15
Yoğunluk	2,7-2,8	2,57-2,6	2,48-2,5	1,75
Lif yoğunluğu (tex)	60-4200	40-4200	40-4200	60-2400
Termal direnç (°C)	-260...+700	-50....+380	-50....+300	-50....+700

Çizelge 2.7. Bazalt liflerinin termal özelliklerinin E-cam lifiyle karşılaştırılması.

Termal özellikler	Bazalt	E-camı
Maksimum çalışma sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	980-982	650
Sürdürülebilir çalışma sıcaklıkları ($^{\circ}\text{C}$)	700-820	480
Minimum çalışma sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	-260	-60
Termal iletkenlik (W/mK)	0.031-0.038	0.034-0.04
Erime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	1280-1450	1120
Termal genleşme katsayısı (ppm/ $^{\circ}\text{C}$)	8.0	5.4



Kırpılmış lif (Chopped fiber)



Dokunmuş kumaş (Woven fabrics)



Çok-eksenli bazalt kumaşlar
(Multiaxial basalt fabrics)



Isı yalıtımlı dokunmamış keçe
(Heat Insulating Non Woven Mats)



Fitiller (Rovings)



Donatı hasırı (Reinforcing mesh)



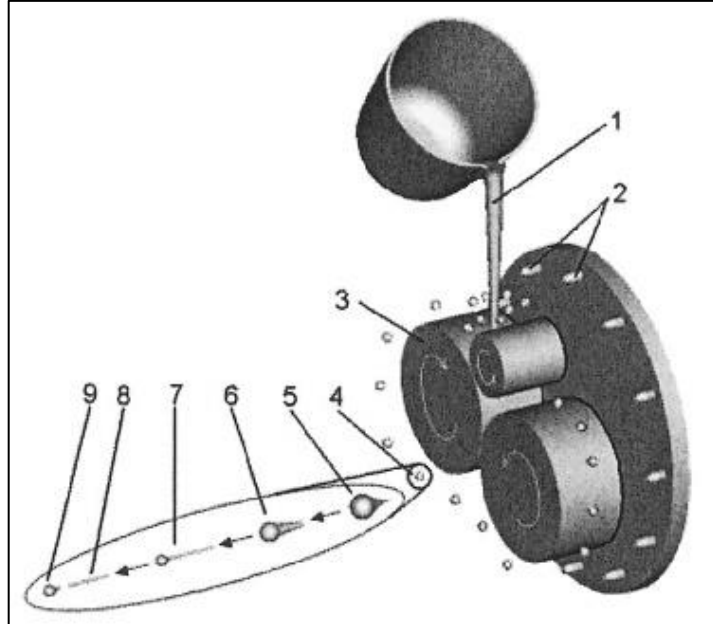
Şekil 2.10. Bazalt liflerinin kompozit içerisindeki temel uygulama biçimleri.

2.5.3. Bazalt Liflerinin Üretilmesi

Bazalt lifinin üretim işlemi, cam lifi ile benzerdir fakat daha az enerji ile tüketimi ve herhangi bir katkı maddesi eklenmemesi bazalt liflerini, cam ya da karbon liflerinden daha ucuz yapmaktadır [63], [76], [60], [70]. Bazalt liflerinin taban maliyeti, hammaddenin türü ve kalitesine, üretim sürecine ve son ürünün özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterir [63].

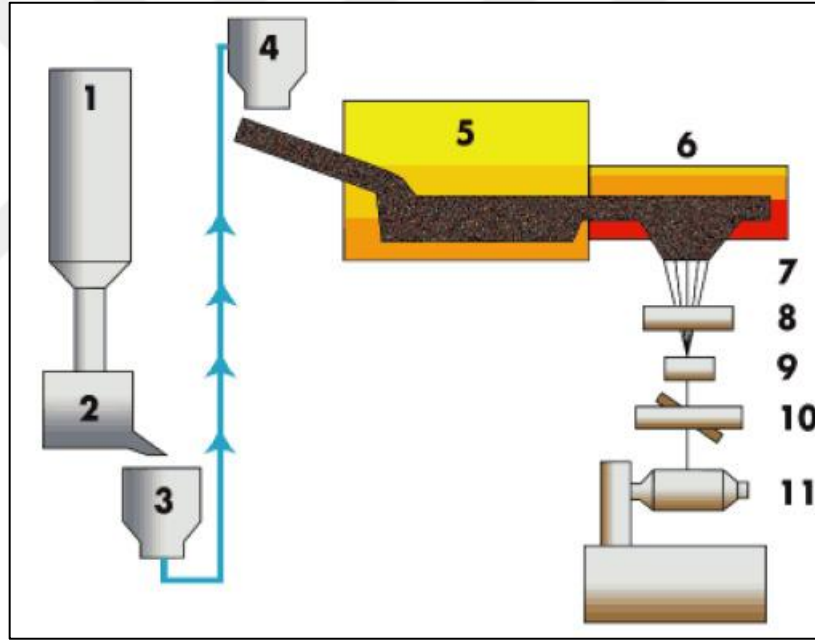
Bazalt lifleri, tipik olarak iki farklı teknolojiyle üretilirler. Her iki yöntemde de, bazalt ocaktan çıkarılır, öğütülür, yıkanır ve sonra 1400-1500 °C' de eritilir. Camın erime noktası 1400 °C ile 1600 °C arasında değişir [48], [58], [75].

Santrifüj silindirli eriyik üfleme teknolojisi (Örneğin; Junkers yöntemi); temel olarak yapı ve otomotiv endüstrisinde, yalıtım malzemeleri olarak kullanılan, 60-100 mm uzunlukta ve 8-20 µm çapa sahip (ya da 7-13 µm), ucuz liflerin imalatı için kullanılır [48], [59]. 1580 °C'lik fırından çıkan eriyik durumdaki bazalt, yatay bir mile sahip lif eğirme makinesine aktarılır. Bu makine, üç santrifüj kafaya sahiptir ve bir hızlanma ve iki liflendirme silindiri içerir. Merkezkaç kuvvetinin etkisiyle oluşan lifler yüksek basınçlı hava ile üflenirler. Şekil 2.11'de eriyik üfleme ile Junkers tipi bazalt lifin üretim şeması gösterilmektedir [48], [59].



Şekil 2.11. Eriyik üfleme ile Junkers tipi bazalt lifin üretim şeması: 1. Erimiş bazalt kaya, 2. Üfleme valfleri, 3. Liflendirme silindiri, 4. Damlacıklar, 5-7. Lif oluşumu, 8. Lif, 9. Lif başı.

Sürekli eğirme yönteminde, eriyik malzeme, lifleri oluşturmak için bir platin/rodyum pota geçişlerine geçirilir. Sürekli eğirme adındaki bu teknoloji, tekstil alanındaki üretim işleminde kullanılabilen ve kompozit malzemeler için büyük bir potansiyel uygulamaya sahip olabilen kırılmış lifler ya da sürekli lifler biçiminde takviye malzemesi oluşturabilir [63]. 10-14 μm çapa sahip bu sürekli lifler, farklı sayılarda temel lifler içeren fitil formunda elde edilebilir. Kısa lifler, çok basit bir teknoloji ile öğütülmüş bazalt taşlardan doğrudan üretilebilir ve bu nedenle bu lifler çok ucuzdur. Ancak nispeten zayıf ve düzensiz mekanik özelliklere sahiptir. Lifler, hidrostatik basınç altında eriyikten iplik olarak çekilir ve daha sonra, sertleşmiş filamentleri elde etmek için soğutulur. İpliğe; kayganlık, bütünlük ve reçine uyumluluğu vermek için silan esaslı bağlayıcı sıvı uygulanır [48]. Bazalt lifinin sürekli eğirme yöntemiyle üretilmesine ait şema Şekil 2.12’de gösterilmektedir [48], [63], [80].



Şekil 2.12. Bazalt lifi eğirme şeması: 1) Öğütülmüş taş silosu, 2)Yükleme ünitesi, 3) Taşıma sistemi, 4) Yığın dolum ünitesi, 5) Başlangıç erime bölgesi, 6) İkincil kontrollü ısı bölgesi, 7) Filament oluşturma, 8) Boyutlandırma uygulayıcı, 9) İplik (strand) oluşturma.

2.5.4. Bazalt Liflerinin Kullanım Alanları

Bazalt lifler; kompozit, otomotiv, denizcilik, inşaat, borular, donatılar, kumaşlar, yapısal plastikler, ulaşım endüstrileri, depolama tankları, kimyasal transfer sistemleri, makine imalatı, spor ve eğlence malzemeleri üretiminde alternatif bir hammadde olarak tercih

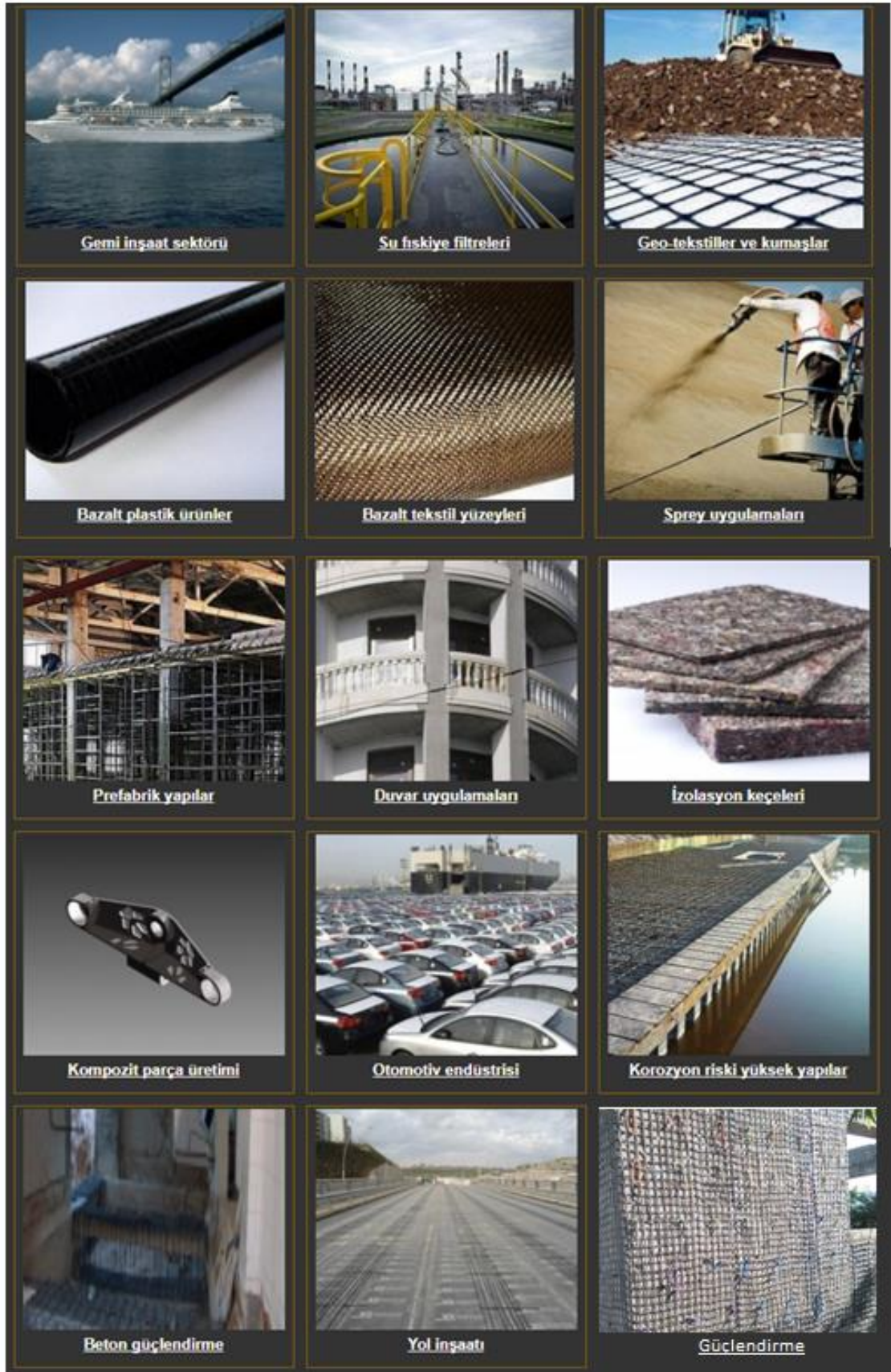
sebebidirler [63], [70]. Ayrıca; tekstil liflerinin üretimi, yer döşemeleri, ağır endüstriyel kullanımlar için asitlere dirençli malzeme, taş yünü, fren balataları kontrolü gibi sürtünme malzemeleri olarak da kullanılmaktadırlar [65].

Bazaltlar; binalarda, çeşitli uygulamalar için kullanılabilir. Beton güçlendirilmesi amacıyla çekmeli sıkılmış (pultruded) profiller veya donatı üretmek için kullanılabilir. Bu son durumda, bazaltlar; çelik ve cam lifine bir alternatiftir. Bazalt donatılarının temel avantajları [63];

- Çelikten daha sert ve hafiftirler,
- Alkali, pas ve asitlere karşı doğal olarak dirençlidir,
- Cam lifi çubuklar gibi özel kaplamaya ihtiyacı yoktur,
- Beton ile aynı termal genleşme katsayısına sahiptir,
- Bazalt donatıları; çubuklar ve beton ve yüzey arasındaki kalınlık ve boşlukları azaltırlar,
- Düzenli araçlar ile istenilen uzunlukta kolayca kesilirler,
- Elektriği iletmezler,
- Korozyonun sürekli bir sorun olduğu deniz ortamları ve kimyasal tesis uygulamaları için uygundur [63].

Bazalt lifi takviyeli plastiklerin çeşitli kullanım alanlarına ait görseller Şekil 2.13'te gösterilmiştir [81].

Bazalt liflerin, üretim ve yüzey özellikleriyle ilgili gelişimi henüz tamamlanamamıştır. Hem mekanik özellikleri hem de kompozit uygulamalarındaki performansları bakımından, literatürde az miktarda araştırma sonuçları bulunmakla beraber, bu sonuçlardaki bilgilerde bazı tutarsızlıklar da bulunmaktadır [82].



Şekil 2.13. Bazalt liflerinin çeşitli kullanım alanlarına ait görseller.

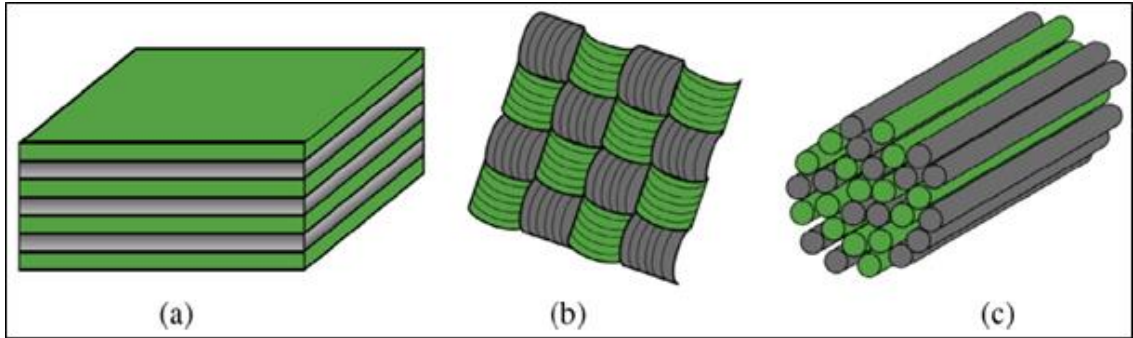
2.6. HİBRİT KOMPOZİTLER

Hibrit kompozitler, farklı türden matrislerle farklı mekanik ve diğer özelliklere sahip, iki ya da daha fazla farklı tiplerde lif ve dolgu takviyelerinden oluşmaktadır. Hibritleştirilmenin amacı, birleştirilen malzemelerin özelliklerinin uyumlu olduğu bir kompozit yapıya ulaşmak ve maliyetleri düşürmektir [83], [48], [84], [85], [86], [39]. Hibrit kompozitler ile spesifik özelliklerin daha fazla kontrol altına alınması, herhangi bir kompozit malzemenin avantaj ve dezavantajları bakımından daha olumlu bir denge oluşturulması mümkün olmaktadır [87].

2.6.1. Hibrit Karışımlar

Tipik olarak, düşük uzamalı (low elongation; LE) ve yüksek uzamalı (high elongation; HE) olmak üzere, iki lif türünden söz edilebilir. Hasara uğrayan birinci lif, normalde LE lifidir. HE lifinin büyük kırılma uzamasına sahip olması şart değildir fakat bir LE lifinden daima daha büyük kırılma uzamasına sahiptir. LE/HE liflerinin yerine gevrek/sünek lif terimlerinin karışıklığa yol açmasının nedeni de budur [83].

LE ve HE lifleri, birçok farklı biçimlerde birleştirilebilir. Üç en önemli birleştirme biçimi Şekil 2.14’de gösterilmiştir [83].

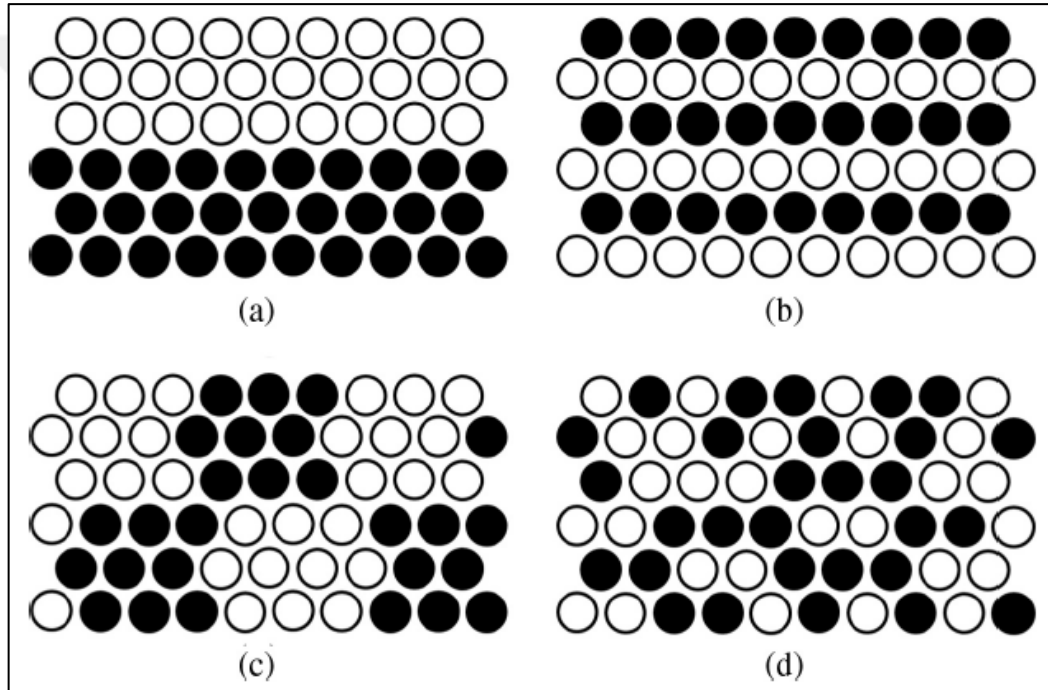


Şekil 2.14. Üç ana hibrit birleşimi; (a) Ara katman (interlayer) veya tabaka tabaka, (b) tabaka içi (intralayer), (c) İç içe gecik iplikler (inrayarn).

Ara katman (interlayer) biçiminde (Şekil 2.14.a) iki lif türü tabakası birbirinin üzerine dizilmiştir. Bu işlem, bir hibrit kompozit üretmek için en basit ve en ucuz yöntemdir. Tabaka içi (intralayer) hibritlerde, iki lif türü tabakalar arasında karıştırılır. Bu işleme ait, farklı ipliklerin, bir örgü içerisinde dokunması (co-woven), Şekil 2.14.b’de örneklendirilmiştir. Ayrıca, paralel demetler gibi, diğer tabaka içi biçimleri de

mümkündür. Ayrıca, iki lif türünün, lif düzeyinde karıştırılmasıyla veya kaynaştırılmasıyla, iç içe ipliklerden (inrayarn) oluşan bir hibrit elde edilebilir (Şekil 2.14.c). Bu üç birleştirmeden ikisinin birleştirilmesiyle, daha karmaşık birleşimler elde edilebilir. Örneğin, iç içe geçik ipliklerden oluşan hibritler, homojen bir iplikle birlikte dokunabilir [83].

Hibrit kompozitlerde önemli diğer bir durum ise, iki lif türünün dağılımıdır. Bu dağılım, iki lif türünün ne kadar iyi karıştırılması ve en küçük tekrar eden uzunluğun iki taraflı olarak belirlenmesi için bir ölçüdür [88], [89], [90], [91]. Şekil 2.15'te, dağılım derecesi, şematik olarak örneklendirmektedir [83].

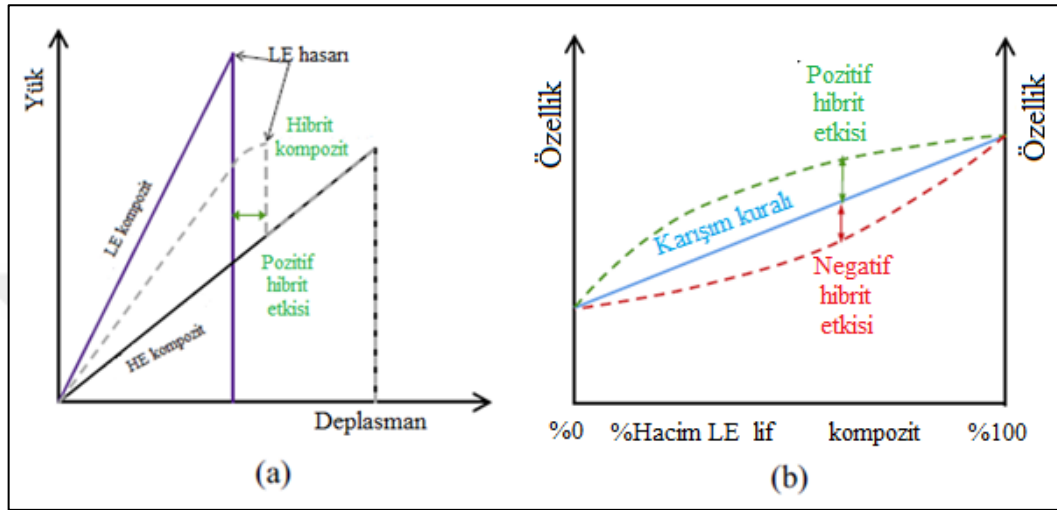


Şekil 2.15. Çeşitli derecelerdeki dağılım örnekleri, (a) iki tabaka, (b) birbirini izleyen tabakalar, (c) demet demet dağılım, (d) tamamen rastgele dağılım.

Şekil 2.15.a, iki belirgin tabaka içerisindeki iki lif türü olarak düşük derecede dağılımlı bir hibriti göstermektedir. Bu durum, tabaka sayılarının arttırılmasıyla veya tabaka kalınlıklarının azaltılmasıyla Şekil 2.15.b'de örneklendirildiği gibi geliştirilebilir. Dağılımı arttırmanın bir başka yolu da, lif demet kademesini arttırarak hibritleştirme yapmaktır (Şekil 2.15.c). En iyi dağılıma, Şekil 2.15.d'de olduğu gibi eğer iki lif türü tamamen rastgele dağılı durumunda olursa ulaşılabilir [83].

2.6.2. Hibrit Etkisi

Hibrit etkisiyle ilgili çeşitli tanımlamalar yeni ortaya çıkmıştır. Hibrit etkisinin en temel tanımı, LE lif takviyeli hibrit olmayan bir kompozitin kırılma uzaması ile karşılaştırıldığında, bir hibrit kompozit içerisindeki LE lifinin görünür kırılma uzamasını arttırmasıdır. Bu tanımlama, Şekil 2.16.a'da şematik olarak örneklendirilmektedir [83].



Şekil 2.16. Hibrit etkisi tanımlarının örneklemeleri, (a) Hibrit kompozitin referans kompozit kadar iki kat kalınlıkta olduğu ve karşılaştırmalı hacim oranının 50/50 olduğu varsayılan, LE liflerinin görünür kırılma uzaması güçlendirmesi ve (b) karışım kurallarındaki bir sapma.

Hibrit etkinin bir diğer tanımı, karışımların basit kuralından sapma olmasıdır [87]. İkinci tanımlamanın avantajı, kırılma uzaması dışındaki mekanik özelliklere de uygulanabilmesidir (Şekil 2.16.b). Bununla birlikte, bu tanımın üç nedenden dolayı uygulanması basit değildir. Birincisi, karışım kuralının tüm özellikler için doğrusal olması zorunlu değildir. Çekme mukavemeti için, LE lifinin kırılma uzaması için sabit bir değer olması beklenirken karışım kuralları iki doğrusaldır [88], [89], [90], [91]. İkincisi, karışımların her kuralının belirli bir kompozisyon parametresine ihtiyacı vardır ve doğru karışımın seçilmesi hayati önem taşımaktadır [92], [88]. LE ve HE kompozitlerinin göreceli hacim fraksiyonları iyi bir seçimdir ancak deneysel olarak saptanması her zaman kolay değildir. Son olarak, ikinci tanım daha genel olsa da yine de tüm mekanik özellikler için geçerli değildir. Örneğin, bir karbon lifli kompozitin iç katmanlarının cam lif katmanları ile yer değiştirmesi durumunda, eğilme modülü neredeyse hiç etkilenmeyecektir. Açık bir ifadeyle, karışımların basit kuralları eğilme

koşulları için geçerli değildir. Klasik laminat teorisi gibi daha ileri teorilere, eğilmede hibrit bir etkinin var olup olmadığını belirlemek için ihtiyaç duyulmaktadır. Bu karmaşık yükleme koşullarında dayanım ve kırılma uzamasının tahmin edilmesinin zor olması nedeniyle, bu durum hibrit etkisinin tahminini ciddi derecede karmaşıktırmaktadır [83].

Şimdiye kadar, hibrit etkisi için üç farklı varsayım yapılmıştır: (1) kalıntı gerilmeleri (residual stress), (2) hibrit kompozitin son kırılmasına yol açan hasar gelişmesindeki değişiklikler ve (3) hareketli gerilme yoğunlaşmaları. Çoğu varsayımlar, ya iç içe geçik ipliklerdeki birleştirmelerde veya katmanlar arası birleştirmelerdeki tek yönlü hibrit kompozitlere uygulanmıştır. Bu varsayımlar, daha karmaşık kırılmalarına rağmen, yine de yükleme yönündeki liflerin kırılmasıyla örtüşen, çok yönlü kompozitlere genişletilebilir. Ayrıca, literatürdeki neredeyse tüm modeller, hibrit etkisini, çok yönlü hibrit kompozitlerden ziyade, tek yönlü hibrit kompozitler için tahmin etmektedir [83].

2.6.2.1. Kalıntı Gerilmeleri (Residual Stresses)

İlk hipotezde, hibrit etki, iki lif tipinin termal büzülmelerdeki farklılıklardan dolayı kalıntı çekme gerilmelerine atfedilir. Bir epoksi matristeki karbon liflerinin ve cam liflerinin klasik birleşimlerini düşünelim. Liflerin emdirilmesinden sonra sıcaklık, epoksiyi kür etmek için yükseltilir. Her iki lif de termal genişleme katsayısı nedeniyle uzunluklarını değiştirme eğiliminde olacaktır. Cam liflerinin termal iletkenlik katsayısı $5-10K^{-1}$ arasında, karbon liflerinin termal iletkenlik katsayısı ise -1 ile $+1 K^{-1}$ aralığında olduğu için bu durum, cam liflerinin ısınması ile lif uzunluklarını arttırmasına neden olurken, karbon liflerinin uzunluklarını az ya da çok korumasına neden olur. Reçine halen sıvı haldeyken, bu henüz gerilme oluşturmaz ancak, reçine sertleştirildikten ve kompozit soğutulduktan sonra, cam lifleri küçülürken, karbon lifleri uzunluklarını az ya da çok koruyacaktır [83], [42], [93]. Bu sadece kısıtlamasız bir durumda ortaya çıkabilir. Gerçekte, sertleştirilmiş reçine, farklı lif türleriyle güçlendirilmiş katları birbirine bağlar ve farklı bir uzunluğa sahip olmalarını engeller. Karbon lifleri üzerine basınç gerilmeleri ve cam lifleri üzerine çekme gerilmeleri uygulayan bir kuvvet dengesi kurulur. Bu basınç gerilmeleri, uygulanan gerilmeye karşı koyar ve karbon liflerinin görünür kırılma uzaması artar. Cam liflerinin görünür kırılma uzaması ise tersine, azalır. Termal etki hibrit etkiye katkıda bulunurken, tam hibrit etkiyi açıklamanın yetersiz olduğu belirtilmiştir [94], [91].

2.6.2.2. Hasar Gelişmesi

Hibrit etki için ikinci hipotez kırılma gelişmesi biçimindeki değişikliklerle ilgilidir. Bu, Manders ve Bader tarafından açıklandığı üzere, istatistiksel veya kırılma mekaniği yaklaşımı ile ele alınabilir [95]. Kırılma mekaniği yaklaşımı, önceden var olan bir çatlak içeren bir yapı ile ilgilenmekte ve bu çatlağın büyümesi için enerjik olarak elverişli zamanı belirlemektedir. Bununla birlikte, lif takviyeli kompozitlerin yapısal homojenliği ve anizotropisi, bu yaklaşımı kompozitin dayanım modellemesi için zorlaştırmaktadır. Sonuç olarak, istatistiksel yaklaşım kırılma mekaniği yaklaşımından daha fazla dikkat çekmiştir [83].

Stokastik olarak dağılmış kusurları olan liflerin ard arda hasara uğraması gerçek bir istatistiksel sorundur. Lif mukavemeti aslında tek, eşsiz bir değer değildir. Ancak stokastik bir değişkendir [83].

Tek yönlü kompozitlerde, tüm lifler bozulmamışsa, gerilme tüm liflerde aynı olur. Gerinim daha da artarsa, ilk olarak lif kırılacak ve lokal olarak yük taşıma kapasitesini kaybedecektir. Bununla birlikte, bu, kompozit hasarına yol açmaz [96]. İlk lif kırılmasından sonra, lifi çevreleyen matris kesme yüküne maruz kalır ve gerilmeyi, kırılma noktasından belli bir mesafeye kadar tam yük taşıma kapasitesini elde eden kırık life geri aktarır. Ayrıca, komşu lifler gerilme konsantrasyonlarına maruz kalacak ve kırık lifin neden olduğu ilave yükü yerel olarak üstleneceklerdir [97], [98], [47]. Komşu liflerdeki bu gerilme konsantrasyonları tipik olarak lif kırılma düzleminde %5-15 aralığında olmakla birlikte, bu lif kırılma düzleminde artan mesafe ile birlikte hızla azalmaktadır [83], [99], [100].

Gerilme konsantrasyonları, komşu liflerde hasar olasılığının artmasına yol açar. Gerinim daha da arttığında, bu artan hasa olasılığı, kırık lif kümelenmelerinin gelişmesine yol açacaktır [101]. Bu kümelerden biri yeteri kadar büyüyorsa ve belirli bir kritik boyuta ulaşırsa, o kümelenme istikrarsız bir şekilde büyür ve nihai hasara neden olur [102].

Hibrit kompozitler, bu hasar gelişim sürecine birkaç aşamada müdahale edebilir. Birincisi, bozulmamış liflerdeki gerilme konsantrasyonları ve kırık lifteki gerilme düzeyi, LE ve HE lifini farklı sertlik veya çapa sahip olması durumunda değiştirilebilir [94], [100]. Bu, kümelenme gelişimine müdahale eder. İkincisi, kırık LE lifleri, HE lifleri ile köprülenebilir ve bu sadece kümelenmenin gelişimini engellemekle kalmaz aynı zamanda kritik kümelenme boyutunu artırabilir [88], [103]. Kalan LE lif parçaları, en zayıf halkalar

ortadan kaldırıldığından daha yüksek bir gerilime maruz kalma eğilimi gösterecektir [103]. Üçüncü olarak, bir boyut ölçeklendirme etkisi meydana gelebilir. Hibrit olmayan kompozitlerin kırılma uzamasının, numune boyutunun azalmasıyla arttığı artık iyi bilinmektedir [98], [104]. Bu etki aynı zamanda, referans LE kompozitine kıyasla, hibrit kompozitlerin belirgin kırılma uzamasını artırabilir. Daha belirgin olarak, bir LE/HE lif hibrit kompoziti aynı hacimdeki bir LE lif kompoziti ile karşılaştırıldığında, LE liflerinin hacmi hibrit kompozitten daha düşüktür ve dolayısıyla hasar ihtimali daha düşüktür [83].

2.6.2.3. Dinamik Gerilme Konsantrasyonları

Bazı yazarlar aynı zamanda tek yönlü kompozitlerin hasarındaki dinamik gerilme konsantrasyonlarının önemini vurgulamışlardır. Bir lif kırıldığında, lif üzerindeki yük lokal olarak gevşer ve lif geri yaylanır. Bu, her lif boyunca hareket eden bir gerilme dalgası yaratarak gerilme konsantrasyonunda geçici bir artışa neden olur.

Önceki bölümlerde hibrit kompozitlerdeki hasarın anlaşılması çeşitli yönleri ile anlatılmıştı. Bununla birlikte, hibrit etkisini etkileyen pek çok parametre vardır ve hangi parametrenin en önemli olduğunu belirlemek önemlidir. Bu parametreler [83], [105], [47];

- Liflerin karşılaştırmalı miktarı,
- Liflerin elastik özellikleri,
- Lifin en-boy oranı,
- Lifin uzunluğu,
- Kırılma uzama oranı,
- Lif dayanımı katkısı,
- Liflerin dağılım derecesi,
- Matris özellikleri,
- Diğer parametreler (lif-matris ara-yüzey dayanımı, tabaka içi dayanım ve tabaka içi kırılma tokluğu) olarak sayılabilir.

Literatürde değişik amaçlar için farklı bileşimlerde birçok kompozit malzemenin üretildiği görülmektedir.

2.7. POLİMER KOMPOZİTLERLE İLGİLİ LİTERATÜR TARAMASI

Ateş, Aztekin ve Çakır, yapmış oldukları bir çalışmada, içerisinde herhangi bir takviye ve dolgu malzemesi içermeyen, sadece matris fazında iki farklı polyester reçine (PA ve PB) içerisine farklı oranlarda başlatıcı ve hızlandırıcı ilave ederek hazırladıkları karışımlar üzerinde yoğunluk ve basınç dayanımı (7 günlük kür süresi) deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Başlatıcının üst sınırı olarak belirlenen %3 değerinin, sertleşme anında belirgin çatlamalara sebep olduğunu, alt seviye olarak alınan %0,5 değerinde ise katılaşmada problemler ortaya çıktığını belirlemişlerdir. Bununla birlikte, hızlandırıcı kullanılmamasının, basınç dayanımı ve yoğunluk değerlerinin düşmesine neden olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, reçine, başlatıcı ve hızlandırıcı oranları değişiminin, basınç dayanımı ve yoğunluk değerlerini etkilediğini tespit etmişlerdir. Çalışmada en büyük basınç dayanımı (133,747 MPa) değerini veren “hızlandırıcı/başlatıcı/polyester” yüzde oranlarını, “PB” reçine tipi için, “0,5/1/98,5” olarak belirlemişlerdir [106].

Mijović ve Wijaya’nın yaptığı araştırmalardan elde edilen bir sonuca göre, kür işleminin ilk safhalarında dielektrik özelliklerin yükseldiği tespit edilmiştir. Maksimum noktalarda ise değerlerin düştüğü anlaşılmıştır. Dielektrik özelliklerdeki bu değişikliklerin, polimerin ağ yapısında olduğu görülmüştür. Düşük sıcaklıkta reçinenin viskozitesinin yüksek olduğu ve elektrik alanı içinde dipollerin kararlı olduğu belirlenmiştir. Sıcaklığın yükselmesiyle viskozitenin düştüğü, dipollerin serbest hale geldiği ve kimyasal reaksiyonların başladığını görmüşlerdir [107].

Yaşar ve Arslan, cam lifli-polyester kompozitler üzerinde lif hacim oranı ve lif doğrultusunun tribolojik özelliklere etkisini incelemek üzere yaptıkları çalışmada, matris olarak ortoftalik doymamış polyester (UP) reçinesi, hızlandırıcı olarak %2 oranında kobalt katalizör, %1 hacim oranında ise başlatıcı, lif olarak da, silan kaplı E-camı kullanmışlardır. Sadece matris fazında gerçekleştirilen reçine karışımının yoğunluğunu $1,21\text{g/cm}^3$, çekme dayanımını ise 25MPa olarak belirlemişlerdir. Matris içerisine ilave ettikleri lif miktarının hacimce (%3; %12; %15; %18; %30; %33; %42; %55 ve %67) oranlarında arttırılmasıyla, yoğunluk ve çekme dayanımlarının arttığını belirlemişlerdir. Bu lif oranlarında üretilen lifli kompozitlerin yoğunluk ve çekme dayanımı değerleri sırasıyla; ($1,23\text{ g/cm}^3$; 39 MPa), ($1,36\text{ g/cm}^3$; 120 MPa), ($1,41\text{ g/cm}^3$; 142 MPa), ($1,45\text{ g/cm}^3$; 171 MPa), ($1,60\text{ g/cm}^3$; 328 MPa), ($1,64\text{ g/cm}^3$; 364 MPa), ($1,69\text{ g/cm}^3$; 525 MPa), ($1,89\text{ g/cm}^3$; 578 MPa) ve ($2,12\text{ g/cm}^3$; 650 MPa) olarak elde edilmiştir. En yüksek

yoğunluk ve çekme dayanımı değerine, %67 lif hacim oranıyla ulaşıldığını belirlemişlerdir [108].

Haddad ve Kobaisi, UP reçinesi ve polimer betonun termal ve mekanik özellikleri ile kür süreci üzerinde, nemin etkisini incelemişlerdir. UP örneği (%33 stiren içinde çözölmüş %67 UP); UP'nin, metilmetakrilat'a hacimsel oranı, 3/2 olacak şekilde karıştırılarak üretilmiştir. Bu karışıma, hacimce %0,8 kobalt oktoat (hızlandırıcı), %0,2 dimetil anilin (DMA; hızlandırıcı) ve %2 MEKP (başlatıcı) ilave edilmiş ve sıra ile karıştırılmıştır. Daha sonra, %1-5 hacim oranında su, kürleştirme aşaması üzerinde ve son polimerik matris özellikleri üzerinde, nem içeriğinin etkisini araştırmak için karışıma ilave edilmiştir. Karışım kalıba dökölmüş ve 24 saat çevre koşullarında kür edilmiştir. Ardından mekanik testler yapılmıştır. Çekme ve eğilme dayanımının belirlenmesi için reçine numunelerinin ebatları, 50x10x2,5 mm olarak kullanılmıştır. Polimer beton agregası, bazalt (iri agregası oranı hacimce, %49,8), kum (orta büyüklükte agregası oranı hacimce, %24,9) ve uçucu kül (ince agregası oranı hacimce, %8,3)'den oluşmuştur. Agregalara, %1-5 oranında su püskürtölmüş ve eşit dağılımı sağlamak için 30 dakika boyunca karıştırılmış ve karışım sonunda nem içeriği ölçölmüştür. Bu agregaya hacimce %17 reçine ilave edilmiş ve agregalarla 20 dakika karıştırılmıştır. Reçine-agregası karışımı, yapışmayı önlemek için, jelkot ve polivinilalkol (PVA)'dan oluşan bir ayırma maddesi ile kaplanmış 100 mm çapında ve 300 mm uzunluğunda bir silindirik bir kalıp ve 100x100x300 mm ebatlarında bir dikdörtgen çelik kalıp içerisine dökölmüştür. Polimer beton numuneleri 28 gün çevre koşullarında kür edildikten sonra basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiştir. TGA analizleri için, tüm termal degradasyon testleri, 90mL/dak'lık bir akış hızı ile azotla süpürme (nitrogen purge) altında yapılmıştır. Analizlerde, tüm testler için en düşük 20 °C'lik ortam sıcaklığından 800 °C'ye kadar olan bir ısıtma oranı kullanılmıştır. FT-IR spektrumları ise, bir Perkin Elmer 2000 spektrometresine, bir ATR eklentisi kullanılarak elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde; başlangıç nem içeriği arttıkça, reaksiyon ısısında bir azalma ve reaksiyon derecesi ve aktivasyon enerjisinde bir artış olduğu gözlenmiştir. Başlangıç nem içeriği, %0'dan %5'e arttırıldığında dönüştürme süresi 17,5 dk'dan 64 dk'ya, %70 yükselmiştir. UP reçinesinin mekanik özelliği, nem içeriğinin artmasıyla önemli ölçüde kötüleşmiştir. Başlangıç nem içeriği, %0'dan %5'e arttırıldığında, reçinenin Shor D sertliği, 85 MPa'dan, 67 MPa'a, eğilme dayanımı, 144 MPa'dan, 30 MPa'a, elastisite modöülü, 2,99 GPa'dan, 1,05 GPa'a ve çekme dayanımı, 58,6 MPa'dan, 30 MPa'a düştüğünü belirlemişlerdir. Polimer betonun

eğilme dayanımı ise, 25,8 MPa'dan 0,68 MPa'a ve basınç dayanımı, 190 MPa'dan 85MPa'a düşmüştür. Su içermeyen UP reçinesi, 2856, 2927 ve 2955 cm^{-1} 'de zayıf C-H gerilme bantları ve 1720 cm^{-1} 'de keskin ve güçlü C = O ester bandına sahip olduğunu belirlemişlerdir. Su içeren UP reçinesinin FTIR sonuçları, 3260 ve 3515 cm^{-1} civarında artan geniş bir zirveye ve radikal kür işlemi sırasında reçinenin çapraz bağlı yapısının bir parçası haline gelen sıkışmış su molekülleri ve O-H işlevselliğine dair kanıtlar göstermiştir. İkinci bir zirve, su içeriği arttıkça 1740 cm^{-1} 'de C = O (St) yamaç olarak gelişir. Bu tepe, C = O işlevselliğinin bazılarının hidrojen bağıyla su OH ile etkileşim içinde olduğunu göstermektedir. C-H (St) bantları ayrıca su içerikli reçinelerde yoğunlaşmıştır. TGA sonuçları değerlendirildiğinde, başlangıç ağırlık kaybı, reçinedeki bağlı kalmış suya atanabilir. Bu aşama, verilerin ağırlık kaybının türevinde pik oluştuğunu göstermiştir. Bu pik, % 1 başlangıç nemi içeren numune için 226 $^{\circ}\text{C}$ 'den, %2, %3 ve %5 başlangıç nem numuneleri için 203, 181 ve 168 $^{\circ}\text{C}$ 'ye bir kayma göstermiştir. Bu durum iki durumdan dolayı meydana gelebilir; 1) ağırlık kaybı oranı, ısıtma işlemi sırasında kütle transferine bağlıdır ve bu kütle transferi, reçinedeki gözenekler boyunca su molekülünün difüzyonuna bağlıdır. Daha yüksek başlangıç nemi daha yüksek bir gözenek hacmi oranına ve bundan dolayı bağlı suyun ağırlık kaybı zirvesinin daha düşük sıcaklıklara kaymasına neden olur. 2) Su, UP reçinede, özellikle kürleştirme işleminin yüksek sıcaklıklarında ester gruplarını hidrolize edebilir veya daha az çapraz bağlanmış ağa neden olan aktif bir radikali sonlandırabilir şeklinde yorumlanmıştır [109].

Khan, Simpson ve Townsend, yaptıkları çalışmada, deniz gemi inşası için cam lifi takviyeli kompozit yapı malzemelerinde, matris olarak görev yapan polyester ve vinilester reçinelerinin kullanımı üzerinde çalışma gerçekleştirmiştir. Numuneler, bir servo-hidrolik test makinesi kullanılarak, 0,005 s^{-1} ila 10 s^{-1} arasında değişen basınç deformasyon hızına tabi tutulmuştur. Öncelikle, reçinelerin; dayanım, modül ve süneklik ile ilgili temel özellikleri ölçülmüş ve kırılma mekanizmaları araştırılarak kısa cam lifli kompozitlerin genel performansı üzerinde reçine özelliklerinin etkisi tartışılmıştır. Hiçbir hızlandırılmış kür uygulanmamış ve mekanik test öncesinde 10 haftayı aşan ortam kürü uygulanmıştır. Narinlik oranı 1:1 olacak şekilde, 10 mm'lik küp şeklindeki test numuneleri, dökme reçine plakalarından yaklaşık olarak 10 mm kalınlığında işlenmiştir. Bu çalışma, basınç deformasyon hızının artırılmasının, polyester ve vinilester reçinelerinin mekanik özelliklerini etkilediğini göstermiştir. Lineer elastik sınırdaki gerilme ve maksimum gerilme, deformasyon hızının artırılmasıyla artmıştır. Bu

mukavemet parametreleri, polyester reçine için, vinil ester reçine ile karşılaştırıldığında, anlamlı derecede yüksek bulunmuştur. Modül; genellikle, her iki reçine için deformasyon hızı ile artmış, ancak modül değerleri, polyester reçineye ait numuneler için daha yüksek olmuştur. Lineer elastik sınırdaki ve maksimum gerilmede ölçülen deformasyonlar, polyester reçinede, vinilester reçineden daha fazla olmuş fakat, polyester reçine için daha az uyumlu olma ve yüksek deformasyon hızlarında gevrek bir şekilde bozulma ve sonuç olarak, elastik sınırdaki ve maksimum gerilmede görülmeyen, deformasyon azalması eğilimi olmuştur. Böyle bir eğilim, vinil ester reçinede gözlenmemiştir ve bu nedenle, vinilester reçinenin, gerçek gemi uygulaması için kompozit yapılarda kullanımının yararlı bir etkiye sahip olabileceği düşünülmüştür [110].

Mahdi ve ark., yaptıkları çalışmada, UP reçinesi üretmek için glikoliz aracılığıyla, artık ürün olan Polietilen Teraftalat (PET) plastik şişeleri depolimerize etmişlerdir. Üretilen UP reçinesi, daha sonra, polimer harç ve polimer beton üretmek için bir bağlayıcı ajan olarak kullanılmıştır. Stiren monomeri, reçinenin viskozitesinin azaltılması ve molekül zincirleri arasında çapraz bağlanma sağlamak için kullanılmıştır. Polimer betonun mukavemeti üzerindeki etkisini bulmak, bu şekilde daha ileri araştırmalar için kullanılabilir en iyi kombinasyonu belirlemek için reçineler, 8 setten oluşan farklı kombinasyonlarda PET, glikol, dibazik asitler, başlatıcılar ve hızlandırıcılar kullanılarak hazırlanmıştır. 1-4 arasındaki setlerde, başlatıcı olarak, Benzoil peroksit (BPO) ve hızlandırıcı olarak ise, N, N-Dietil anilin (NNDA) kullanılırken, 5-8 arasındaki setlerde, başlatıcı olarak MEKP ve hızlandırıcı olarak kobalt naftanat (CoNp) kullanılmıştır. UP reçinesi, viskoziteyi azaltmak için stiren ile seyreltilmiştir. Stiren miktarı, UP' nin 0,63 ml/g'ı olarak alınmıştır. Seyreltilmiş reçine, inorganik agrega ile karıştırma öncesinde serbest radikal başlatıcı ve hızlandırıcı ile karıştırılmıştır. Reçinenin ağırlığı, agreganın ağırlıkça, %10'u olarak alınmıştır. MEKP ve CoNp kullanıldığında, reçine ilk olarak agrega üzerine dökülmüş ve daha sonra CoNp'yi takiben, MEKP, reçine içerisine ilave edilmiş ve daha sonra elde edilen karışım elle karıştırılmıştır. Çalışmada, ince ve iri agrega olarak kuvars kökenli maksimum tane çapı 10 mm olan kırma taş agregalar kullanılmıştır. Basınç dayanımının belirlenmesinde, polimer harçlar için 70,6 mm boyutlarında dökme demir polimer harç küp numuneleri kullanılırken, polimer betonlar için 150 mm'lik küpler kullanılmıştır. 8 setten oluşan numuneler arasında, polimer harçlar içerisinde en yüksek basınç dayanımı değeri, 8 nolu sette, dibazik asit olarak sadece maleik anhidrit içeriğiyle, PET/glikol oranı 2:1 olarak ve MEKP ve CoNp kullanımıyla,

28,5 MPa olarak belirlenmiştir. Polimer betonun en yüksek basınç dayanımı değeri ise, 5 nolu sette, dibasik asit olarak maleik ve fitalik anhidrit içeriğiyle, PET/glikol oranı 1:1 olarak ve MEKP ve CoNp kullanılarak elde edilmiş ve bu değer 42,2 MPa olarak belirlenmiştir. Sertleşmiş polimer reçinesi üzerinde sıcaklığın etkisini incelemek için TGA çalışmaları yapılmıştır. Testler, sertleştirilmiş reçine üzerinde 1000 °C'ye kadar gerçekleştirilmiştir. 1, 2, 5, 6 ve 7 numaralı setler için sertleştirilmiş polimer reçinesindeki ağırlık kaybı 100 °C'de % 1'den az iken, kalan setlerde (3, 4 ve 8 nolu setler) ağırlık kaybı, %1,28'den %1,38'e yükselmiştir. 1, 2, 5, 6 ve 7 numaralı setler için sertleştirilmiş polimer reçinesindeki ağırlık kaybı, 200 °C'de, %3'den az iken kalan setlerde (3, 4 ve 8 nolu setler) ağırlık kaybı, %3,68'den %4,75'e yükselmiştir. Sertleşmiş polimer reçinelerinin 3, 4 ve 8 nolu setler haricindeki tüm setler için TGA eğrileri, yaklaşık 250 °C'ye kadar düz kalmış ve bundan sonra eğri keskin bir düşüş göstermiştir. 3, 4 ve 8 setlerinde, eğriler 200 °C'ye kadar düz kalmıştır. 450 °C'den sonra, eğri yine yatay hale gelmiş ve malzemenin neredeyse %80'i ayrılmıştır. Yukarıdaki sonuçlar değerlendirildiğinde, 1, 2, 5, 6 ve 7 numaralı setler, 200 °C ye kadar termal stabiliteye sahip olduğu ve bununla birlikte, tüm setler arasında, 5 ve 6 numaralı setlerin daha iyi ısı dirence sahip olduğu kanaatine varılmıştır [111].

Ateş ve Aztekin, dolgu takviyeli polyester matrisli ve lif takviyeli polyester matrisli kompozitlerin, yoğunlukları ile mekanik özellikleri üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Matris yapı için, %98,5 polyester, % 1 başlatıcı ve % 0,5 oranında hızlandırıcı kullanılmıştır. Basınç testi numune boyutları, 50x100 mm'dir. Lif takviyeli kompozitler, 6 mm uzunluğunda kırılmış E cam liflerinin %22'den %88'e kadar, %11'lik artışlarla, toplamda 7 farklı hacimde karıştırılmasıyla üretilmişlerdir. Kuvars dolgulu kompozitler ise, tane çapları 0-0,125 mm aralığında, %5'ten %45'e kadar, %5'lik artışlarla, toplamda 9 farklı hacimde karıştırılarak üretilmişlerdir. Hazırlanan lif takviyeli kompozitler ile dolgu takviyeli kompozit numunelerin 7 gün bekleme süresi sonunda yoğunlukları belirlenmiş ve bu numuneler üzerinde basınç testleri gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda, en yüksek basınç dayanımı, "lif takviyeli kompozitte"; %55 lif hacim oranında, 45,190 MPa olarak elde edilmiştir. "Kuvars dolgulu kompozitte" ise, en yüksek basınç dayanımı, %10 hacim oranında, 131,009 MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek dayanımlar bu hacim miktarlarında elde edilirken, en düşük yoğunluklar da bu hacim oranlarında elde edilmiş ve bu değerler sırasıyla, lif takviyeli kompozitte, 1,142 g/cm³ ve kuvars dolgulu kompozitte, 1,351 g/cm³ olarak belirlenmiştir [112].

Vidales ve ark., çalışmalarında, atık şişelerden elde ettikleri PET'leri, bir glikolizis işlemi ile depolimerize etmişler ve ardından UP üretmek için, içerisine maleik anhidrit eklemişlerdir. UP, polimer harçlar üretmek için bir bağlayıcı ajan olarak kullanılmıştır. PET'ler aynı zamanda, ince taneli kum dolgular ve daha iri taneli PET parçacıkları elde etmek için yıkandıktan sonra elle kesilmişlerdir. Reçinenin sertleşmesi için karışım, %1'lik MEKP ve %5'lik kobalt oktoat kullanılarak, UP ağırlığına bağlı olarak hazırlanmıştır. Bu karışım, yaklaşık 5 dakika boyunca elle karıştırılmış ve daha sonra 50 mm'lik kübik harçlar yan yana kalıplanmıştır. Harçlar kalıplardan çıkarılmış ve 7, 14, 21 ve 28 gün boyunca, 20 °C'de kür edilmişlerdir. Polimer harçlar, iki tip olarak hazırlanmıştır. Birinci karışım, kum/UP karışımından oluşurken, ikinci karışım ise kum/geri dönüşümlü PET parçacıkları/UP kullanılarak hazırlanmıştır. En iyi mekanik ve fiziksel özelliklerin, 80/20 (kum/UP) oranında ve 78/20/2 (kum/UP/PET) parçacıklarından oluşan harçlar ile sağlandığını belirlemişlerdir. 28 günlük kür periyodu sonunda, 80/20 (kum/UP)'lik karışımın basınç dayanımı, yaklaşık 29 Mpa olarak belirlenirken, 78/20/2 (kum/UP/PET) parçacıklarından oluşan karışımın basınç dayanımı ise yaklaşık 24 MPa olarak belirlenmiştir. Karışıma giren PET parçacık miktarı arttıkça mekanik özelliklerde bir miktar düşüş meydana geldiğini belirlemişlerdir. PET ve sertleşmiş reçinenin ısı direncini belirlemek için bir termogravimetrik analiz yapılmıştır. PET ve sertleştirilmiş reçinenin TGA termogramlarına göre, PET, 350 °C'ye kadar sabit kalmış ve bu sıcaklıktan itibaren bozunmaya başlamış ve %84'lük bir ağırlık kaybına ulaştığında, yaklaşık 410 °C'de bozunma tamamlanmıştır. Sertleşen reçine 200 °C'den itibaren bozunmaya başlamış ve 400 °C'de %82'lik bir ağırlık kaybı göstermiştir. TGA analizi, PET şişelerin geri dönüştürülmesinden sonra elde edilen reçinelerle hazırlanan polimer harcının yüksek termal dirence sahip olduğunu ve bir bağlayıcı gibi çeşitli inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılabileceği kanaatine varılmıştır. UP için FTIR spektrumu, PET'deki ana fonksiyonel grupların, UP'yi oluşturmak için maleik anhidrit ile reaksiyonundan sonra tutulduğunu göstermiştir. Bu bant pozisyonları, PET reçinesinin kimyasal yapısının yine de doğrusal bir yapıyı muhafaza eden bir (UP)'ye dönüştüğünü göstermiştir. Kür işleminden sonra hazırlanan reçinenin FT-IR spektrumu, ana fonksiyonel grupların pozisyonu, UP spektrumunda gözlenen ile çok benzerdir. Bu malzemelerin FTIR spektrumları arasındaki en büyük fark, sertleşmiş reçinenin spektrumundaki bant yoğunluğunun azalmasıdır. Bu, stiren ve UP aktif bölgelerinde çapraz bağlanmaya neden olan sertleşme reaksiyonu sırasında oluşan ısınmaya atfedilebilir. Bu çapraz bağlanma, UP yapısında bulunan alifatik çift bağlara bağlı olarak

meydana gelir. Bu çift bağlar stiren varlığı ile açılır, bu nedenle C-C alifatik bağları uyarılır. Alifatik C = C ile bağlantılı olan 1640 cm^{-1} 'deki bant hemen hemen kaybolur. Bu nedenle, FTIR spektrumu, sertleştirilmiş reçinenin üç boyutlu yapısını doğruladığı şeklinde yorumlanmıştır [113].

Hwang ve ark., polimer harçları üzerinde yapmış oldukları çalışmada, hızlı soğutulmuş çelik cürufun tekrar kullanılabilirliklerinin belirlenmesi amacıyla, çeşitli oranlarda çelik cürufunun ikame edilmesi ve polimer bağlayıcı maddenin ilave edilmesiyle toplamda 20 farklı polimer harç numuneleri hazırlamışlardır. Hazırladıkları polimer harç kompozitlerinde, polimer bağlayıcı olarak UP reçinesi, hızlandırıcı olarak kobalt oktoat ve başlatıcı olarak MEKP kullanılmıştır. Dolgu malzemesi olarak kalsiyum karbonat (ortalama tane çapı $32\text{ }\mu\text{m}$) ve su içeriğini %0,1'in altına düşürmek için kurutulmuş ince agrega (0,1-1,2 mm) kullanılmıştır. Harç karışımları içerisinde, polyester reçine, %9-12 oranında, dolgu malzemesi olarak kalsiyum karbonat sabit oranda olacak şekilde, %20 oranında ve polimer bağlayıcının oranına bağlı olarak %68-71 oranında değişen miktarda ince agrega kullanılmıştır. Çalışmada, ayrıca ince agrega olarak kullanılan standart kum yerine, %0-71 arasında değişen oranlarda hızlı soğutulmuş çelik cüruf ikame edilmiştir. Hazırlanan polimer harç numunelerinin, normal sıcaklıkta 28 günlük kür süresinden sonra basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, %10 ve daha fazla polimer bağlayıcı kullanıldığında, hem basınç dayanımı hem de eğilme dayanımı değerlerinde, normal çimento harcına kıyasla, yaklaşık 4 kat daha büyük dayanımların elde edildiği görülmüştür. Tüm karışımlarda, standart ince agrega yerine, artan miktarlarda hızlı soğutulmuş çelik cüruf ilave edilmesiyle basınç ve eğilme dayanımlarının arttığı, su emme değerlerinin ise düştüğü görülmüştür. En yüksek basınç ve eğilme dayanımı, %12/20/0/68 (polimer bağlayıcı/dolgu malzemesi/standart ince agrega/hızlı soğutulmuş çelik cüruf) karışımında, sırasıyla, yaklaşık 1600 kgf/cm^2 ve 360 kgf/cm^2 olarak elde edilmiştir [114].

Yılmaz, üç farklı aşamadan oluşan bir deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Birinci aşamada, $3\text{ }\mu\text{m}$ partikül boyutuna sahip CaCO_3 , %40, %50 ve %60 oranında olacak şekilde, UP'ye ilave edilmiştir. Elde edilen kompozit malzemelerin mekanik özellikleri en iyi olan %50 CaCO_3 katkılı UP kompozit numunesi esas alınarak, %20 cam lif katkılı kompozit malzemelerine, $1\text{ }\mu\text{m}$, $2\text{ }\mu\text{m}$, $3\text{ }\mu\text{m}$, $5\text{ }\mu\text{m}$ ve $10\text{ }\mu\text{m}$ partikül boyutlu CaCO_3 mineral katkıları ilave edilerek yeni kompozit malzemeler üretilmiştir. Üçüncü aşamada ise, endüstride yaygın olarak kullanılan ve atık durumunda bulunan $10\text{--}15\text{ }\mu\text{m}$ partikül

boyutlu mermer tozunun, termoset malzemelerde kullanılabilirliğini incelemek için UP malzemeye, %40, %50 ve %60 oranında ilave edilip, mekanik ve erosiv aşınma özellikleri araştırılmıştır. Elde edilen bulgular sonucunda, CaCO_3 ve atık durumda olan mermer tozunun, polyester malzemeye etkileri karşılaştırılmıştır. CaCO_3 oranının artması ile çekme mukavemetindeki artış, %10 civarında olmuştur. Matris bünyesine, değişik parçacık boyutlarında (1 μm , 2 μm , 3 μm , 5 μm ve 10 μm) ilave edilen CaCO_3 'ın partikül boyutu arttıkça, çekme mukavemetindeki azalmanın, 1 μm partikül boyutlu CaCO_3 'a göre sırasıyla, %15, %25, %22 ve %44 oranında olduğu gözlenmiştir. Atık mermer tozu oranının artması ile çekme mukavemetinde, %27 artış olmuştur. CaCO_3 oranının, %40'dan %60 oranına çıkarılması ile eğilme mukavemetinde yaklaşık, %16 azalma olmuştur. CaCO_3 partikül boyutunun artması ile eğilme mukavemetindeki azalma, %18 olmuştur. Kompozit malzeme içerisindeki CaCO_3 katkısının partikül boyutunun küçük olması (1 μm) aşınma oranını azaltmaktadır [5].

Akıncı, çalışmasında, enjeksiyon kalıplı, düşük yoğunluklu polietilen (LDPE)'lerin fiziksel, mekanik ve morfolojisi üzerine bazaltın etkisini incelemiştir. Çalışmada, dolgu içeriğinin etkisini incelemek için LDPE içerisine, ağırlıkça, %10; %30; %50 ve %70 arasında değişen oranlarda bazalt dolgusu eklenerek bazalt dolgulu kompozit numuneler hazırlanmıştır. Çalışma sonucunda, bazalt dolgu maddesi içeriğinin, kompozitin yapısal bütünlüğünü ve mekanik özelliklerini etkilediği görülmüştür. Dolgusuz hazırlanan LDPE' ye, gittikçe artan oranlarda bazalt dolgusu ilave edilmesiyle, eğilme dayanımı, E-modülü, ve yoğunluk değerlerinin arttığı görülürken, çekme dayanımı, çekme kopma uzaması, tokluk ve kırılma enerjisi değerlerinin düştüğü görülmüştür. Bazalt içeriğinin artmasıyla kristalleşme artmıştır. Bazalt ilavesinin, LDPE için alternatif bir katkı olabileceği gözlemlenmiştir [115].

Ateş ve Barnes, çalışmalarında, bağlayıcı ve dolgu malzemesi olarak UP ve kuvars kullanarak, farklı agrega diyagramları ve bağlayıcı oranları doğrultusunda, standart çimento beton tane boyutlu eğrilere (TS802) göre tasarlanan, polimer beton kompozit numuneler hazırlamışlardır. Başlatıcı olarak MEKP ve hızlandırıcı olarak kobalt oktoat kullanılmıştır. Polimer beton kompozit numunelerde matris yapı olarak %16, %18, %20, %22, %24, %26 ve %28 oranlarında UP ve ilave dolgu malzemesi olarak, en büyük tane çapı 8mm olan kuvars kullanılmıştır. Basınç dayanımı deneyi için, 50 x 100 mm ebatlarında numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler ilk olarak, oda sıcaklığında katılaştırılmış ve daha sonra 50 $^{\circ}\text{C}$, 75 $^{\circ}\text{C}$ ve 100 $^{\circ}\text{C}$ 'deki bir fırın içine yerleştirilmiştir.

Numuneler daha sonra basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Basınç dayanımının belirlenmesi sonucunda, sıcaklığın yükseltilmesi işlemiyle, basınç mukavemetinin arttığı görülmüştür. En yüksek basınç dayanımı değerleri, 75 °C’de elde edilmiş ve 75 °C’de çalışılan tüm tane dağılımı eğrilerine göre, bu değerler, 872 daN/cm² (87,2 MPa) ile 958 daN/cm² (95,8 MPa) arasında elde edilmiştir [116].

Ateş, farklı tane dağılımına sahip olan ve farklı oranlarda bağlayıcı ve dolgu malzemesi kullanarak ürettiği kompozit malzemenin, basınç dayanımı özelliklerinin değişimini incelemiştir. Çalışmada, bağlayıcı olarak kullanılan reçinelerden biri olan UP reçinesi ile dolgu malzemesi olarak kullanılan kuvars kumu karıştırılarak polimer kompozit üretilmiştir. Agregaların tane dağılımları, standart tane dağılımı eğrisi EN 12260’de belirtilen tane dağılımlarına göre gerçekleştirilmiştir. Toplamda 7 farklı tane dağılımı eğrisine sahip ve maksimum tane çapı 8mm olan agregalar karışımları oluşturulmuştur. Polyester reçine bağlayıcı oranları, %16, %18, %20, %22, %24 ve %26 olarak kullanılmıştır. Basınç dayanımı testleri için, 50x100 mm’lik silindir numuneler kullanılmıştır. Yapılan test sonuçlarına göre, reçine ve dolgu oranları ile tane dağılımı eğrilerinin değişiminin, polimer betonun basınç dayanımlarını etkilediği görülmüştür. Polyester reçine karışımlarında en yüksek dayanım değerleri, ideal eğriler olan, A ve B eğrileri arasındaki tane dağılımlarında elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanımına sahip karışım, 3 nolu tane dağılımı grubuna ait, %18 UP reçine + %82 kuvars dolgulu karışım, 628 daN/cm² (62,8 MPa) olarak elde edilmiştir [117].

Gürü ve ark., tarafından yapılan çalışmada, polyester matrisli ve mermer tozu dolgulu kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiş ve üretilen malzemelerin, eğilmede çekme dayanımı özellikleri incelenmiştir. Mermer/polyester oranları kütlece, 3; 3,5; 4; 4,5 ve 5 olacak şekilde karışımlar hazırlanmıştır. Karışıma, polyester miktarının %0,1’i oranında başlatıcı ve hızlandırıcı, ayrı ayrı ilave edilmiştir. Hızlandırıcı olarak CoNp, başlatıcı olarak da, MEKP kullanılmıştır. En yüksek mukavemet değerlerine, mermer/polyester oranının, 4 olduğu durumda ulaşılmıştır. En iyi SEM görüntüleri de bu oranda alınmıştır. Bu karışım oranında elde edilen üç noktalı eğilmede çekme dayanımı değeri 60,17 MPa olarak belirlenmiştir [118].

Bazalt liflerin, kompozit malzemeler için takviye amaçlı kullanılmasını araştıran Lopresto ve ark., vakumlu torbalama (vacuum bag) teknolojisi ve el yatırması yöntemiyle, 300 x 300 mm ebatlarında ürettikleri E-camı ve bazalt lif takviyeli lamine kompozitlerin mekanik özelliklerini karşılaştırmıştır. Güçlendirme amacıyla farklı

türlerde takviyeler kullanılmıştır. Bunlar; düz dokumalı kuru bazalt kumaş (200 g/m², 100 teks), düz dokumalı kuru E camı kumaş (290 g/m², 300 teks) takviye malzemeleridir. İstenilen kalınlıkta lamine kompozit üretmek için matris yapı olarak epoksi reçineler kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, E-camı takviyeli numunelerin daha yüksek çekme yükü taşıdığı, ancak bazalt lifli lamine kompozitlerin E modülü değerinin, E camına göre %35-42 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, E cam lifli lamine kompozitlerin, eğilme ve basma yüklemelerine karşı, bazalt lif takviyeli kompozitlerden daha yüksek mukavemet gösterdiklerini belirlemişlerdir. Çekme, eğilme ve basma yüklemeleri karşında, bazalt lif takviyeli kompozit numunelerin elastikiyet modüllerinin daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır [72].

Gümölcine ve ark., el yatırması yöntemiyle ürettikleri, izohtalik UP (yoğunluk: 1,15 g/cm³, viskozitesi 700 cP, monomer oranı %39) matrisli, sürekli E-camı (yoğunluk: 2,54 g/cm³, GF01:1200 teks, lif çapı 16 µm ve GF02: 2400 teks, lif çapı 22,5 µm) ve bazalt lifi (yoğunluk: 2,67 g/cm³, BF01: 1200 teks, lif çapı 13 ve BF02: 800 teks, lif çapı 7 µm) takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Üretilen kompozit numunelere; çekme, üç noktalı eğme ve darbe testleri uygulanmıştır. Ayrıca özellikleri yukarıda sözü edilen test metotlarıyla tespit edilen her numuneye, kalsinasyon testi uygulanarak numunelerin lif hacim oranları belirlenmiştir. Sürekli lif demetleri, özel olarak tasarlanmış tutucu bir aparata tek eksen ve birbirlerine paralel olacak şekilde dizilmiş ve gergin duruma getirilmiştir. Çalışmada, kürlleme işleminin en uygun koşullarda gerçekleştirilmesi için, hızlandırıcı olarak %0,2 oranında %6'lık kobalt oktanat ve katalizör olarak %1 MEKP kullanılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen veriler çekme dayanımı değerlerine göre eşit lif hacminde (örneğin %5 hacim oranında) değerlendirildiğinde, BF02 takviyeli kompozit numuneler (213,26 MPa), daha kalın çaplı BF01 takviyeli numunelerden (150,51 MPa) %41,7, GF01 takviyeli numunelerden (150,33 MPa) %41,8, GF02 takviyeli numunelerden (100,04 MPa) %113,2 daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu görülmüştür. BF01 takviyeli numunelerin çekme dayanımı, GF01 takviyelilerden %0,1, GF02 takviyelilerden ise %50,4 daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Cam lifi takviyeli kompozit numunelerin çekme dayanımı karşılaştırıldığında ise, GF01 takviyeli numunelerin, GF02 takviyeli numunelere göre %50,2 daha iyi performans sergilediği görülmüştür. Elastikiyet modülü değerlerine göre, cam ve bazalt lif takviyeli kompozitleri karşılaştırıldığında, bazalt lifi takviyeli kompozitlerin, cam lifi takviyelilerden daha yüksek E modülüne sahip olduğu tespit

edilmiştir. Eşit lif hacminde (örneğin %5 hacim oranında) BF02 takviyeli numuneler, BF01 takviyelilerden %24,8, GF01 takviyelilerden %8,6, GF02 takviyelilerden de %100,4 daha yüksek çekme modülüne sahip olduğu görülmüştür. BF01 takviyeli numunelerin elastikiyet modülü, GF01 takviyelilerden %13 daha az iken, GF02 takviyelilerden %60,5 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. GF01 takviyeli numunelerin elastik modülü, GF02 takviyeli numunelerden %84,5 daha yüksek olarak bulunmuştur. GF02 takviyeli kompozit numunelerde lif sıyrılması diğer numunelere oranla daha fazla görülmüştür. Bunun sebebi, GF02'li numunelerin çok yoğun lif içermesi ve bu yüzden reçinenin lifleri tam olarak ıslatamayıp iyi ara yüzey oluşturamamış olmasına bağlanabilir. Takviye çeşidine göre eşit lif hacmine sahip (örneğin %5 hacim oranında) kompozit numunelerin eğilme dayanımı karşılaştırıldığında, BF02 takviyeli numunelerin eğilme dayanımı (886,69 MPa), BF01 takviyeli numunelerden (758,45 MPa) %16,9, GF01 takviyeli numunelerden (545,56 MPa) %62,5 ve GF02 takviyeli numunelerden (403,71 MPa) %119,6 yüksek olduğu belirlenmiştir. Cam lifli numuneler kendi aralarında kıyaslanacak olursa; GF01 takviyeli kompozit numunelerin eğilme dayanımı, GF02 takviyeli numunelerden %35,1 daha yüksek olarak bulunmuştur. BF01 takviyeli numuneler, GF01 takviyelilerden %39 ve GF02 takviyeli numunelerden %26 daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Aynı lif hacim oranında (örneğin %5 hacim oranında) kompozit numunelerin darbe dayanımı karşılaştırıldığında, BF01 ve BF02 takviyeli kompozit numunelerden birbirlerine yakın sonuçlar alınmakla birlikte, BF01'de, görece kısmen daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. BF01 takviyeli numunelerin darbe dayanımı 44,64 kJ/m², BF02 takviyeli numunelerin darbe dayanımı 35,58 kJ/m², GF01 takviyeli numunelerin darbe dayanımı 51,53 kJ/m² ve GF02 takviyeli numunelerin darbe dayanımı 55,37 kJ/m² olarak bulunmuştur [82].

Sakin, cam lifli takviyeli polyester kompozit malzemenin eğilme ve yorulma davranışını araştırmak için, 800 g/m², 500 g/m², 300 g/m² ve 200 g/m² olan cam lifli dokuma ve 225 g/m², 450 g/m² ve 600 g/m² olan rasgele dağıtılmış cam lifli keçe numuneleri kullanılmıştır. Reçine içerisine %0,2 kobalt katalizör ve %0,7 MEKP eklenmiştir. Numuneler RTM (Reçine Transfer Kalıplama) yöntemi ile üretilmiş ve 0/90±45° yönünde kesilmiştir. Numune kombinasyonlarının sonucu olarak, 9 farklı yapı elde edilmiştir. Ayrıca, yeni bir kalıp, RTM yöntemi için özel olarak tasarlanmıştır. Bu yeni kalıp sistemi, liflerin tam olarak infiltrasyon (ıslatılma) elde edilmesi amacıyla uygulanmıştır. İlk olarak, kompozit numunelere, üç noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Daha sonra yorulma

testi yapılmıştır. Test sonuçlarına göre, en yüksek yorulma ömrü, 85,139 MPa olarak, 0/90 (grup E), 800 g/m² 'lik cam lifi dokuma numunelerinden elde edilmiştir. Ancak, 800 g/m² 'lik cam lifi dokuma numunelerinin, daha yüksek anizotropik özelliklerinden dolayı, tasarımda kullanılmaları riskli olacağından, 500 g/m² 'lik cam lifi numunelerinin kullanılmasının daha uygun olduğu düşünülmüştür. En yüksek eğilme dayanımı ise, 375,199 MPa olarak, 0/90 (grup F), 225 g/m² 'lik cam lifi dokuma numunelerinden elde edilmiştir. GFRP (Cam Lif Takviyeli Plastik) malzemenin anizotropi özelliğinin, yorulma dayanımı üzerinde baskın olduğu, deneylerden açıkça görülmüştür. Test sonuçlarında etkili olan parametreler, alan üzerindeki lif dağılımının yoğunluğu, lif açısı, dokuma lif reçine geçirgenliği, liflerin tam sızması (ıslatma) veya sızmaması parametreleridir [119].

Varga ve ark., CTP kompozitleri üzerine yaptıkları çalışmada, "Polyalkenyl-poly-maleic-anhydride-ester/amide" tipi yeni deneysel katkı maddeleri geliştirmişler ve cam lifi takviyeli polyester kompozitlerin özelliklerini iyileştirmek için, bu katkı maddelerini kullanmışlardır. Çalışmada, iki farklı ticari takviye malzemesi incelenmiştir. Bu takviyeler, kırılmış cam lifi keçe ve dokunmuş cam kumaş (0/90⁰) malzemeleridir. Kimyasal yapılarına bağlı olarak, her ikisi de E-camı tipidir. Takviye yüzeyleri, çözünmüş halde, "polyalkenyl-poly-maleic-anhydride-ester", "polyalkenylpoly-maleic-anhydride-amide" ve "polyalkenyl-poly-maleic-anhydride-ester-amide" tipi deneysel bağlayıcı katkı maddeleri ile işlenmiş ve sonra lif takviyeli termosetlerde kullanılmıştır. Bağlayıcı katkı maddeleri, sadece kimyasal yapısı ve fiziksel özellikleri açısından değil, aynı zamanda, bu katkılardan etkilenebilen lif-matris etkileşimi içerisinde farklılıklara sahiptir. Takviyeli numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde farklı sayılarda katkıların kullanılmasının sebebi budur. En uygun etkiler, cam lif yüzeyinin "polyalkenyl-poly-maleic-anhydride-ester-amide" türü katkı maddeleri ile değiştirildiği durumda bulunmuştur. Ayrıca sonuçlar, cam dokuma kumaş kompozitlere göre, kırılmış cam lif keçe kompozitlerin daha olumlu etkileri olduğunu göstermiştir. Bu laminatlarda, çekme özellikleri, %38,9 katkı ile ve eğilme özellikleri, %21,9 katkı ile geliştirilebilmiştir. Cam dokuma kumaş takviyeli kompozitlerin çekme ve eğilme özellikleri, aynı takviyeli işlem görmemiş cam lifleri içeren polyester kompozitler ile karşılaştırıldığında, %18,0 ve %40'ı oranında gelişme kaydedilebilmiştir. "Polyalkenyl-poly-maleic-anhydride-ester" türü yüzey değiştirme katkısı, laminatların çekme ve eğilme özelliklerinin durumunu kötüleştirmiş fakat dinamik özellikler işlem görmemiş cam lifli numunelerinkinden daha elverişli olmuştur. Mekanik özelliklerin artmasından

ya da azalmasından sorumlu olan lif-matris etkileşimini belirlemek için, kompozitlerin kırılmış yüzeylerinin SEM mikro yapıları üzerinde çalışma yapılmıştır. Olumsuz sonuçlara, polyester matristen, lifin dışarı doğru kaymasının sebep olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, "polyalkenylpoly-maleic-anhydride-ester-amide" katkısının, lifler ve matris arasında, yapışmayı geliştirmede başarılı olduğu görsel gözlemle desteklenmiştir [120].

Raja, uçucu kül emdirilmiş, kırılmış E-cam lifi keçe takviyeli UP reçineli kompozitin (GFRP) mekanik davranışını belirlemek için ilk olarak, GFRP mekanik özellikleri analizlerinden, lif ve reçine oranlarını optimize etmişlerdir. Çalışmada kullanılan lif takviyeli polimer kompozit numuneleri, el yatırması tekniğiyle, 140x240x5mm ölçülerinde kalıp kullanılarak, dolgulu ve dolgusuz malzemeler ile üretilmiştir. Bir oksitleyici olarak etkiyen gerekli CoNp miktarı, polyester reçineye eklenmiştir. Başlatıcı olarak, MEKP kullanılmıştır. Kompozit numunelerin en uygun lif ve reçine oranlarının belirlenmesi için, çeşitli ağırlık yüzdelerinde reçine ve lif malzemeleri ile (%65 reçine / %35 lif; %70 reçine / %30 lif; %75 reçin / %25 lif; %80 reçine / %20 lif; %85 reçine / %15 lif) çalışılmıştır. Mekanik deneyler için, kompozit numunelere, 50 mm/dk'lık bir yükleme hızıyla yük uygulanmıştır. Dolgu malzemesiz GFRP içinde, %70 reçine ve %30 E-camı oranının en iyi sonuçları (en yüksek çekme dayanımı 86 MPa, en yüksek basınç dayanımı 45 MPa, eğilme dayanımı 124 MPa, darbe enerjisi 6 J) verdiği gözlemlenmiştir. Uçucu kül emdirilmiş lif takviyeli polimer kompozitleri, dolgusuz en uygun %70 reçine oranıyla hazırlanan kompozit ile karşılaştırmak için, %70 sabit orandaki reçine içerisine, %5-%25 oranlarında değişen miktarda uçucu kül ve %5-%25 oranlarında değişen miktarlarda E-cam lifi ilave edilmiştir. Özellikle %10 oranında uçucu kül dolguları (%70 reçine + %20 lif), iyi adezyon kuvvet nedeniyle daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu karışımdaki mekanik deney sonuçları (en yüksek çekme dayanımı 90 MPa, en yüksek basınç dayanımı 59 MPa, eğilme dayanımı 136 MPa darbe enerjisi yaklaşık 8 J) olarak belirlenmiştir [121].

Wong, ve ark., çalışmalarında, E-camı, Hindistan cevizi lifi, palmiye yağı lifi ile birlikte, E-camı / Hindistan cevizi lifi ve E-camı / palmiye yağı lifi hibrit polyester kompozitlerinin darbe dayanımları üzerine bir araştırma yapmışlardır. Tüm kompozit türleri, %30, %40 ve %50 lif hacim oranlarında ve lif uzunlukları 3, 7 ve 10 mm olacak şekilde güçlendirilmiştir. Numuneleri üretmek için, el yatırması tekniği uygulanmıştır. UP, hacimce %1,5 oranında MEKP ile karıştırılmıştır. Karışım, daha sonra kısa liflerle

takviye edilmiş ve hafifçe karıştırılmıştır. Hibrit kompozitler için hem Hindistan cevizi lifi hem de palmiye yağı lifinin, cam liflere oranları, 1:1 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Polimer beton numuneleri için, kum parçacıkları, kısa Hindistan cevizi lifine (%40, %50 ve %60 hacim oranlarında ve lif uzunlukları, 3, 7 ve 10 mm) eklenmiş ve reçine ise, %30 hacim oranında sabit tutulacak şekilde çalışma gerçekleştirilmiştir. Ardından, karışım, 381x12,7x12,7 mm³ ebatlarındaki kalıp içerisine dökülmüştür. Keçeler, istenilen biçime göre 508x76,2x25,4 mm³ ebatlarında farklı bir kalıp içerisinde düzenlenmişlerdir. Lamine kompozitler için ise, boyuna ve enine Hindistan cevizi lifli keçelerle güçlendirilen kompozit laminatlar çalışılmıştır. Lif keçelerin sayısı, boşluksuz lif keçeler için, 1, 2, 3 ve 4 tabakadan ve 1,5 mm boşluklu lif keçeler için, 2, 3 ve 4 tabakadan olmak üzere değişecek şekilde üretilmişlerdir. Daha sonra, polyester karışımı, yavaşça kalıbın üzerine dökülmüştür. Tüm numuneler 24 saat oda sıcaklığında kür edilmişlerdir. Lif güçlendirmesi, genel olarak polyesterin darbe dayanımını arttırmıştır. Darbe dayanımı; lif hacim oranı ve lif uzunluğuyla geliştirilmiştir. Boyuna lifli keçeler, enine lifli keçelerden daha fazla darbe enerjisi yutmuş ve sıkı lif keçeler, boşluklu lif keçelerden daha fazla darbe tokluğuna sahip olmuştur. Yüksek miktarda kum parçacıkları, darbe dayanımını kötüleştirmiş fakat, daha düşük lif içeriğinde ve lif uzunluğunda enerji yutma kapasitesi gelişmiştir [122].

Kaundal ve ark., çalışmalarında, fiziksel, mekanik ve termomekaniksel özellikleri değerlendirmek için, kısa lif takviyeli polyester bazlı kompozitleri, üç farklı ağırlık yüzdesindeki (%0, %10 ve %20) Al₂O₃ parçacıkları ile birleştirerek üretmişlerdir. Güçlendirme olarak, 6mm uzunluğunda kısa E-cam lifi (E-modülü:72,5 GPa ve yoğunluk: 2,59 gm/cm³) ve Al₂O₃ (80 µm) parçacıkları kullanılmıştır. Matris olarak, doymamış izoftalik polyester reçinesi (E-modülü:3,25 GPa ve yoğunluk:1,35 gm/cm³) kullanılmıştır. Kompozitler; polyester reçine içerisinde, %50 oranında cam lifi ve üç farklı ağırlık yüzdesindeki (%0, %10 ve %20) Al₂O₃ parçacıkları ile güçlendirilerek üretilmişler ve karışımlar, ihtiyaca uygun çeşitli kalıplara dökülmüşlerdir. Kalıpların ebatları, 200x200x15 mm'dir. Sıkışmış hava boşlukları bir rulo ile dikkatlice çıkarılmış ve kalıpların üzeri, 10 kg/cm²'lik sabit bir basınç altında, 24 saat süreyle, 30 °C'lik bir sıcaklıkta kür edilmek üzere kapatılmıştır. Çekme testi, ASTM 3039-76 standardına göre, düz, dikdörtgen şeklindeki kompozitler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımı testi, 70 mm mesnet aralığında ve 10 mm/dk yükleme hızı ile gerçekleştirilmiştir. Kompozit numunelerin darbe dayanımlarını hesaplamak için düşük hızlı plastik darbe

testleri yapılmıştır. Darbe testleri için 2mm'lik çentik derinliğinde ve 60x10x4mm³'lük standart test numuneleri kullanılmıştır. Kısa lif takviyeli polyester kompozitlerinin mekanik özellikleri üzerinde, alümina içeriğinin etkisi değerlendirildiğinde, Al₂O₃ dolgu içeriğinin arttırılmasıyla, kompozitlerin çekme ve eğilme dayanımlarının azaldığı görülmüştür. Dolgusuz kompozitin çekme dayanımı ortalama ~25 MPa iken, %10 Al₂O₃ dolgulu karışımların çekme dayanımı azalma eğilimi göstererek, ortalama ~17 MPa değerine inmiş ve %20 Al₂O₃ dolgulu karışımların çekme dayanımı, ortalama ~14 MPa değerine düşmüştür. Ayrıca, %10 Al₂O₃ dolgu oranında çekme E-modülü değeri artış göstererek ortalama ~1,4 GPa değeri ile en yüksek değerine ulaştıktan sonra azalma eğilimi göstermiştir. Dolgusuz kompozitin eğilme dayanımı, ortalama ~48 MPa iken, %10 Al₂O₃ dolgulu karışımların eğilme dayanımı azalma eğilimi göstererek, ortalama ~38 MPa değerine inmiş ve %20 Al₂O₃ dolgulu karışımların eğilme dayanımı ortalama ~16 MPa değerine düşmüştür. Ayrıca, %10 Al₂O₃ dolgu oranında eğilme E-modülü değeri artış göstererek ortalama ~3,75 GPa değeri ile en yüksek değerine ulaştıktan sonra azalma eğilimi göstermiştir. Dolgu oranının arttırılmasıyla, darbe enerjisi de artış eğilimi göstermiştir. Dolgusuz kompozitin darbe enerjisi, ortalama ~2,25 J iken, Al₂O₃ dolgu oranının arttırılmasıyla, darbe enerjisi de artış göstermiş ve %20 dolgu oranında ortalama ~5,5 J darbe enerjisi ile en yüksek değerine ulaşmıştır. Çekme ve eğilme dayanımındaki azalma, dolgu parçacıklarının kümelenmesinden ya da sadece, kompozitlerin içerisindeki var olan boşluklar ve çok yakın kümelenmeler arasındaki fiziksel temas sonucu meydana gelmiş olabileceği şeklinde yorumlanmıştır. Oysa, kompozitlerin, çekme modülü, eğilme modülü, ve darbe dayanımları göz önünde bulundurulduğunda, Al₂O₃ içeriğinin artışıyla, bu değerler de artış göstermiştir [123].

Singh ve ark., çalışmalarında, farklı hacim oranlarında cam lifli, kırpılmış demet cam lifi takviyeli, parçacık dolgulu polimer kompozitlerinin çekme dayanımlarını araştırmıştır. Basınçlı kalıplama yöntemiyle, UP reçinesi içerisine, ortalama uzunluğu 3mm olan kısa E-cam lifleri takviye edilmiştir. Lifler, reçine ile karıştırılmadan önce, 1 saat süreyle 80 °C'de etüvde kurutulmuş ve bir desikatör içerisinde saklanmıştır. Lifler, bir karıştırıcı yardımıyla reçine ile karıştırılmış ve devamında, kompozit içerisinde sıkışmış hava çıkarılmıştır. Reçine ağırlığının %1'i oranında kobalt oktoat ve %1'i oranında MEKP, viskozitenin, liflerin daha fazla çökelmediği bir noktaya artışına kadar, 10-15 dk süreyle reçine içerisinde karıştırılmıştır. Karışım, daha sonra kalıba dökülmüş ve oda sıcaklığında kür edilmiştir. Cam lifi içeriği, toplam matris içerisinde, ağırlıkça, %1'den %10'a kadar

değişmiştir. Tamamlanmış levhalar, istenilen ebatlarda ve şekillerde kesilmişlerdir. Çekme testi, ASTM D 638'e göre gerçekleştirilmiştir. Yükleme hızı, 2mm/dk olarak yapılmıştır. Dolgusuz polyester levhalarda, 1111,5 MPa olan çekme E-modülü değeri, kısa cam lifi içeriği %10'a ulaştığında, %77,5 artışla, 1973 MPa'a ulaşmıştır [124].

Marcovich ve ark., çalışmalarında, takviye olarak kısa lifler ve dolgu olarak odun unu kullanarak, UP (izoftalik bazlı) kompozitleri üretmişler ve bu kompozitlerin eğilme ve basınç dayanımlarını incelemişlerdir. Ayrıca, hibrit odun unu dolgulu sisal kompozitleri hazırlanmış ve bu kompozitin mekanik özellikleri, tek dolgulu kompozitlerin mekanik özellikleriyle karşılaştırılmıştır. UP reçinesi, başlatıcı olarak, toplam reaksiyon karışımının %1,5'i oranında benzoil peroksit ile karıştırılmıştır. Parçacık dolgusu olarak, odun unu (147 µm çapında) kullanılmıştır. Lif olarak ise, 10mm uzunluğunda kesilmiş sisal lifleri (S1) kullanılmıştır. Odun unu ve S1 sisal liflerinin yüzeyleri, maleik anhidrit (MAN) ile işlenmiştir. Tüm dolgular ve lifler, UP reçinesi ile, bir mikser yardımıyla karıştırılmıştır. Tüm numuneler, %40 dolgu ya da %40 lif oranında hazırlanmıştır. Hibrit kompozitler ise, %20 odun unu + %20 sisal lifleri (S1) oranında olmak üzere, toplamda %40 olacak şekilde kullanılmışlardır. Karışımlar, daha sonra, metal bir kalıp (145 mm çapında, 3 mm kalınlığında) içerisinde kür edilmiştir. Kür döngüsü, 50 °C (açık kalıp)'de 2 saat ve takiben, 80 °C (kapalı kalıpta)'de ve 3,8 MPa basınç altında 1,5 saat olarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler, 2 saat süreyle, basınç olmaksızın 150 °C'de post kür edilmişlerdir. Tüm test numuneleri, plaklardan kesilmiş ve vakum altında, 70 °C'de 24 saat kurutulmuşlardır. Hazırlanan numuneler üzerinde, yükleme hızı 1mm/dk. olacak şekilde üç nokta eğilme testi (ASTM 790-86, yöntem A, açıklık 50 mm) gerçekleştirilmiştir. Numune çubuklar; 70x12x3 mm ebatlarında kesilmişlerdir. Basınç testleri ise, ASTM 695-85 standardına göre, 0,5 mm/dk. yükleme hızında gerçekleştirilmiştir. 3mm ebatlarında kare çubuklar, kalıptan çıkan plaklardan kesilmişlerdir. Mekanik sonuçlar incelendiğinde, UP reçinesinin eğilme dayanımı, 85,5 MPa ve E-modülü, 3,7 GPa iken, odun unu dolgulu kompozitin eğilme dayanımı, 61,7 MPa ve E-modülü, 5,2 GPa, odun unu/S1 kompozitinin eğilme dayanımı, 70,3 MPa ve E-modülü, 5,8 GPa, S1 lif takviyeli kompozitin eğilme dayanımı, 60,6 MPa ve E-modülü, 5,2 MPa olarak elde edilmiştir. Basınç dayanımları incelendiğinde ise, UP reçinesinin basınç dayanımı, 156,6 MPa ve E-modülü, 3,03 GPa iken, odun unu/S1 dolgulu kompozitin basınç dayanımı, 142,8 MPa ve E-modülü, 3,45 GPa, S1 lif takviyeli kompozitin basınç dayanımı, 107,5 MPa ve E-modülü, 3,03 GPa olarak elde edilmiştir.

Sonuç olarak, hem basınç dayanımları hem de eğilme dayanımları incelendiğinde, dolgu ve lif katkılarının eklenmesiyle dayanımların düştüğü, E-modülü değerlerinin ise artış gösterdiği görülmüştür [125].

Gull ve ark., yaptıkları çalışmada, değişen yoğunluklarda çinko oksit (ZnO) dolgulu cam lifi takviyeli polyester (GFRP) kompozitlerin üretimini ve bu kompozitlerin mekanik ve termal davranışlarının araştırılmasını amaçlamışlardır. Çalışmada, UP reçinesi olarak (%42 stiren içeriğine ve %3 ile silika dumanı, yoğunluğu: 1,11-1,23 g/cm³), başlatıcı olarak, %1 oranında MEKP ve hızlandırıcı olarak, %0,5 oranında CoNp ve takviye elemanı olarak da, E-camı fitil lif keçe kullanılmıştır. Bu çalışmada, kontrol numunesi olarak, öncelikle reçine ve lif oranları %50 olacak şekilde sabit oranda kullanılmış ve bu karışımlar içerisine, %1-%5 oranında ZnO yüksek hızlı dağıtıcı kullanılarak polyester içinde dağıtılmış ve laminatlar sıcak basınçlı kalıplama yoluyla el yatırması tekniği ile imal edilmişlerdir. Reçine karışımı hazırlandıktan sonra çalışma masasında alüminyum folyo üzerine ayrı olarak dört tabakalı 178x178x20 mm ebatlarında çapraz katlanmış dokunmuş fitil cam lifli keçe yerleştirilmiş ve ZnO dolgulu polyester reçine, bu tabakaların üzerine uniform olarak dökülmüştür. Son olarak bu tabakalar birbirlerinin üzerine yığılmış ve alüminyum folyo içerisine sarılmıştır. Eğilme dayanımı analizi ve çarpma dayanımı ile mekanik özellikler belirlenmiştir. 127x14,5x2,5 mm ebatlarında eğilme numuneleri üzerinde, 1 mm/dk yükleme hızıyla yükleme yapılmıştır. Darbe testi numuneleri, 63,5 x 12,7 x 2,5 mm ebatlarında çentikli olarak hazırlanmıştır. Dolgusuz GFRP kompozitin eğilme dayanımı değeri, 25 MPa iken, %3 ZnO dolgu oranında GFRP kompozitin eğilme dayanımı, dolgusuz kompozite göre önemli ölçüde (%62,12 kadar) gelişmiş ve en yüksek eğilme dayanımına (72 MPa) ve eğilme modülü (10,175 GPa) değerine ulaştıktan sonra azalma eğilimi göstermiştir. Dolgu oranı arttıkça, izot darbe dayanımı değeri de artış göstermiş ve %5 dolgu oranında en yüksek değere (0,54 J/m) ulaşmıştır [126].

Türkmen ve Köksal, yaptıkları çalışmada; farklı cam lif katman sayısına sahip, el yatırması üretim yöntemiyle üretilmiş polyester reçineli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. E sınıfı kırılmış cam lif keçe (450 g/m²) kompozit malzemeden üretilmiş levhalar; el yatırması yöntemiyle, 500x500x2 mm, 500x500x2,5 mm ve 500x500x3,5 mm boyutlarında olmak üzere üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin çekme ve üç nokta eğilme testleri yapılarak ortalama mukavemet değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, düşük hızlı darbe testi yapılarak malzemelerin darbe dayanımları

incelenmiştir. Çalışmada kullanılan polyester reçinenin çekme dayanımı, 61 MPa, eğilme dayanımı ise, 119 MPa olarak belirlenmiştir. CTP kompozitlerin mekanik özellikleri incelendiğinde, lif katman sayısına bağlı kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin (çekme ve eğilme dayanımı) iyileştiği görülmüştür. Tek tabakalı numunenin çekme dayanımı, 63,19, iki tabakalının, 68,67 ve üç tabakalının ise, 74,10 MPa olarak belirlenmiştir. Tek tabakalı numunenin eğilme dayanımı, 65,25 MPa, iki tabakalının 142,08 ve üç tabakalının ise 384,98 MPa olarak belirlenmiştir. Darbe testi sonuçlarına bakıldığında, lif katman sayısı artışı ile malzemelerin absorbe ettiği enerji değerleri (hasar enerjisi) yaklaşık lineer bir artış göstermiştir [3].

Huang Gu, cam lif takviyeli polimer kompozitler üzerinde, deniz suyunun etkisini incelemek için yaptığı çalışmada, vakum yardımcı reçine infüzyon (VARİ) tekniği kullanarak cam lif takviyeli (E-cam dokuma) UP laminatlar üretmiştir. Laminatlar iki ve dört tabakalı olarak üretilmiştir. Eğilme dayanımı numuneleri, 180x20 mm, çekme dayanımı numuneleri, 180x20x(0,3-0,7) mm ebatlarındadır. Yükleme hızı, 2 mm/dk'dır. Laminatlar, çeşitli süreler için yapay deniz suyu içine daldırılmıştır. Deniz suyunun tuzluluk oranı, %3,4-%3,5'dir. İşlem süreleri ayrı olarak sırasıyla, 10, 30, 60, 90 ve 120 gündür. Deniz suyunda bekletilmenin iki önemli sonucu olmuştur. Bunlar, su emilimi ve çözünebilir malzeme çıkarılmasıdır. Başlangıçta su emilimi hâkimken, daha sonraki kısımda ise çözünebilir malzeme çıkarımı büyük bir rol oynamıştır. Uzun süreli deniz suyu daldırma süresi ile kademeli olarak azalan eğilme ve çekme dayanımı, malzemenin bazı fiziksel hasar ve/veya geri dönüşü olmayan kimyasal bozulmaya uğradığını göstermektedir. Nem; matris ve lif grupları ile reaksiyona girerek, matrisin kabarmasına ve kırılmasına sebep olmuştur. Tüm bu koşullar, malzemenin bozulmasına sebep olmuştur. İki tabakalı numunelerin çekme dayanımları, 0, 10, 30, 60, 90 ve 120 günlük işlem süreleri sonucunda sırasıyla, yaklaşık olarak 650, 610, 610, 640, 590 ve 580 N olarak belirlenmiş, dört tabakalı numunelerde ise sırasıyla, 1500, 1300, 1250, 1190, 1150 ve 1100 N olarak belirlenmiştir. Eğilme dayanımlarında ise, daldırma süresinin uzatılmasıyla, eğilme direncinde azalma eğilimi görülmüştür. Her bir durum için eğilme dayanımında önemli bir azalma olup olmadığını görmek için istatistiksel hesaplamalar yapılmıştır. 10 ve 30 günlük deniz suyuna batırma işleminden sonra, eğilme dayanımının sırasıyla, 2 ve 4 katlı numuneler için önemlilik göstermeye başladığı belirtilmiştir [127].

Amuthakkannan ve ark., yapmış oldukları çalışmada, kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde, lif uzunluğunun ve bazalt lif içeriğinin etkisini araştırmışlardır. Numuneler,

takviye malzemeleri olarak kısa bazalt lifleri, matris olarak ise UP reçinesinin kullanılmasıyla hazırlanmıştır. Polyester reçine, başlatıcı olarak hacimce %1 oranında MEKP ile ve hızlandırıcı olarak hacimce %1 oranında CoNp ile kür edilmiştir. Çalışmada, 4 mm, 10 mm, 21 mm ve 50 mm farklı uzunluklu bazalt lifleri kullanılmıştır. Lifler, kompozit içerisine %10'dan %90'a kadar kademeli olarak arttırılarak eklenmiştir. Bazalt lifli polimer kompozit üretimi için basınçlı kalıplama yöntemi kullanılmıştır. Numuneler, yaklaşık 24 saat oda sıcaklığında kür edilmiştir. Üretilen kompozit numuneler üzerinde çekme, eğilme ve darbe testleri yapılmıştır. Kompozitlerin karakterizasyonu incelendiğinde, lif uzunluğunun ve ayrıca lif miktarının kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Lif oranlarının arttırılmasıyla 50 mm lif uzunluklu kompozitlerin çekme dayanımı değerleri, diğer lif oranlarındaki kompozitlere göre daha yüksek değerler almış ve bu kompozitlerin en yüksek çekme dayanımı (~134 MPa), %68 lif yüzdesinde elde edilmiştir. Ancak, tüm kompozitler içerisinde, en yüksek çekme dayanımı ve çekme E-modülü değeri sırasıyla ~135 MPa ve 0,75 GPa olarak, %68'lik lif yüzdesine sahip ve 10 mm lif uzunluklu bazalt lifli kompozitlerde elde edilmiştir. Eğilme dayanımları açısından değerlendirme yapıldığında ise, en yüksek eğilme dayanımı (~138 MPa), % 68 lif yüzdeli ve 21 mm lif uzunluğundaki kompozitlerde elde edilirken, en yüksek eğilme E modülü (~7300 MPa) ise %68 lif yüzdesine sahip ve 10mm lif uzunluklu kompozitlerde elde edilmiştir. Darbe testi sonucunda, tüm lif yüzdeleri içerisinde, 50 mm uzunluklu bazalt lif takviyeli kompozitler içerisine artan oranlarda lif ilave edilmesiyle kompozitlerin darbe dayanımı 45 J/cm^2 'den 55 J/cm^2 (%68 lif oranında)'ye kadar lineer olarak artış göstererek diğer lif oranlarına göre daha yüksek darbe enerjisi emilimi göstermiş ancak, en yüksek darbe enerjisi emilimi %68 lif yüzdeli 10mm uzunluklu kompozitlerde $\sim 56 \text{ J/cm}^2$ olarak elde edilmiştir [128].

Manikandan ve ark., yaptıkları çalışmada, oda sıcaklığında el yatırması tekniği kullanarak UP matris içine bazalt dokuma takviye ederek, UP bazlı polimer kompozitler geliştirmişlerdir. Çalışma; dokumaların, hem asit ve alkali ile hem de asit ve alkali olmadan işlem görmüş bazalt lif takviyeli UP kompozitleri incelemektedir. Araştırmanın amacı; çekme, kesme ve darbe dayanımları üzerinde yüzey modifikasyonlarının (NaOH ve H_2SO_4) etkisini araştırmaktır. Çalışmada, 220 g/m^2 yoğunluklu bazalt lifi ve E-cam lifi kullanılmıştır. UP reçinesi, hacimce %1 başlatıcı MEKP ve %1 hızlandırıcı CoNp ile karıştırılarak kür edilmiştir. Lifler, iki çözelti içerisinde (1 N NaOH ve 1 N H_2SO_4), ayrı

ayrı ıslatılarak işlem görmüş ve 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir. Sonra lifler saf su ile yıkanmış ve 24 saat süreyle oda sıcaklığında kurulanmıştır. Dört tabaka bazalt lif keçe, 35x35 cm ebatlarında kesilmiş ve UP reçinesinin 1:1 oranının denkliğini belirlemek için ağırlığı tartılmıştır. Daha sonra reçine karışımı, rulo kullanılarak, el yatırması tekniğiyle, dört tabakalı bazalt lifleri üretmek için kullanılmıştır. Numuneler, 24 saat oda sıcaklığında kür edilmişlerdir. Benzer yöntem, asitle işlem görmüş bazalt, bazla işlem görmüş bazalt, işlem görmemiş cam, asitle işlem görmüş cam ve bazla işlem görmüş cam lif takviyeli polimer kompozitleri hazırlamak için kullanılmıştır. Araştırmanın sonucu, bazalt lif takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin, cam lif takviyeli kompozitlerden üstün olduğunu göstermiştir. Çekme testlerinde, asitle işlem görmüş bazalt lif takviyeli kompozitlerin çekme dayanımlarının, diğer kompozitlerin çekme dayanımlarından daha yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Cam lif takviyeli kompozitlerin, asit işleminden, bazalt lif takviyeli kompozitlere göre daha fazla etkilendiği görülmüştür. Darbe testlerinde, asitle işlem görmüş bazalt lif takviyeli kompozitlerin daha yüksek darbe dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Tüm çalışmalar göstermiştir ki, bazalt lifli kompozit güçlendirmesi, yükleme koşullarına bağlı olarak cam lif takviyeli kompozitlere göre daha üstün özellikte olan yeni bir malzeme meydana getirmiştir [129].

Mısıtık ve Merdan, çalışmalarında, 200 g/m² bazalt ve cam dokuma kumaş ve findıkkabuklarının takviye malzemesi olarak kullanılmasıyla el yatırması tekniğiyle, dört kat olarak polimer matrisli kompozitler üretmişlerdir. Dokuma kumaşlar, çoklu iplik (multi filament) ve 200 tex cam ve bazalt iplikler kullanılarak bezayağı örgüsünde dokunmuştur. Matris olarak, termoset polyester reçine kullanılmıştır. Ağırlıkça %5 oranında kullanılan findıkkabukları ise kumaşların arasına yerleştirilmiştir. Ayrıca, 3 farklı boyutta findıkkabuğu kullanılmıştır. Fındık kabukları, en küçük boyutu 1. kademe olacak şekilde, 1., 2. ve 3. kademe şeklinde adlandırılmıştır. Eğilme dayanımı test numunelerinin boyutları, 120x25mm'dir. Dokuma bazalt-cam ve findıkkabuğu takviyeli polimer kompozit malzemelerin, 0⁰ ve 90⁰ yönündeki eğilme dayanımları belirlenmiştir. Bazalt dokuma kumaş takviyeli kompozitler, cam dokuma kumaş takviyeli kompozitlere göre her üç kademe, öğütülmüş findıkkabuklarının kullanıldığı kompozitlerde daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. 2. kademe findıkkabuklarının kullanıldığı kompozitlerin eğilme dayanımı değerleri, diğer kompozitlere göre daha yüksek (90⁰ yönündeki cam dokuma 38,9 MPa, bazalt dokuma 40,7 MPa; 0⁰ yönünde ise cam dokuma 40,5 MPa, bazalt dokuma 42,5 MPa) olarak belirlenmiştir [130].

Fu ve Lauke, kısa lif takviyeli polimerlerin (SFRP) çekme dayanımını tahmin etmek için analitik bir yöntem kullanarak, SFRP kompozitlerin çekme dayanımı üzerinde, lif uzunluğu ve lif yönlenme dağılımlarının etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, SFRP dayanımının, ortalama lif uzunluğunun artması ile hızlı bir şekilde arttığını göstermiştir. Liflerin çekme dayanımı eğiliminin, kompozitlerin dayanımı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir [131].

Yazıcı ve Ülkü, iki boyutlu rasgele dağılılı kısa cam lifi takviyeli polyester matrisli kompozit plaklarda çekme hızının kompozit mukavemeti üzerine etkilerini araştırmıştır. Takviye malzemesi olarak, $50 \pm 0,2$ mm uzunluğunda cam liflerin düzlemsel rastgele dağılımından oluşan cam keçe ve matris malzemesi olarak UP reçinesi kullanılmıştır. Malzemeler cam kalıpların içerisinde el yatırma yöntemiyle üretilmiş ve oda sıcaklığında polimerizasyonun tamamlanması beklenmiştir. Çalışma kapsamında, 1, 2 ve 3 tabakalı kompozitler üretilmiştir. Cam lifi her bir malzeme gurubunda hacimsel olarak %5 oranında sabit tutulmuştur. Çekme testleri, 5, 50 ve 250 mm/dk sabit çekme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen test sonuçlarına göre, çekme hızı arttıkça kompozit mukavemetinde düşme görülmüştür. Tek tabakadan oluşan kompozit yapıda, çekme hızı 5, 50 ve 250 mm/dak. olarak uygulandığında, kopma gerilme değerleri sırasıyla, $51,11 \pm 9,19$ MPa; $38,68 \pm 8,27$ MPa; $25,52 \pm 3,80$ MPa ve E modülleri sırasıyla, 2305 ± 269 MPa; 2514 ± 35 MPa; 939 ± 101 MPa olarak belirlenmiştir. İki tabakadan oluşan kompozit yapıda, çekme hızı 5, 50 ve 250 mm/dak. olarak uygulandığında, kopma gerilme değerleri sırasıyla, $53,80 \pm 13,37$ MPa; $55,79 \pm 8,270$ MPa; $66,73 \pm 12,80$ MPa ve E modülleri sırasıyla, 2336 ± 269 MPa; 2536 ± 178 MPa; 1986 ± 610 MPa olarak belirlenmiştir. Üç tabakadan oluşan kompozit yapıda, çekme hızı 5, 50 ve 250 mm/dak. olarak uygulandığında, kopma gerilme değerleri sırasıyla, $87,60 \pm 10,90$ MPa; $106,4 \pm 16,38$ MPa; $78,625 \pm 11,29$ MPa ve E modülleri sırasıyla, 2889 ± 286 MPa; 3076 ± 427 MPa; 3076 ± 427 MPa olarak belirlenmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, tek tabakalı kompozit yapı için yükleme hızının artımı ile kompozit mukavemetinde belirgin bir düşüş eğilimi gözlenmiştir. Tabaka sayısı arttıkça, çekme dayanımları da artış göstermiştir. İki ve üç tabakalı kompozitlerin çekme dayanımları, yükleme hızından çok fazla etkilenmemiştir. Bunun sebebi olarak, tek tabakalı yapıya göre iki ve üç tabakalı yapıların mukavemet açısından farklı tabakalar arası yüzey bölgesinin olmasına bağlanmıştır. Ara yüzeyde oluşan kayma gerilmeleri ile yükün bir tabakadan diğerine aktarılması

neticesinde, tabakalar arası bölgenin kompozit mukavemeti açısından belirleyici olduğu yönünde yorumlanmıştır [132].

Lee ve Jang, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranında lif içeriğine sahip cam lif keçe/PP kompozit malzemelerinin çekme, eğilme ve darbe dayanımlarını incelemişlerdir. Lif içeriği arttıkça, çekme ve eğilme modüllerinin başlangıçta lineer bir artış gösterdiğini ancak, cam lifinin optimum içeriğinden daha yüksek hacim değerine ulaşıldığında, boşluk içeriğinin daha da artması nedeniyle lifler verimli olarak takviye görevini yerine getirememiş ve bu nedenle dayanımlarda azalma meydana gelmiştir. Kompozitin çekme ve eğilme dayanımı, hacimce %15-20 cam lifi içeriğine kadar artmış ve cam lifi içeriğinin daha da artırılmasıyla dayanımlarda azalma görülmüştür. Bu davranış, cam lifi uçlarından gelen gerilme konsantrasyonu ve zayıf lif-matris yapışma mukavemetiyle uyarılmış lokalize çatlak oluşumu ile açıklanmıştır. Çekme dayanımı %20 cam lifi içeriğinde ~ 37 MPa değeri ile en yüksek değerine ulaştıktan sonra azalma eğilimi göstermiştir. Eğilme dayanımı, %15 cam lifi içeriğinde ~77 MPa değeri ile en yüksek değerine ulaştıktan sonra azalma eğilimi göstermiştir. Kompozitin toplam darbe emme enerjisi, hacimce % 20 cam lifi içeriğinde maksimum değeri göstermiş ve daha fazla lif içeriğinde azalma meydana gelmiştir. Bu olay, cam lifi içeriğine göre her bir darbe emme mekanizmasının değişmesinden kaynaklanmıştır [133].

Amuthakkannan ve ark., dokuma bazalt lifi ve cam lifi kullanarak farklı lif laminasyon dizilerinden basınçlı kalıplama yöntemiyle ürettikleri polyester matrisli hibrit lifli kompozitlerin mekanik (darbe, çekme ve eğilme) özelliklerini incelemişlerdir. Polimerizasyon için hacimce %1 oranında MEKP ve %1 oranında CoNp kullanmışlardır. Üretilen kompozitlerde, G, cam lifi olarak, B ise bazalt lifi olarak simgelenmiştir. Hibrit kompozitler, 4G/4G/4G; 4B/4B/4B; 4G/4B/4G; 4B/4G/4B; 4G/4G/4B; 4G/4B/4B; 2B/2G/2B/2G ve 2B/2G/2B şeklinde farklı laminasyon dizilerinde üretilmişlerdir. Sadece cam lifli kompozitin (4G/4G/4G) çarpma mukavemetini, sadece bazalt lifli kompozitin (4B/4B/4B) çarpma mukavemetinden %3,5 daha yüksek olarak belirlemişlerdir. Hibrit kompozitlerin kullanımıyla, tek başına kullanılan lifli kompozitlerden genel olarak daha yüksek darbe dayanımı elde edilmiştir. 2B/2G/2B hibrit kompozitlerin darbe direnci (~44 J/cm²) diğer kombinasyonlardaki hibrit kompozitlerden daha yüksek darbe direncine sahip olmuştur. Çekme testlerinde ise, tek başına kullanılan bazalt lifli kompozitlerin çekme dayanımı (262,4 MPa), diğer tüm kombinasyonlardaki hibrit kompozitlerden daha yüksek değere sahip olmuştur. Tek başına kullanılan cam lifli kompozitlerin çekme

dayanımı ise tüm kompozitler içerisinde en düşük çekme dayanımına (58,64 MPa) sahip olmuştur. Eğilme dayanımlarında ise, 4G/4B/4G ve 4G/4G/4B kombinasyonları en yüksek eğilme dayanımı değerini vermiştir [134].

İsa ve ark., UP kompozitin özellikleri üzerinde, lif türünün ve birleştirmelerinin etkisi üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Lif takviyeleri olarak, örgülü fitil E-cam lifi, düz örgülü keçeden oluşan Kevlar 79 lifi ve düz örgülü naylon lifi kullanılmıştır. 150 ml'lik genel amaçlı UP reçinesi bir plastik kap içinde ölçülerek hazırlandıktan sonra içerisine ağırlıkça % 5 Dioktil Fitalat (DOP) ilave edilerek 10 dakika karıştırılmış ve ardından ağırlıkça % 2 MEKP ilave edilerek 3 dakika karıştırılmış ve son olarak ağırlıkça % 2 kobalt hızlandırıcı eklenerek 2 dakika daha karıştırılmıştır. Tek parçalı ve hibrit kompozit numuneleri, el yatırması yöntemiyle basınç uygulanarak üretilmiş ve numuneler ASTM standardına göre test edilmişlerdir. Liflerin her biri dokuz katman olacak şekilde, düz kompozit (tek parçalı), cam lifi takviyeli polyester (GFRP), Kevlar kompozit (KFRP), naylon kompozit (NFRP), lokal olarak dokunmuş naylon kompozit (LNFRP) üretilmesi için kullanılmıştır. Benzer şekilde, asimetrik istif sırasına göre, Kevlar ve cam kompozit (KGFRP), cam ve naylon kompozit (GNFRP) ve cam ve lokal naylon kompozit (GLNFRP) hibrit numuneleri, 5 tabakasında cam kullanılarak ve diğer 4 tabakasında diğer lifler kullanılarak üretilmiştir. Ayrıca, lifli hibrit kompozitleri, 3 farklı lif katmanının asimetrik olarak istiflenmesiyle üretilmiştir. Modifiye edilmiş polyesterin çekme dayanımı $40 \pm 1,6$ MPa'dır. KGFRP Hibrit kompozitlerinin (4 tabaka kevlar lifi, 5 tabaka cam lifi) ve KGNFRP (3'er tabaka kevlar, cam ve naylon lifi), çekme dayanımlarında ve özgül çekme dayanımlarında, tek parçalı cam lifli kompozitlerden (GFRP; 9 tabakalı cam lifi) daha çok gelişme meydana gelmiştir. En yüksek çekme dayanımı, KFRP kompozitinde 370 ± 19 MPa olarak elde edilmiştir. Bu dayanım, GFRP kompozitinin çekme dayanımından %28 daha fazladır. NFRP ve LNFRP kompozitleri en düşük çekme dayanımına sahip olmuştur. KGFRP'nin çekme dayanımı, GFRP'nin çekme dayanımından, %19,4 daha fazla olmakla birlikte, KGFRP ve KGNFRP'nin elastikiyet modülü, GFRP'nin elastikiyet modülünden sırasıyla, %89,22 ve %55,82 daha fazla olmuştur[135].

Mishra ve ark., polyester matris içerisinde, cam lifi ve biofiber lifini hibrit olarak kullanmışlar ve cam lifinin, nispeten az miktarlarda eklenmesi ile hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin geliştiğini belirlemişlerdir [136].

Atıqah ve ark., %70 oranında sabit içeriğe sahip UP ile toplamı %30 olacak şekilde farklı hacim oranlarında, keçe formunda, kırılmış kenaf ve cam liflerini hibrit olarak birleştirerek güçlendirilmiş kompozitler üretmiştir. Kenaf lifleri, işlenmiş ve işlenmemiş olarak kullanılmıştır. Kenaf lifi, ağartma (merserizasyon) yöntemi kullanılarak 3 saat süreyle %6 sodyum hidroksit (NaOH) seyreltilmiş çözeltisi ile işlenmiştir. Cam lifi olarak, 15x15x0,15mm ebatlarında, kırılmış iplikten dokunmuş keçe şeklinde E-cam lifi (TGFM-450 tipi) kullanılmıştır. UP reçinesi, 100:14 oranında hızlandırıcıyla karıştırılmıştır. Kalıp kapatıldıktan sonra, boşlukları en aza indirmek için, kalıplar, 25 °C sıcaklıkta, 0,5 bar basınç altında, 30 dakika süreyle, saç kalıplama bileşiği (Sheet Moulding Compound: SMC) makinası içerisinde kür edilmişler ve daha sonra kesilmişlerdir. Hibrit kompozitlerin, ASTM D 790-03, ASTM D 618 ve ASTM D 256-04 standartları kullanılarak sırasıyla, 3 nokta eğilme dayanımı, köpek kemiği şeklinde çekme dayanımı (50mm/dk. yükleme hızı) ve izod darbe dayanımları test edilmiştir. Bu araştırmada, en yüksek eğilme, çekme ve darbe dayanımı, S3 karışımında UPE (hacimce %70) + işlenmemiş Kenaf (hacimce %15)+ kırılmış keçe E-cam lifleri (hacimce %15) hibrit kompozitinde elde edilmiştir. Bu karışımdaki eğilme dayanımı 453,22 MPa, çekme dayanımı 39,28 MPa ve izod darbe dayanımı 146,04 MPa olarak belirlenmiştir [137].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. MATERYAL

Çalışma kapsamında üretilen kompozit malzeme üretiminde matris malzemesi olarak ortoftalik reçine ve izoftalik reçineler, dolgu malzemesi olarak, silis kumu, kuvars kumu ve bazalt kumu, takviye malzemesi olarak ise kırılmış cam ve bazalt lifi kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan hammaddelerle ilgili ayrıntılı bilgiler bu bölümde sunulmuştur.

3.1.1. Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Matris Malzemeleri

3.1.1.1. Doymamış Polyester Reçineleri

Doymamış polyester reçine türleri olarak ortoftalik (Polipol 3562-SR) ve izoftalik (Polipol 3873-SR) reçineler kullanılmıştır. Bu reçinelerin kullanılmasının sebebi, CTP boru üretiminde bu iki reçinenin yaygın olarak kullanılmakta olmasıdır. Polimerizasyonun oluşabilmesi için başlatıcı (kürleştirici) olarak metil etil keton peroksit (MEKP; Akperox ER 59), hızlandırıcı (katalizör) olarak da kobalt oktoat (Akkobalt RC88) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan reçine ve katkıları Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan ham polyester reçine türlerinin bazı özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir [138].



Ortoftalik reçine



İzofthalik reçine



Hızlandırıcı
(katalizör)



Başlatıcı
(kürleştirici)

Şekil 3.1. Kullanılan ham reçine, başlatıcı ve hızlandırıcılara ait görsel.

Çizelge 3.1. Doymamış polyester reçine türlerinin fiziksel ve mekanik özellikleri.

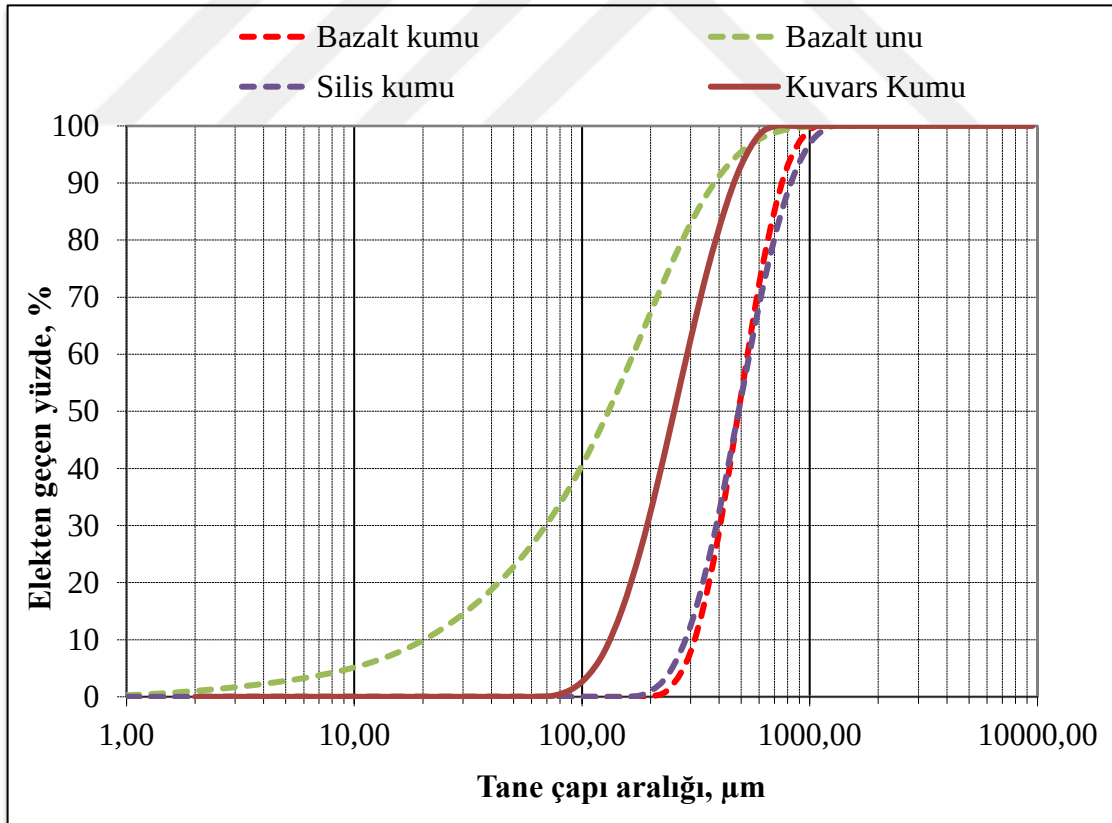
Özellik	Birim	Doymamış Polyester Reçine Türleri	
		Ortoftalik Reçine	İzofthalik Reçine
Yoğunluk	-	1,12	1,067
Viskozite	(cp)	250	300
Solid içeriği	(%)	57	64-66
Çekme modülü	(MPa)	3550	3050
Çekme dayanımı	(MPa)	74	70
Eğilme dayanımı	(MPa)	125	128
Eğilme modülü	(MPa)	3800	3700
Kopma uzaması (çekme)	(%)	3,15	2,8
Toplam hacimsel çekme	(%)	8,0	7,9

3.1.2. Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Dolgu Malzemeleri

Çalışmada, farklı tane dağılımlarına sahip silis kumu, bazalt kumu ve kuvars kumu olmak üzere üç tür dolgu malzemesi 0-1000 mikron aralığında kullanılmıştır. Kullanılan dolgu malzemelerine ait bir resim Şekil 3.2’de, tane dağılımları Şekil 3.3’te gösterilmiştir. Ayrıca kullanılan dolgu malzemelerine ait kimyasal analizler Çizelge 3.2’de, mekanik ve fiziksel özellikler Çizelge 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.2. Dolgu malzemeleri.



Şekil 3.3. Dolgu malzemelerine ait tane dağılımı grafiği.

Çizelge 3.2. Dolgu malzemelerinin kimyasal analiz sonuçları.

Kimyasal Bileşen	Dolgu Malzemeleri		
	Kuvars Kumu (%)	Silis Kumu (%)	Bazalt Kumu (%)
SiO ₂	99,18	98,94	61,21
Al ₂ O ₃	0	0,08	13,61
Fe ₂ O ₃	0,02	0,1	5,72
MgO	0	0	3,90
CaO	0,16	0,12	6,20
Na ₂ O	0	0	2,63
K ₂ O	0,03	0,05	2,83
TiO ₂	0,04	0,12	0,76
MnO	-	-	0,13
SO ₃	0,02	0,3	-
P ₂ O ₅	0,01	0,01	-
Cr ₂ O ₃	0,004	0,053	-
Mn ₂ O ₃	0,0017	0,0035	-

Çizelge 3.3. Dolgu malzemelerine ait fiziksel özellikler.

Deneysel çalışmalar	Dolgu malzemeleri		
	Silis kumu	Bazalt kumu	Kuvars kumu
Nem miktarı (%)	0,002	0,6	0,5
Bağıl yoğunluk	2,55	2,74	2,57
Yakma kaybı (%)	1,3	2,6	1,2
Kuru özgül ağırlık	2,55	2,74	2,57
Suya doygun özgül ağırlık	2,61	2,82	2,63
Gevşek birim ağırlık (g/cm ³)	1,616	1,537	1,541
Sıkışık birim ağırlık (g/cm ³)	1,791	1,723	1,764
Su emme (%)	2,03	2,73	2,29
Özgül yüzey alanı (m ² /kg)	12,07	11,3	10,42
Ortalama tane boyutu (mikron)	237	245	254

3.1.3. Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Takviye Malzemeleri

Takviye malzemeleri olarak, kırılmış cam lifi ve bazalt lifi olmak üzere iki tür takviye malzemesi kullanılmıştır. Şekil 3.4’de, kullanılan takviye malzemeleri gösterilmiştir. Kompozit malzeme üretiminde kullanılan kırılmış lif takviye malzemelerine ait fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4. Kırılmış lif takviye malzemeleri.

Çizelge 3.4. Kırılmış lif takviye malzemelerine ait fiziksel ve mekanik özellikler.

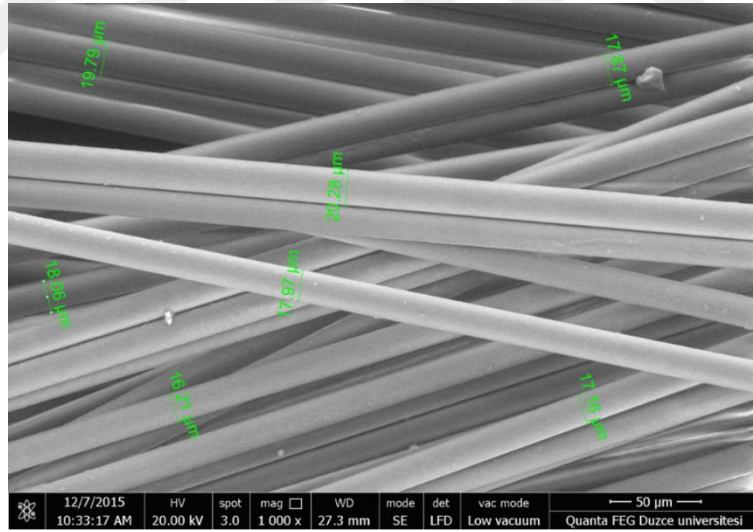
Deneysel çalışmalar	Takviye malzemeleri	
	Cam lifi	Bazalt lifi
Nem miktarı (%)	0,92	0,95
Lif ağırlığı (g/km)	2400	2400
Binder (Bağlayıcı) içeriği (%)	2,1	2,1
Uç sayısı	60	12 (400*12)
Lif çapı (micron)	16-20	12-14
Özgül Ağırlık	2,60	2,61
Çekme Dayanımı (MPa)	3400	4700
Elastisite Modülü (GPa)	77	328
Lif Uzunluğu (mm)	25	25

Liflerin SEM analizi kapsamında numuneler 105 °C’de 24 saat kurutulduktan sonra ölçüm alınmıştır. Numuneler yalıtkan özelliğe sahip olduğundan, önce iletken hale getirilmiş ve ardından kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için numuneler sputter cihazının kafesine yerleştirilmiş ve uygun potansiyelde oluşan plazma ortamında yaklaşık 5 nm kalınlıkta gold-paladyum ile kaplanarak görüntü alınmıştır. Kaplanan

numune mikroskoba yerleştirilerek belli bir yükseklikte ışık kaynağı ile etkileştirilmiştir. Işık kaynağı olarak alan emisyonlu tabanca kullanılmıştır. 10 mikron, 30 mikron ve 50 mikron boyutlarında görüntüler alınmıştır. Cam lifine ait lif boyutunu veren SEM cihazı Şekil 3.5’te ve kullanılan cam ve bazalt liflerinden elde edilen lif çaplarına ait SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de verilmiştir.

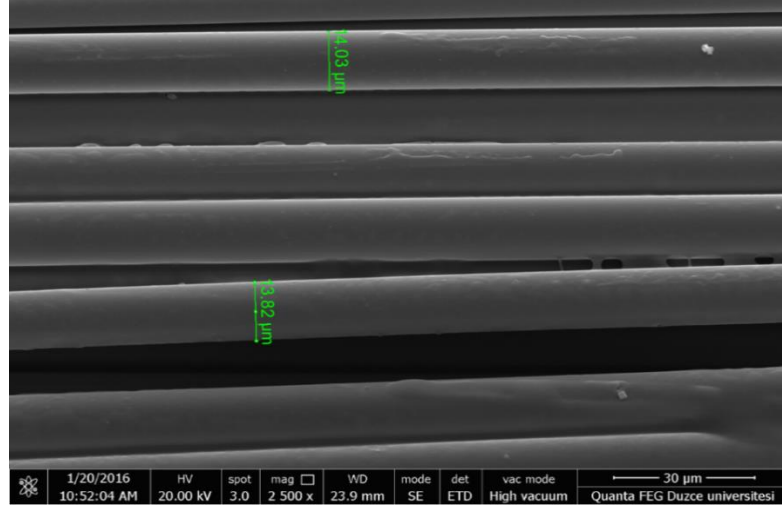


Şekil 3.5. SEM analiz cihazı.



Şekil 3.6. Cam lifinin filament çapı.

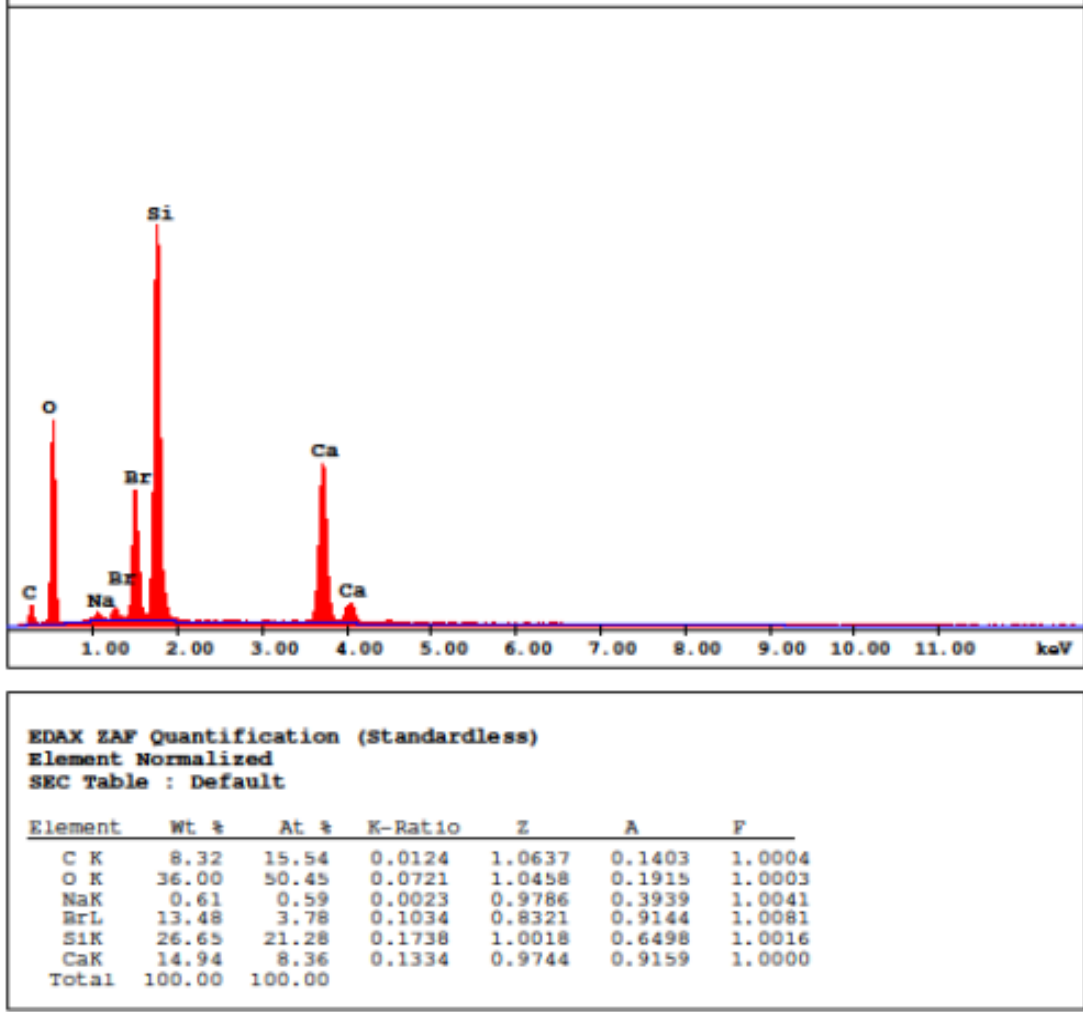
Cam lifinin filament çapının 16-20 mikron metre olduğu görülmüştür.



Şekil 3.7. Bazalt lifinin filament çapı.

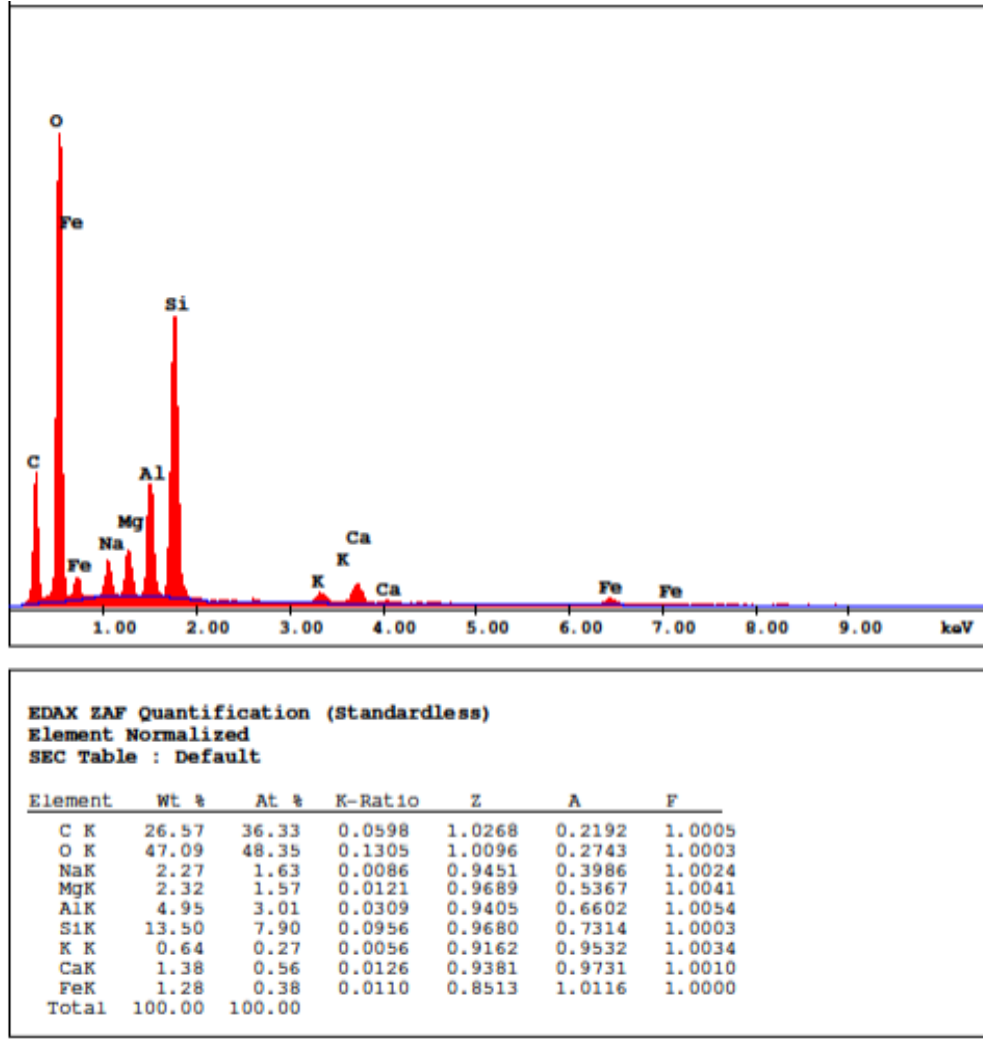
Bazalt lifinin filament çapının 12-14 mikron metre olduğu ve cam lifinden daha küçük filament çapına sahip olduğu görülmüştür.

Cam ve bazalt liflerinin kimyasal bileşenlerinin analizi Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.8. Cam lifinin kimyasal içeriği.

Cam lifinin yapısında Na, Si, Ca ,Br, O ve C olduğu gözlenmiştir. Cam lifi içerisinde en baskın elementin silis olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3.9. Bazalt lifinin kimyasal içeriği.

Bazalt lifinin kimyasal içeriği cam lifiyle karşılaştırıldığında, içerik bakımından daha zengin olduğu ve Mg, Al, K ve Fe gibi elementler ile birlikte bunların bileşiklerini içerdiği gözlenmiştir.

3.2. YÖNTEM

Kompozit malzeme üretiminde yapılan deneysel çalışmalar 3 aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamadaki deneysel çalışmalar, farklı türde ve farklı oranlarda başlatıcı ve hızlandırıcı kullanılarak hazırlanmış doymamış polyester reçine kompozit karışımları üzerinde gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada, bu reçine karışımları içerisine farklı türde ve farklı tane dağılımına sahip dolgu malzemeleri tek tek ve hibrit olacak şekilde karıştırılarak kompozit malzemenin özellikleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Üçüncü ve son aşama da ise, kompozit malzemenin her açıdan en iyi özelliklere sahip

olmasını sağlamak, pek çok uygulama alanında kullanımını mümkün kılmak ve sonuç olarak mevcut piyasada kullanılan malzemelere alternatif bir kompozit malzeme üretmek amacıyla dolgulu reçine karışımları içerisinde, farklı türde ve farklı hacim oranlarında kırılmış lif (elyaf) takviye malzemeleri ilave edilmiş ve oluşturulan hibrit lif takviyeli kompozit malzemeler üzerinde nihai deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Uygulanan deneysel çalışmalar; reçine, dolgulu kompozitler ve lif takviyeli kompozitler üzerinde olmak üzere aşağıda sırasıyla verilmiştir.

3.2.1. Doymamış Polyester Reçine Karışımları Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Her bir ham polyester reçine içerisinde, polimerizasyonun başlatılması için, ortoftalik anhidrit ve izoftalik anhidrit içeren reçinelere hızlandırıcı olarak ağırlıkça %1 oranında kobalt oktoat, başlatıcı olarak ağırlıkça %1, %1,5, %2 ve %2,5 oranlarında MEKP katkıları ilave edilerek polyester reçine karışımları hazırlanmıştır. Daha sonra bu karışımlar üzerinde fiziksel, kimyasal ve mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Reçine karışımları üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışma planı Çizelge 3.5'te verilmiştir.

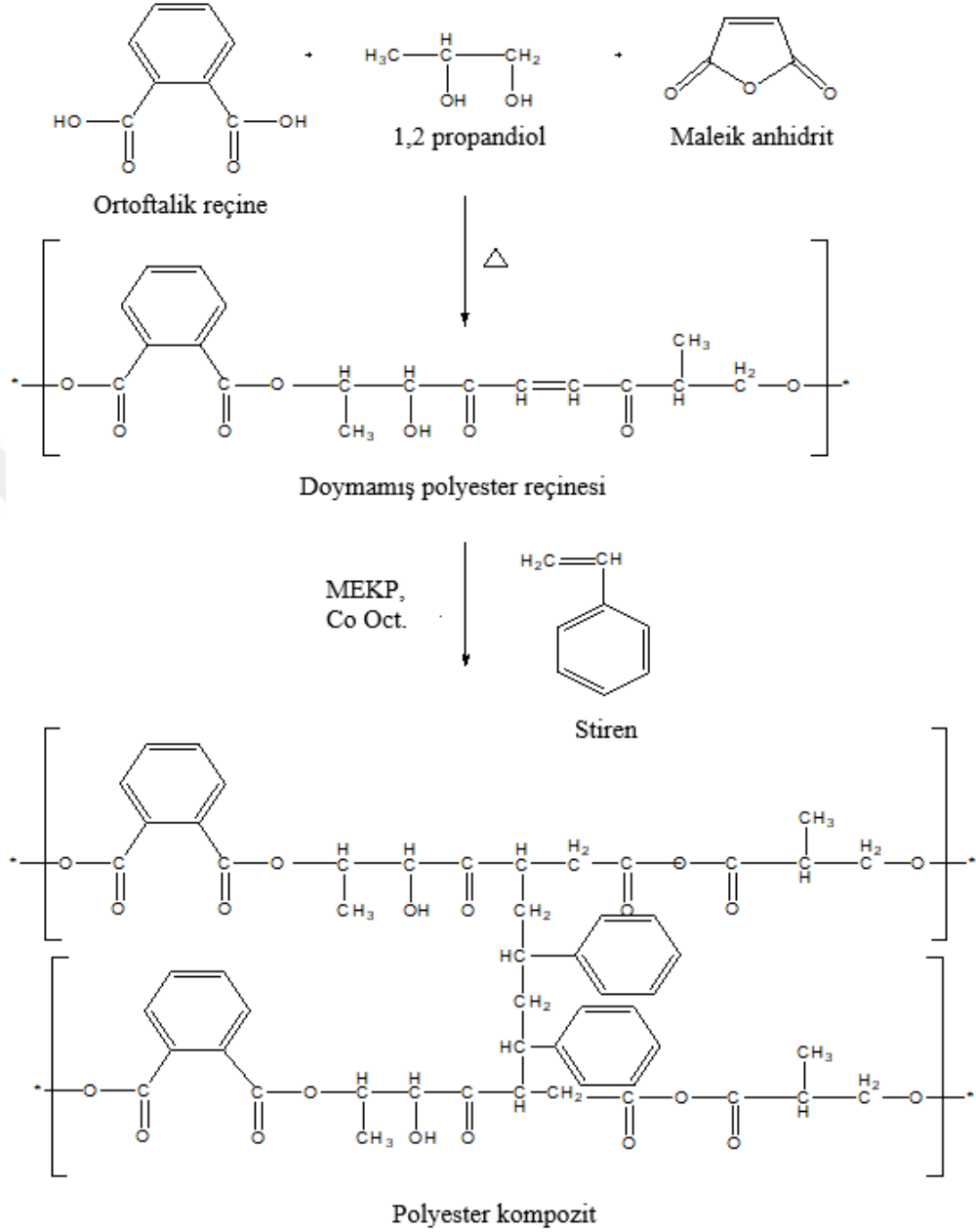
Çizelge 3.5. Reçine karışımları üzerinde yapılan deneysel çalışma planı ve numune sayıları.

Testler	Reçine Türü							
	Ortoftalik Polyester Reçinesi				İzoftalik Polyester Reçinesi			
	%1 MEKP	%1,5 MEKP	%2 MEKP	%2,5 MEKP	%1 MEKP	%1,5 MEKP	%2 MEKP	%2,5 MEKP
Çekme Dayanımı (MPa)	3	3	3	3	3	3	3	3
Eğilme Dayanımı (MPa)	3	3	3	3	3	3	3	3
Jelleşme süresi (sn)	3	3	3	3	3	3	3	3
Jelleşme Sıcaklığı (°C)								
Pik Ekzoterm Sıcaklığı (°C)								
Viskozite (cp)	Ham reçine için 1 adet				Ham reçine için 1 adet			
TGA (%)	1	1	1	1	1	1	1	1
FT-IR	1	1	1	1	1	1	1	1

TGA: Termogravimetrik analiz

FT-IR: Fourier Dönüşümlü Infrared Spektrofotometre

Reaksiyonlarda kullanılan reçine türleri ile başlatıcı ve hızlandırıcının kimyasal yapılarına ait görseller Şekil 3.10'da verilmiştir.

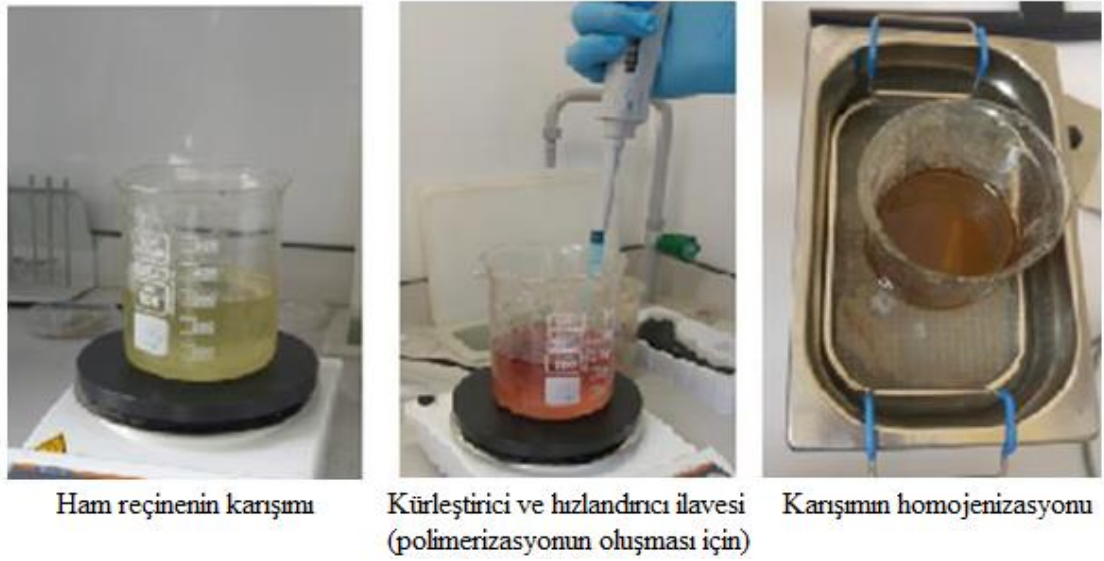


Şekil 3.10. Kompozit üretiminde kullanılan kimyasalların yapıları.

3.2.1.1. Reçine Karışımlarının Hazırlanması

Polimerleşme reaksiyonu, oda sıcaklığında ve üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada reçine, hızlandırıcı ve başlatıcı ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda etkileştirilmiştir. Bu amaçla 500 ml'lik ortoftalik ve izoftalik asit reçineleri cam behere alınmış ve üzerine sırasıyla 5 ml hızlandırıcı ve hacimce %1, 1,5, 2,0 ve 2,5 olacak şekilde 5 ml; 7,5 ml; 10

ml ve 12,5 ml başlatıcı ilave edilmiştir. Ardından karışım 2 dk süre ile 400 rpm’de ısıtıcılı magnetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. İkinci aşamada etkileşimi artırmak ve homojen bir ürün elde etmek amacıyla Bandelin marka Sonorex model ultrasonik homojenizatörde 1 dk ve 35 KHZ’de numuneler, cam beher içinde tutulmak suretiyle etkileştirilmiştir. Üçüncü aşamada ise numuneler ultrasonik banyodan alınmış ve Heidolph marka Hei-TORQUE 100 model ultratoraks karıştırıcı ile 1000 rpm’de 4 dk karıştırılmıştır. Reçinelerin polimerize edilmesi ve homojenizasyonu işlemi Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Reçinelerin polimerizasyon ve homojenizasyon işlemi.

Hazırlanan her bir reçine karışımları üzerinde öncelikle fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlemek için çeşitli testler yapılmıştır. Reçine karışımlarına ait yapılan fiziksel ve kimyasal özelliklere ait testler ve standartları Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Reçine karışımlarına ait fiziksel özellik testleri ve standartları.

Fiziksel Özellik Test Parametreleri	Deney Standartları
Yoğunluk	ISO 1675 [139]
Jelleşme süresi	ISO 2535 [140]
Jelleşme sıcaklığı	ASTM D 3056 [141]
Pik ekzoterm sıcaklığı	ASTM D 2471-99 [142]
Viskozite	ASTM D 2196 [143]
Katı madde içeriği ve stiren içeriği	ISO 3344 [144]

3.2.1.2. Reçine Karşımlarının Fiziksel Özelliklerine Ait Testler

Jelleşme süresi, jelleşme sıcaklığı ve pik ekzoterm sıcaklığı

Hammadde olarak kullanılan doymamış polyester reçine sahip olduğu monomerler ile birlikte başlatıcı ve hızlandırıcı ile radikalik polimerizasyon reaksiyonu sonrasında çapraz bağlı yeni moleküller oluştururlar. Bu çapraz bağlanma olarak ifade edilen ve sertleşme olarak gözlenen olay polimerleşme reaksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Polimerleşmenin başladığı sıcaklık ve bu sıcaklığa ulaşana kadar geçen süre sırasıyla, jelleşme sıcaklığı ve jelleşme süresi olarak adlandırılırken, reaksiyon sonucu gözlenen en yüksek sıcaklık, pik ekzoterm sıcaklığı olarak ifade edilmektedir. Bu parametreler, polimerlerin hazırlanma sürecindeki reaksiyon koşulları için önem arz etmektedirler. Reçinelerin jelleşme süresi, sıcaklığı ve pik ekzoterm sıcaklığı, ısıtıcılı manyetik karıştırıcı üzerine kurulan ve polietilentereftalat (PET) beher üzerine kısıkaç ve nivo ile tutturulmuş, 127 mm'lik, -50 °C ila -300 °C çalışma aralığına sahip daldırmalı çelik termometre ve vizkozimetrenin spindle ucunun daldırılması sonucu oluşan sistemde belirlenmiştir. Bu amaçla, önce katalizör, ardından başlatıcı reçine üzerine ilave edilmiştir. Reaksiyonun başlangıcından bir süre sonra, karışımın sıcaklığı yükselirken viskozite değeri sabit kalmıştır. Sonrasında viskozite değeri de artış göstermeye başlamıştır. Viskozitenin artmaya başladığı nokta jelleşmenin başladığı durum olarak yorumlanmıştır. Reaksiyon sonucunda sıcaklığın sabit kalıp düşmeye başladığı nokta ise pik ekzoterm sıcaklığını vermektedir.

Viskozite

Kompozit üretimi esnasındaki reçinenin akış özelliklerinin belirlenmesi, malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkilemektedir. Bu amaçla, akış özelliklerinin belirlenmesi için kinematik ve gerilime bağlı viskozite ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kinematik viskozite ölçümleri Myr model VR 3000 marka cihaz ile gerçekleştirilirken, akış özelliklerini daha iyi belirleyebilmek için gerilime bağlı vizkozite ölçümleri ise Brookfield Marka RST-CPS Model reometre cihazı ile 37,5 mm yarıçaplı cone-plate geometrisinde, 1 mm boşluk değerine sahip aparatlarla oda şartlarında gerçekleştirilmiştir. Viskozimetre cihazı Şekil 3.12’de ve Reometre cihazı Şekil 3.13’te gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Viskozimetre cihazı.



Şekil 3.13. Reometre cihazı.

Termal özellik

Termal analizler için kullanılan Shimadzu marka DTG 60H model termal analiz cihazı Şekil 3.14’de gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Termal analiz cihazı.

TGA analizleri için platin pan'a 9-10 mg arası numune alınmış ve 50 ml/dk N₂ akış oranında 20 °C/dak ısıtma hızında, oda koşullarından 800 °C'ye kadar sıcaklık uygulanmıştır.

Polimerizasyon Analizi (Kimyasal analiz)

Çalışmada kimyasal özellikleri belirlemek ve reaksiyonlar sonucu elde edilen ürünlerin kimyasal karakterizasyonunu belirlemek amacıyla kullanılan ATR-FT-IR cihazı Şekil 3.15'te verilmiştir. FT-IR analizleri, Shimadzu marka, IR-Prestige 21 model FT-IR cihazı ile 4 cm⁻¹ çözünürlükte ve 20 tarama sonucunda elde edilmiştir. Bu amaçla, sıvı numunelerin direk ışık kaynağı ile etkileşimi ve katı numunelerin ise ZnSe kristalinde belli bir basınçla sıkıştırılması ile elektromanyetik spektrumun 600-4000 cm⁻¹ aralığında bulunan bölgedeki karakteristik moleküler absorpsiyon pikleri belirlenmiştir.

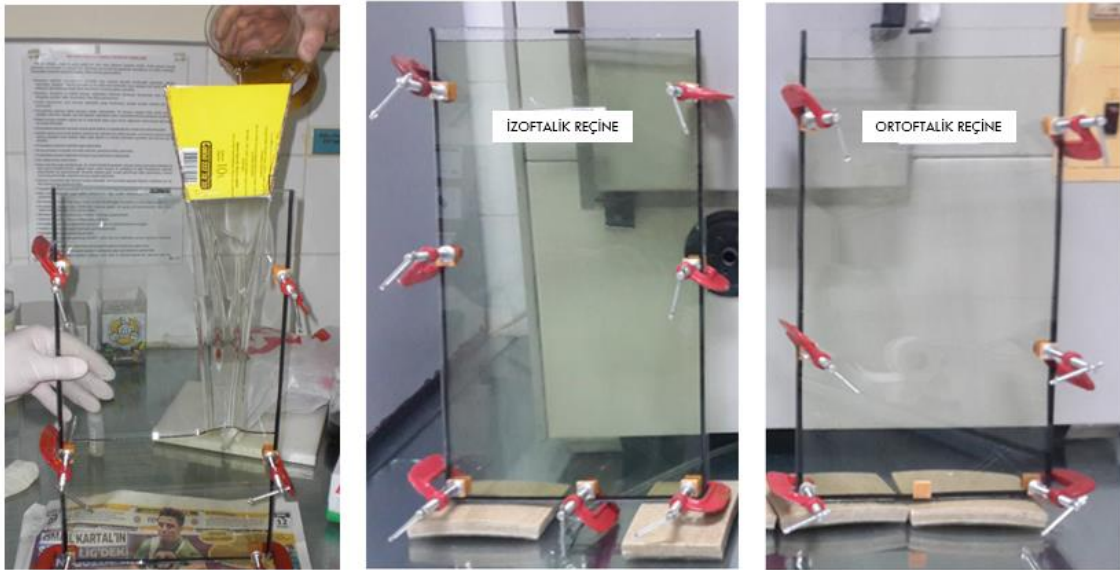


Şekil 3.15. FTIR cihazı.

Bu kapsamda oda koşullarında akışkan özellikte bulunan numunelerden 0,5 ml, numune bölmesine damlatılmış ve sıkıştırılmıştır.

3.2.1.3. Reçine Karışımlarının Mekanik Özelliklere Ait Testler

Standartlara uygun mekanik deney numuneleri hazırlamak için 30x50 cm ebatlarında cam levhalar kesilmiş ve cam levhaların kenarlarına silikon fitil yapıştırılarak 4mm kalınlığında kalıplar hazırlanmıştır. Cam levhaların ve silikon fitillerin yüzeylerine reçinelerin yapışmasını önlemek için kalıp ayırıcı (Polivaks SV-6) sürülmüştür. Kalıp ayırıcı, temiz kalıp yüzeylerine 1 veya daha fazla sürülerek, 15~30 dakika bekledikten sonra kalıplar kullanıma hazır hale getirilmiştir. Cam levhalar, reçine dökümü sırasında sızma olmaması için çeşitli noktalarından mengenelerle sıkıştırılmıştır. Hazırlanan karışımlar, cam levhadan oluşan kalıpların içerisine kabarcıkların oluşmaması için döküm anında yavaşça ilave edilmiştir. Reçine karışımlarının cam levha kalıba dökülme işlemi Şekil 3.16’da gösterilmiştir.



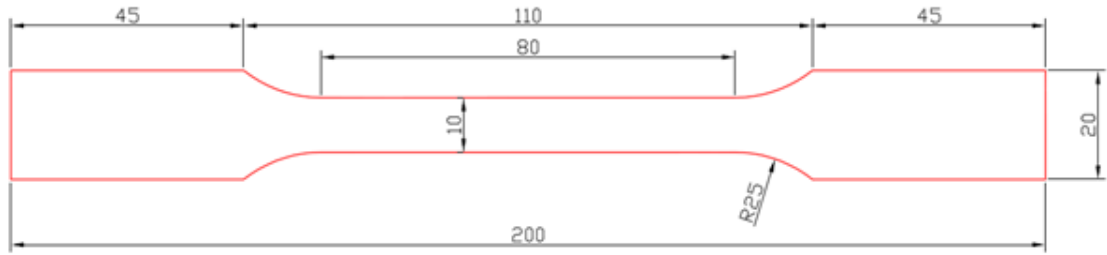
Şekil 3.16. Reçine karışımlarının cam levha kalıba dökülme işlemi.

Reçine karışımları cam levhaya döküldükten sonra ISO 291’e göre 20 ± 2 °C’ de en az 4 saat bekletilmiştir [145]. Daha sonra, reçinelerin alınmış olduğu Poliya A.Ş firmasının tavsiyelerine uyularak, kalıplar etüve konulmuş ve 50 °C’de 1 saat, 80 °C’de 1 saat ve 100 °C’de 1 saat bekletilerek post kür (hızlı kür) işlemi uygulanmıştır. Daha sonra levha şeklindeki numuneler kalıptan çıkarılmış ve bu levhalar, yapılacak analizin ihtiyacına göre lazer kesim cihazıyla standartlara uygun boyutlarda kesilmiştir. Kesilen numuneler

oda koşullarında, 7 günlük bekleme süresinin ardından mekanik deneylere tabi tutulmuşlardır. Levhalardan her bir mekanik deney için 3'er adet numune kesilmiştir. Çizelge 3.7'de reçineler üzerinde yapılan mekanik testler, bu testlere ait standartlar ve yükleme hızları belirtilmiştir. Mekanik testlere tabi tutulan numune boyutları milimetre cinsinden Şekil 3.17'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7. Reçineler üzerinde yapılan mekanik testler, bu testlere ait standartlar ve yükleme hızları.

Mekanik Testler	Deney Standartları	Yükleme Hızları
Kaşık Çekme Dayanımı (TİP 1B)	ISO 527-1 [146]	1 mm/dk
Kaşık Çekme E-Modülü (TİP 1B)	ISO 527-1 [146]	1 mm/dk
Eğilmede Çekme Dayanımı	ISO 178 [147]	2 mm/dk
Eğilmede Çekme E-Modülü	ISO 178 [147]	2 mm/dk



Kaşık çekme dayanımı ve E modülü(TİP 1B numunesi)



Eğilmede çekme dayanımı ve E modülü

Şekil 3.17. Mekanik deneylere tabi tutulan numune boyutları.

Polimerleşme reaksiyonu sonrasında kalıptan çıkarılan numuneler, polyester reçine türleri ile başlatıcı ve hızlandırıcı miktarlarına bağlı olarak, az miktarda en ve boydan hacimsel büzülme göstermektedir. Bu yüzden hazırlanan numune boyutlarında küçük farklılıklar görülebilmektedir. Mekanik deney uygulamalarında cihazdan alınan yük değerlerinin, bu boyut farklılıklarını dikkate alarak mekanik dayanımı doğru şekilde kesite göre açıklayabilmek için, deneyden önce tüm numunelerin uzunluk, genişlik ve kalınlık noktalarından kumpas ile ölçümler yapılmış ve gerilme hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Reçine karışımlarının mekanik test numunelerine ait görsel Şekil

3.18’de, kaşık çekme ve eğilme testlerinin yapılışına ait görüntüler sırasıyla Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de gösterilmiştir.



Kaşık çekme numuneleri

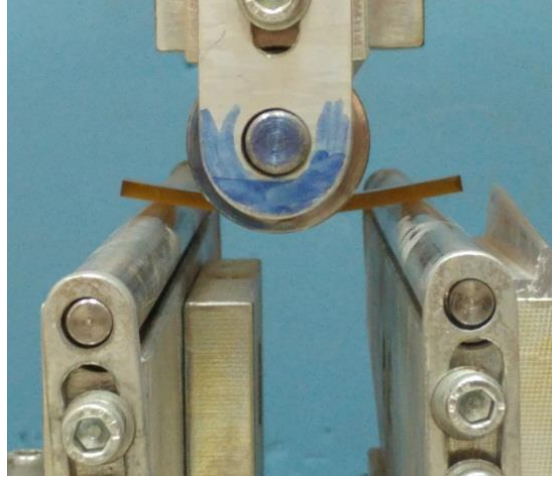


Eğilme numuneleri

Şekil 3.18. Reçine mekanik test numuneleri.



Şekil 3.19. Reçine karışımlarının kaşık çekme dayanımı testi.



Şekil 3.20. Reçine karışımlarının eğilme dayanımı testi.

Çalışma kapsamında, kompozit numuneler üzerinde gerçekleştirilen çekme ve eğilme testleri neticesinde, kompozitlerin çekme dayanımı ve çekme E-modülü, eğilme dayanımı ve eğilme E-modülü değerlerinin hesaplanması için aşağıdaki formüller kullanılmıştır.

Reçine karışımlarının çekme dayanımı hesaplanmasında Denklem (3.1) ve çekme E modülünün hesaplanmasında Denklem (3.2) kullanılmıştır [146].

Formülde;

$$\sigma_{\zeta} = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

$$E_{\zeta} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.2)$$

σ_{ζ} : Çekme dayanımı (MPa),

F: Yük (N),

A: Alan (mm²),

E_{ζ} : Çekme E modülü (MPa),

ε_2 : Birim deformasyon (0,0025),

ε_1 : Birim deformasyon (0,0005),

σ_2 : Birim deformasyon değeri $\varepsilon_2 = 0,0025$ 'a karşılık gelen gerilme,

σ_1 : Birim deformasyon değeri $\varepsilon_1 = 0,0005$ 'a karşılık gelen gerilmeyi ifade etmektedir.

Reçine karışımlarının eğilme dayanımı hesaplanmasında Denklem (3.3) ve eğilme E modülünün hesaplanmasında Denklem (3.4) kullanılmıştır [147].

$$\sigma_e = \frac{3xFL}{2xbxh^2} \quad (3.3)$$

$$E_e = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.4)$$

σ_e : Çekme dayanımı (MPa),

F: Yük (N),

L: Mesnet aralığı (mm),

E_e : Eğilme E modülü (MPa),

ε_2 : Birim deformasyon (0,0025),

ε_1 : Birim deformasyon (0,0005),

σ_2 : Birim deformasyon değeri $\varepsilon_2 = 0,0025$ 'a karşılık gelen gerilme,

σ_1 : Birim deformasyon değeri $\varepsilon_1 = 0,0005$ 'a karşılık gelen gerilmeyi ifade etmektedir.

3.2.2. Dolgulu Kompozitler Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Ortoftalik ve izoftalik reçineler üzerinde yapılan mekanik testler sonucunda ortoftalik ve izoftalik reçinelerin mekanik dayanımları birbirine yakın değer aldığından ve aynı zamanda ortoftalik reçinelerin maliyeti daha düşük olduğundan dolayı bu aşamada sadece ortoftalik reçinelerin kullanılması tercih edilmiştir.

Tüm dolgulu kompozitlerin üretiminde; ortoftalik reçinelere hızlandırıcı olarak ağırlıkça %1 oranında kobalt oktoat, başlatıcı olarak ağırlıkça %1, %1,5 ve %2 oranlarında MEKP katkıları ilave edilerek polyester reçine karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan reçine karışımları içerisine hacimce 1/1 oranında dolgu malzemesi ilave edilmiştir. Dolgulu kompozit üretiminde %2,5 oranında başlatıcı kullanılmamıştır. Bunun sebebi; %2,5 başlatıcı oranındaki ham reçine karışımlarında yapılan testler sonucunda mekanik değerlerin düşmesi ve kopma uzamalarının azalması sonucunda malzemenin daha gevrek bir yapıya sahip olmasıdır. Dolgulu reçine numuneleri üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışma planı Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Dolgulu kompozitler üzerinde yapılan deneysel çalışma planı ve numune sayıları.

Dolgu Türü	Deneyler	Ortoftalik polyester reçinesi		
		Toplam numune sayıları		
		%1 MEKP	%1,5 MEKP	%2 MEKP
Silis Kumu (AFS40-45; F0,8 ve F1,0)	Basınç dayanımı	9	9	9
	SEM	3	3	3
	Reçine Tüketimi (%)	9	9	9
Bazalt Kumu (AFS40-45; F0,8 ve F1,0)	Basınç dayanımı	9	9	9
	SEM	3	3	3
	Reçine Tüketimi (%)	9	9	9
Kuars Kumu (AFS40-45; F0,8 ve F1,0)	Basınç dayanımı	9	9	9
	SEM	3	3	3
	Reçine Tüketimi (%)	9	9	9
%60 Bazalt + %40 Silis (F0,8)	Basınç dayanımı	3	3	3
	SEM	1	1	1
	Reçine Tüketimi (%)	3	3	3
%60 Kuvars + %40 Silis (F0,8)	Basınç dayanımı	3	3	3
	SEM	1	1	1
	Reçine Tüketimi (%)	3	3	3
%60 Bazalt + %40 Kuvars (F0,8)	Basınç dayanımı	3	3	3
	SEM	1	1	1
	Reçine Tüketimi (%)	3	3	3

Çalışmada, ilk olarak piyasada mevcut bulunan American Faundry Society (Amerikan Dökümcüler Birliği: AFS 40-45) sınıfı tane dağılımına sahip silis kumu, bazalt kumu ve kuvars kumu dolgu malzemeleri kullanılmıştır. Ayrıca, en az reçine tüketimini sağlamak için, maksimum kompasiteye (doluluk) sahip dolgulu reçine karışımları elde etmek amacıyla, “Fuller” denklemi referans alınmış ve tüm dolgu dağılımları (gradasyon eğrileri) belirlenmiştir. Referans alınan Fuller denklemi, Denklem (3.5) ’te verilmiştir [34, Denklem (4.1)].

$$P = 100.(d/d_{\max})^n \quad (3.5)$$

Formülde;

P: Elekten geçen yüzde değeri (%),

d: Tane çapı,

dmax: Maksimum tane çapı (1000 µm),

n: 0,1'den 1'e kadar (1 dahil) değişen katsayıyı ifade etmektedir.

Çalışmada yukarıdaki Fuller denkleminde, n katsayısının 0,8 ve 1,0 olacak şekilde alınarak her elek arasında alınması gerekli olan malzeme miktarları belirlendikten sonra bu malzemeler birlikte karıştırılarak bir harman oluşturulmuş ve reçineler ile karışıma hazır hale getirilmişlerdir.

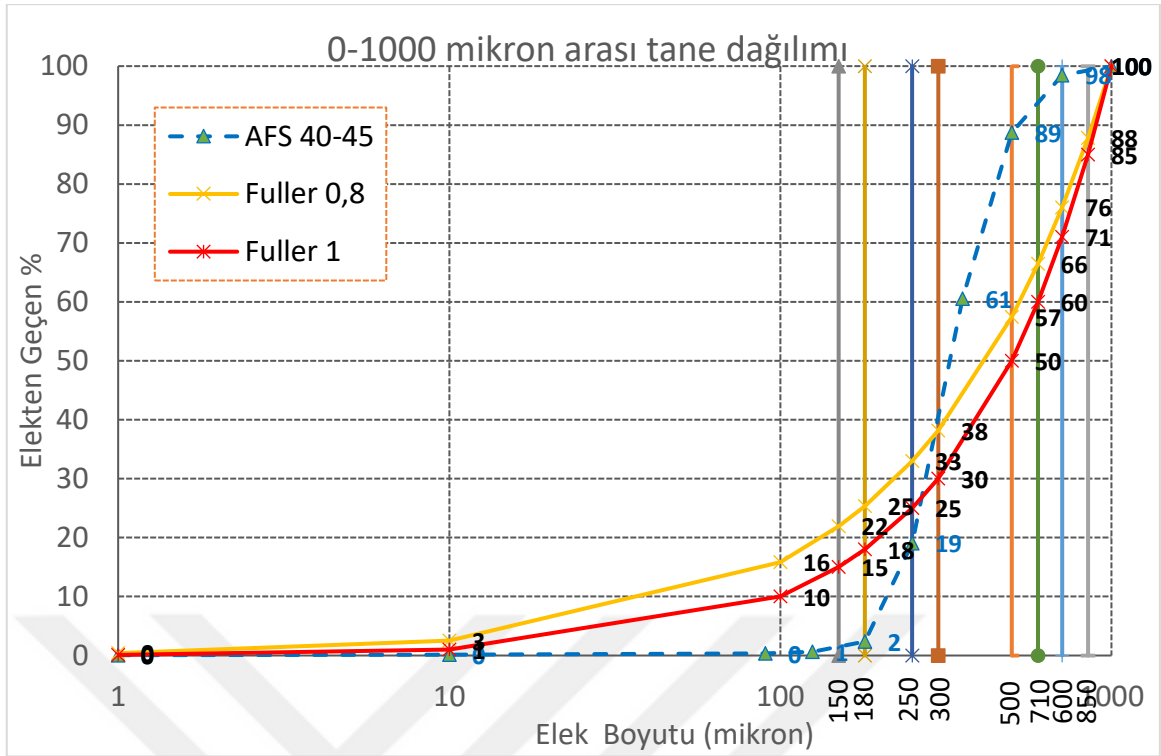
F 0,8 : Fuller denkleminde n katsayısı değeri 0,8 olan tane dağılımı

F 1,0 : Fuller denkleminde n katsayısı değeri 1,0 olan tane dağılımı

Dolgulu numunelerin üretiminde kullanılan AFS 40-45, Fuller 0,8 ve Fuller 1,0 tane dağılımı yüzdeleri Çizelge 3.9'da tane dağılım eğrileri ise Şekil 3.21'de verilmiştir.

Çizelge 3.9. AFS 40-45, Fuller 0,8 ve Fuller 1,0 denklemlerine göre belirlenmiş dolgu malzemelerin tane dağılımları.

Tane Çapları	Elekten Geçen Yüzdeler (%)		
	Silis, Bazalt, Kuvars		
	Fuller (0,8)	Fuller (1,0)	AFS 40-45
1	0,4	0,1	0
10	2,5	1,0	0
100	15,8	10,0	0
150	21,9	15,0	0
180	25,4	18,0	1
250	33,0	25,0	2
300	38,2	30,0	19
500	57,4	50,0	61
600	66,5	60,0	89
710	76,0	71,0	98
850	87,8	85,0	99
1000	100,0	100,0	100



Şekil 3.21. AFS 40-45, Fuller 0,8 ve Fuller 1,0 denklemlerine göre belirlenmiş malzemelerin tane dağılımı eğrileri.

Reçine içerisine ilave edilen, farklı tane dağılımlarına sahip ve farklı türdeki dolgu malzemelerinin karışım oranları tek tek ve hibrit olmak üzere Çizelge 3.10'daki gibi gerçekleştirilmiştir;

Çizelge 3.10. Hibrit ve hibrit olmayan dolgulu reçine karışımlarının hazırlanma süreci.

Reçine +	Sadece silis (AFS40-45; F 0,8 ve F 1,0 tane dağılımlarında),
	Sadece bazalt (AFS40-45; F 0,8 ve F 1,0 tane dağılımlarında),
	Sadece Kuvars (AFS40-45; F 0,8 ve F 1,0 tane dağılımlarında),
	%60 Bazalt + %40 Silis (Hibrit; F0,8 tane dağılımında)
	%60 Kuvars + %40 Silis (Hibrit; F0,8 tane dağılımında)
	%60 Bazalt + %40 Kuvars (Hibrit; F0,8 tane dağılımında)

Hibrit dolgulu reçine karışımlarında, tüm hibrit karışımlar sadece F 0,8 tane dağılımında ve %1 başlatıcı oranında hazırlanmışlardır. Hibrit dolgulu karışımların tane dağılımları Çizelge 3.11'de gösterilmiştir.

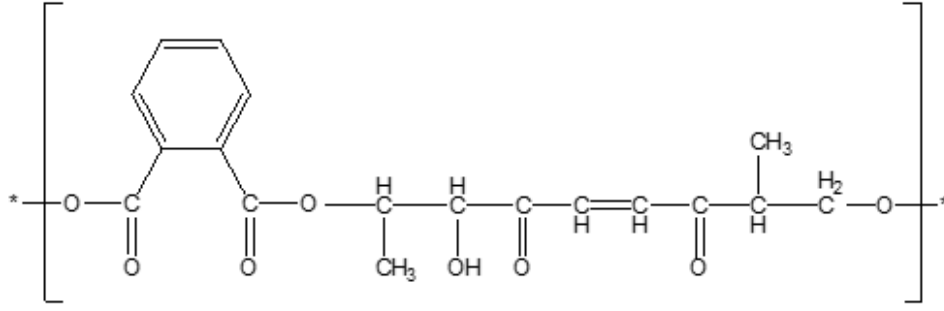
Çizelge 3.11. Hibrit dolgulu karışımların tane dağılımları.

Dolgular	Tane çapı (µm)	Fuller (0,8) Geçen yüzde (%)
Bazalt ve Kuvars	1000-850	12,2
	850-710	11,77
	710-600	9,58
	600-500	9,02
	500-300	19,27
Silis	300-250	5,18
	250-180	7,63
	180-150	3,44
	150-100	6,07
	100-10	13,34
	10-1	2,11
		0,4
	Toplam	100

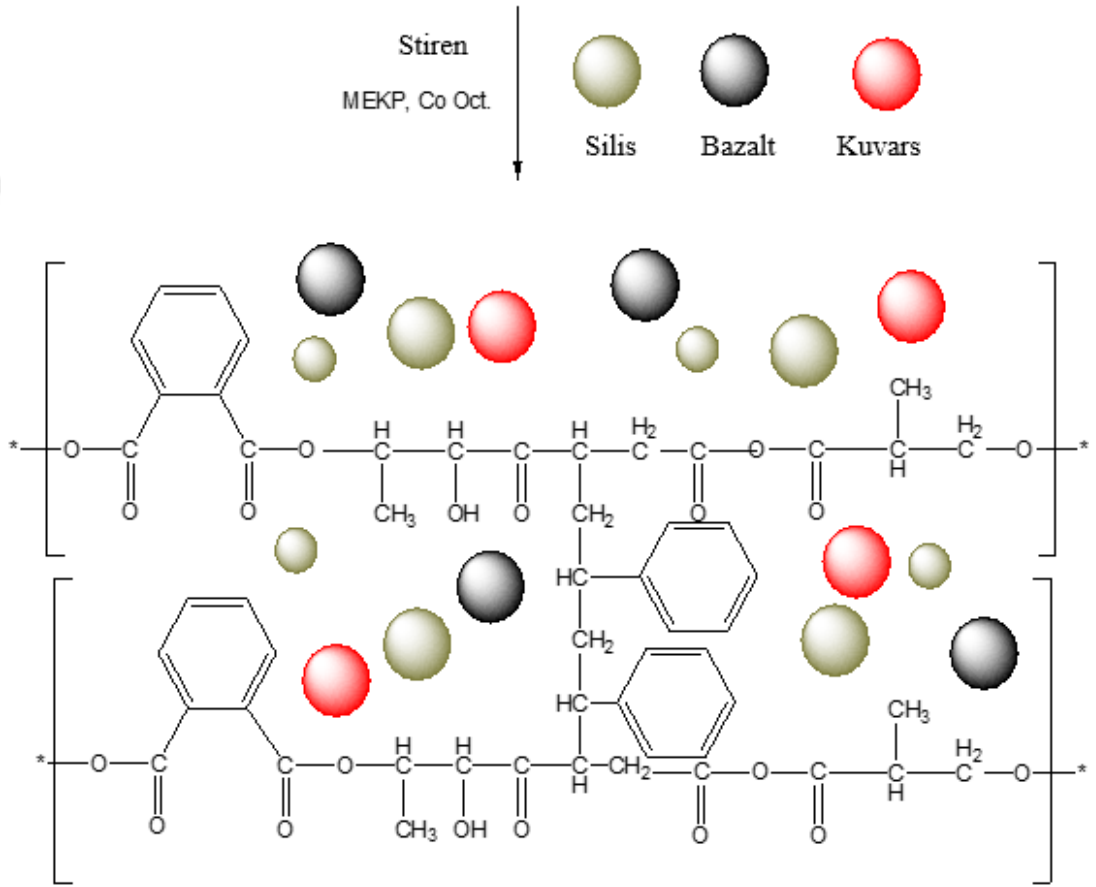
Çizelge 3.11’de görüldüğü üzere, hibrit dolgulu karışımlarda, bazalt veya kuvars dolguları 1000 µm-300 µm elek aralığında kullanılırken, silis dolguları ise 300 µm altındaki elek aralığında kullanılmıştır. Bu elek aralıklarındaki dolgular homojen olarak karıştırılıp yeterli miktarda biriktirilmiş ve farklı oranlardaki hibrit dolgulu karışımlarda kullanılmaya hazır hale getirilmişlerdir.

3.2.2.1. Dolgulu Kompozitlerin Hazırlanması

Ortoftalik reçinenin polimerizasyon işlemi daha önce belirtildiği şekilde başlatıldıktan sonra, reçine jelleşme süresine ulaşmadan önce vakit kaybetmeden dolgu malzemesi ilavesi yapılmıştır. Bu amaçla, tane dağılımları önceden hazırlanan dolgu malzemeleri, reçine içerisine ilave edilmiş, bu karışım daha sonra mekanik karıştırıcıda (torrax) 1 dk. süre ile 1000 rpm devirde karıştırıldıktan sonra, hazırlanan dolgulu reçine karışımları çelik silindir şeklindeki kalıplara dökülmüştür. Dolgu malzemeleriyle doymamış polyester reçinenin karışım reaksiyonu Şekil 3.22’de, dolgu malzemelerinin reçine ile karışım işlemi Şekil 3.23’de, hazırlanan dolgulu reçine karışımlarının çelik silindir kalıba döküm işlemi Şekil 3.24’de gösterilmiştir.



Doymamış polyester reçinesi



Şekil 3.22. Dolgu malzemeleriyle doymamış polyester reçinenin karışım reaksiyonu.



Dolgu malzemesinin reçine içerisine dökülmesi



Reçine ve dolgu malzemesinin homojen karışımı



Ultrasonik mekanik karıştırıcı

Şekil 3.23. Dolgu malzemelerinin reçine ile karışım işlemi.



Karışımın kalıba dökülmesi



Karışımın jelleşme süresini tamamlaması için bekletilmesi

Şekil 3.24. Hazırlanan dolgulu reçine karışımlarının çelik silindir kalıba döküm işlemi.

Katılaştıran karışımın rahatça çıkarılabilmesi için kalıpların içerisine önceden kalıp ayırıcı sürülmüştür. Dolgulu reçine karışımları ISO 291'e göre 20 ± 2 °C' de en az 1 saat bekletilmiştir [145]. Ardından, reçinelerin temin edildiği Poliya A.Ş'nin tavsiyeleri doğrultusunda, kalıplar post kür işlemi için öncelikle etüvde, 50 °C'de 1 saat, 80 °C'de 1 saat ve 100 °C'de 1 saat bekletildikten sonra etüvün kapakları açılmış ve karışımlar ortam sıcaklığına ulaşana kadar bekletilmişlerdir. Oda sıcaklığına gelen kalıplaşmış numuneler kalıptan alınmıştır. Kalıp içerisinde jelleşen karışımların post kür edilmesi işlemi Şekil 3.25'te gösterilmiştir.



Şekil 3.25. Kalıp içerisinde jelleşen karışımların post kür işlemi.

3.2.2.2. Dolgulu Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Ait Testler

Numuneler silindirik kalıplardan çıkarıldıktan sonra basınç testlerinin yapılması ve reçine tüketim miktarlarının belirlenmesi için kesim işlemine tabi tutulmuşlar, 7 günlük bekleme süresinin ardından kesilen numuneler üzerinde basınç testleri yapılmış ve reçine tüketim miktarları belirlenmiştir.

Basınç testi, ASTM C 579-01 [148] standardına göre yapılmıştır. Numuneler silindirik şeklinde ve çap/boy oranı $\frac{1}{2}$ olacak şekilde yaklaşık (35mm/70mm) ebatlarında üretilmişlerdir. Yükleme hızı 41 MPa/dak. olarak ayarlanmıştır. Basınç testinin gerçekleştirilmesi için her bir karışımdan 3'er adet numune üretilmiştir.

Basınç dayanımının hesaplanmasında Denklem (3.6) kullanılmıştır.

Formülde;

$$\sigma_b = \frac{F}{A} \quad (3.6)$$

σ_b : Basınç dayanımı (MPa),

F: Yük (N),

A: Alan (mm²) ifade etmektedir.

Dolgulu reçine karışımlarının reçine tüketim miktarlarının belirlenmesi için kesilmiş numunelerin ağırlıkları tartılmış ve porselen krozelerin içerisine konulan bu numuneler kül fırınına yerleştirildikten sonra polyesterin tamamen uçurulması için kül fırınının sıcaklık değeri yaklaşık 650 °C'ye ayarlanmış ve bu sıcaklıkta 2 saat süreyle bekletilmişlerdir. Kül fırınından çıkarılan numuneler ortam sıcaklığına ulaşana kadar bekletildikten sonra ağırlıkları tartılmış ve gerekli hesaplamalar yapılarak, bu karışımın ne kadar reçine tükettiği belirlenmiştir.

Kalıptan çıkarılan silindir şeklindeki numuneler ve bu numunelerin kesim işlemleri Şekil 3.26'da gösterilmiştir. Basınç testinin gerçekleştirilmesi için kesilmiş silindir numuneler Şekil 3.27'de, reçine tüketiminin belirlenmesi için kesilmiş numuneler Şekil 3.28'de, basınca tabi tutulan silindir numuneler Şekil 3.29'da, dolgulu kompozitlerin reçine tüketim testi Şekil 3.30'da gösterilmiştir. Basınç testi sonrası kopan parçalardan SEM analizi için alınan numuneler Şekil 3.31'de gösterilmiştir.



Kalıptan çıkarılan numuneler



Kesim işlemi

Şekil 3.26. Kalıptan çıkarılan silindir numuneler ve kesim işlemi.



Silis dolgulu basınç numuneleri



Kuvars dolgulu basınç numuneleri

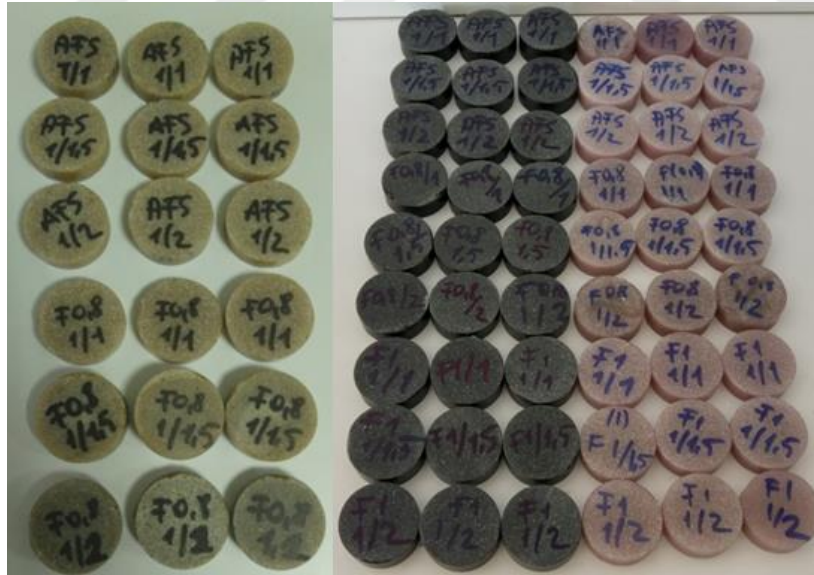


Bazalt dolgulu basınç numuneleri



Hibrit karışımlara ait basınç numuneleri

Şekil 3.27. Basınç testinin gerçekleştirilmesi için kesilmiş silindir numuneler.



Şekil 3.28. Reçine tüketiminin belirlenmesi için kesilmiş numuneler.



Silis dolgulu
basınç numunesi



Bazalt dolgulu
basınç numunesi



Kuvars dolgulu
basınç numunesi



Hibrit dolgulu
basınç numunesi

Şekil 3.29. Katılaştıran dolgulu reçine karışımları üzerinde basınç testlerinin yapılması işlemi.

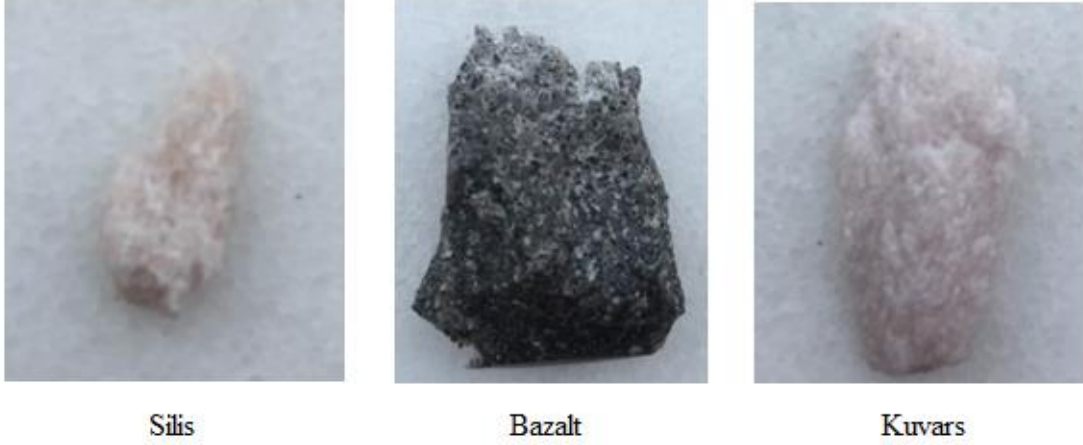


Kül fırını



Reçine tüketim testi

Şekil 3.30. Dolgulu kompozitlerin reçine tüketim testi.



Şekil 3.31. SEM analizi örnekleri.

3.2.3. Lifli Kompozitler Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Bölüm 3.2’de belirtildiği üzere, farklı oranlarda başlatıcılar ilave edilerek hazırlanan reçine karışımları içerisinde, kürlenme ısısının ve polimerizasyonun kontrol edilebildiği optimum karışımın %1 başlatıcı ve %1 hızlandırıcı oranlarında olduğu deneysel olarak belirlenmiştir. Bu optimum reçine karışımının içerisinde, 1. aşamada; önceden hazırlanmış olan AFS 40-45 ve F0,8 tane dağılımındaki silis, bazalt ve kuvars dolguları, reçine ve dolgu oranı hacimce, 1/1 olacak şekilde karıştırılmış ve daha sonra reçine hacminin %5; %7,5 ve %10’u oranlarında cam lifleri ve yine aynı oranlarda bazalt lifleri ilave edilerek lif takviyeli kompozitler hazırlanmıştır. 2. aşamada; F0,8 tane dağılımına sahip silis, bazalt, kuvars ve hibrit dolguları (%60 bazalt + %40 silis; hibrit karışımlar içerisinde en yüksek mekanik değer elde edildiğinden sadece bu karışım kullanılmıştır) ile lif takviye malzemeleri hibrit olacak şekilde (hacimce, %6 cam lifi + %4 bazalt lifi) birleştirilerek, hibrit lif takviyeli kompozitler üretilmiştir. Hibrit lifli olmayan ve hibrit lifli olarak üretilen kompozitlerin hazırlanma prosesi Çizelge 3.12 ve Çizelge 3.13’de verilmiştir.

Çizelge 3.12. Hibrit lifli olmayan lif ve mineral takviyeli kompozitlerin hazırlanma prosesi.

Reçine +	Sadece silis (AFS40-45; F 0,8 tane dağılımında),	%5; %7,5; %10 cam ve bazalt lifi
	Sadece bazalt (AFS40-45; F 0,8 tane dağılımında),	
	Sadece Kuvars (AFS40-45; F 0,8 tane dağılımında),	

Çizelge 3.13. Hibrit lif ve mineral takviyeli kompozitlerin hazırlanma prosesi.

Reçine +	Sadece silis (F 0,8 tane dağılımında),	Hibrit lifler (%6 cam lifi + %4 bazalt lifi)
	Sadece bazalt (F 0,8 tane dağılımında),	
	Sadece Kuvars (F 0,8 tane dağılımında),	
	Hibrit dolgulu (%60 Bazalt + %40 Silis) (F0,8 tane dağılımında)	

Levhalarından her bir mekanik deney için 5'er adet örnek kesilmiştir. Hibrit olmayan ve hibrit lifli kompozit levhalar üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışma planı sırasıyla Çizelge 3.14 ve Çizelge 3.15'te verilmiştir.

Çizelge 3.14. Hibrit lifli olmayan lifli kompozitler üzerinde yapılan deneysel çalışma planı ve örnek sayıları.

Dolgu Türü	Testler	Numune Sayıları											
		Cam lifi						Bazalt lifi					
		%5		%7,5		%10		%5		%7,5		%10	
		AFS 40-45	F0,8	AFS 40-45	F0,8	AFS 40-45	F0,8	AFS 40-45	F0,8	AFS 40-45	F0,8	AFS 40-45	F0,8
Silis kumu	Charpy darbe dayanımı	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Eğilme dayanımı	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Çekme dayanımı	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	SEM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bazalt kumu	Charpy darbe dayanımı	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Eğilme dayanımı	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Çekme dayanımı	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	SEM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kuars kumu	Charpy darbe dayanımı	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Eğilme dayanımı	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Çekme dayanımı	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	SEM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Çizelge 3.15. Hibrit lifli kompozitler üzerinde yapılan deneysel çalışma planı ve örnek sayıları.

Dolgu türü	Testler	Örnek Sayıları
		F0,8 tane dağılımlı; hibrit lifli (%6 cam lifi+ %4 bazalt lifi)
Silis kumu	Charpy darbe dayanımı	5
	Eğilme dayanımı	5
	Çekme dayanımı	5
	SEM	1 (Charpy numunesinden)
Bazalt kumu	Charpy darbe dayanımı	5
	Eğilme dayanımı	5
	Çekme dayanımı	5
	SEM	1 (Charpy numunesinden)
Kuvars kumu	Charpy darbe dayanımı	5
	Eğilme dayanımı	5
	Çekme dayanımı	5
	SEM	1 (Charpy numunesinden)
%60 Bazalt + %40 Silis	Charpy darbe dayanımı	5
	Eğilme dayanımı	5
	Çekme dayanımı	5
	SEM	1 (Charpy numunesinden)

3.2.3.1. Lif Takviyeli Kompozitlerin Hazırlanması

Çalışmada, 250 x 450 x 10 mm ebatlarında yüksek ısıya dayanıklı versalit malzemeden yapılmış üstü açık kalıplar kullanılmıştır. Öncelikle, ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda, cam beher içerisine ham reçine ilavesi yapılmış ve üzerine %1 oranında hızlandırıcı ilave edildikten sonra %1 başlatıcı ilave edilerek 1dk süreyle karıştırılmıştır. Hemen ardından reçine içerisine, AFS 40-45 ve F0,8 tane dağılımında önceden hazırlanan silis, bazalt ve kuvars dolguları, tek tek ve hibrit olacak şekilde ilave edildikten sonra, bu karışımlar 2 dk süreyle 300 rpm'de karıştırılmış ve sonrasında 35 kHz değerinde 1 dk ultrasonik banyoda homojenize edilmiştir. Bu karışımlar kalıplara döküldükten sonra, üzerine kırılmış lifler el ile rastgele dağılı olarak serpilmiştir. Lif takviyesinin ardından, el yatırması yöntemiyle, bir demir rulonun lif takviyeli dolgulu reçine karışımı üzerinde ileri geri hareket ettirilmesiyle reçinenin lifleri tamamen ıslatması ve karışım içerisinde hapsolmuş hava kabarcıklarının dışarıya çıkması sağlanmıştır. Daha sonra, aynı yöntemle hazırlanan dolgulu reçine karışımı, kalıp içerisine tekrar dökülmüş ve kalıbın üzeri cam

levha ile kapatıldıktan sonra üzerine ağırlık konulmuş ve ISO 291 standardına göre kalıplar 4 saat süreyle 20 ± 3 °C’de bekletilmiştir [145]. Daha sonra, reçinelerin alınmış olduğu Poliya A.Ş firmasının tavsiyelerine uyularak, kalıplar etüve konulmuş ve 50 °C’de 1 saat, 80 °C’de 1 saat ve 100 °C’de 1 saat bekletilerek post kür işlemi uygulanmıştır. Etüvün kapakları açıldıktan sonra, kalıpların ortam sıcaklığına kadar düşmesi beklenmiş, kalıplar etüvden çıkarılmış ve ardından lifli kompozit levhalar kalıpların içerisinden çıkarılmış ve yapılacak analizin ihtiyacına göre lazer kesim cihazıyla standartlara uygun boyutlarda kesilmiştir. Kesilen numuneler oda koşullarında, 7 günlük bekleme süresinin ardından mekanik deneylere tabi tutulmuşlardır. Kompozit levha üretiminde kullanılan kalıplar Şekil 3.32’de, dolgulu reçine karışımı içerisine kırılmış lif takviye edilmesi işlemi Şekil 3.33’te, liflerin el yatırması yöntemiyle reçine içerisine emdirilmesi Şekil 3.34’de, kalıp içerisinde jelleşen karışımların etüvde post kür edilmesi işlemi Şekil 3.35’te, kalıptan çıkarılan lifli kompozit levhalar Şekil 3.36’da, kesim işlemi Şekil 3.37’de verilmiştir.



Şekil 3.32. Kompozit levha üretiminde kullanılan kalıplar.



Kırılmış cam lifi takviyesi

Kırılmış bazalt lifi takviyesi

Hibrit cam ve bazalt lifi takviyesi

Şekil 3.33. Dolgulu reçine karışımı içerisine kırılmış lif takviye edilmesi işlemi.



Şekil 3.34. Liflerin el yatırması yöntemiyle reçine içerisine emdirilmesi.



Şekil 3.35. Kalıp içerisinde jelleşen karışımların post kür edilmesi işlemi.



Silis



Bazalt

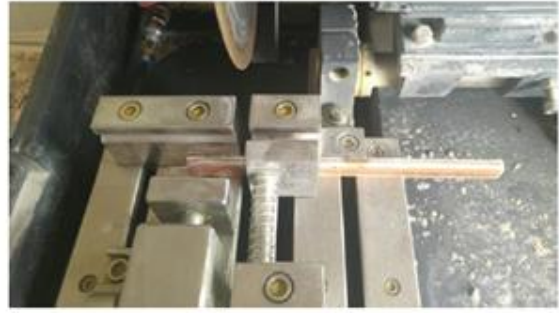


Kuvars

Şekil 3.36. Kalıptan çıkarılan lifli kompozit levhalar.



Sulu kesim



İnce kesim

Şekil 3.37. Lifli kompozit levhaların sulu ve ince kesim işlemi.

3.2.3.2. Lifli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Ait Testler

Standarda göre kesilen lifli kompozit levhalar üzerinde charpy (darbe), eğilme, çekme testleri yapılmıştır.

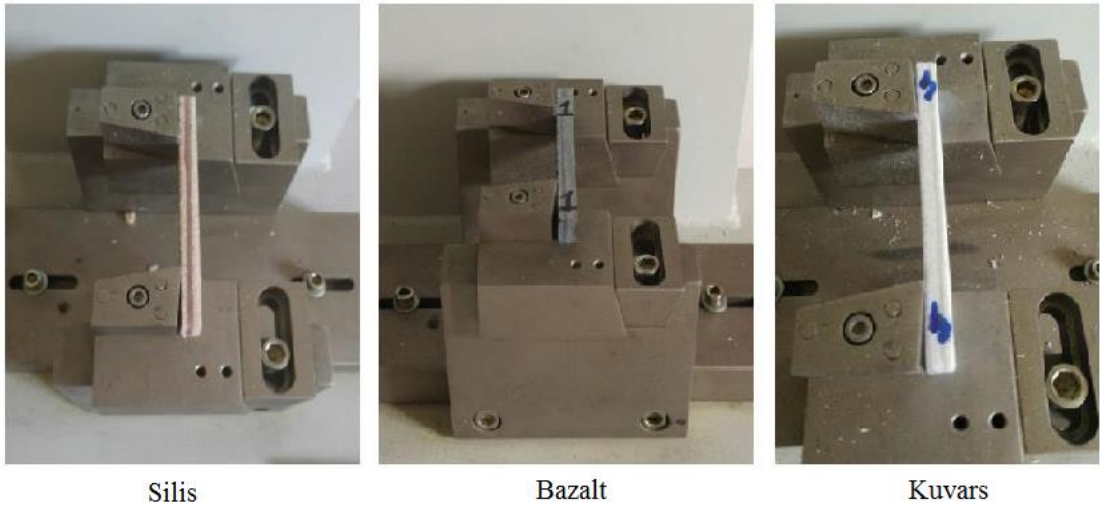
Charpy Testleri; Charpy test numuneleri ISO 179-1 standardına göre TİP 3 numunesi seçilerek yapılmıştır [149]. TİP 3'e göre lifli kompozit numuneler 110 x 15 x 10 mm ebatlarında 5 tekrar numunesi olarak hazırlanmıştır. Charpy testlerinin gerçekleştirilmesi için 50 J'lik charpy test cihazı kullanılmıştır. Charpy test cihazı Şekil 3.38'de, kesilen numunelere ait görseller Şekil 3.39'da, charpy testlerine tabi tutulan numunelere ait bir görsel Şekil 3.40'da verilmiştir.



Şekil 3.38. Charpy test cihazı.



Şekil 3.39. Charpy test numuneleri.



Şekil 3.40. Charpy testlerine tabi tutulan lifli kompozitler.

Lifli kompozitlerin charpy darbe dayanımının hesaplanmasında Denklem (3.7) kullanılmıştır [149].

Formülde;

$$a_{cU} = \frac{E_c}{hxb} \times 10^3 \quad (3.7)$$

a_{cU} = Charpy darbe dayanımı (kJ/m²),

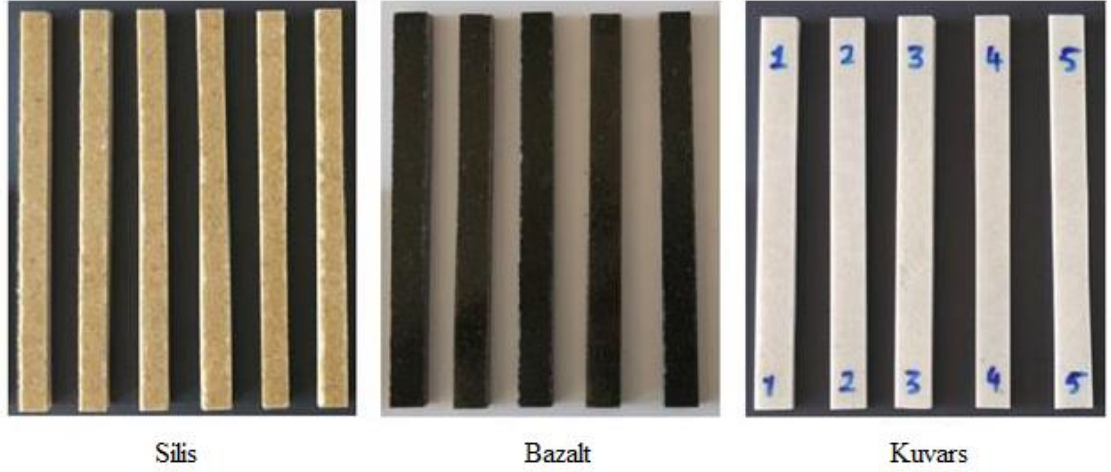
h = Kalınlık (0,01 m),

b = Genişlik (0,015 m),

E_c = Test numunesinin kırılmasıyla emilen düzeltilmiş enerji (J),

L^1 = Mesnet aralığı (60 mm) ifade etmektedir.

Eğilme Testleri; Eğilme testleri, ISO 14125 standardına göre Yöntem A (3 nokta eğilme testi) Sınıf II seçilerek yapılmıştır [150]. Yükleme hızı, 5 mm/dk. olarak uygulanmıştır. Lifli kompozitler, 200 x 15 x 10mm ebatlarında 5 tekrar numunesi olarak hazırlanmışlardır. Kesilen eğilme numunelere ait görseller Şekil 3.41’de, eğilme testlerine tabi tutulan numuneler Şekil 3.42’de verilmiştir.



Şekil 3.41. Standarta göre kesilen eğilme numuneleri.



Şekil 3.42. Eğilme testlerine tabi tutulan lifli kompozitler.

Lifli kompozitlerin eğilme dayanımının hesaplanmasında Denklem (3.8) , eğilme E modülü hesaplanmasında ise Denklem (3.9), Denklem (3.10) ve Denklem (3.11) kullanılmıştır [151].

Formülde;

$$\sigma_f = \frac{3xFL'}{2xbxh^2} \quad (3.8)$$

σ_f : Eğilme dayanımı (MPa),

F: Kuvvet (N),

L' : Mesnet aralığı (160 mm),

h : Kalınlık (10 mm),

b : Genişlik (15 mm),

L : Numune uzunluğu (200 mm),

ve,

$$E_f = 500x(\sigma_f'' - \sigma_f') \quad (3.9)$$

E_f : Eğilme E modülü (MPa),

σ_f' : s' , defleksiyonunda ölçülen gerilme (MPa),

σ_f'' : s'' , defleksiyonunda ölçülen gerilme (MPa),

$$s' = \frac{\varepsilon_f' x(L')^2}{6xh} \quad (3.10)$$

$$s'' = \frac{\varepsilon_f'' x(L')^2}{6xh} \quad (3.11)$$

s' ve s'' : Kiriş orta nokta defleksiyonları (mm),

ε_f' : Birim deformasyon (0,0025),

ε_f'' : bBirim deformasyon (0,0005), ifade etmektedir.

Çekme Testleri; Çekme testi, TS EN 1394/Şubat 1999 standardı, Metot D'ye göre yapılmıştır [151]. Yükleme hızı 2 mm/dk. olarak uygulanmıştır. Lifli kompozitler, çekme testi için, 250 x 25 x 10 mm ebatlarında kesilmişlerdir. Kesilen çekme numunelerine, gövde genişliği 10 mm'den az olmayacak şekilde çentik açılmıştır. Çekme testi numunelerine çentik açılması işlemi Şekil 3.43'te, kesilen çentikli çekme numunelere ait görseller Şekil 3.44'de ve çekme testlerine tabi tutulan numuneler Şekil 3.45'te verilmiştir.



Silis

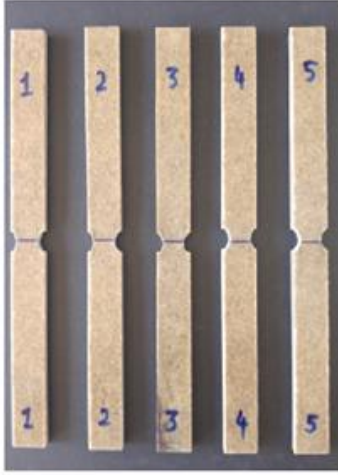


Bazalt



Kuvars

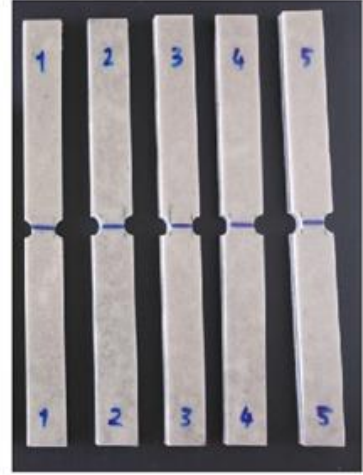
Şekil 3.43. Çekme testi numunelerine çentik açılması işlemi.



Silis



Bazalt



Kuvars

Şekil 3.44. Kesilen çentikli çekme numunelere ait görseller.



Şekil 3.45. Çekme testlerine tabi tutulan lifli kompozitler.

Lifli kompozitlerin çekme dayanımının hesaplanmasında Denklem (3.12) kullanılmıştır [151].

$$\sigma_{cD} = \frac{F_{ult}}{b} \quad (3.12)$$

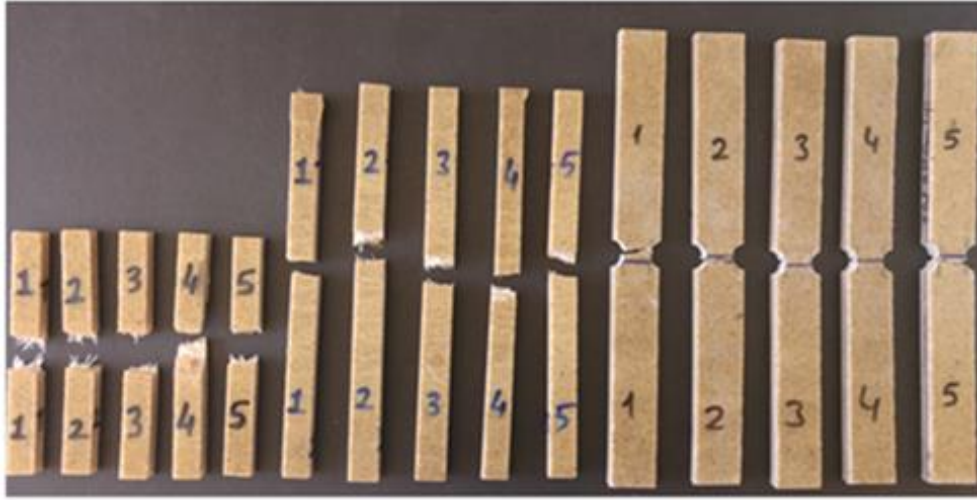
Formülde;

σ_{cD} : Milimetre çember uzunluğu başına Newton cinsinden başlangıç görünür çember mukavemeti (N),

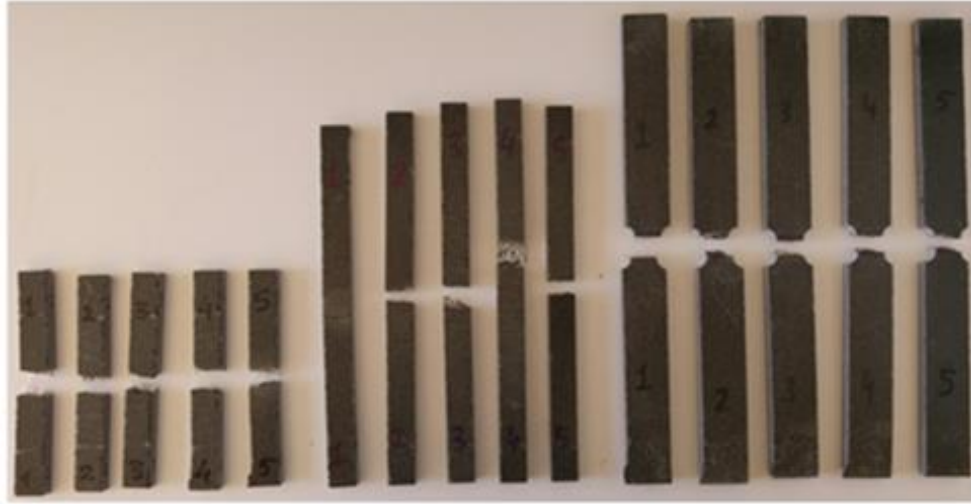
F_{ult} : Nihai çekme kuvveti (N),

b : Deney parçasının genişliği (mm), fade etmektedir.

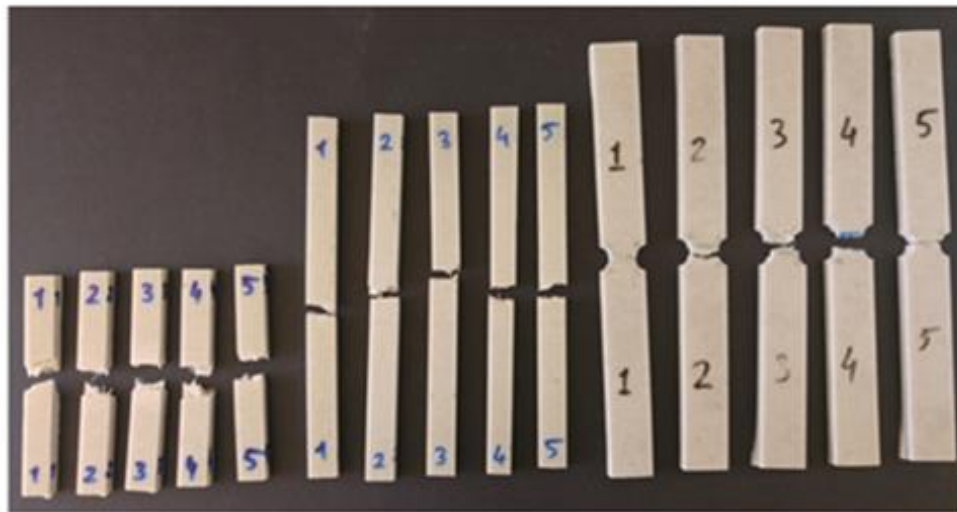
Mekanik testler sonucu kırılan cam lifli, bazalt lifli ve hibrit lifli kompozitlere ait görseller Şekil 3.46, Şekil 3.47 ve Şekil 3.48’de gösterilmiştir.



Cam lifli silis dolgulu kompozitler

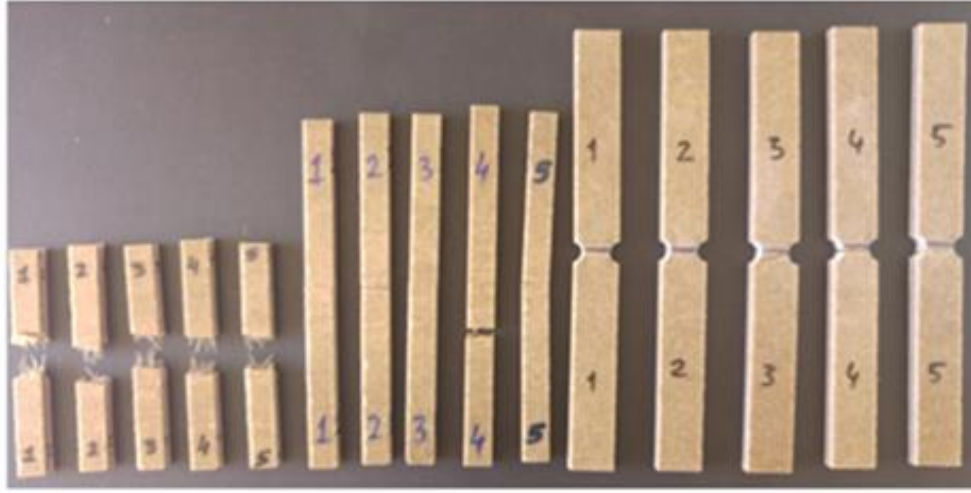


Cam lifli bazalt dolgulu kompozitler

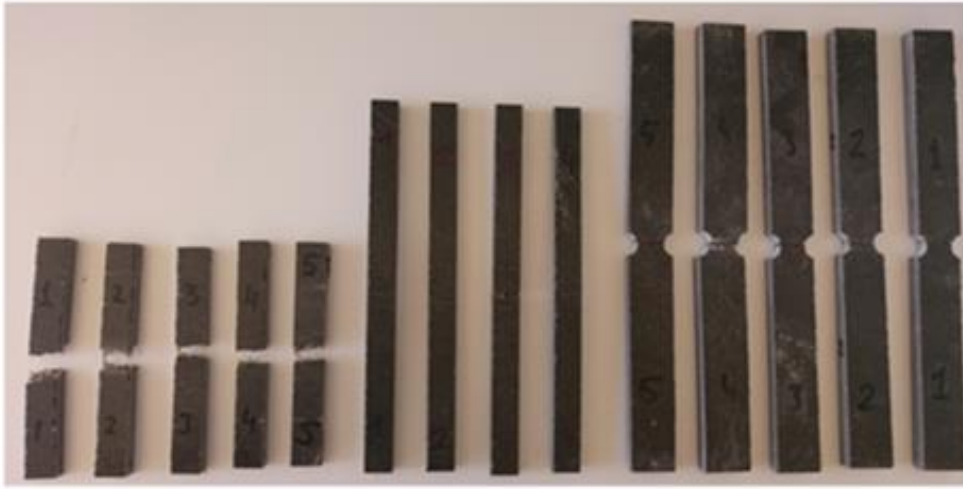


Cam lifli kuvars dolgulu kompozitler

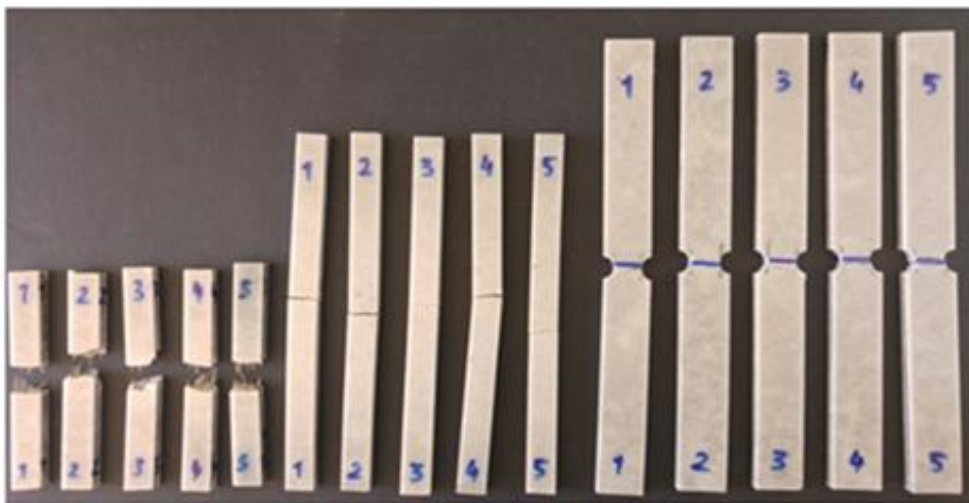
Şekil 3.46. Mekanik testler sonucu kırılan cam lifli kompozitler.



Bazalt lifli silis dolgulu kompozitler

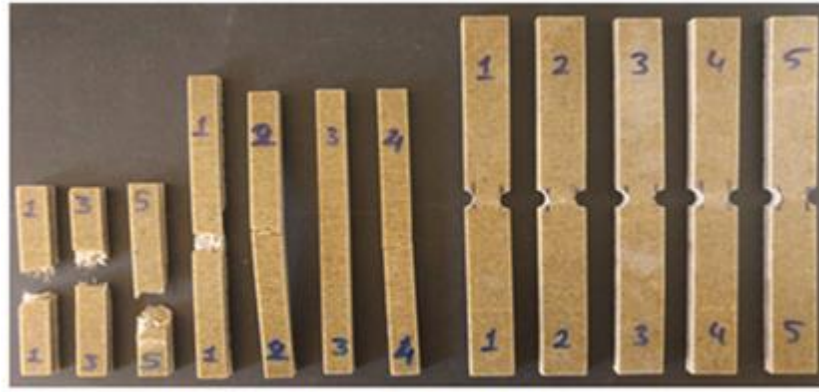


Bazalt lifli bazalt dolgulu kompozitler



Bazalt lifli kuvars dolgulu kompozitler

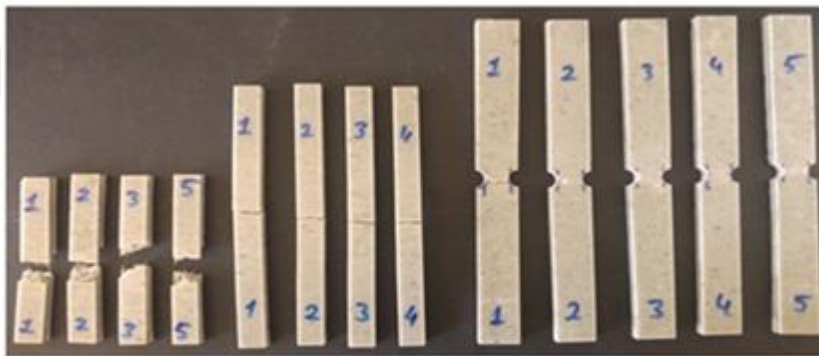
Şekil 3.47. Mekanik testler sonucu kırılan bazalt lifli kompozitler.



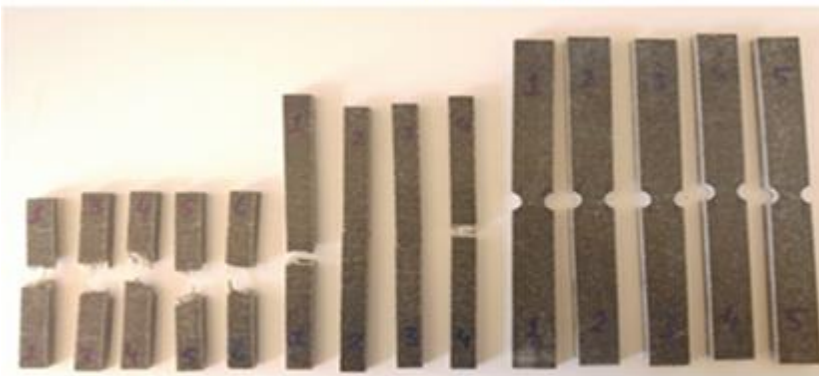
Hibrit lifli kuvars dolgulu kompozitler



Hibrit lifli bazalt dolgulu kompozitler



Hibrit lifli kuvars dolgulu kompozitler



Hibrit lifli ve hibrit dolgulu kompozitler

Şekil 3.48. Mekanik testler sonucu kırılan hibrit lifli kompozitler.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. FİZİKSEL VE KİMYASAL TEST BULGULARI

4.1.1. Doymamış Polyester Reçine Karışımlarına Ait Fiziksel ve Kimyasal Test Bulguları ve Değerlendirme

Farklı oranlarda başlatıcı ve hızlandırıcılar kullanılarak hazırlanan her bir reçine karışımları üzerinde yapılan fiziksel ve kimyasal testler sonucunda elde edilen bulgular ve değerlendirmesi aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir. Reçine karışımları; P: polyester reçine, M: metil etil keton peroksit, C: kobalt oktoat şeklinde simgelenmiştir.

Jelleşme süresi, jelleşme sıcaklığı ve pik ekzoterm sıcaklığı

Jelleşme süresi, jelleşme sıcaklığı ve pik ekzoterm sıcaklığına ait elde edilen sonuçlar sırasıyla, Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı reçine, başlatıcı ve hızlandırıcı oranlarında elde edilen polimerlere ait jelleşme süreleri.

Reçine karışım oranları	Jelleşme süresi (dk)	
	Ortoftalik Reçine	İzoftalik Reçine
P+%1M+%1C	15	13
P+%1,5M+%1C	13	6
P+%2M+%1C	10	6
P+%2,5M+%1C	6	5

Çizelge 4.2. Farklı oranlarda karışımla elde edilen reçinelere ait jelleşme sıcaklıkları.

Reçine karışım oranları	Jelleşme sıcaklığı (°C)	
	Ortoftalik Reçine	İzoftalik Reçine
P+%1M+%1C	28,5	29,3
P+%1,5M+%1C	29	31
P+%2M+%1C	32,8	33
P+%2,5M+%1C	34,1	34,1

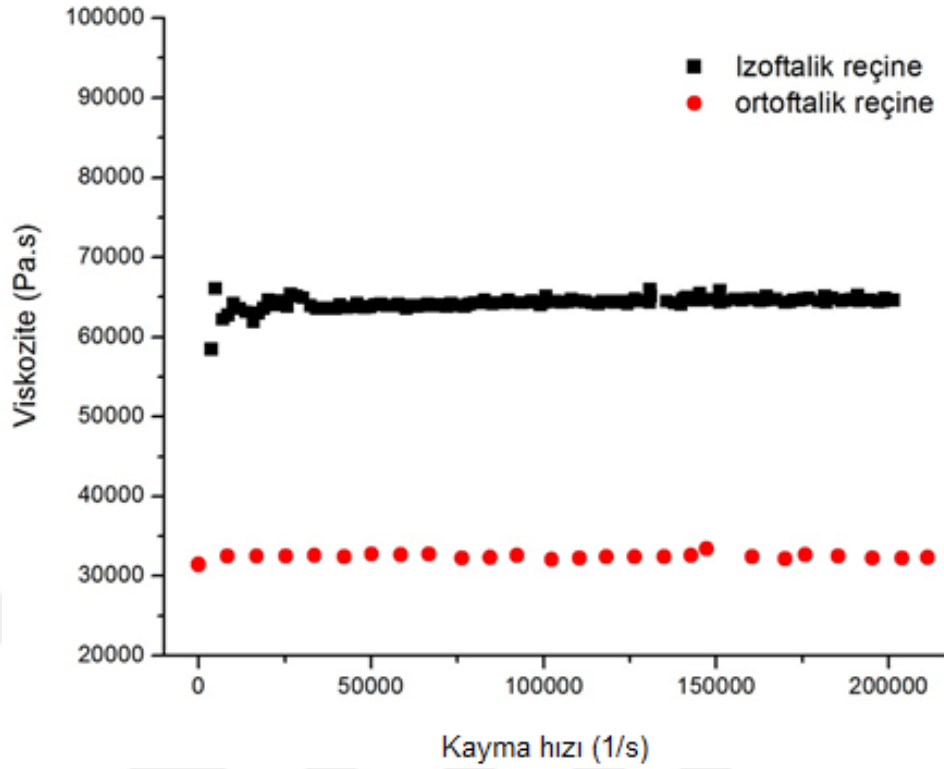
Çizelge 4.3. Farklı oranlarda hazırlanan reçine karışımlarına ait pik ekzoterm sıcaklıkları.

Reçine karışım oranları	Pik ekzoterm sıcaklığı (°C)	
	Ortoftalik Reçine	İzoftalik Reçine
P+%1M+%1C	189,8	161,2
P+%1,5M+%1C	177	181,8
P+%2M+%1C	182,6	204
P+%2,5M+%1C	192,9	203

Çizelge 4.1 incelendiğinde hem izohtalik reçineye hem de ortohtalik reçineye ait jelleşme süresi, başlatıcı oranının artmasıyla azalmıştır. Bu durum başlatıcı oranının artmasıyla radikalik polimerizasyonun ve çapraz bağlanmanın daha hızlı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Çizelge 4.2 incelendiğinde jelleşme sıcaklığı her iki reçinede de MEKP artışına bağlı olarak artış göstermiştir. Jelleşme sıcaklığının artması ise, peroksit radikallerinin miktarının artması sonucu gerçekleşen ekzotermik reaksiyondan kaynaklanmaktadır. Oluşan bu durum diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) termogramlarında genel olarak 2 ekzotermik pik olmak üzere belirtilmiştir. Bu durum, kullanılan peroksit serbest radikallerinin miktarının artması sonucu temas yüzeyi artması ve bu durum sonucunda hızının da artması şeklinde yorumlanmıştır. Reaksiyon hızının artması ile birlikte reaksiyonun sıcaklık artışı daha hızlı olmuştur [152], [153]. Çizelge 4.3 incelendiğinde pik ekzoterm sıcaklığı değerleriyle ortohtalik reçinedeki başlatıcı oranları arasında anlamlı bir değişim görülemedi. Bunun sebebi olarak, ortohtalik reçinedeki bileşenlerin safsızlıkları düşünülebilir. İzohtalik reçinede ise, başlatıcı oranının artması ile beklendiği gibi pik ekzoterm sıcaklığı yükseltmiştir.

Viskozite

Viskozimetre cihazı ile yapılan kinematik ölçümler sonucunda, izohtalik reçinenin viskozite değeri daha yüksek bulunmuştur. Bununla birlikte değerleri tam görebilmek adına kayma gerilimine bağlı akış özelliklerini belirlemek için reometre cihazı ile viskozite ölçümleri de gerçekleştirilmiştir. Doymamış polyester reçinelerin kayma hızına bağlı viskozite değerleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



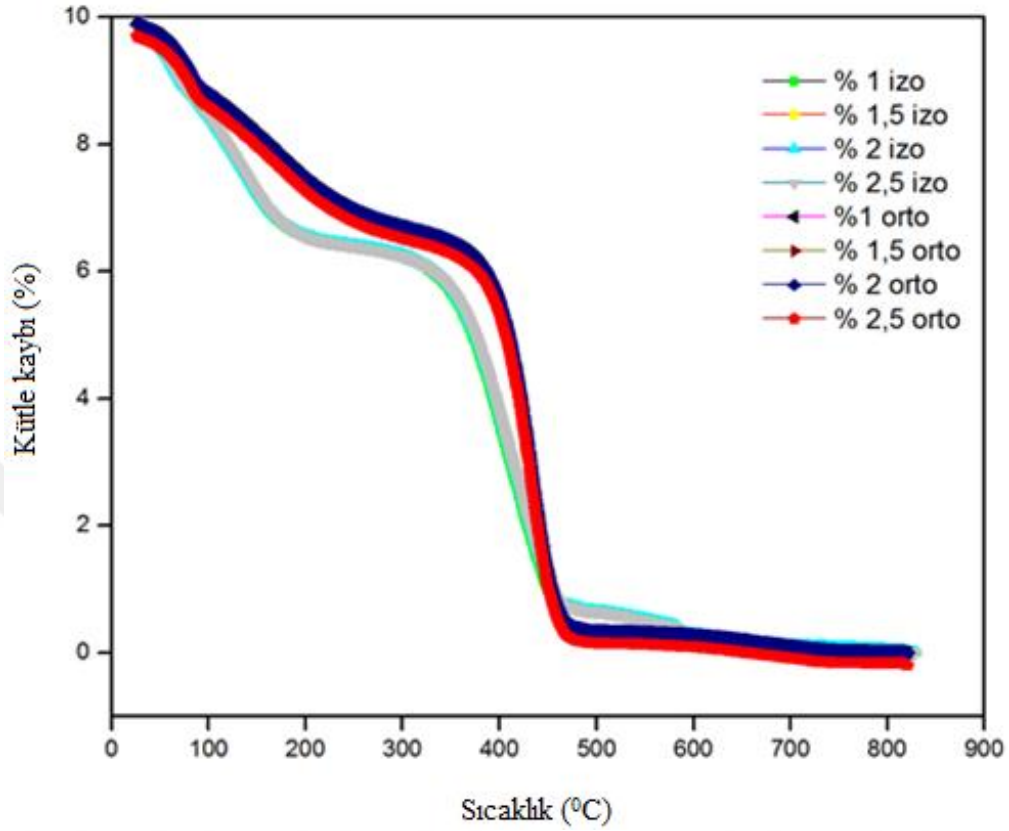
Şekil 4.1. Doymamış polyester reçinelerin kayma hızına bağlı viskozite değerleri.

Şekil 4.1’deki sonuçlar incelendiğinde, izoftalik reçinenin viskozite değerinin, uygulanan kayma hızı değerlerinde 60000 Pa.s-70000 Pa.s aralığında olduğu ölçülmüştür. Ortoftalik reçinenin viskozite değeri ise 30000 Pa.s-35000 Pa.s aralığında olmuştur. Polimerlerin sahip olduğu viskozite değerleri endüstride uygulanabilirlik açısından önemli olmaktadır. Bu durum sonucunda, uygun viskoziteye sahip reçinenin takviye malzemelerini ıslatma potansiyeli, proseste işlenebilme, lifleri sağlam ve uygun bir şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilme gibi özellikleri artar [154]. Bu özelliklerden dolayı daha düşük viskoziteye sahip reçinelerin uygulanabilme potansiyeli daha yüksektir [15]. Çalışmada kullanılan izoftalik reçinenin başlatıcı ve katalizörle etkileştirilmesi sırasında viskozitesinin daha yüksek olması nedeniyle proseste daha düşük uygulanabilme potansiyeline sahip olduğu görülmüştür. Ortoftalik reçine ise izoftalik reçine ile karşılaştırıldığında daha düşük viskozite değerine sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı daha yüksek bir uygulanabilme potansiyeline sahiptir.

Termal özellik

Numunelerin bozunma sıcaklıkları, termal kararlılıkları, stiren içerikleri, bağlayıcı oranları ve nem miktarlarını belirlemek amacıyla termal analiz grubundan TGA ile

sıcaklığa bağlı kütle kaybı belirlenmiştir. Ortoftalik ve izoftalik reçinelere ait kütle sıcaklık ilişkisi Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Ortoftalik ve izoftalik reçinelere ait kütle sıcaklık ilişkisi.

Şekil 4.2’deki TGA analizi incelendiğinde (açık renkli olan renkler izoftalik reçineye ait olurken, koyu renkliler ise ortoftalik reçineye aittir), 2 numune de benzer bozunma eğrisine sahip olmasına rağmen minimal bozunma farklılıkları gösterdiği görülmüştür. İzoftalik ve ortoftalik reçinelerin farklı başlatıcı oranları genel anlamda benzer davranış göstermiştir. Reçine türlerinde ise farklı davranış göstermiştir. Numunelerin bozunma sıcaklıkları 25 °C - 200 °C ve 300 °C - 450 °C aralığında olmak üzere 2 grupta incelenmiştir. 25 °C -200 °C bölgesinde düşük molekül ağırlıklı moleküller yapıdan uzaklaşırken, 300 °C - 450 °C bölgesinde orta molekül ağırlıklı moleküller yapıdan uzaklaşmaktadır. Bu sıcaklık aralığı, ana yapının bozunduğu sıcaklık aralığını kapsamaktadır. 500 °C’ye kadar kısımda %3,5’lik kısmın izoftalik reçinesinde ortamda kaldığı gözlenirken, ortoftalik reçineden elde edilen polimerde ise %3,8 olmuştur. Reçine türleri karşılaştırıldığında, hem birinci bölgede hemde ikinci bölgede, ortoftalik asitten elde edilen kompozitin termal karalılığının izoftalik reçineden elde edilen kompozite göre daha yüksek değerde olduğu gözlenmiştir. Laoubi ve ark. yaptığı çalışmada 130 °C ve

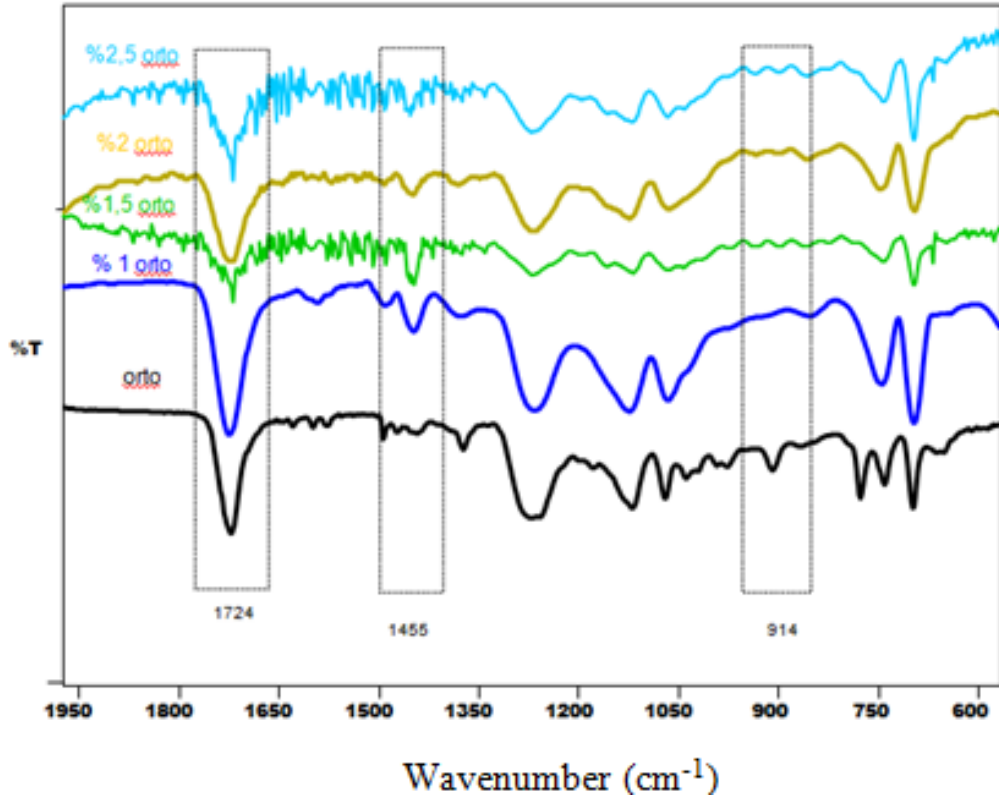
400 °C’de olmak üzere 2 bölgede bozunmanın gerçekleştiğini ve 500 °C ye kadar kısımda %2,45’lik bir kısmının kaldığını gözlemlemişlerdir [155].

TGA Analizi İle Stiren ve Katı madde içeriği

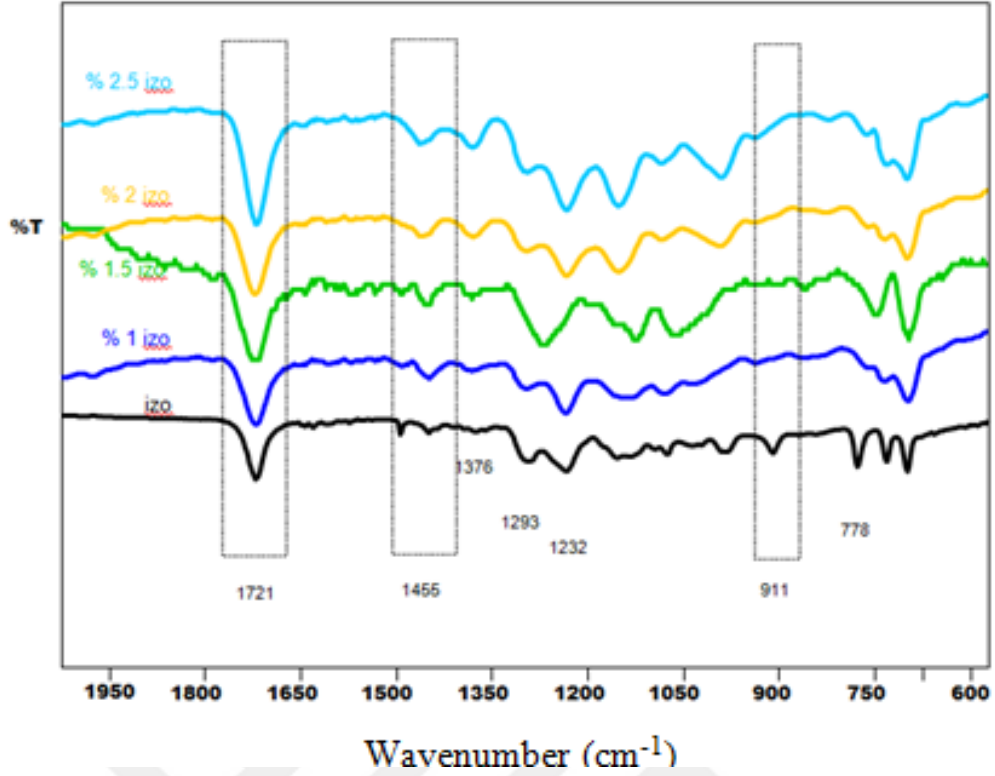
Yapılan termal analiz sonucunda reçinelerin içerisinde çözücü olarak kullanılan stiren miktarı TGA ölçümleri ile belirlenmiştir. Stiren içeriği, doymamış radikalik polimerizasyondaki önemli bileşenlerden biridir. Çalışmada hem polimerleşme ajanı hem de çözücü olarak kullanılan stiren miktarının belirlenmesinde, 150 °C’ye kadar olan bozunmadaki kütle kaybı stiren içeriği olarak değerlendirilir, geri kalan kısım ise katı madde içeriğini vermektedir. Şekil 4.2 incelendiğinde, ortoftalik reçinede bu oran %17,45 olarak belirlenirken, izoftalik reçinede bu oran %28,49 olarak ölçülmüştür.

Polimerizasyon Analizi (Kimyasal analiz)

Çalışmada kullanılan ortoftalik ve izoftalik reçineler üzerinde absorpsiyon piklerine dayalı olarak, moleküler etkileşimleri belirlemek amacıyla gerçekleştirilen FT-IR analizleri sonucunda elde edilen polimer bazlı kompozit malzemelere ait spektrumlar Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Ortoftalik asit polyester reçinesinin polimerleşmesi sonucu elde edilen kompozitlerinin FT-IR spektrumu



Şekil 4.4. İzofthalik asit polyester reçinesinin polimerleşmesi sonucu elde edilen kompozitlerin FT-IR spektrumu.

Spektrumlar incelendiğinde, ortofthalik reçineden elde edilen kompozitte karbonil grubundaki C=O asimetrik gerilme titreşimi, 1727 cm^{-1} gözlenirken, C-O-C etkileşimleri 1376 cm^{-1} , C-O simetrik gerilme titreşimi ise 1118 cm^{-1} 'de gözlenmiştir. Bu değerler izofthalik reçineden elde edilen kompozitte daha düşük dalga sayılarında gözlenmiştir. Polimerleşme reaksiyonunda önemli bir pik olan ve polimerizasyon karakterini belirleyen stirene ait karakteristik C=C titreşimi ortofthalik ve izofthalik reçineden elde edilen kompozitte sırasıyla 914 cm^{-1} ve 912 cm^{-1} 'de gözlenmiştir. Bu pikin başlatıcı ile reaksiyon sonrasında spektrumda görülmemesi, polimerleşme reaksiyonunun gerçekleştiğini ifade etmektedir [156]. 1455 cm^{-1} 'de gözlenen pik ise CH₂ bantlarına aittir. Polimerleşme sonrasında bu bandın şiddetinde artma gözlenmiştir. Bu artış, yapıdaki karbon zincirinin uzunluğunun arttığı anlamına gelmektedir [120]. Fakat pik şiddetleri ile başlatıcı oranları arasında, anlamlı bir ilişki gözlenmemiştir. Başlatıcı oranlarının farklılığı ile piklerin geçirgenlikleri arasında anlamlı bir ilişki görülmemiştir.

4.2. MEKANİK TEST BULGULARI

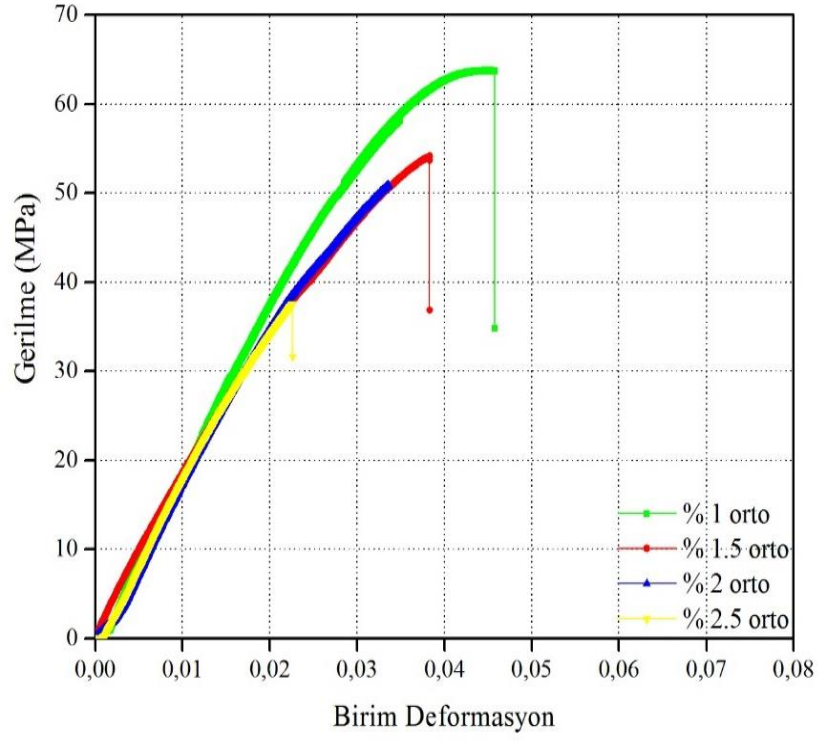
4.2.1. Dolgusuz Reçine Karışımlarının Mekanik Analiz Test Bulgularının Değerlendirilmesi

Çalışmada, farklı başlatıcı oranlarında hazırlanan ortoftalik ve izoftalik reçine karışımlarından üretilen kompozitler üzerinde çekme dayanımı, çekme E-modülü, eğilme dayanımı, eğilme E-modülü ve kopma uzaması testleri gerçekleştirilmiştir. Bu kompozitlerin tüm mekanik özelliklerine ait sonuçlar Çizelge 4.4’de birlikte verilmiştir.

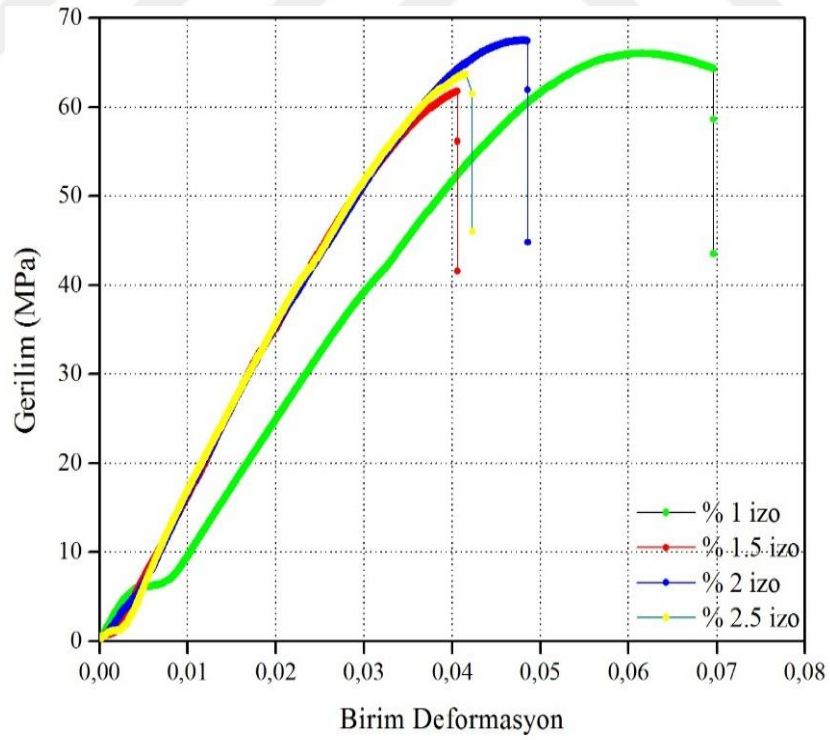
Çizelge 4.4. Farklı başlatıcı oranlarında hazırlanan ortoftalik ve izoftalik reçine karışımlarının mekanik özellikleri (7 günlük).

Mekanik Özellikler	Birim	Reçineler ve Karışım Oranları							
		İzoftalik				Ortoftalik			
		MEKP (%)				MEKP (%)			
		1,0	1,5	2,0	2,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Çekme E modülü	(MPa)	1783	2322	2345	2529	2654	2108	2184	2446
Çekme dayanımı	(Mpa)	66	62	68	62	64	54	52	38
Eğilme dayanımı	(Mpa)	117	123	123	112	116	117	100	83
Eğilme E modülü	(Mpa)	5311	5399	5410	5523	5180	4859	5592	4881
Kopma uzaması (çekme)	(%)	7,35	5,36	4,96	4,41	4,36	4,12	3,75	3,03

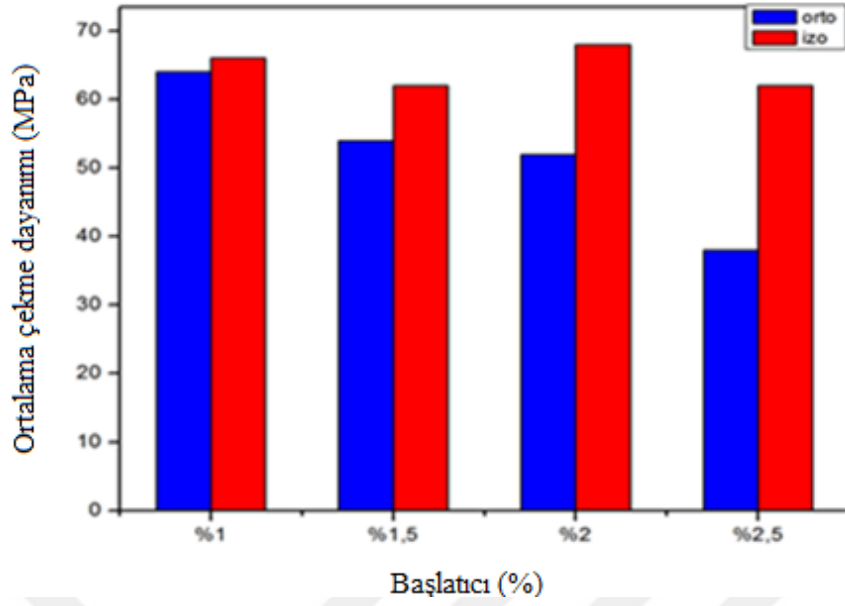
Ortoftalik reçineden elde edilen kompozitlere ait çekme dayanımı verilerine ait gerilme-birim deformasyon eğrileri Şekil 4.5’ te izoftalik reçineye ait çekme gerilmesi birim deformasyon eğrisi Şekil 4.6’da verilmiştir. Reçinelere ait ortalama çekme dayanımı ve çekme E modülleri sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilmiştir.



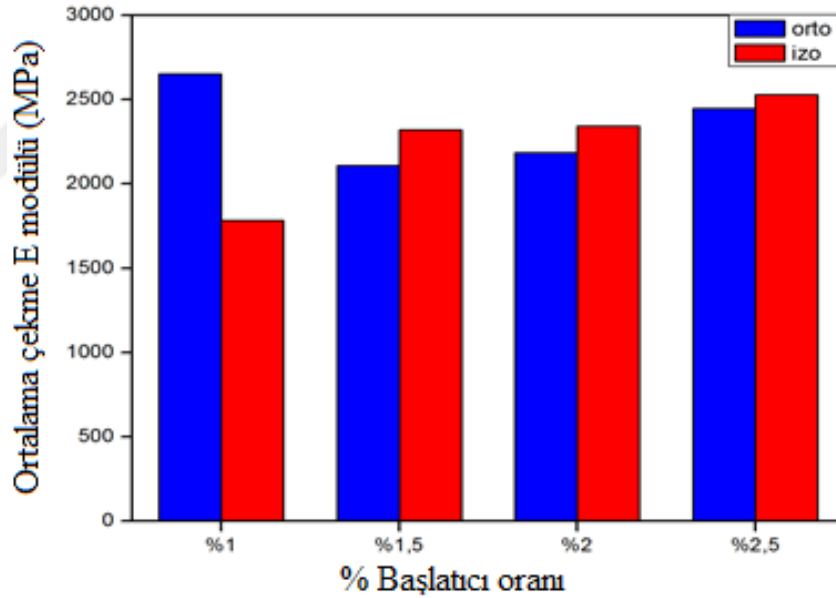
Şekil 4.5. Ortoftalik reçineden üretilen kompozitin çekme gerilmesi birim deformasyon eğrisi.



Şekil 4.6. İzofthalik reçineden üretilen kompozitin çekme gerilme-birim deformasyon eğrisi.



Şekil 4.7. Ortoftalik ve izoftalik reçineden üretilen kompozitlerin çekme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.8. Ortoftalik ve izoftalik reçineden üretilen kompozitlerin çekme elastikiyet modülü değerlerinin karşılaştırılması.

Çekme dayanımı

Ortoftalik reçine karışımlarında en düşük çekme dayanımı değeri %2,5 başlatıcı oranında **38 MPa** olarak elde edilmiş, en yüksek çekme dayanımı değeri ise %1,0 başlatıcı oranında **64 MPa** olarak elde edilmiştir. Ayrıca başlatıcı oranı arttırıldıkça çekme dayanımlarının da azaldığı tespit edilmiştir.

İzoftalik reçine karışımlarında en düşük çekme dayanımı değeri %1,5 başlatıcı oranında **62 MPa** olarak elde edilmiştir. En yüksek çekme dayanımı değeri %2 başlatıcı oranında **68 MPa** olarak belirlenirken, % 1,0 başlatıcı oranında ise bu değer **66 MPa** bulunmuştur. Çekme dayanımları arasındaki farkın düşük olmasından dolayı izoftalik reçine için en uygun başlatıcı oranının %1,0'lık reçine karışımı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, başlatıcı oranı arttırıldıkça çekme dayanımlarının genel olarak azaldığı tespit edilmiştir.

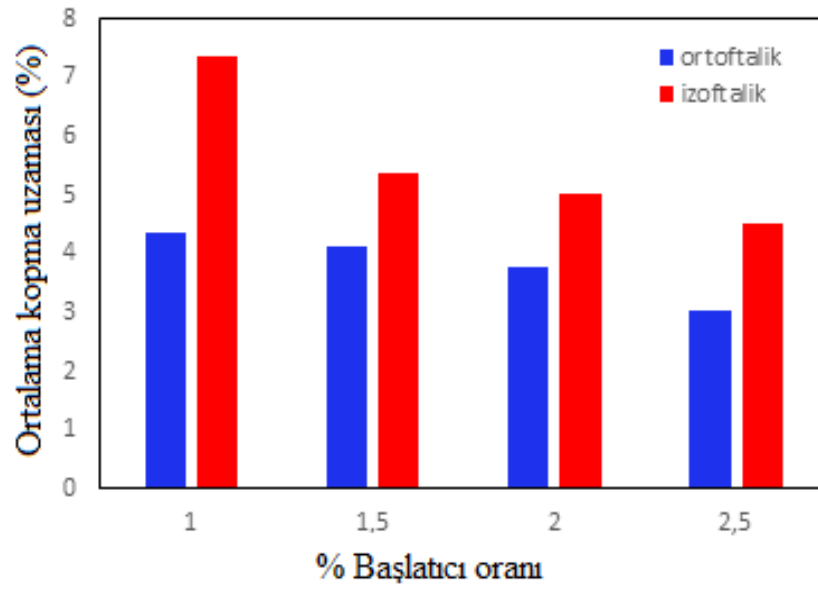
İzoftalik reçine karışımlarında %2 başlatıcı oranında elde edilen en yüksek çekme dayanımı değeri, %1,0 başlatıcı oranında elde edilen çekme dayanımı değerinden **%3,03** daha yüksek olarak belirlenmiştir. İzoftalik reçine karışımlarında %2 başlatıcı oranında elde edilen en yüksek çekme dayanımı değeri, ortoftalik reçinenin en yüksek çekme dayanımı değerinden **%6,25** daha yüksek olarak belirlenmiştir. % 1,0 başlatıcı oranında ise, izoftalik reçinenin çekme dayanımı, ortoftalik reçinenin çekme dayanımı değerinden **%3,125** daha yüksek olarak belirlenmiştir. Ateş, Aztekin ve Çakır, ham polyester reçine içerisine farklı oranlarda başlatıcı ve hızlandırıcı ilave ederek hazırladıkları karışımlarda, başlatıcının üst sınırı olarak belirlenen %3 değerinin sertleşme anında belirgin çatlamalara sebep olduğunu, alt seviye olarak alınan %0,5 değerinde ise katılaşmada problemler ortaya çıktığını belirlemişlerdir [106]. Sonuç olarak, bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçları destekleyecek şekilde, reçine, başlatıcı ve hızlandırıcı oranları değişiminin, mekanik özellikleri etkilediğini tespit etmişlerdir.

Çekme E modülü

İzoftalik reçine karışımlarında en düşük çekme E-modülü değerinin %1,0 başlatıcı oranında **1783 MPa** olduğu, en yüksek çekme E modülü değerinin ise %2,5 başlatıcı oranında **2529 MPa** olduğu gözlenmiştir. Ayrıca başlatıcı oranı arttırıldıkça çekme E-modülünün de arttığı tespit edilmiştir. Ortoftalik reçine karışımlarında ise en düşük çekme E-modülü değerinin %1,5 başlatıcı oranında **2108 MPa** olarak elde edildiği, en yüksek çekme E-modülü değeri ise %1,0 başlatıcı oranında **2654 MPa** olarak bulunmuştur. Ateş, Aztekin ve Çakır, bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçları destekleyecek şekilde, reçine, başlatıcı ve hızlandırıcı oranları değişiminin mekanik özellikleri etkilediğini tespit etmişlerdir [106].

Kopma uzaması

Farklı başlatıcı oranlarında hazırlanan ortoftalik ve izoftalik reçine karışımlarının kopma uzaması değerleri Şekil 4.9'da verilmiştir.

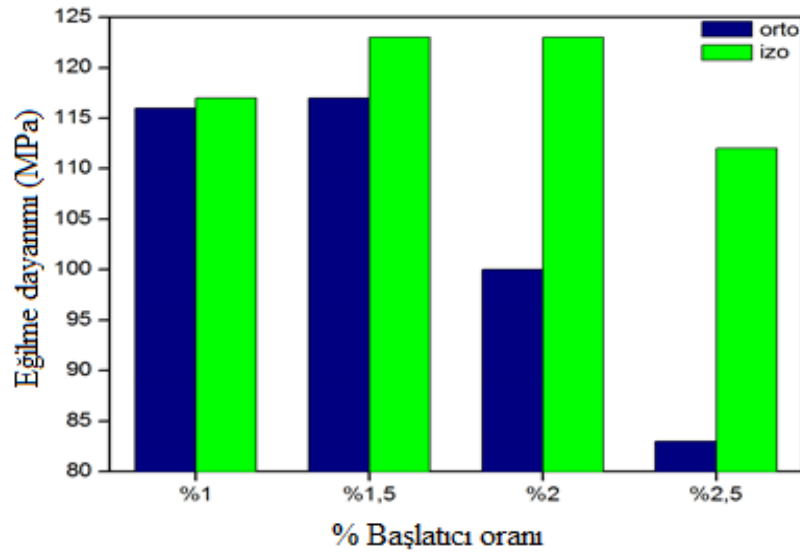


Şekil 4.9. Ortoftalik ve izoftalik reçineden üretilen kompozitlerin kopma uzama değerlerinin karşılaştırılması.

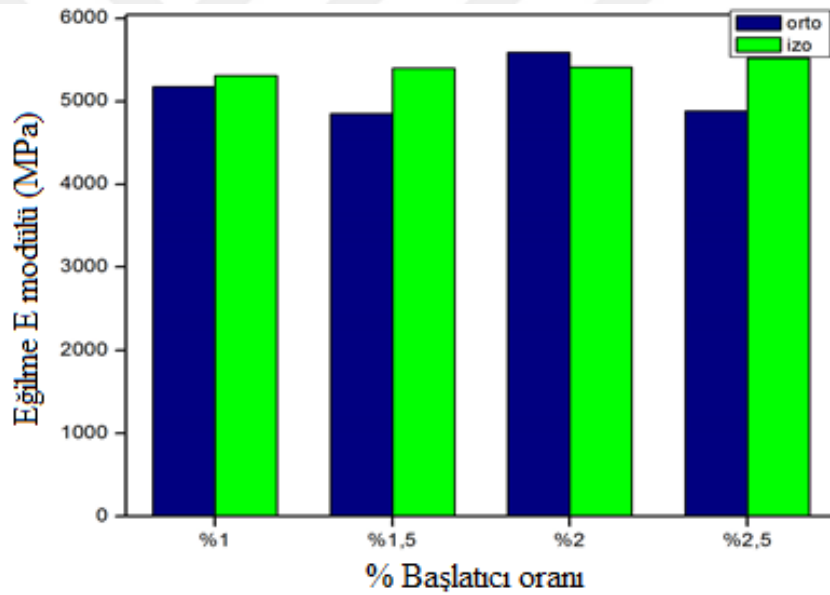
Çalışmada kullanılan ham polyester reçinesi ile farklı başlatıcı oranlarında hazırlanan reçine karışımlarının kopma uzaması değerleri incelendiğinde hem ortoftalik hem de izoftalik reçinelerde başlatıcı oranlarının arttırılmasıyla elde edilen kompozitlerin kopma uzaması değerlerinde azalma görülmüştür. Ayrıca tüm karışımlarda izoftalik reçineden elde edilen kompozitlerin kopma uzamalarının ortoftalik reçinelerin kopma uzamalarından daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Eğilme dayanımı ve eğilme E modülü

Farklı başlatıcı oranlarındaki reçinelerden elde edilen eğilme dayanımı ve eğilme modülüne ait sonuçlar sırasıyla Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.10. Ortoftalik ve izoftalik reçine karışımlarının eğilme dayanımlarının karşılaştırılması.



Şekil 4.11. Ortoftalik ve izoftalik reçine karışımlarının eğilme E modülü değerlerinin karşılaştırılması.

İzoftalik reçinelerde en düşük eğilme dayanımı değeri %2,5 başlatıcı oranında **112 MPa** olarak bulunmuştur. En yüksek eğilme dayanımı değeri ise %1,5 ve %2,0 başlatıcı oranında **123 MPa** olarak elde edilmiştir. Ortoftalik reçinelerde ise en düşük eğilme dayanımı değerinin %2,5 başlatıcı oranında **83 MPa** olarak elde edildiği, en yüksek eğilme dayanımı değerinin ise %1,5 başlatıcı oranında **117 MPa** olarak elde edildiği görülmüştür.

İzoftalik reçine karışımlarında %1,5 ve %2 başlatıcı oranında elde edilen en yüksek eğilme dayanımı değeri, %1,0 başlatıcı oranında elde edilen eğilme dayanımı değerinden **%5,128** daha yüksek olarak belirlenmiştir. İzoftalik reçine karışımlarında %1,5 ve %2 başlatıcı oranında elde edilen en yüksek eğilme dayanımı değeri, ortoftalik reçinenin %1,5 başlatıcı oranında elde edilen en yüksek eğilme dayanımı değerinden **%5,128** daha yüksek olarak belirlenmiştir. % 1,0 başlatıcı oranında ise, izoftalik reçinenin eğilme dayanımı, ortoftalik reçinenin eğilme dayanımı değerinden **%0,86** daha yüksek olarak belirlenmiştir.

Eğilme E-Modülü değeri incelendiğinde, izoftalik reçine için en yüksek değer %2,5 başlatıcı oranında, **5523 MPa** olarak elde edilirken, en düşük değer ise %1,0 başlatıcı oranında **5311 MPa** olarak elde edilmiştir. Ortoftalik reçinelerde ise en düşük eğilme E-modülü değerinin %1,5 başlatıcı oranında **4859 MPa** olarak elde edildiği, en yüksek eğilme E-modülü değerinin ise %2,0 başlatıcı oranında **5592 MPa** olarak elde edildiği görülmüştür. Literatürde, Kaundal ve ark., eğilme E-modülü değerini **~1750 MPa** olarak belirlemiştir [123]. Marcovich ve ark., ise eğilme E-modülü değerini, **3700 MPa** olarak bulmuşlardır [125]. Ateş, Aztekin ve Çakır, bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçları destekleyecek şekilde, reçine, başlatıcı ve hızlandırıcı oranları değişiminin, mekanik özellikleri etkilediğini tespit etmişlerdir [106].

Ortoftalik ve izoftalik reçinelerin çekme ve eğilme özellikleri incelendiğinde, izoftalik reçinelerin mekanik özelliklerinin ortoftalik reçinelerin mekanik özelliklerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçların literatürle uyumlu olduğu görülmüş ve bu sonucun, izoftalik reçinelerin ortoftalik reçinelerden genellikle daha lineer biçimde ve daha yüksek moleküler ağırlıklı polimerler olmalarından kaynaklanabileceği belirtilmiştir [31].

Mevcut çalışmada, doymamış polyesterlerin moleküler yapılarının farklı olması, üretim süreçlerinde içerdikleri katkı maddelerinin farklılık göstermesi, polimerleşme için kullanılan başlatıcı ve hızlandırıcı türleri ile oranlarının farklılığı, karışımların iyi homojenize edilmesi için uygulanan ön işlemler ve kompozitlerin kürleşme şartları gibi faktörlerin kompozitin mekanik özelliklerini etkilediği gözlenmiştir.

Çalışmada mevcut literatürden farklı olarak, uygulanan ön işlemler daha kapsamlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla reaksiyon hızını artırmak ve verimli reaksiyon gerçekleştirmek amacıyla manyetik karıştırıcı ile birlikte ultrasonik homojenizatör ve

mekanik karıştırıcı kullanmak suretiyle temas yüzeyinin artırılması, optimum etkileşme ve homojenizasyon sağlanmaya çalışılmıştır. Çünkü temas yüzeyinin artırılması, reaksiyondaki moleküllerin birbirleri ile çarpışmasını artırarak daha homojen bir kompozit elde edilmesini sağlamaktadır [157].

4.2.2. Dolgulu Reçine Karışımlarının Basınç Dayanımı Değerlerine Ait Test Bulgularının Değerlendirilmesi

Silis, bazalt, kuvars ve hibrit dolgulu reçine karışımlarının basınç dayanımları sırasıyla, Çizelge 4.5, Çizelge 4.6, Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8’de verilmiştir. Farklı tane sınıflarında dökülmüş dolgulu reçine karışımlarının, başlatıcı oranındaki değişime bağlı ortalama basınç dayanımlarının birlikte gösterimi Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.5. Silis dolgulu reçine karışımlarının basınç dayanımları.

Numunenin Adı	Tane Sınıfı	Dolgu Türü	Basınç Dayanımı (MPa)
P + %1M + %1C	AFS 40-45	Silis	115,576
P + %1M + %1C	AFS 40-45	Silis	116,310
P + %1,5M + %1C	AFS 40-45	Silis	119,646
P + %1,5M + %1C	AFS 40-45	Silis	117,088
P + %2M + %1C	AFS 40-45	Silis	123,831
P + %2M + %1C	AFS 40-45	Silis	123,670
P + %1M + %1C	F0,8	Silis	131,660
P + %1M + %1C	F0,8	Silis	129,652
P + %1,5M + %1C	F0,8	Silis	103,420
P + %1,5M + %1C	F0,8	Silis	120,544
P + %2M + %1C	F0,8	Silis	101,797
P + %2M + %1C	F0,8	Silis	116,344
P + %1M + %1C	F1,0	Silis	130,335
P + %1M + %1C	F1,0	Silis	126,488
P + %1,5M + %1C	F1,0	Silis	122,016
P + %1,5M + %1C	F1,0	Silis	121,885
P + %2M + %1C	F1,0	Silis	105,727
P + %2M + %1C	F1,0	Silis	118,625

P: Polyester reçinesi; M: Metil Etil Keton Peroksit; C: Kobalt Oktoat

Çizelge 4.6. Bazalt dolgulu reçine karışımlarının basınç dayanımları.

Numunenin Adı	Tane Sınıfı	Dolgu Türü	Basınç Dayanımı (MPa)
P + %1M + %1C	AFS 40-45	Bazalt	130,340
P + %1M + %1C	AFS 40-45	Bazalt	130,513
P + %1,5M + %1C	AFS 40-45	Bazalt	122,609
P + %1,5M + %1C	AFS 40-45	Bazalt	124,8
P + %2M + %1C	AFS 40-45	Bazalt	114,712
P + %2M + %1C	AFS 40-45	Bazalt	112,429
P + %1M + %1C	F0,8	Bazalt	129,358
P + %1M + %1C	F0,8	Bazalt	125,099
P + %1,5M + %1C	F0,8	Bazalt	116,769
P + %1,5M + %1C	F0,8	Bazalt	120,508
P + %2M + %1C	F0,8	Bazalt	125,352
P + %2M + %1C	F0,8	Bazalt	122,399
P + %1M + %1C	F1,0	Bazalt	128,586
P + %1M + %1C	F1,0	Bazalt	129,789
P + %1,5M + %1C	F1,0	Bazalt	123,735
P + %1,5M + %1C	F1,0	Bazalt	124,639
P + %2M + %1C	F1,0	Bazalt	119,681
P + %2M + %1C	F1,0	Bazalt	121,928

Çizelge 4.7. Kuvars dolgulu reçine karışımlarının basınç dayanımları.

Numunenin Adı	Tane Sınıfı	Dolgu Türü	Basınç Dayanımı (MPa)
P + %1M + %1C	AFS 40-45	Kuvars	127,765
P + %1M + %1C	AFS 40-45	Kuvars	132,059
P + %1,5M + %1C	AFS 40-45	Kuvars	110,832
P + %1,5M + %1C	AFS 40-45	Kuvars	113,961
P + %2M + %1C	AFS 40-45	Kuvars	113,040
P + %2M + %1C	AFS 40-45	Kuvars	116,721
P + %1M + %1C	F0,8	Kuvars	128,994
P + %1M + %1C	F0,8	Kuvars	129,598
P + %1,5M + %1C	F0,8	Kuvars	129,264
P + %1,5M + %1C	F0,8	Kuvars	125,783
P + %2M + %1C	F0,8	Kuvars	124,697
P + %2M + %1C	F0,8	Kuvars	125,855
P + %1M + %1C	F1,0	Kuvars	115,967
P + %1M + %1C	F1,0	Kuvars	117,874
P + %1,5M + %1C	F1,0	Kuvars	120,971
P + %1,5M + %1C	F1,0	Kuvars	120,917
P + %2M + %1C	F1,0	Kuvars	121,949
P + %2M + %1C	F1,0	Kuvars	121,767

Çizelge 4.8. Hibrit dolgulu reçine karışımlarının basınç dayanımları.

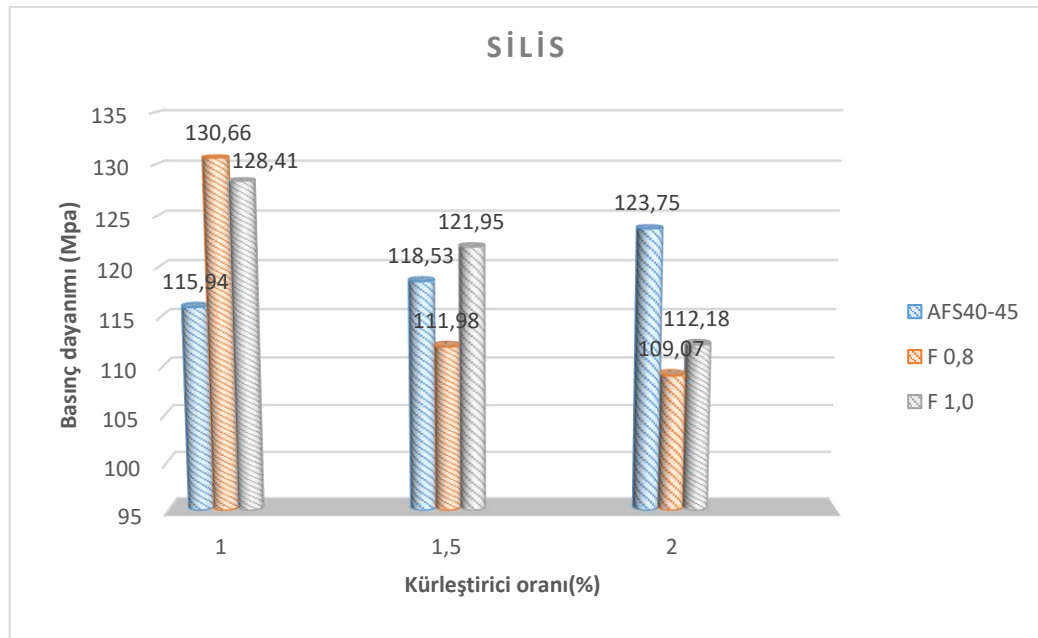
Numunenin Adı	Numunenin Adı	Dolgu Türü	Basınç Dayanımı (MPa)
P + %1M + %1C	%60 Kuvars + %40 Silis	Hibrit	124,018
	%60 Kuvars + %40 Silis	Hibrit	125,778
	%60 Bazalt + %40 Silis	Hibrit	127,562
	%60 Bazalt + %40 Silis	Hibrit	127,279
	%60 Bazalt + %40 Kuvars	Hibrit	109,004
	%60 Bazalt + %40 Kuvars	Hibrit	110,949

Çizelge 4.9. Farklı tane sınıflarında dökülmüş dolgulu reçine karışımlarının, başlatıcı oranındaki değişime bağlı ortalama basınç dayanımları.

Başlatıcı Oranı (%)	BASINÇ DAYANIMLARI (MPa)											
	AFS 40-45			FULLER 0,8			FULLER 1,0			HİBRİT KARIŞIMLAR		
	Silis	Bazalt	Kuvars	Silis	Bazalt	Kuvars	Silis	Bazalt	Kuvars	%60 K + %40 S	%60 B + %40 S	%60 B + %40 K
1	116	130	130	131	127	129	128	129	117	125	127	110
1,5	118	124	112	112	119	128	122	124	121			
2	124	116	115	109	124	125	112	121	122			

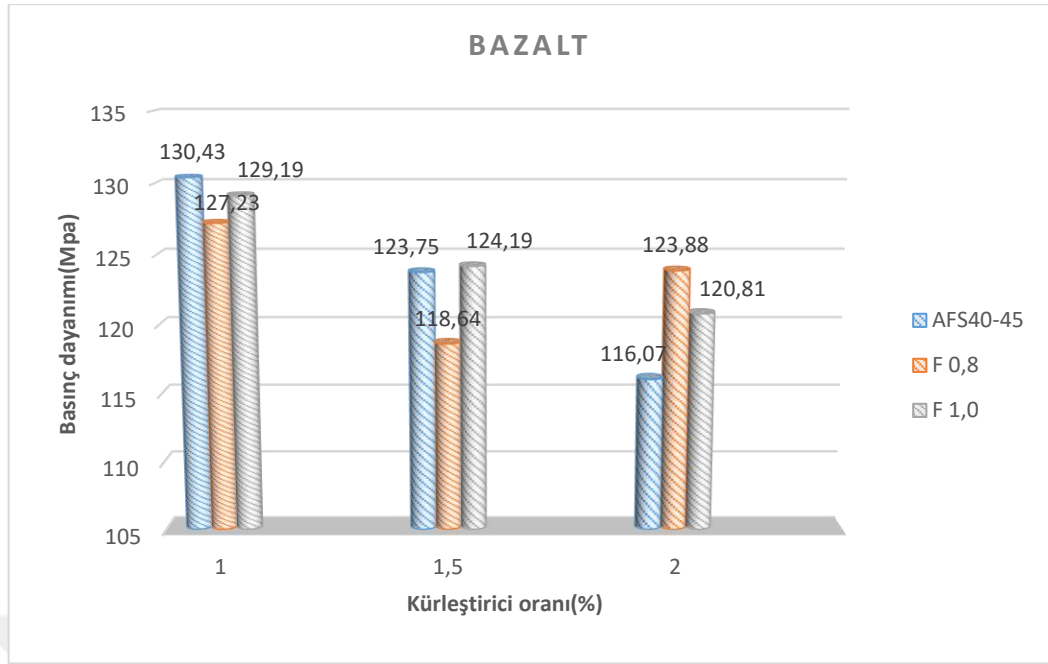
K: kuvars; B: bazalt; S: silis

“AFS40-45, F0,8 ve F1,0” tane dağılımına sahip silis, bazalt ve kuvars dolgulu reçine karışımlarının, başlatıcı oranındaki değişime bağlı ortalama basınç dayanımlarındaki değişimler sırasıyla, Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17’de verilmiştir. Farklı karışım oranlarında hazırlanmış “F 0,8” tane sınıfındaki hibrit dolgulu reçine karışımlarının, “%1,0” başlatıcı oranındaki basınç dayanımlarındaki değişim ise Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Tüm dolgulu kompozitler içerisinde ilk beş sıradaki basınç dayanımlarını gösteren grafik Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



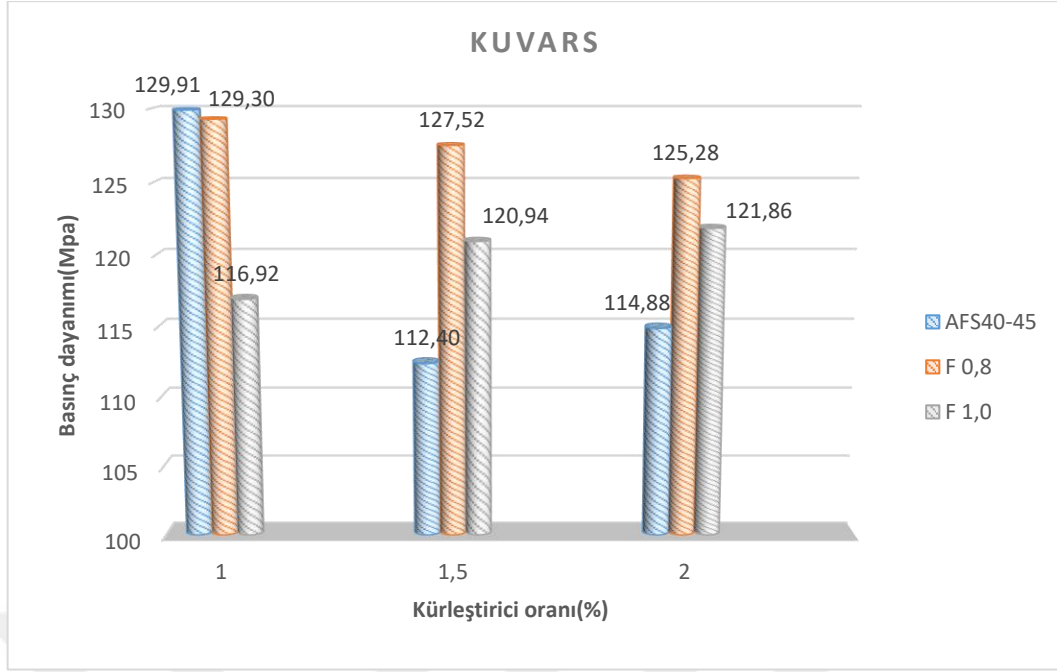
Şekil 4.12. Farklı tane dağılımlarına sahip “silis dolgulu” reçine karışımlarının, başlatıcı oranındaki değişime bağlı ortalama basınç dayanımlarındaki değişim.

“AFS 40-45” tane dağılımına sahip silis dolgulu reçine karışımları üzerinde yapılan basınç testlerinde, başlatıcı oranı arttıkça basınç dayanımlarının da arttığı görülmüştür. %1,0 başlatıcı oranında en düşük basınç dayanımı değeri elde edilmiş ve bu değer **115,94 MPa** olarak belirlenmiştir. “%1,5” başlatıcı oranında basınç dayanımı **118,37 MPa** değerine yükselmiş, “%2,0” başlatıcı oranında ise en yüksek basınç dayanımı değerine ulaşarak **123,75 MPa** değerine ulaşmıştır. Artış yüzdesi sırasıyla, **%2,09 ve %6,73** olmuştur. Ancak, başlatıcı oranının daha da arttırılmasıyla, karışımın ısı değeri daha da yükseleceğinden ve büzülme miktarı da artacağından dolayı dayanımın da düşeceği düşünülmektedir. “F 0,8 ve F 1,0” tane sınıfındaki silis dolgulu reçine karışımlarında en yüksek ilk iki basınç dayanımı değeri “%1,0” başlatıcı oranında elde edilmiş ve sırasıyla **130,66 MPa ve 128,41 MPa** olarak belirlenmiştir. Ancak başlatıcı oranının arttırılmasıyla, her iki tane sınıfındaki karışımların basınç dayanımlarının da azaldığı görülmüştür. Sonuç olarak, tüm silis dolgulu reçine karışımları içerisinde, en yüksek basınç dayanımı “F0,8” tane dağılımında ve “%1,0” başlatıcı oranında elde edilmiş ve bu dayanım değeri, “AFS 40-45” tane dağılımındaki silis dolgulu kompozitten **%12,69** daha yüksek olarak elde edilmiştir. F1,0 tane dağılımında ve “%1,0” başlatıcı oranında elde edilen dayanım değeri ise, “AFS 40-45” tane dağılımındaki silis dolgulu kompozitten **%10,75** daha yüksek olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, “AFS 40-45” tane dağılımı uniform tane dağılımına sahip olduğundan, F0,8 ve F 1,0 tane dağılımları ise daha iyi derecelenmiş tane dağılımına sahip olduğundan dolayı sadece tane dağılımlarında yapılan iyileştirmeye dayanım değerlerinin artış gösterdiği görülmüştür.



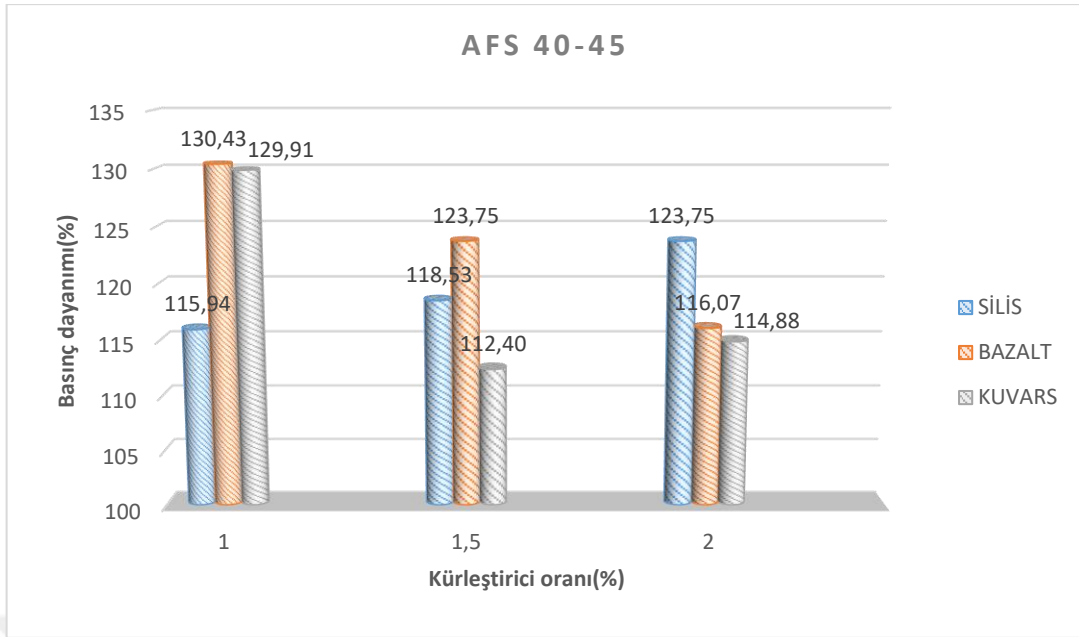
Şekil 4.13. Farklı tane dağılımlarına sahip “bazalt dolgulu” reçine karışımlarının, başlatıcı oranındaki değişime bağlı ortalama basınç dayanımlarındaki değişim.

Bazalt dolgulu reçine karışımları içerisinde her bir farklı tane sınıfı için en yüksek basınç dayanımı değerleri, “%1,0” başlatıcı oranında elde edilmiştir. Başlatıcı oranı arttıkça tüm tane sınıfındaki karışımlara ait basınç dayanımı değerleri de azalmıştır. En yüksek basınç dayanımı değeri “AFS40-45” tane sınıfındaki karışımında, **130,43 MPa** olarak belirlenmiştir. İkinci en yüksek dayanım ise “F 1,0” tane sınıfındaki karışımında, **129,19 MPa** olarak belirlenmiştir. Üçüncü en yüksek dayanım ise “F 0,8” tane sınıfındaki karışımında, **127,73 MPa** olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, bazalt dolgusu kullanılarak farklı tane dağılımlarında üretilen kompozitlerin dayanım değerlerinde anlamlı farklılıklar gözlenmediğinden tane dağılımı değişimiyle dayanım dayanım değerlerinde önemli bir değişimin olmadığı görülmüştür.



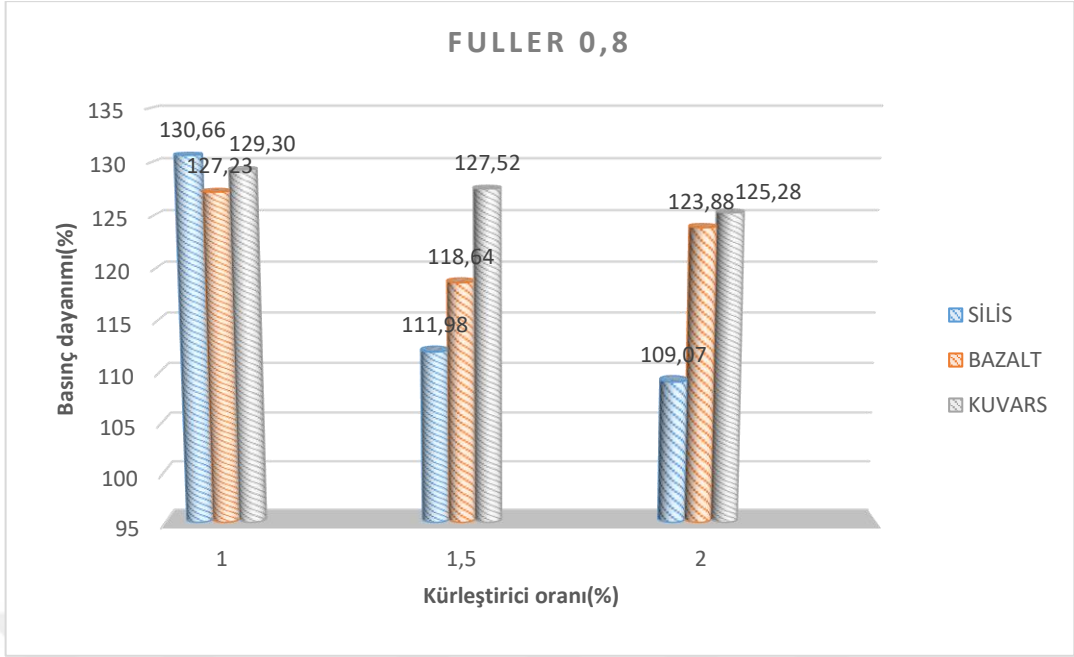
Şekil 4.14. Farklı tane dağılımlarına sahip “kuvars dolgulu” reçine karışımlarının, başlatıcı değişime bağlı ortalama basınç dayanımlarındaki değişim.

Kuvars dolgulu reçine karışımları içerisinde her bir farklı tane sınıfı için, en yüksek basınç dayanımı değerleri, “AFS 40-45” ve “F 0,8” tane sınıfında ve “%1,0” başlatıcı oranında elde edilmiştir. Başlatıcı oranı arttıkça “AFS 40-45” ve “F 0,8” tane sınıfındaki karışımlara ait basınç dayanımı değerleri azalırken, “F 1,0” tane sınıfındaki karışımlarda artış meydana gelmiştir. En yüksek basınç dayanımı değeri “AFS40-45” tane sınıfındaki karışımda **129,91 MPa** olarak belirlenmiştir. İkinci en yüksek dayanım ise “F 0,8” tane sınıfındaki karışımda **129,30 MPa** olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, kuvars dolgusu kullanılarak farklı tane dağılımlarında üretilen kompozitlerin dayanım değerlerinde anlamlı farklılıklar gözlenmediğinden tane dağılımının dayanım değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir.



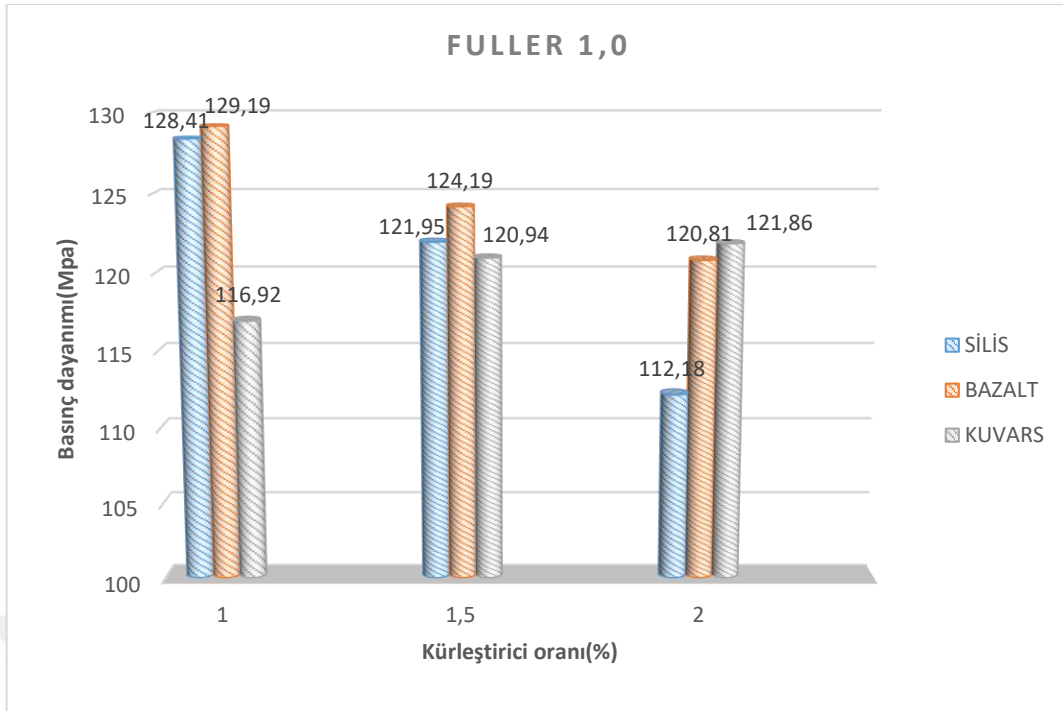
Şekil 4.15. AFS40-45 tane dağılımına sahip farklı türdeki dolgulu reçine karışımlarının, başlatıcı oranındaki değişime bağlı ortalama basınç dayanımlarındaki değişim.

“AFS 40-45” tane sınıfındaki dolgulu reçine karışımlarında en yüksek basınç dayanımları, bazalt ve kuvars dolgularında ve “%1,0” başlatıcı oranında elde edilmiştir. %1 başlatıcı oranındaki bazalt dolgulu kompozitlerin dayanım değeri silis dolgulu kompozitlerden **%12,49** daha yüksek olarak belirlenirken, kuvars dolgulu kompozitlerin dayanım değeri silis dolgulu kompozitlerden **%12,05** daha yüksek olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, “AFS 40-45” tane dağılımına sahip kompozitlerde dolgu türünün basınç dayanımında önemli bir etkiye sahip olduğu ve bazalt ve kuvars dolgularının kullanılması durumunda daha yüksek dayanımların elde edildiği görülmüştür.



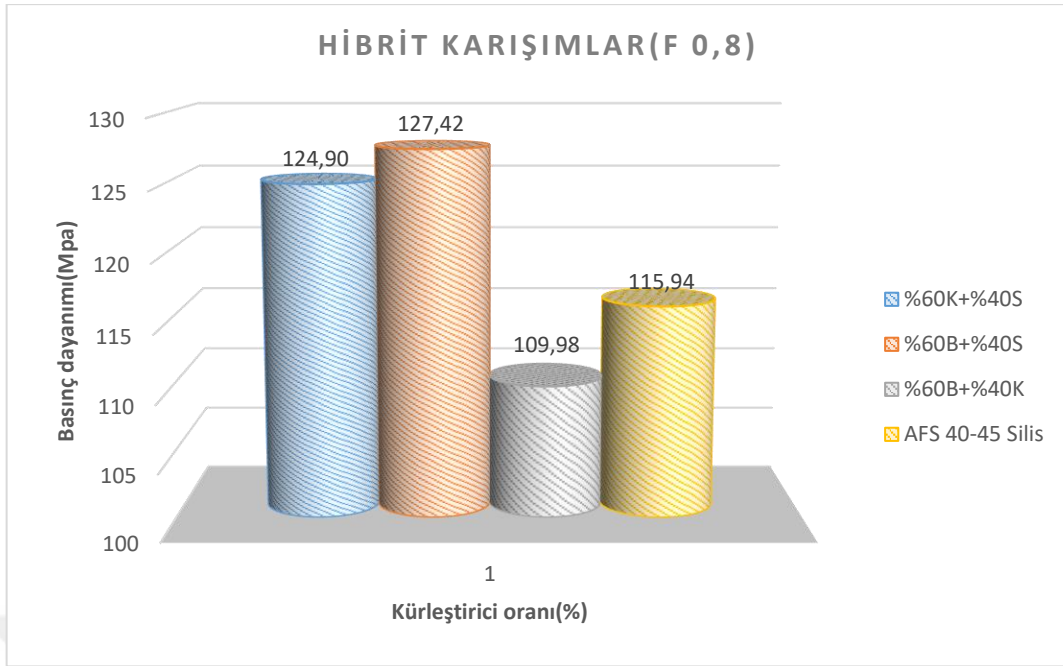
Şekil 4.16. “F0,8” tane dağılımına sahip farklı türdeki dolgulu reçine karışımlarının, başlatıcı oranındaki değişime bağlı ortalama basınç dayanımlarındaki değişim.

“F 0,8” tane sınıfındaki dolgulu reçine karışımlarında en yüksek basınç dayanımlarının, *silis ve kuvars* dolgularında ve “%1,0” *başlatıcı oranında* elde edildiği ancak dayanım değerleri arasında anlamlı bir değişimin olmadığı gözlenmiştir. Ayrıca, başlatıcı oranının artırılmasıyla tüm dolgulu kompozitlerde dayanım değerlerinin düştüğü gözlenmiştir.



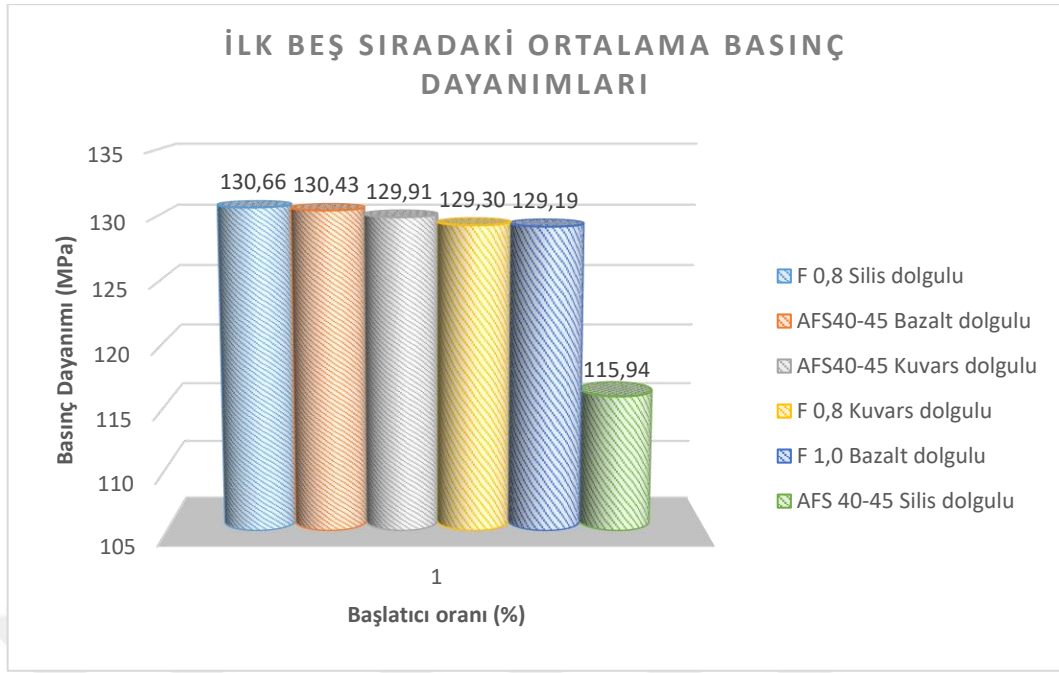
Şekil 4.17. “F1,0” tane dağılımına sahip farklı türdeki dolgulu reçine karışımlarının, başlatıcı oranındaki değişime bağlı basınç dayanımlarındaki değişim.

“F 1,0” tane sınıfındaki dolgulu reçine karışımlarında en yüksek basınç dayanımları, bazalt ve silis dolgularında ve “%1,0” başlatıcı oranında elde edilmiştir. Aynı başlatıcı oranına sahip kuvars dolgulu kompozitlerde ise daha düşük dayanım değeri elde edilmiştir. %1 başlatıcı oranındaki bazalt ve silis dolgulu kompozitlerin dayanım değeri aynı başlatıcı oranına sahip kuvars dolgulu kompozitlerden sırasıyla **%10,26** ve **% 9,4** daha yüksek olarak belirlenmiştir. Ayrıca, başlatıcı oranının arttırılmasıyla silis ve bazalt dolgulu kompozitlerde dayanım değerlerinin düştüğü gözlenirken, kuvars dolgularında artı meydana gelmiştir. Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, “F 1,0 ” tane dağılımına sahip kompozitlerde dolgu türünün basınç dayanımında önemli bir etkiye sahip olduğu, bazalt ve silis dolgularının kullanılması durumunda daha yüksek dayanımların elde edildiği görülmüştür.



Şekil 4.18. Farklı karışım oranlarında hazırlanmış “F 0,8” tane sınıfındaki “hibrit dolgulu” reçine karışımlarının, “%1,0” başlatıcı oranındaki ortalama basınç dayanımlarındaki değişim.

“F 0,8” tane sınıfında ve “%1,0” başlatıcı oranında hazırlanmış hibrit dolgulu reçine karışımları içerisinde en yüksek basınç dayanımı değeri, “%60B+%40S” karışım oranında, **127,42 MPa** olarak belirlenmiştir. İkinci en yüksek basınç dayanımı değeri ise, “%60K+%40S” karışım oranında, **124,9 MPa** olarak elde edilmiştir. En düşük dayanım değeri ise, “%60B+%40K” karışım oranında ve **109,98 MPa** olarak elde edilmiştir. En yüksek dayanımın elde edildiği dayanım değeri, “%60K+%40S” karışım oranındaki kompozitin dayanım değerinden **%2,01**, “%60B+%40K” karışım oranındaki kompozitin dayanım değerinden **%15,85** daha yüksek olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.19. İlk beş sıradaki dolgulu kompozitlerin basınç dayanımları sıralaması.

➤ Dolgulu kompozitlere ait sonuçlar değerlendirildiğinde;

Tüm dolgulu kompozitler içerisinde, en yüksek 5 basınç dayanımı “%1,0” başlatıcı oranında elde edilmiştir.

Tüm dolgulu reçine karışımları içerisinde, en yüksek beş basınç dayanımını sıralayacak olursak;

En yüksek basınç dayanımı değeri; “F 0,8” tane sınıfındaki “silis dolgulu” reçine karışımında, **130,66 MPa** olarak belirlenmiştir. Bu dayanım değeri, çeşitli sektörlerde ticari olarak kullanılan ve bu çalışmada referans değer olarak baz alınan “AFS 40-45” tane dağılımına göre üretilen silis dolgulu kompozitlerden **%12,69** daha yüksek olarak belirlenmiştir.

“AFS40-45” tane sınıfındaki “bazalt dolgulu” reçine karışımında, **130,43 MPa** olarak belirlenmiştir. Bu dayanım değeri, referans değer olarak baz aldığımız “AFS 40-45” tane dağılımına sahip silis dolgulu kompozitlerden **%12,49** daha yüksek olarak belirlenmiştir.

“AFS40-45” tane sınıfındaki “kuvars dolgulu” reçine karışımında, **129,91 MPa** olarak belirlenmiştir. Bu dayanım değeri, referans değer olarak baz aldığımız “AFS 40-45” tane dağılımına sahip silis dolgulu kompozitlerden **%12,05** daha yüksek olarak belirlenmiştir.

“F 0,8” tane sınıfındaki “kuvars dolgulu” reçine karışımında, **129,30 MPa** olarak belirlenmiştir. Bu dayanım değeri, referans değer olarak baz aldığımız “AFS 40-45” tane dağılımına sahip silis dolgulu kompozitlerden **%11,52** daha yüksek olarak belirlenmiştir.

“F 1,0” tane sınıfındaki “bazalt dolgulu” reçine karışımında, **129,19 MPa** olarak belirlenmiştir. Bu dayanım değeri, referans değer olarak baz aldığımız “AFS 40-45” tane dağılımına sahip silis dolgulu kompozitlerden **%11,43** daha yüksek olarak belirlenmiştir.

“Hibrit dolgulu reçine karışımlarına” ait basınç dayanımı değerleri ilk beş dayanım değeri arasında yer almamıştır.

“Hibrit dolgulu kompozitler” içerisinde en yüksek basınç dayanımı değeri **%60 Bazalt + %40 Silis** karışımında **127,42 MPa** olarak elde edilmiştir. Bu dayanım değeri, referans değer olarak baz aldığımız “AFS 40-45” tane dağılımına sahip silis dolgulu kompozitlerden **%9,9** daha yüksek olarak belirlenmiştir.

Haddad ve Kobaisi, UP reçinesiyle iri taneli bazalt agregası, kum ve uçucu kül kullanarak ürettikleri polimer betonun basınç dayanımını **190 MPa** olarak belirlemiştir [109]. Bu dayanım değeri, tez çalışması kapsamında, dolgulu kompozitler üzerinde yapılan basınç dayanımı testlerindeki en yüksek dayanım değerinden (**130,66 MPa**), **% 45,4** daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Bu veriler değerlendirildiğinde, kompozit içerisine ilave edilen dolguların tane çapı irileştikçe dayanım değerlerinin de yükseldiğini ifade etmektedir.

Ateş ve Aztekin, kuvars kumu dolgu takviyeli (%5-%45 oranında) ve UP matrisli kompozitlerin, yoğunlukları ile mekanik özellikleri üzerine bir çalışma gerçekleştirmiş ve en yüksek basınç dayanımı değerini, %10 kuvars kumu hacim oranında, **131,009 MPa** olarak elde etmiştir [106]. Bu dayanım değeri, tez çalışması kapsamında belirlenen en yüksek dayanım değeriyle neredeyse aynı değere sahip olmuştur.

Akıncı, çalışmasında, ham reçine içerisine eklenen bazalt dolgu maddesi içeriğinin, kompozitin yapısal bütünlüğünü ve mekanik özelliklerini etkilediğini bildirmiştir [115]. Ateş, reçine ve dolgu oranları ile tane dağılımı eğrileri değişiminin, polimer betonun basınç dayanımlarını etkilediğini belirlemiştir [117]. Bu sonuçların, çalışmada elde edilen sonuçları desteklediği tespit edilmiştir.

4.2.3. Dolgulu Reçine Karışımlarının Reçine Tüketim Miktarları

Farklı tane dağılımlarındaki dolgulu reçine karışımlarının reçine tüketim miktarları Çizelge 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Farklı tane dağılımlarındaki dolgulu reçine karışımlarının reçine tüketim miktarları.

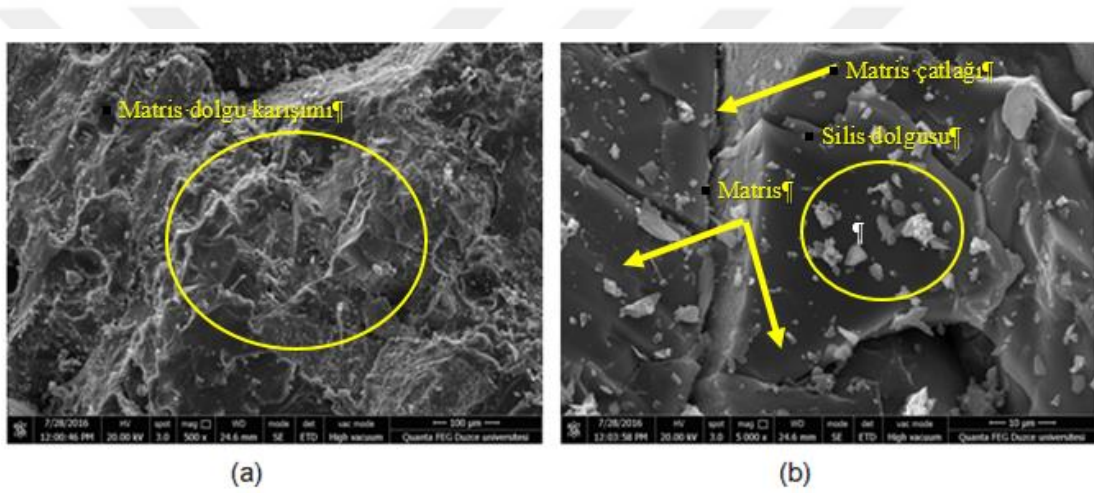
Kürleştirici Oranları (%)	Farklı Tane Dağılımlarındaki Dolgulu Reçine Karışımlarının Ortalama Reçine Tüketim Miktarları (%)								
	Silis			Bazalt			Kuars		
	AFS40-45	F 0,8	F 1,0	AFS40-45	F 0,8	F 1,0	AFS40-45	F 0,8	F 1,0
1,0	52	45	49	53	48	51	59	52	53
1,5	51	47	50	51	53	51	55	52	55
2,0	54	50	52	52	52	52	55	52	55

Tüm dolgulu reçine karışımları içerisinde, en az reçine tüketen karışımlar, “F0,8” tane dağılımında ve “%1,0” başlatıcı oranında elde edilmiştir. Bu karışımlar içerisinde en az reçine tüketimi silis dolgulu karışımlarda elde edilmiş ve bu oran %45 olarak belirlenmiştir. Bazalt dolgulu karışımlarda ise bu oran % 48, kuvars dolgulu karışımlarda % 52 olarak belirlenmiştir. Tüm dolgulu reçine karışımları içerisinde en fazla reçine tüketen karışımlar ise “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitlerde elde edilmiştir. Silis dolgulu kompozitlerde “F0,8” tane dağılımında ve “%1,0” başlatıcı oranında elde edilen reçine tüketim miktarı “F1,0” tane sınıfındaki reçine tüketim miktarından %8,89 daha az reçine tüketmiş, “AFS 40-45” tane sınıfındaki reçine tüketim miktarından ise %15,55 daha az reçine tüketmiştir. Bazalt dolgulu kompozitlerde “F0,8” tane dağılımında ve “%1,0” başlatıcı oranında elde edilen reçine tüketim miktarı “F1,0” tane sınıfındaki reçine tüketim miktarından %6,25 daha az reçine tüketmiş, “AFS 40-45” tane sınıfındaki reçine tüketim miktarından ise %10,42 daha az reçine tüketmiştir. Kuvars dolgulu kompozitlerde “F0,8” tane dağılımında ve “%1,0” başlatıcı oranında elde edilen reçine tüketim miktarı “F1,0” tane sınıfındaki reçine tüketim miktarından %1,92 daha az reçine tüketmiş, “AFS 40-45” tane sınıfındaki reçine tüketim miktarından ise %13,46 daha az reçine tüketmiştir. Bunun sebebi olarak, “AFS 40-45” tane sınıfındaki kompozitlerin uniform tane dağılımına sahip olması, “F0,8” ve “F1,0” tane sınıfındaki kompozitlerin ise daha iyi derecelenmiş bir dağılıma sahip olması olarak düşünülmektedir. Tanelerin iyi derecelenmesinin, iri tanelerin arasındaki boşlukların daha küçük taneler ile dolmasına

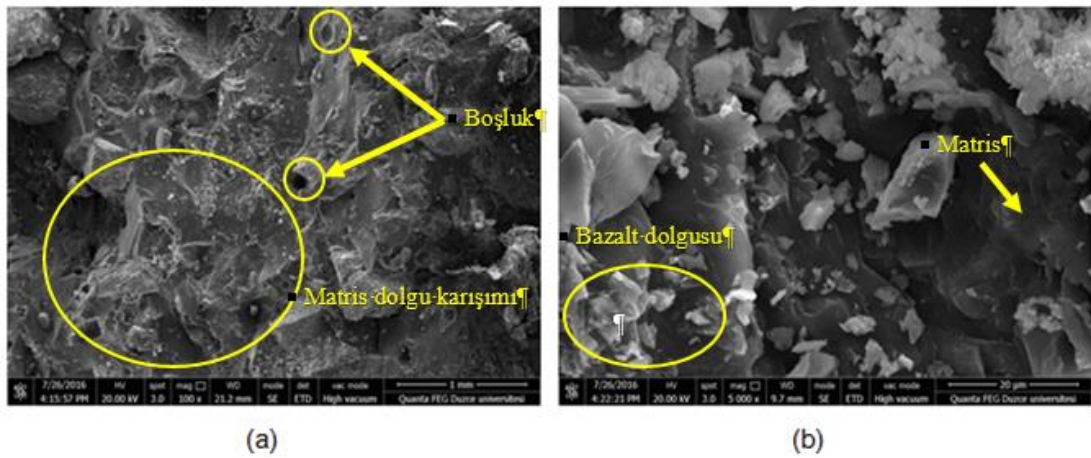
sebebiyet vererek kompozitin daha az boşluklu bir yapıda olmasını sağladığı ve bu sayede kompozitin daha az reçine tüketmesine sebep olduğu düşünülmektedir.

4.2.4. Dolgulu Reçine Karışımlarının SEM Görüntüleri ve Morfolojik Analizi

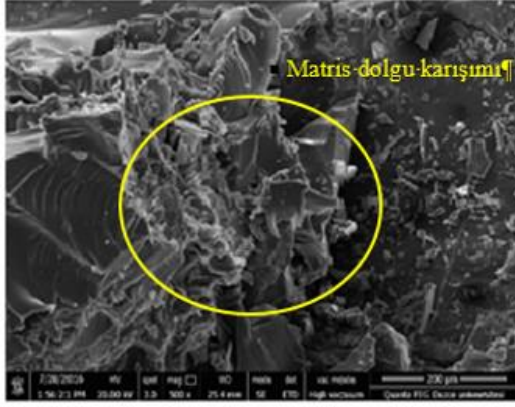
En yüksek 5 basınç dayanımına sahip ve hibrit dolgulu kompozitlerin basınç testleri sonrasında kopan parçalarının SEM görüntüleri alınmış ve alınan görüntülerin morfolojik analizleri yapılmıştır. En yüksek 5 basınç dayanımına sahip dolgulu kompozitlerin SEM görüntüleri sırasıyla, Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’de gösterilmiştir. Hibrit dolgulu kompozitlerin SEM görüntüleri ise Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de gösterilmiştir. Görüntüler, panoramik (100 μ m, 200 μ m) ve birim alan ayrıntılı olarak (5 μ m-10 μ m) verilmiştir.



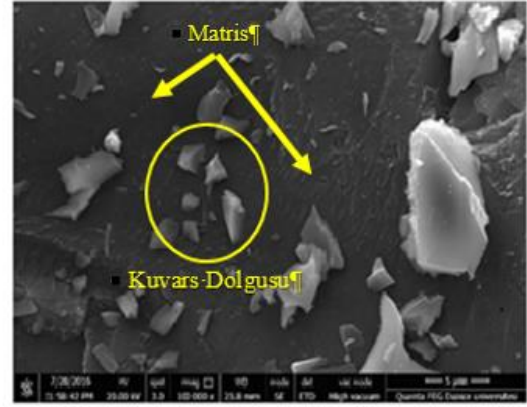
Şekil 4.20. “F 0,8” tane dağılımlı silis kumu ile polyester reçinenin “% 1,0” başlatıcı oranıyla etkileşimi sonrasında elde edilen kompozitin SEM görüntüsü.



Şekil 4.21. “AFS 40-45” tane dağılımlı bazalt kumu ile polyester reçinenin “% 1,0” başlatıcı oranıyla etkileşimi sonrasında elde edilen kompozitin SEM görüntüsü.



(a)

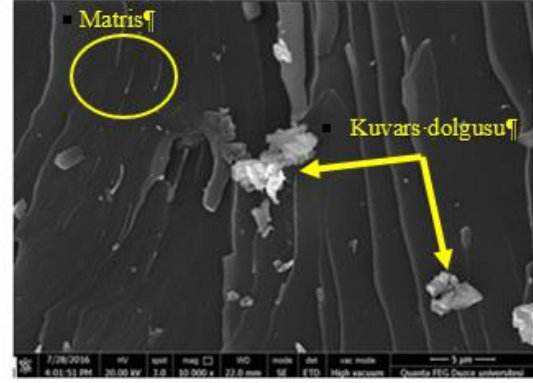


(b)

Şekil 4.22. “AFS 40-45” tane dağılımlı kuvars kumu ile polyester reçinenin “% 1,0” başlatıcı oranıyla etkileşimi sonrasında elde edilen kompozitin SEM görüntüsü.

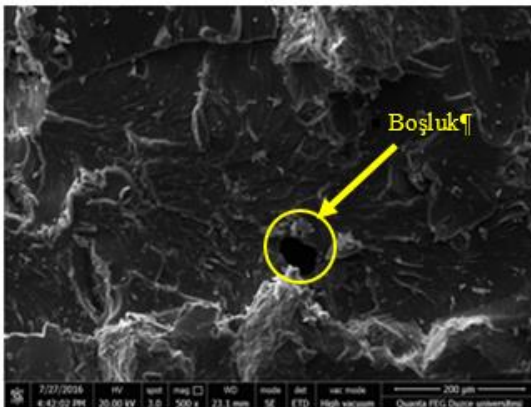


(a)

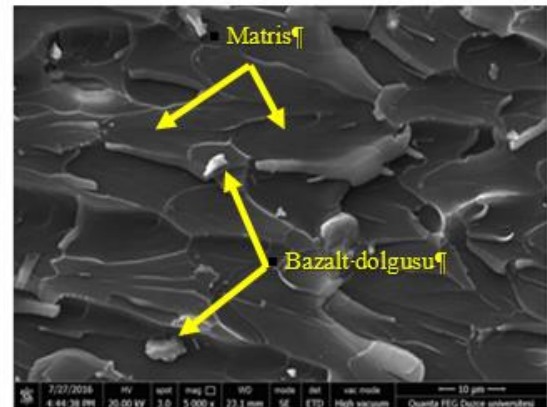


(b)

Şekil 4.23. “F 0,8” tane dağılımlı kuvars kumu ile polyester reçinenin “% 1,0” başlatıcı oranıyla etkileşimi sonrasında elde edilen kompozitin SEM görüntüsü.

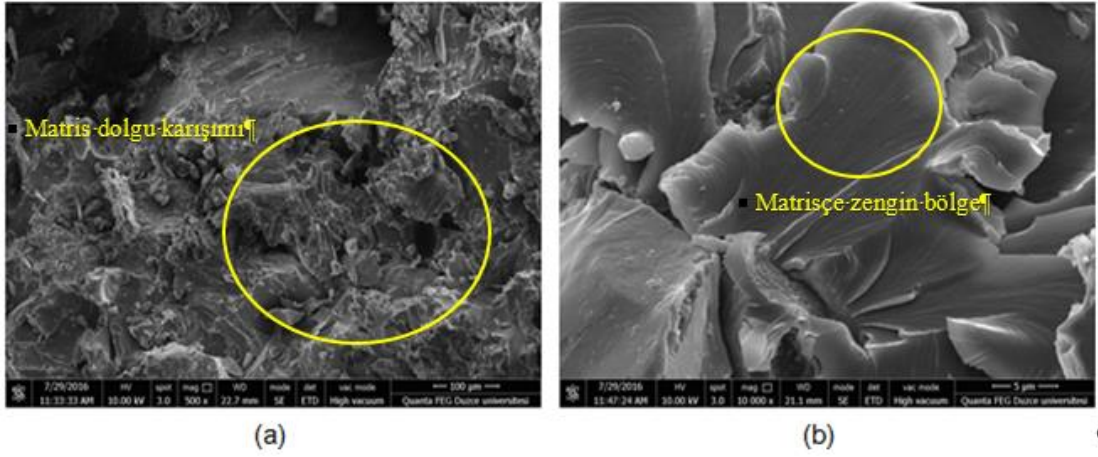


(a)

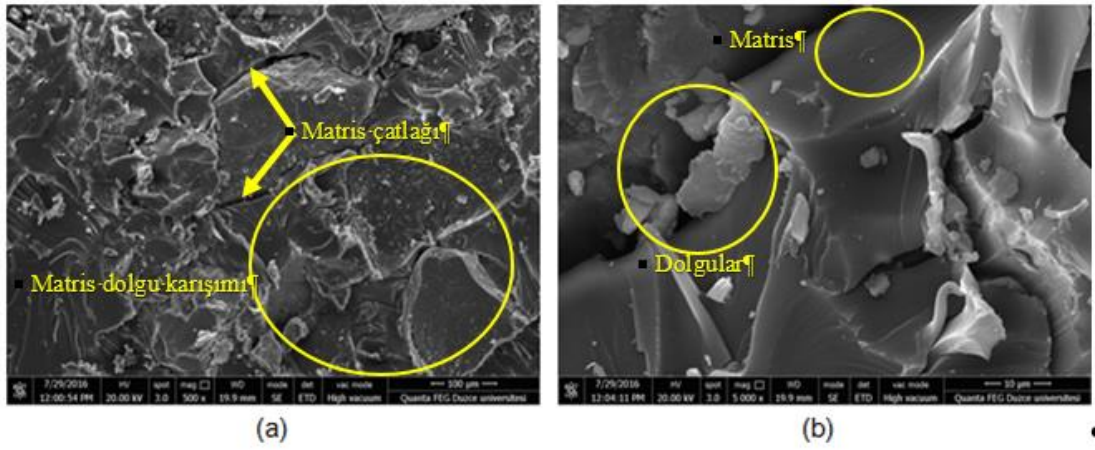


(b)

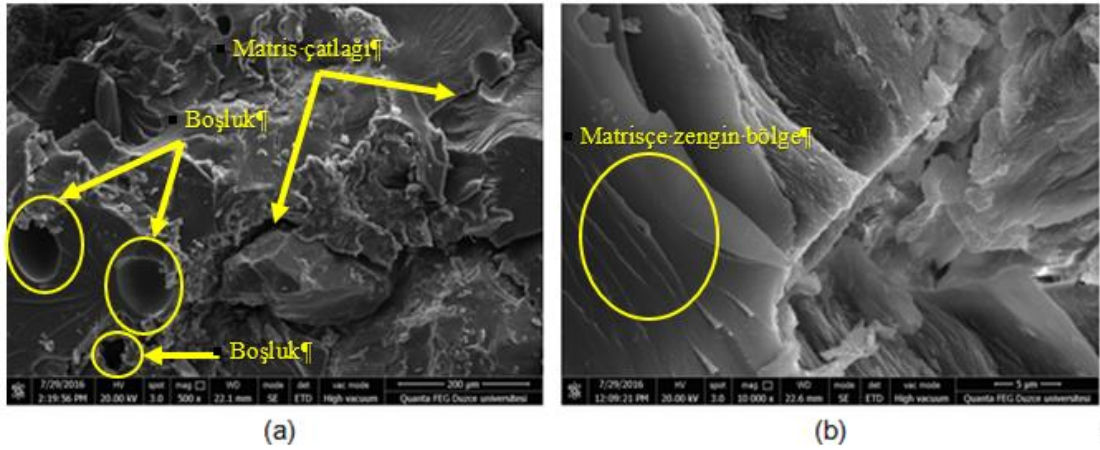
Şekil 4.24. “F 1,0” tane dağılımlı bazalt kumu ile polyester reçinenin “% 1,0” başlatıcı oranıyla etkileşimi sonrasında elde edilen kompozitin SEM görüntüsü.



Şekil 4.25. “F 0,8” tane dağılımlı, %60 Bazalt + %40 Kuvars hibrit dolgulu karışımlar ile polyester reçinenin “% 1,0” başlatıcı oranıyla etkileşimi sonrasında elde edilen kompozitin SEM görüntüsü.



Şekil 4.26. “F 0,8” tane dağılımlı, %60 Bazalt + %40 Silis hibrit dolgulu karışımlar ile polyester reçinenin “% 1,0” başlatıcı oranıyla etkileşimi sonrasında elde edilen kompozitin SEM görüntüsü.



Şekil 4.27. “F 0,8” tane dağılımlı, %60 Kuvars + %40 Silis hibrit dolgulu karışımlar ile polyester reçinenin “% 1,0” başlatıcı oranıyla etkileşimi sonrasında elde edilen kompozitin SEM görüntüsü.

- *Silis kumu dolgulu kompozitlerin morfolojik analizi*

Tüm dolgulu kompozitler içerisinde en yüksek basınç dayanımının sağlandığı, %1,0 başlatıcı oranına sahip F 0,8 tane sınıfındaki silis dolgulu kompozit numunelerdeki SEM görüntüleri incelendiğinde, dolguların homojen olarak dağıldığı, yığılmanın olmadığı, matris yapının dolgu malzemesini bütünüyle ıslattığı ve reçine ile dolguların aderansının iyi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca kompozit malzemedeki boşluk oranının da çok az olduğu düşünülmektedir. Kullanılan dolgu malzemelerinin küçük olması, kompozitlerin içerisinde çatlak oluşturmak için uygulanması gereken enerji miktarının artmasına sebep olmuştur. Uygulanan yük ile kompozite verilen enerji sonucunda dolgu malzemelerinde kırılmaların olması da dolgularla matris yapının ara yüzey bağının kuvvetli olduğunun bir kanıtıdır. Mekanik özelliklerden de anlaşılabileceği üzere, kullanılan dolgu malzemeleri uygulanan yükün büyük bir kısmını taşımış ve matris yapıyı kesilmeye karşı korumuştur. Ancak, yükün arttırılmasıyla yüksek kayma gerilmeleri oluşmuş, ara yüzey bağı dayanımı aşılmış ve çatlak oluşmaya başlamış ve ardından kompozit kırılmıştır.

- *Bazalt kumu dolgulu kompozitlerin morfolojik analizi*

İkinci en yüksek basınç dayanımının sağlandığı AFS40-45 ve F1,0 tane sınıfındaki bazalt dolgulu kompozitlerdeki SEM görüntüleri incelendiğinde, en yüksek basınç dayanımının sağlandığı silis dolgulu kompozit numunedekine benzer olarak, bazalt dolgularının homojen olarak dağıldığı, matris yapının dolgu malzemesini bütünüyle ıslattığı ve reçine ile dolguların aderansının çok iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca kompozit malzemedeki

boşluk oranının da yok denecek kadar az olduğu düşünülmektedir. Dolgu malzemesi ile matris ara yüzeyindeki aderans çok iyi olduğundan dolayı kırılmanın aderans kaybından dolayı olmadığı düşünülmektedir.

- *Kuvars kumu dolgulu kompozitlerin morfolojik analizi*

Basınç deneyleri sonucunda 3. ve 4. en yüksek basınç dayanımının elde edildiği AFS 40-45 ve F0,8 tane dağılımındaki kuvars dolgulu kompozitlerdeki SEM görüntüleri incelendiğinde, polyester matris içerisindeki kuvars dolgu maddelerinin matris yapı içerisinde büyük oranda homojen dağıldığı ve matris yapının dolgu malzemesini bütünüyle ıslattığı gözlenmiştir.

- *Hibrit dolgulu kompozitlerin morfolojik analizi*

Hibrit dolgulu kompozitlerde, homojenizasyonun yeterince sağlandığı, ancak matris yapı ve dolgu malzemesi arasındaki ara yüzeylerde ufak boşlukların olduğu ve bu nedenle aderansın tam olarak sağlanamaması nedeniyle sıyrılmaların meydana geldiği gözlenmekte ve dayanım kaybının da bu nedenle meydana geldiği düşünülmektedir. Sonuç olarak, üretilen kompozitlere uygulanan ön fiziksel işlemler neticesinde dolgu maddelerinin matris yapıya büyük oranda homojen olarak dağılmasının başarılı bir şekilde sağlandığı görülmüş, kırılmış bazı numunelerin üzerindeki matrisli yapıda görünen yer yer boşluklu yapının kompozitlerin mekanik özelliklerini de etkiledikleri görülmüştür.

4.2.5. Lifli Kompozitlerin Mekanik Analiz Test Bulgularının Değerlendirilmesi

4.2.5.1. Lifli Kompozitlerin Charpy Testi Sonuçları

Charpy testi sonucunda %5, %7,5, %10 cam ve bazalt lifli karışımlar ile hibrit lifli karışımlardan elde edilen darbe enerjisi ve darbe dayanımı değerleri Çizelge 4.11, Çizelge 4.12, Çizelge 4.13, ve Çizelge 4.14’de verilmiştir. Şekil 4.28, Şekil 4.29, Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’de verilmiştir.

Çizelge 4.11. %5 cam ve %5 bazalt lifli kompozitlerin charpy testi sonuçları.

Test Parametresi	Tane Dağılımları	Numune No	Charpy Test Sonuçları					
			%5 Cam Lifleri			%5 Bazalt Lifleri		
			Silis	Bazalt	Kuvars	Silis	Bazalt	Kuvars
DARBE DAYANIMI (kJ/m²)	AFS 40-45	1	1,21	1,25	2,04	1,48	1,38	1,42
		2	1,11	1,29	1,91	1,62	1,43	1,54
		3	1,12	1,36	1,87	1,51	1,45	1,47
		4	1,04	1,27	1,83	1,57	1,48	1,67
		5	1,19	1,37	1,96	1,61	1,37	1,61
DARBE DAYANIMI (kJ/m²)	F0,8	1	1,54	1,83	2,09	1,95	1,91	2,35
		2	1,98	1,87	1,94	1,91	2,03	2,04
		3	1,94	1,51	1,82	2,03	2,01	2,42
		4	1,61	1,69	2,05	2,16	1,97	2,36
		5	1,75	1,61	1,87	1,98	1,83	2,31

Çizelge 4.12. %7,5 cam ve %7,5 bazalt lifli kompozitlerin charpy testi sonuçları.

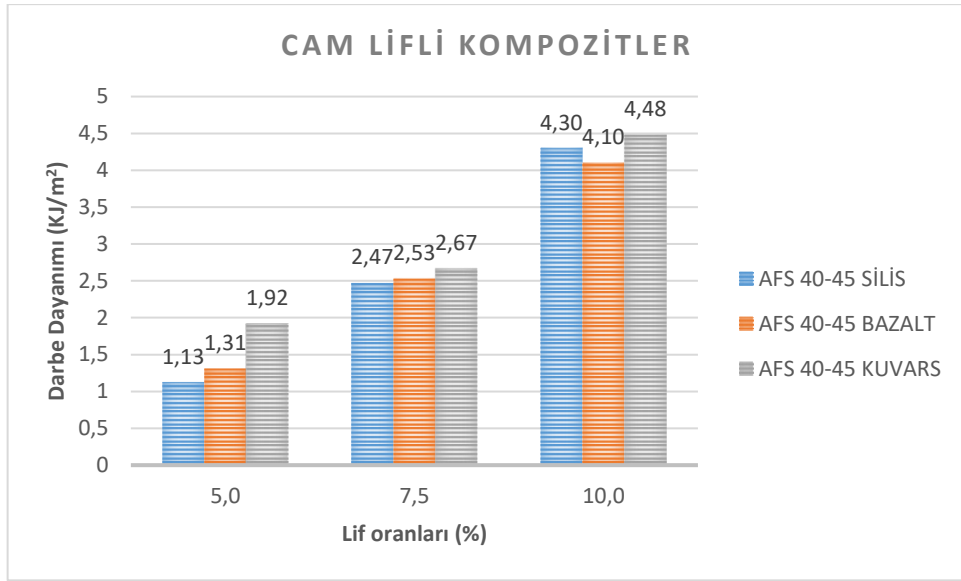
Test Parametresi	Tane Dağılımları	Numune No	Charpy Test Sonuçları					
			%7,5 Cam Lifleri			%7,5 Bazalt Lifleri		
			Silis	Bazalt	Kuvars	Silis	Bazalt	Kuvars
DARBE DAYANIMI (kJ/m²)	AFS 40-45	1	2,49	2,60	2,71	2,12	2,28	2,18
		2	2,53	2,47	2,66	2,11	2,02	2,55
		3	2,48	2,43	2,81	2,06	2,25	2,27
		4	2,41	2,62	2,53	2,22	2,16	2,47
		5	2,43	2,55	2,63	1,98	2,21	2,39
DARBE DAYANIMI (kJ/m²)	F0,8	1	3,13	2,85	3,33	2,17	2,55	2,47
		2	2,77	2,93	3,19	2,45	2,31	2,23
		3	2,85	3,13	3,39	2,24	2,23	2,34
		4	2,92	3,06	3,07	2,13	2,35	2,28
		5	3,08	3,07	3,28	2,40	2,08	2,52

Çizelge 4.13. %10 cam ve %10 bazalt lifli kompozitlerin charpy testi sonuçları.

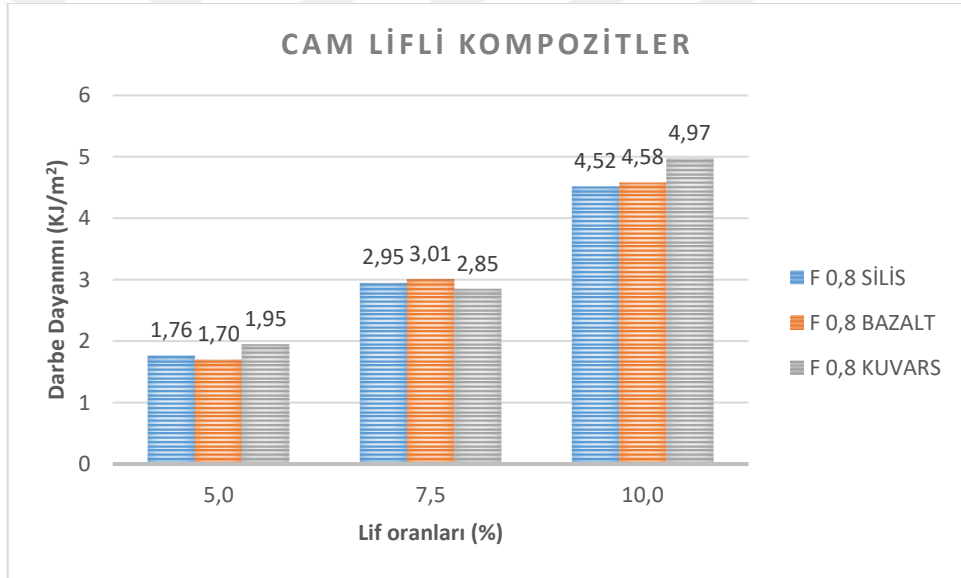
Test Parametresi	Tane Dağılımları	Numune No	Charpy Test Sonuçları					
			%10 Cam Lifleri			%10 Bazalt Lifleri		
			Silis	Bazalt	Kuvars	Silis	Bazalt	Kuvars
DARBE DAYANIMI (kJ/m²)	AFS 40-45	1	4,39	3,41	4,33	2,79	2,76	3,65
		2	4,26	3,36	4,62	2,81	2,69	3,79
		3	4,28	3,24	4,51	2,78	2,84	3,69
		4	4,33	3,02	4,42	2,79	2,91	3,94
		5	4,23	3,08	4,51	2,70	2,81	3,61
DARBE DAYANIMI (kJ/m²)	F0,8	1	4,46	4,68	5,05	3,61	3,63	3,71
		2	4,49	4,54	5,26	3,45	3,65	3,78
		3	4,66	4,46	4,83	3,74	3,86	4,08
		4	4,44	4,51	4,93	3,48	3,53	3,83
		5	4,56	4,71	4,78	3,56	3,56	4,01

Çizelge 4.14. Hibrit lifli kompozitlerin charpy testi sonuçları.

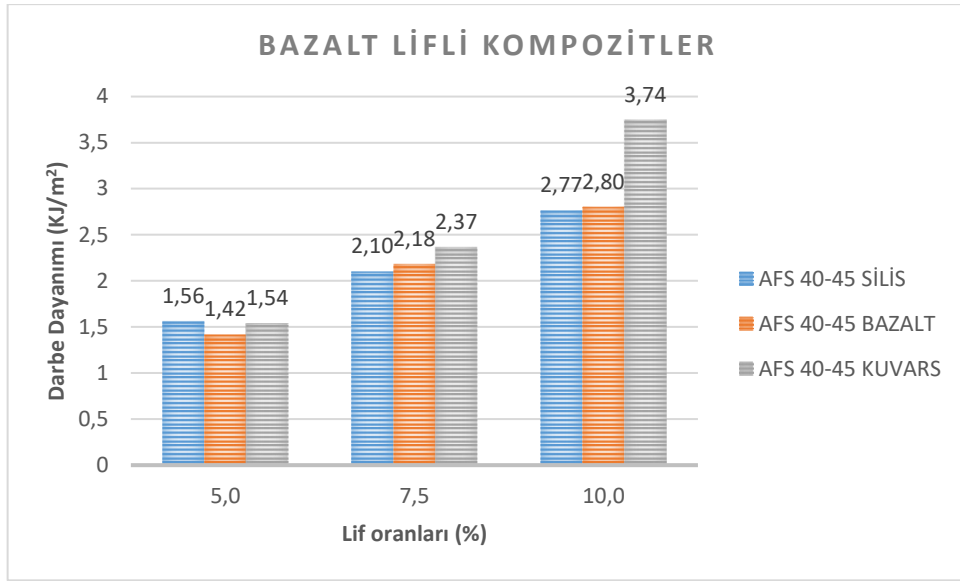
Test Parametresi	Tane dağılımları	Numune adedi	Charpy Test Sonuçları			
			Hibrit Lifli Karışımlar (%6 Cam Lifi + %4 Bazalt Lifi)			
			Silis	Bazalt	Kuvars	%60 Bazalt + %40 Silis
DARBE DAYANIMI (kJ/m²)	F0,8	1	2,41	2,41	2,36	2,61
		2	2,26	2,36	2,55	2,71
		3	2,61	2,31	2,61	2,53
		4	2,35	2,43	2,43	2,53
		5	2,53	2,25	2,47	2,58



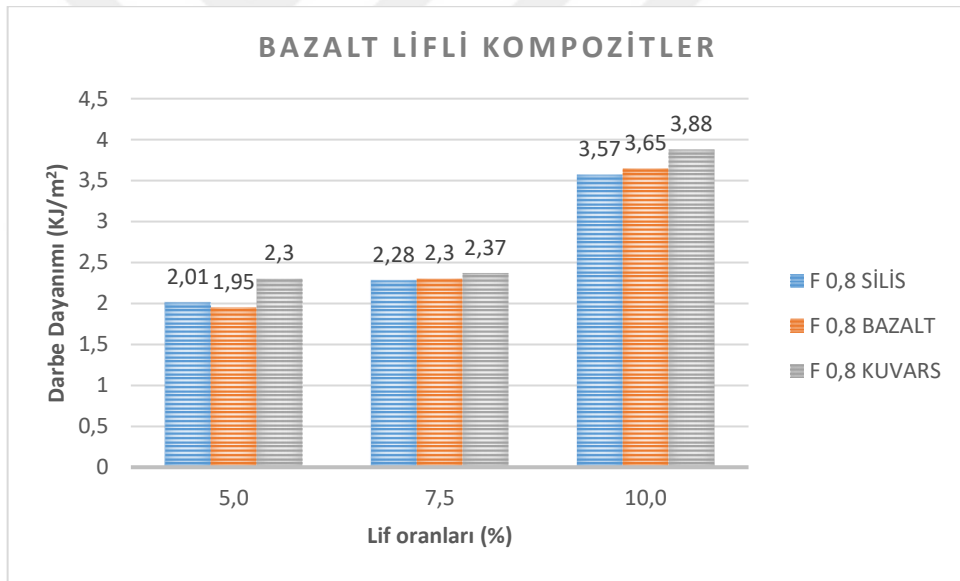
Şekil 4.28. AFS 40-45 tane dağılımındaki cam lifli kompozitlerin charpy testi sonuçları.



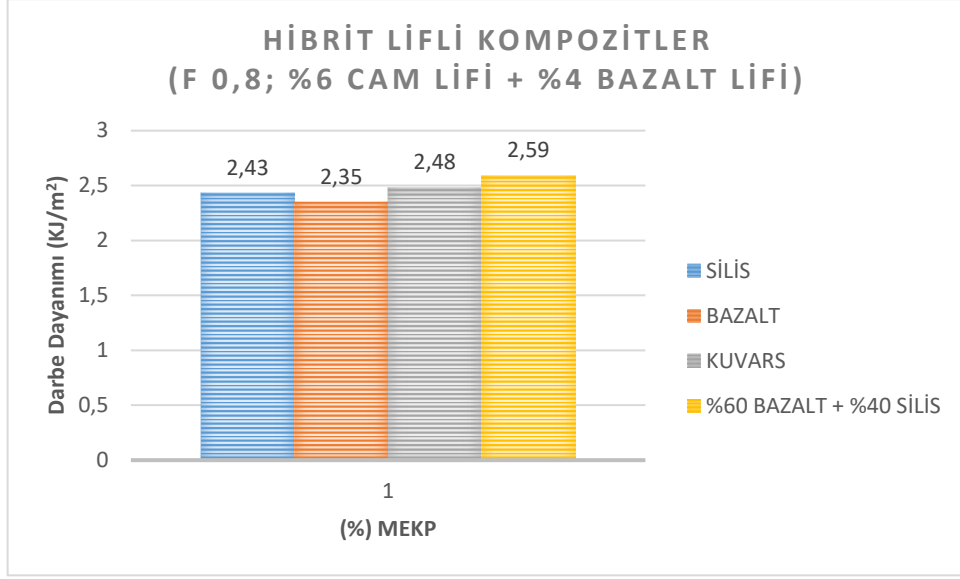
Şekil 4.29. F0,8 tane dağılımındaki cam lifli kompozitlerin charpy testi sonuçları.



Şekil 4.30. AFS 40-45 tane dağılımındaki bazalt lifli kompozitlerin charpy testi sonuçları.



Şekil 4.31. F0,8 tane dağılımındaki bazalt lifli kompozitlerin charpy testi sonuçları.



Şekil 4.32. F0,8 tane dağılımındaki hibrit lifli kompozitlerin charpy testi sonuçları.

Charpy testi sonuçlarının değerlendirilmesi

- “AFS 40-45” ve “F0,8” tane dağılımlarındaki *tüm dolgulu karışımlarda*, kullanılan cam ve bazalt lif oranı arttırıldıkça darbe dayanımının da artış gösterdiği görülmüş ve en yüksek darbe dayanımları %10 lif oranında elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde; lif oranının kompozitin darbe dayanımı üzerinde etkili olduğu görülmektedir.
- “AFS40-45” ve “F0,8” tane dağılımındaki %10 oranındaki *cam ve bazalt lifli kompozitler* içerisinde en yüksek darbe dayanımları kuvars dolgusuyla elde edilmiştir. Dolgu türünün, kompozitin darbe dayanımı üzerinde etkili olduğu görülmektedir.
- Tüm cam ve bazalt lifi oranlarında, “AFS 40-45 ve F0,8” tane dağılımındaki karışımlarda, *silis ve bazalt dolgularının* darbe dayanımı sonuçlarının birbirlerine yakın değerler aldığı görülmektedir.
- *Tüm dolgulu karışımlarda*, %10 cam lifi oranında, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitlerin darbe dayanımı değerleri, “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitten daha yüksek olarak belirlenmiştir. Cam lifli kompozitlerde dolgu tane dağılımının, kompozitin darbe dayanımında etkili olduğu tespit edilmiştir.
- *Silis dolgulu karışımlarda*, %10 cam lifi oranında, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitin darbe dayanımı değeri (**4,52 kJ/m²**), “AFS 40-45” tane dağılımındaki

kompozitin darbe dayanımı değerinden (**4,30 kJ/m²**), **%5,11** daha yüksek olarak belirlenmiştir.

- *Bazalt dolgulu karışımlarda, %10 cam lifi oranında*, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitin darbe dayanımı değeri (**4,58 kJ/m²**), “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitin darbe dayanımı değerinden (**4,1 kJ/m²**), **%11,7** daha yüksek olarak belirlenmiştir.
- *Kuvars dolgulu karışımlarda, %10 cam lifi oranında*, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitin darbe dayanımı değeri, (**4,97 kJ/m²**) “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitin darbe dayanımı değerinden (**4,48 kJ/m²**) **% 10,93** daha yüksek olarak belirlenmiştir.
- *Tüm dolgulu karışımlarda, %10 bazalt lifi oranında*, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitlerin darbe dayanımı değerleri, “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitin darbe dayanımı değerlerinden daha yüksek olarak belirlenmiştir. Bazalt lifli kompozitlerde dolgu tane dağılımının, kompozitin darbe dayanımı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir.
- *Silis dolgulu karışımlarda, %10 bazalt lifi oranında*, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitin darbe dayanımı değeri (**3,57 kJ/m²**), “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitin darbe dayanımı değerinden (**2,77 kJ/m²**) **%28,88** daha yüksek olarak belirlenmiştir.
- *Bazalt dolgulu karışımlarda, %10 bazalt lifi oranında*, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitin darbe dayanımı değeri (**3,65 kJ/m²**), “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitin darbe dayanımı değerinden (**2,8 kJ/m²**) **%30,35** daha yüksek olarak belirlenmiştir.
- *Kuvars dolgulu karışımlarda, %10 bazalt lifi oranında*, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitin darbe dayanımı değeri (**3,88 kJ/m²**), “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitin darbe dayanımı değerinden (**3,74 kJ/m²**) **% 3,74** daha yüksek olarak belirlenmiştir.
- *Tüm dolgulu karışımlarda, %10 lif oranında*, hem “AFS 40-45” hem de “F0,8” tane dağılımındaki kompozitlerde, cam lifli kompozitlerin darbe dayanımları bazalt lifli kompozitlerin darbe dayanımı değerlerinden daha yüksek olarak

belirlenmiştir. Kullanılan lif türünün, kompozitin darbe dayanımında etkili olduğu tespit edilmiştir.

- *Silis dolgulu karışımlarda, %10 lif oranındaki kompozitlerde*, “AFS 40-45” tane dağılımındaki cam lifli kompozitin darbe dayanımı (**4,3 kJ/m²**), bazalt lifli kompozitin darbe dayanımı değerinden (**2,77 kJ/m²**), **%55,23** daha yüksek çıkmıştır. “F0,8” tane dağılımındaki cam lifli kompozitin darbe dayanımı (**4,52 kJ/m²**), bazalt lifli kompozitin darbe dayanımı değerinden (**3,57 kJ/m²**), **%26,61** daha yüksek çıkmıştır.
- *Bazalt dolgulu karışımlarda, %10 lif oranındaki kompozitlerde*, “AFS 40-45” tane dağılımındaki cam lifli kompozitlerin darbe dayanımları (**4,1 kJ/m²**), bazalt lifli kompozitin darbe dayanımı değerinden (**2,8 kJ/m²**), **%46,42** daha yüksek çıkmıştır. “F0,8” tane dağılımındaki cam lifli kompozitlerin darbe dayanımları (**4,58 kJ/m²**), bazalt lifli kompozitin darbe dayanımı değerinden (**3,65 kJ/m²**), **%25,47** daha yüksek çıkmıştır.
- *Kuvars dolgulu karışımlarda, %10 lif oranındaki kompozitlerde*, “AFS 40-45” tane dağılımındaki cam lifli kompozitlerin darbe dayanımları (**4,48 kJ/m²**), bazalt lifli kompozitin darbe dayanımı değerinden (**3,74 kJ/m²**), **%19,78** daha yüksek çıkmıştır. “F0,8” tane dağılımındaki cam lifli kompozitlerin darbe dayanımları (**4,97 kJ/m²**), bazalt lifli kompozitin darbe dayanımı değerinden (**3,88 kJ/m²**), **%28,09** daha yüksek çıkmıştır.
- *Hibrit lifli kompozitlerde en yüksek darbe dayanımı değeri (2,59 kJ/m²)*, hibrit dolgulu (%60 bazalt + %40 silis) karışımda elde edilirken, *en düşük darbe dayanımı değeri (2,35 kJ/m²)* ise, bazalt dolgulu karışımda elde edilmiştir. Silis dolgulu kompozitlerin darbe dayanımı değeri **2,43 kJ/m²** olarak belirlenmiş, Kuvars dolgulu kompozitlerin darbe dayanımı değeri ise **2,48 kJ/m²** olarak belirlenmiştir.
- *Hibrit lifli kompozitlerde*, en yüksek darbe dayanımına sahip hibrit dolgulu karışımların dayanım değeri (**2,59 kJ/m²**), bazalt dolgulu kompozitlerin darbe dayanımı değerinden **%10,21**, silis dolgulu kompozitlerden **%6,58** ve kuvars dolgulu kompozitlerden **%4,43** daha yüksek olarak belirlenmiştir.

➤ Lifli kompozitler içerisinde en yüksek 5 darbe dayanımı değerini sıralayacak olursak;

1. F 0,8 tane dağılımlı, “kuvars dolgulu”, %10 cam lifli karışımda, **4,97 (kJ/m²)**,
2. F 0,8 tane dağılımlı, “bazalt dolgulu”, %10 cam lifli karışımda, **4,58 (kJ/m²)**,
3. F 0,8 tane dağılımlı, “silis dolgulu”, %10 cam lifli karışımda, **4,52 (kJ/m²)**,
4. AFS 40-45 tane dağılımlı, “kuvars dolgulu”, %10 cam lifli karışımda, **4,48 (kJ/m²)**,
5. AFS 40-45 tane dağılımlı, “silis dolgulu”, %10 cam lifli karışımda, **4,30 (kJ/m²)**,

Hibrit lifli kompozitlerin darbe dayanımı değerleri, ilk beş kompozit içerisinde yer almamıştır. Bu durum sonucunda, belirlenen karışım oranları ve belirtilen yöntemle üretilen hibrit lifli kompozitlerin darbe dayanımı özellikleri bakımından yetersiz kaldığı görülmektedir.

Gümölcine ve ark., el yatırması yöntemiyle ürettikleri izohtalik UP matrisli, sürekli E-camı ve bazalt lifi takviyeli kompozitler üzerinde yaptıkları darbe testlerinin sonucunda lif türüne bağlı olarak darbe dayanımı değerlerinin değiştiğini belirlemişler ve aynı hacim oranındaki cam lifi takviyeli kompozitlerin darbe dayanımını, bazalt lif takviyeli kompozitlerden daha yüksek olarak tespit etmişlerdir [82]. Bu sonuçlar, tez çalışmasında elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Çalışmada, lif türünün darbe dayanımı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir.

Raja, uçucu kül emdirilmiş, kırılmış E-cam lifi keçe takviyeli UP reçineli kompozitler üzerinde darbe testleri gerçekleştirmiş ve lif oranının arttırılmasıyla darbe dayanımlarının artış gösterdiğini belirtmiştir [121]. Wong, ve ark., çalışmalarında, E-camı, Hindistan cevizi lifi, palmye yağı lifi ile birlikte, E-camı / Hindistan cevizi lifi ve E-camı / palmye yağı lifi hibrit polyester kompozitlerde darbe testleri gerçekleştirmişler ve lif hacim oranının ve lif uzunluğunun arttırılmasıyla darbe dayanımlarının artış gösterdiğini belirlemişlerdir [122]. Bir başka çalışmada, Amuthakkannan ve ark., yapmış oldukları çalışmada, kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde, lif uzunluğunun ve bazalt lif içeriğinin etkisini araştırmışlar ve lif uzunluğunun ve ayrıca lif miktarının kompozitlerin darbe dayanımı özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir [128]. Bu sonuçları destekleyen bir başka çalışmada da, Lee ve Jang, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranında lif içeriğine sahip cam lif keçe / PP kompozit malzemelerinin darbe dayanımlarını incelemişler ve lif içeriği arttıkça darbe emme enerjisinin yükseldiğini

belirlemişlerdir [133]. Bu sonuçlar, tez çalışmasında elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Çalışmada, lif miktarının ve lif türünün darbe dayanımı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir.

4.2.5.2. Lifli Kompozitlerin Eğilme Testi Sonuçları

AFS 40-45 ve F0,8 tane dağılımında hazırlanan kompozitlerin eğilme testi sonucunda elde edilen değerleri Çizelge 4.15, Çizelge 4.16, Çizelge 4.17, Çizelge 4.18 ve Şekil 4.33, Şekil 4.34, Şekil 4.35, Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’de verilmiştir.

Çizelge 4.15. %5 cam ve %5 bazalt lifli kompozitlerin eğilme testi sonuçları.

Tane Dağılımları	Numune No	Eğilme Dayanımları (MPa)					
		%5 Cam Lifleri			%5 Bazalt Lifleri		
		Silis	Bazalt	Kuvars	Silis	Bazalt	Kuvars
AFS 40-45	1	29,31	37,28	51,38	37,94	35,90	36,27
	2	20,72	34,88	48,26	35,25	28,38	30,71
	3	26,55	35,58	46,34	37,81	29,94	31,80
	4	25,58	34,05	44,85	31,83	34,57	30,68
	5	24,59	30,70	45,63	32,56	30,82	31,91
F0,8	1	33,22	36,47	52,75	30,38	32,42	36,07
	2	30,20	31,24	53,59	36,34	31,61	42,82
	3	36,83	38,94	49,76	28,94	34,71	38,50
	4	37,16	35,63	52,36	34,73	31,08	35,49
	5	36,25	34,78	48,56	32,60	29,97	38,22

Çizelge 4.16. %7,5 cam ve %7,5 bazalt lifli kompozitlerin eğilme testi sonuçları.

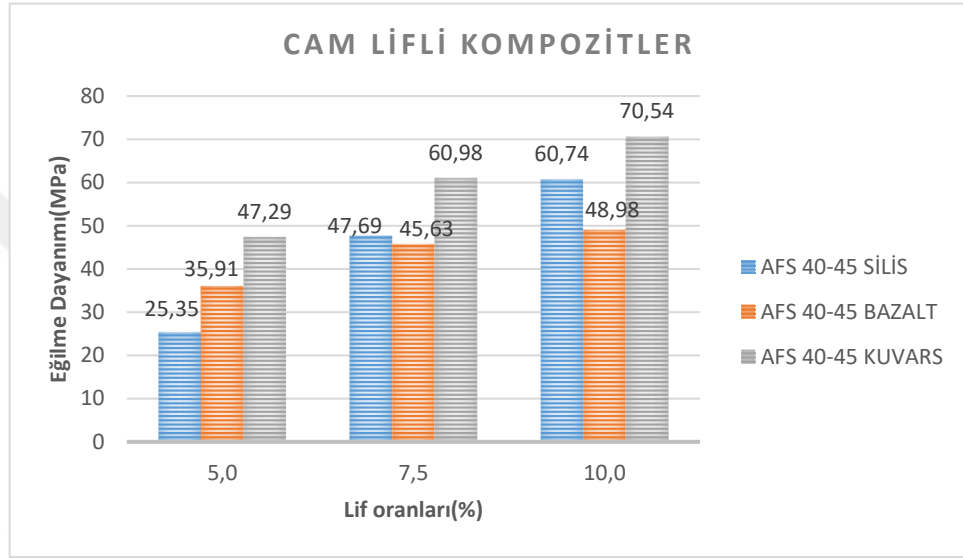
Tane Dağılımları	Numune No	Eğilme Dayanımları (MPa)					
		%7,5 Cam Lifleri			%7,5 Bazalt Lifleri		
		Silis	Bazalt	Kuvars	Silis	Bazalt	Kuvars
AFS 40-45	1	43,45	43,03	56,68	46,96	43,49	52,65
	2	46,14	46,51	58,69	40,25	39,06	54,98
	3	52,06	49,04	65,66	43,21	38,31	53,21
	4	49,22	47,54	62,51	45,27	37,16	59,61
	5	47,61	42,04	61,34	40,47	39,47	51,76
F0,8	1	61,58	50,18	57,95	45,76	42,57	49,37
	2	63,57	43,75	58,82	48,71	47,75	55,13
	3	69,62	44,57	65,52	43,75	43,78	56,44
	4	67,48	47,65	62,51	41,02	43,51	55,95
	5	62,86	45,88	61,70	44,81	43,16	50,55

Çizelge 4.17. %10 cam ve %10 bazalt lifli kompozitlerin eğilme testi sonuçları.

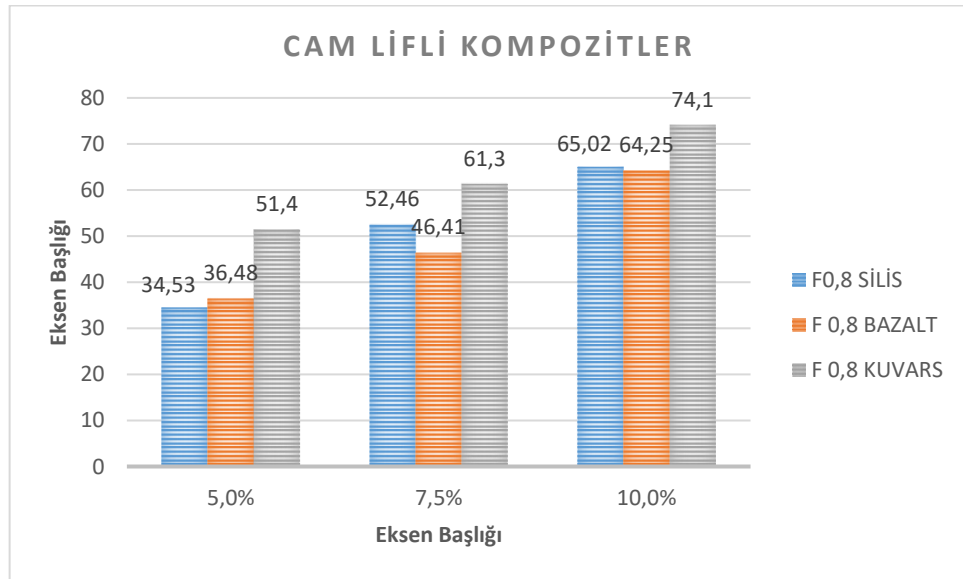
Tane Dağılımları	Numune No	Eğilme Dayanımları (MPa)					
		%10 Cam Lifleri			%10 Bazalt Lifleri		
		Silis	Bazalt	Kuvars	Silis	Bazalt	Kuvars
AFS 40-45	1	56,44	50,14	72,08	58,63	53,77	76,36
	2	65,26	47,86	73,91	59,21	58,01	69,97
	3	59,15	45,21	71,23	62,81	58,89	72,23
	4	63,98	52,51	66,96	64,48	52,72	74,21
	5	58,86	49,16	68,51	61,39	56,19	70,10
F0,8	1	59,58	68,14	77,62	68,95	71,28	79,10
	2	62,57	65,06	76,14	73,11	66,52	77,53
	3	67,62	59,23	75,28	76,93	63,69	76,38
	4	66,48	61,76	70,23	72,47	68,78	71,12
	5	60,66	67,06	71,24	70,18	66,61	72,11

Çizelge 4.18. Hibrit lifli kompozitlerin eğilme testi sonuçları.

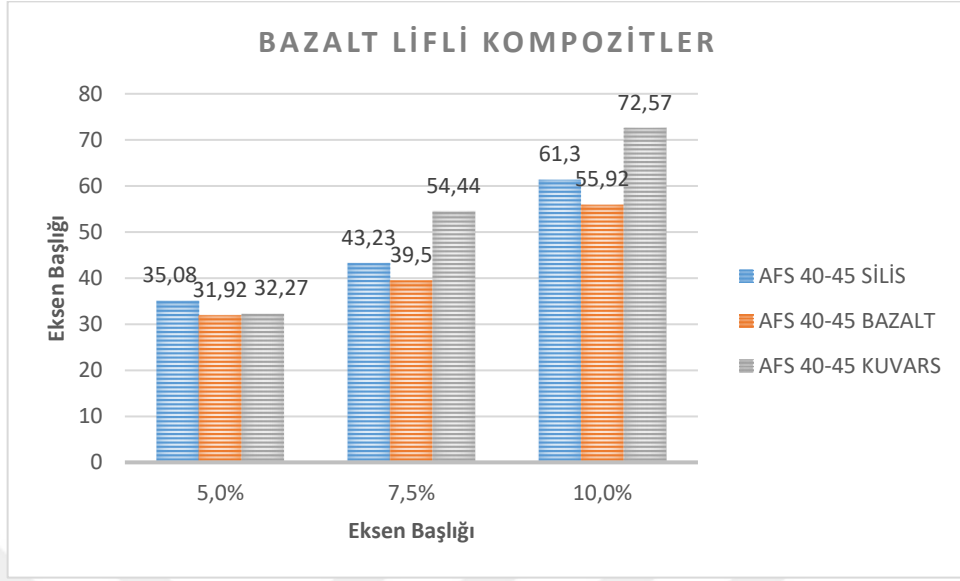
Tane dağılımları	Numune adedi	Hibrit Lifler (%6 Cam Lifi + %4 Bazalt Lif)			
		Silis	Bazalt	Kuvars	%60 Bazalt + %40 Silis
F0,8	1	60,83	67,41	72,93	62,27
	2	66,86	66,42	66,36	65,59
	3	58,02	61,20	68,06	63,03
	4	57,75	63,55	64,85	60,03



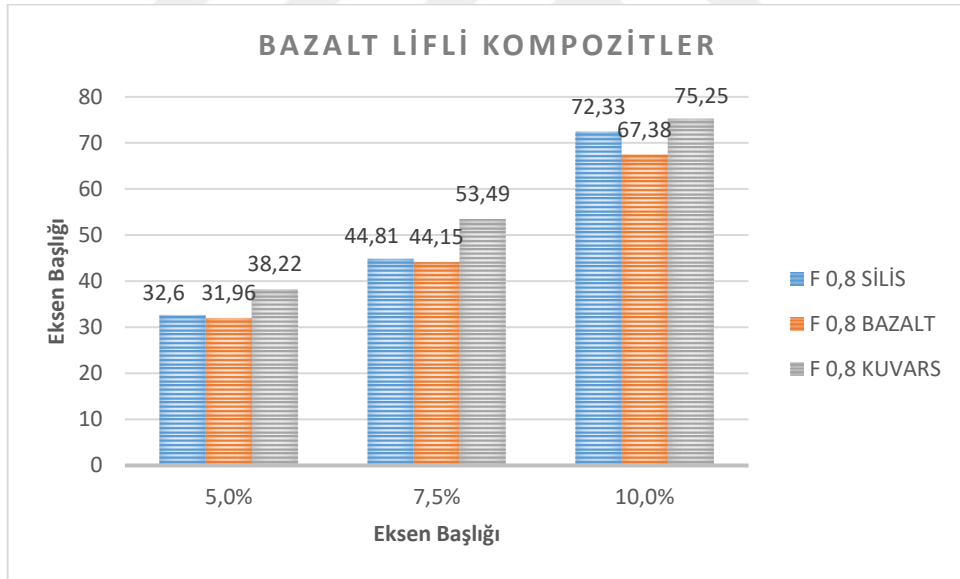
Şekil 4.33. AFS 40-45 tane dağılımındaki cam lifli kompozitlerin eğilme testi sonuçları.



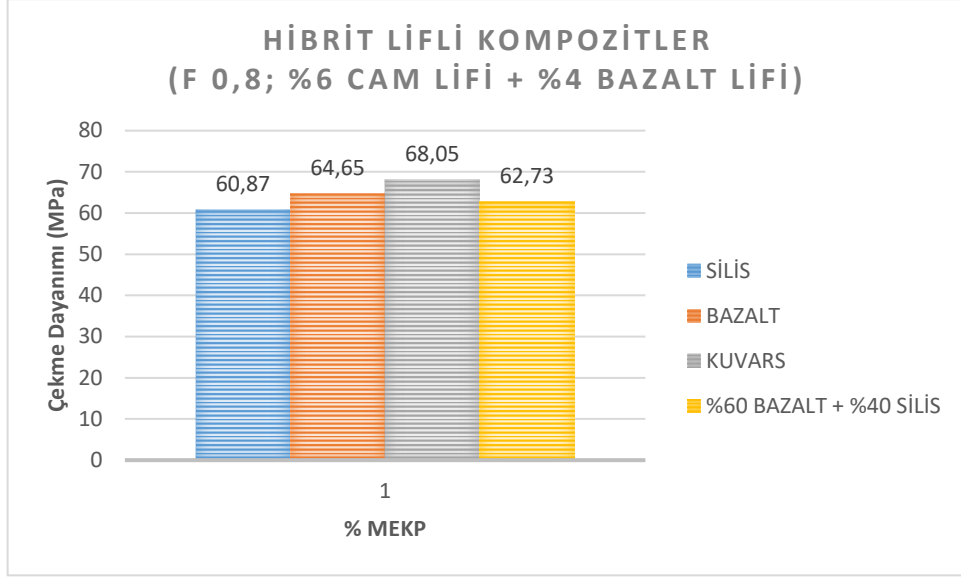
Şekil 4.34. F0,8 tane dağılımındaki cam lifli kompozitlerin eğilme testi sonuçları.



Şekil 4.35. AFS 40-45 tane dağılımındaki bazalt lifli kompozitlerin eğilme testi sonuçları.



Şekil 4.36. F0,8 tane dağılımındaki bazalt lifli kompozitlerin eğilme testi sonuçları.



Şekil 4.37. F0,8 tane dağılımındaki hibrit lifli kompozitlerin eğilme testi sonuçları.

Eğilme testi sonuçlarının değerlendirilmesi;

- “AFS 40-45” ve “F0,8” tane dağılımlarındaki *tüm dolgulu karışımlarda*, kullanılan cam ve bazalt lif oranı arttırıldıkça eğilme dayanımının da artış gösterdiği görülmüş ve en yüksek eğilme dayanımları %10 lif oranında elde edilmiştir. Lif takviyesinin kompozitin eğilme dayanımı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir.
- “AFS40-45” ve “F0,8” tane dağılımındaki %10 oranındaki *cam ve bazalt lifli kompozitler* içerisinde en yüksek eğilme dayanımları kuvars dolgusuyla elde edilmiştir. Deney sonuçları değerlendirildiğinde, dolgu türünün, kompozitin eğilme dayanımı üzerinde etkili olduğu görülmektedir.
- Tüm cam lifi oranlarında, “AFS 40-45 ve F0,8” tane dağılımındaki karışımlarda, *silis ve bazalt dolgularının* eğilme dayanımı değerleri arasında anlamlı bir ilişki bulunamamıştır.
- Tüm bazalt lifi oranlarında, “AFS 40-45 ve F0,8” tane dağılımındaki karışımlarda, *silis dolgulu* kompozitlerin eğilme dayanımı değeri, bazalt dolgulu kompozitlerden daha yüksek değerde elde edilmiştir.
- *Tüm dolgulu karışımlarda*, tüm cam lifi oranlarında, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitlerin eğilme dayanımı değerleri, “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitten daha yüksek olarak belirlenmiştir. Cam lifli kompozitlerde dolgu

tane dağılımının, kompozitin eğilme dayanımında etkili olduğu kanaatine varılmıştır.

- *Silis dolgulu karışımlarda, %10 cam lifi oranında, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitin eğilme dayanımı değeri (63,38 MPa), “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitin eğilme dayanımı değerinden (60,74 MPa), %4,34 daha yüksek olarak belirlenmiştir.*
- *Bazalt dolgulu karışımlarda, %10 cam lifi oranında, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitin eğilme dayanımı değeri (64,25 MPa), “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitin eğilme dayanımı değerinden (48,98 MPa), %31,17 daha yüksek olarak belirlenmiştir.*
- *Kuvars dolgulu karışımlarda, %10 cam lifi oranında, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitin eğilme dayanımı değeri (74,1 MPa), “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitin eğilme dayanımı değerinden (70,54 MPa), %5,04 daha yüksek olarak belirlenmiştir.*
- *Tüm dolgulu karışımlarda, %10 bazalt lifi oranında, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitlerin eğilme dayanımı değerleri, “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitin eğilme dayanımı değerlerinden daha yüksek olarak belirlenmiştir. Bazalt lifli kompozitlerde dolgu tane dağılımının, kompozitin darbe dayanımında etkili olduğu tespit edilmiştir.*
- *Silis dolgulu karışımlarda, %10 bazalt lifi oranında, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitin eğilme dayanımı değeri (72,33 MPa), “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitin eğilme dayanımı değerinden (61,3 MPa), %17,99 daha yüksek olarak belirlenmiştir.*
- *Bazalt dolgulu karışımlarda, %10 bazalt lifi oranında, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitin eğilme dayanımı değeri (67,38 MPa), “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitin eğilme dayanımı değerinden (55,92 MPa), %20,49 daha yüksek olarak belirlenmiştir.*
- *Kuvars dolgulu karışımlarda, %10 bazalt lifi oranında, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitin eğilme dayanımı değeri (75,25 MPa), “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitin eğilme dayanımı değerinden (72,57 MPa), %3,69 daha yüksek olarak belirlenmiştir.*

- *Tüm dolgulu karışımlarda, %10 lif oranında*, hem “AFS 40-45” hem de “F0,8” tane dağılımındaki kompozitlerde, bazalt lifli kompozitlerin eğilme dayanımları cam lifli kompozitin eğilme dayanımı değerinden daha yüksek olarak belirlenmiştir. Kullanılan lif türünün, kompozitin eğilme dayanımında etkili olduğu görülmektedir.
- *Silis dolgulu karışımlarda, %10 lif oranındaki kompozitlerde*, “AFS 40-45” tane dağılımındaki bazalt lifli kompozitin eğilme dayanımı **(61,3 MPa)**, cam lifli kompozitin eğilme dayanımı değerinden **(60,74 MPa)**, **%0,92** daha yüksek çıkmıştır. “F0,8” tane dağılımındaki bazalt lifli kompozitin eğilme dayanımı **(72,33 MPa)**, cam lifli kompozitin eğilme dayanımı değerinden **(63,38 MPa)**, **%14,12** daha yüksek çıkmıştır.
- *Bazalt dolgulu karışımlarda, %10 lif oranındaki kompozitlerde*, “AFS 40-45” tane dağılımındaki bazalt lifli kompozitin eğilme dayanımı **(55,92 MPa)**, cam lifli kompozitin eğilme dayanımı değerinden **(48,98 MPa)**, **%14,16** daha yüksek çıkmıştır. “F0,8” tane dağılımındaki bazalt lifli kompozitin eğilme dayanımı **(67,38 MPa)**, cam lifli kompozitin eğilme dayanımı değerinden **(64,25 MPa)**, **%4,87** daha yüksek çıkmıştır.
- *Kuvars dolgulu karışımlarda, %10 lif oranındaki kompozitlerde*, “AFS 40-45” tane dağılımındaki bazalt lifli kompozitin eğilme dayanımı **(72,57 MPa)**, cam lifli kompozitin eğilme dayanımı değerinden **(70,54 MPa)**, **%2,87** daha yüksek çıkmıştır. “F0,8” tane dağılımındaki bazalt lifli kompozitin eğilme dayanımı **(75,25 MPa)**, cam lifli kompozitin eğilme dayanımı değerinden **(74,1 MPa)**, **%1,55** daha yüksek çıkmıştır.
- En yüksek eğilme dayanımının elde edildiği %10 cam lifi ve %10 bazalt lifi oranındaki karışımlarda, silis dolgulu kompozitlerin eğilme dayanımı değeri, bazalt dolgulu kompozitlerden daha yüksek değerde elde edilmiştir.
- Hibrit lifli kompozitlerde en yüksek eğilme dayanımı değeri **(68,05 MPa)**, kuvars dolgulu karışımda elde edilirken, en düşük eğilme dayanımı değeri **(60,87 MPa)** ise silis dolgulu karışımda elde edilmiştir. Bazalt dolgulu kompozitlerin eğilme dayanımı değeri **64,65 MPa**, hibrit dolgulu (%60 bazalt + %40 silis) kompozitlerin eğilme dayanımı değeri ise **62,73 MPa** olarak belirlenmiştir.

- Hibrit lifli kompozitlerde, en yüksek eğilme dayanımına sahip kuvars dolgulu karışımların dayanım değeri, silis dolgulu kompozitlerin eğilme dayanımı değerinden **%11,79**, hibrit dolgulu kompozitlerden **%8,48** ve bazalt dolgulu kompozitlerden **%5,25** daha yüksek olarak belirlenmiştir.

➤ Lifli kompozitler içerisinde en yüksek 5 eğilme dayanımı değerini sıralayacak olursak:

1. F 0,8 tane dağılımlı, “kuvars dolgulu”, %10 bazalt lifli karışımında, **75,25 MPa**,
2. F 0,8 tane dağılımlı, “kuvars dolgulu”, %10 cam lifli karışımında, **74,1 MPa**,
3. AFS 40-45 tane dağılımlı, “kuvars dolgulu”, %10 bazalt lifli karışımında, **72,57 MPa**,
4. AFS 40-45 tane dağılımlı “kuvars dolgulu”, %10 cam lifli karışımında, **70,54 MPa**,
5. F 0,8 tane dağılımlı, “silis dolgulu”, %10 bazalt lifli karışımında, **72,33 MPa**,

Hibrit lifli kompozitlerin eğilme dayanımı değerleri, ilk beş kompozit içerisinde yer almamıştır. Bu durum sonucunda, belirlenen karışım oranları ve belirtilen yöntemle üretilen hibrit lifli kompozitlerin eğilme dayanımı özellikleri bakımından yetersiz kaldığı kanaatine varılmıştır.

Bazalt liflerin, kompozit malzemeler için takviye amaçlı kullanılmasını araştıran Lopresto ve ark., vakumlu torbalama (vacuum bag) teknolojisi ve el yatırması yöntemiyle, 300x300 mm ebatlarında ürettikleri E-camı ve bazalt lif takviyeli lamine kompozitlerin mekanik özelliklerini karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda, E cam lifli lamine kompozitlerin, eğilme ve basma yüklemelerine karşı, bazalt lif takviyeli kompozitlerden daha yüksek mukavemet gösterdiklerini belirlemişlerdir [72]. Bu sonuçlarla tez çalışmasında elde edilen sonuçlar farklılık göstermektedir. Çalışmada, bazalt lifli kompozitlerin eğilme dayanımı değeri cam lifli kompozitlerden daha yüksek olarak belirlenmiş ve lif türünün eğilme dayanımı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir.

Gümölcine ve ark., el yatırması yöntemiyle ürettikleri izohtalik UP matrisli, sürekli E-camı ve bazalt lifi takviyeli kompozitler üzerinde yaptıkları 3 nokta eğilme testleri sonucunda, bazalt lifli kompozitlerin eğilme dayanımı değerini cam lifli kompozitlerden daha yüksek olarak belirlemişlerdir [82]. Bu sonuçlar, tez çalışmasında elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir.

Raja, uçucu kül emdirilmiş, kırılmış E-cam lifi keçe takviyeli UP reçineli kompozitler üzerinde eğilme testleri gerçekleştirmiş ve lif oranının arttırılmasıyla eğilme dayanımlarının artış gösterdiğini belirtmiştir [121]. Bir başka çalışmada, Amuthakkannan

ve ark., kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde, lif uzunluğunun ve bazalt lif içeriğinin etkisini araştırmışlar ve sonuç olarak, lif uzunluğunun ve ayrıca lif miktarının kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir [128]. Yukarıdaki sonuçları destekleyen başka bir çalışmada da, Lee ve Jang, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranında lif içeriğine sahip cam lif keçe / PP kompozit malzemelerinin eğilme dayanımlarını incelemişler ve lif içeriği arttıkça eğilme dayanımlarının yükseldiğini tespit etmişlerdir [133]. Bu sonuçlar, tez çalışmasında elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Çalışmada, lif miktarının eğilme dayanımı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir.

4.2.5.3. Lifli Kompozitlerin Çekme Testi Sonuçları

Çekme testi sonucunda elde edilen değerler Çizelge 4.19, Çizelge 4.20, Çizelge 4.21, Çizelge 4.22 ve Şekil 4.38, Şekil 4.39, Şekil 4.40, Şekil 4.41 ve Şekil 4.42’de verilmiştir.

Çizelge 4.19. %5 cam ve %5 bazalt lifli kompozitlerin çekme testi sonucunda elde edilen değerler.

Tane Dağılımları	Numune No	Çekme Dayanımları (MPa)					
		%5 Cam Lifleri			%5 Bazalt Lifleri		
		Silis	Bazalt	Kuvars	Silis	Bazalt	Kuvars
AFS 40-45	1	167,18	144,04	173,98	147,68	153,80	153,91
	2	168,25	152,13	172,09	143,71	149,84	152,83
	3	165,12	142,41	166,41	140,68	147,91	158,65
	4	162,71	142,26	172,08	146,07	152,32	157,22
	5	166,85	150,39	168,32	142,56	148,86	159,49
F0,8	1	176,16	181,48	194,69	150,25	138,67	155,51
	2	174,42	178,53	189,95	149,05	139,85	151,18
	3	169,30	176,81	194,30	141,68	134,41	157,91
	4	178,23	178,11	192,51	143,05	139,59	151,75
	5	172,17	175,21	191,25	146,64	135,80	152,16

Çizelge 4.20. %7,5 cam ve %7,5 bazalt lifli kompozitlerin çekme testi sonucunda elde edilen değerler.

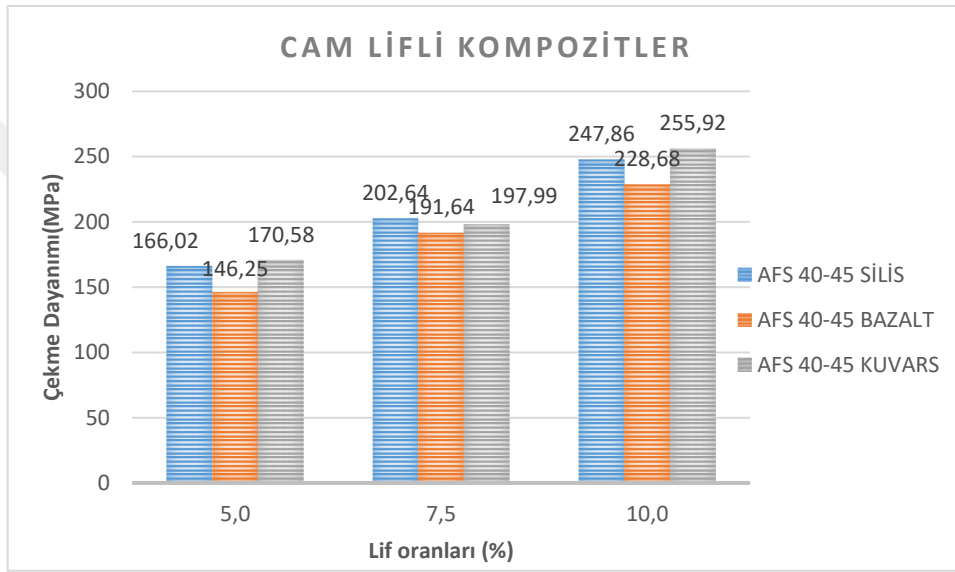
Tane Dağılımları	Numune No	Çekme Dayanımları (MPa)					
		%7,5 Cam Lifleri			%7,5 Bazalt Lifleri		
		Silis	Bazalt	Kuvars	Silis	Bazalt	Kuvars
AFS 40-45	1	202,50	191,49	201,33	181,66	209,87	192,83
	2	207,54	189,97	196,46	185,88	204,12	188,24
	3	206,61	197,85	195,05	180,38	206,30	195,46
	4	197,49	192,81	194,57	184,27	208,67	189,28
	5	199,06	186,06	202,56	182,11	210,08	191,33
F0,8	1	214,64	218,74	225,70	203,97	243,23	236,31
	2	217,42	214,58	223,69	257,75	253,82	209,88
	3	219,39	213,57	220,98	209,42	245,64	180,91
	4	212,71	216,54	221,38	248,60	278,77	258,68
	5	213,48	217,78	226,84	232,32	200,38	252,01

Çizelge 4.21. %10 cam ve %10 bazalt lifli kompozitlerin çekme testi sonucunda elde edilen değerler.

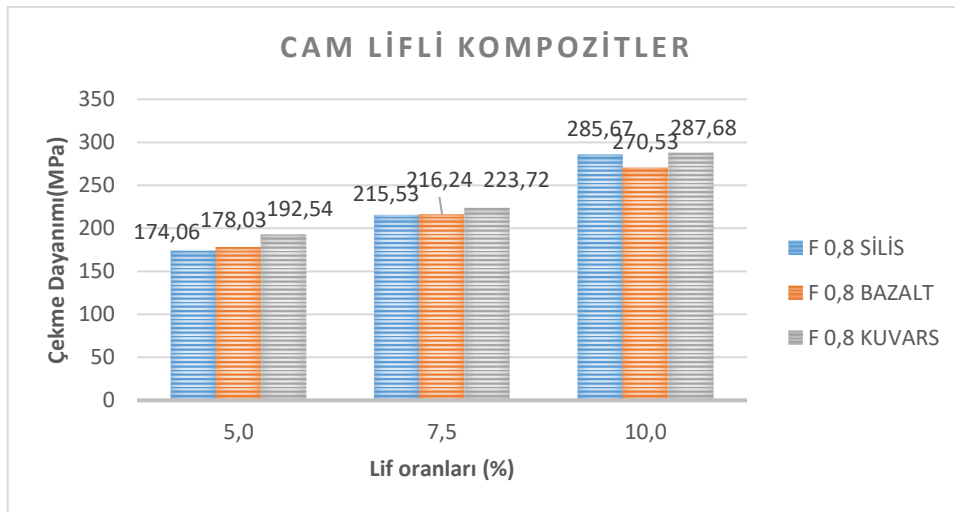
Tane Dağılımları	Numune No	Çekme Dayanımları (MPa)					
		%10 Cam Lifleri			%10 Bazalt Lifleri		
		Silis	Bazalt	Kuvars	Silis	Bazalt	Kuvars
AFS 40-45	1	249,90	225,12	251,67	267,48	246,55	267,22
	2	245,58	231,95	256,11	267,37	253,62	268,78
	3	247,00	231,17	259,46	265,79	247,18	262,33
	4	249,51	228,65	254,15	262,33	252,58	264,27
	5	247,32	226,53	258,22	265,49	246,21	268,35
F0,8	1	283,08	269,13	290,67	264,76	255,07	264,34
	2	285,01	275,71	283,79	270,53	252,01	267,31
	3	289,17	272,41	290,02	267,43	250,72	266,48
	4	284,87	268,23	288,54	265,51	257,02	269,26
	5	286,24	267,19	285,36	271,16	248,23	272,74

Çizelge 4.22. Hibrit lifli kompozitlerin çekme testi sonucunda elde edilen değerler.

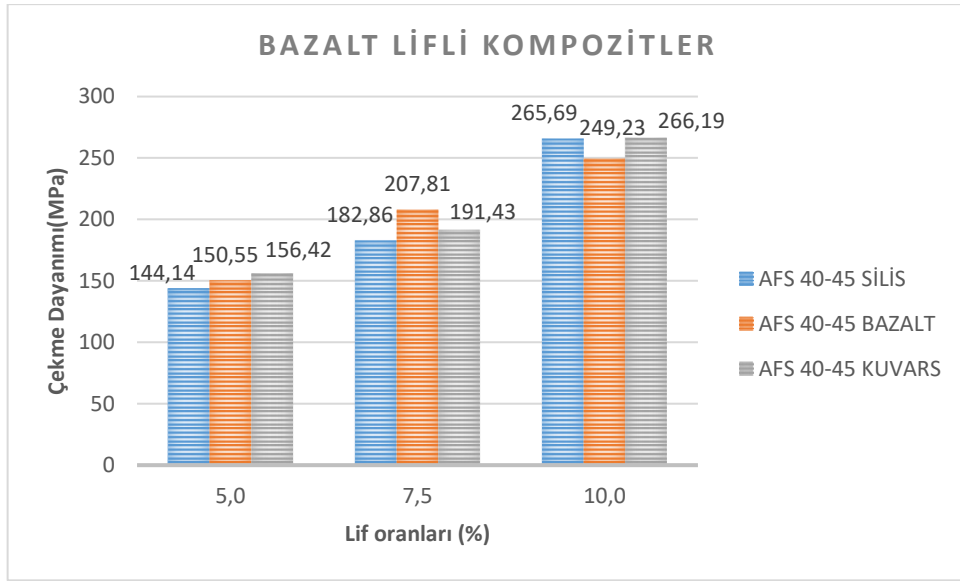
Tane dağılımları	Numune adedi	Hibrit Lifler (%6 Cam Lifi + %4 Bazalt Lifi)			
		Silis	Bazalt	Kuvars	%60 Bazalt + %40 Silis
F0,8	1	273,12	261,83	275,94	288,26
	2	275,85	257,66	272,21	284,28
	3	270,15	262,42	267,53	279,60
	4	271,84	257,09	271,61	283,28
	5	277,62	266,29	270,31	286,52



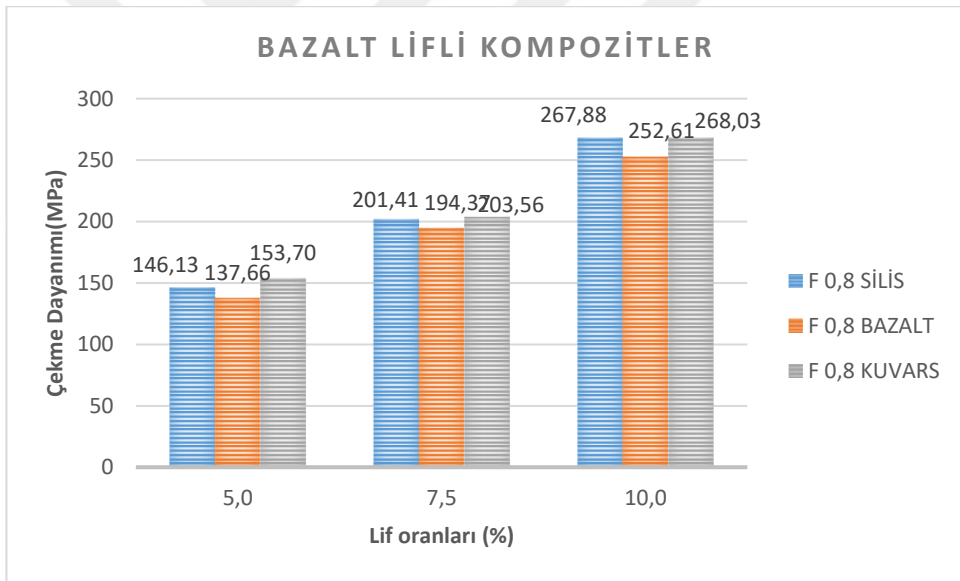
Şekil 4.38. AFS 40-45 tane dağılımındaki cam lifli kompozitlerin çekme testi sonuçları.



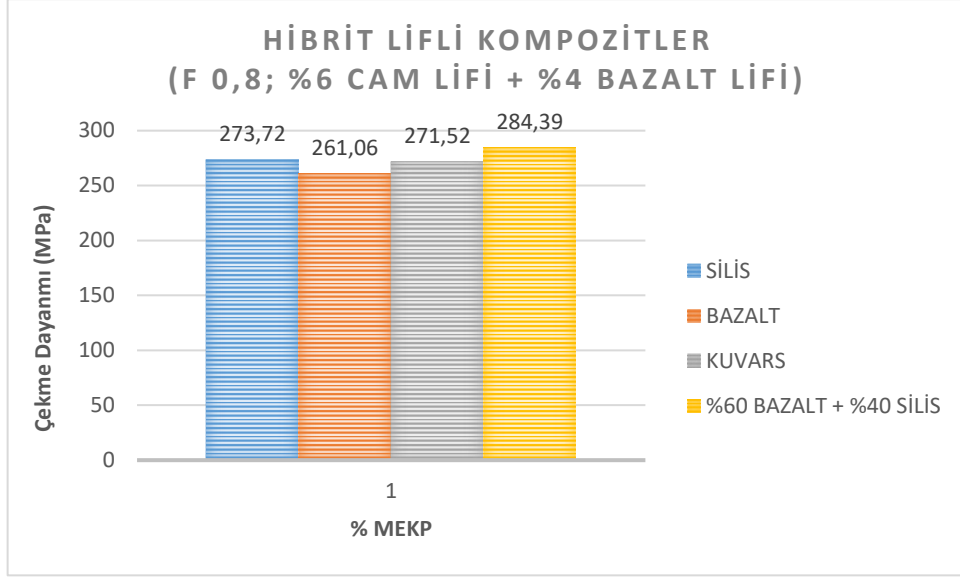
Şekil 4.39. F0,8 tane dağılımındaki cam lifli kompozitlerin çekme testi sonuçları.



Şekil 4.40. AFS 40-45 tane dağılımındaki bazalt lifli kompozitlerin çekme testi sonuçları.



Şekil 4.41. F0,8 tane dağılımındaki bazalt lifli kompozitlerin çekme testi sonuçları.



Şekil 4.42. F0,8 tane dağılımındaki hibrit lifli kompozitlerin çekme testi sonuçları.

Çekme testi sonuçlarının değerlendirilmesi;

- “AFS 40-45” ve “F0,8” tane dağılımlarındaki *tüm dolgulu karışımlarda*, kullanılan cam ve bazalt lif oranı arttırıldıkça çekme dayanımının da artış gösterdiği görülmüş ve en yüksek çekme dayanımları %10 lif oranında elde edilmiştir. Lif takviyesinin kompozitin çekme dayanımı üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir.
- “AFS40-45” ve “F0,8” tane dağılımındaki %10 oranındaki *cam ve bazalt lifli kompozitler* içerisinde en yüksek çekme dayanımları kuvars dolgusuyla elde edilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde; dolgu türünün, kompozitin çekme dayanımı üzerinde etkili olduğu görülmüştür.
- *Tüm dolgulu karışımlarda*, %10 cam lifi oranında, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitlerin çekme dayanımı değerleri, “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitten daha yüksek olarak belirlenmiştir. Cam lifli kompozitlerde dolgu tane dağılımının, kompozitin çekme dayanımında etkili olduğu görülmektedir.
- *Silis dolgulu karışımlarda*, %10 cam lifi oranında, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitin çekme dayanımı değeri **(285,67 MPa)**, “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitin çekme dayanımı değerinden **(247,86 MPa)**, %15,25 daha yüksek olarak belirlenmiştir.

- *Bazalt dolgulu karışımlarda, %10 cam lifi oranında, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitin çekme dayanımı değeri (270,53 MPa), “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitin çekme dayanımı değerinden (228,68 MPa), %18,3 daha yüksek olarak belirlenmiştir.*
- *Kuvars dolgulu karışımlarda, %10 cam lifi oranında, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitin çekme dayanımı değeri (287,68 MPa), “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitin çekme dayanımı değerinden (255,92 MPa), %12,41 daha yüksek olarak belirlenmiştir.*
- *Tüm dolgulu karışımlarda, %10 bazalt lifi oranında, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitlerin çekme dayanımı değerleri, “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitin çekme dayanımı değerlerinden daha yüksek olarak belirlenmiştir. Bazalt lifli kompozitlerde dolgu tane dağılımının, kompozitin çekme dayanımında etkili olduğu düşünülmektedir.*
- *Silis dolgulu karışımlarda, %10 bazalt lifi oranında, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitin çekme dayanımı değeri (267,88 MPa), “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitin çekme dayanımı değerinden (265,69 MPa) %0,82 daha yüksek olarak belirlenmiştir.*
- *Bazalt dolgulu karışımlarda, %10 bazalt lifi oranında, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitin çekme dayanımı değeri (252,61 MPa), “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitin çekme dayanımı değerinden (249,23 MPa) %1,35 daha yüksek olarak belirlenmiştir.*
- *Kuvars dolgulu karışımlarda, %10 bazalt lifi oranında, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitin çekme dayanımı değeri (268,03 MPa), “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitin çekme dayanımı değerinden (266,19 MPa) %0,69 daha yüksek olarak belirlenmiştir.*
- *Tüm dolgulu karışımlarda, %10 lif oranında, “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitlerde, bazalt lifli kompozitlerin çekme dayanımları cam lifli kompozitlerin çekme dayanımı değerlerinden daha yüksek olarak belirlenmiştir. Kullanılan lif türünün, kompozitin darbe dayanımında etkili olduğu düşünülmektedir.*

- *Silis dolgulu karışımlarda, %10 lif oranındaki kompozitlerde*, “AFS 40-45” tane dağılımındaki bazalt lifli kompozitin çekme dayanımı (**265,69 MPa**), cam lifli kompozitin çekme dayanımı değerinden (**247,86 MPa**), **%7,19** daha yüksek çıkmıştır.
- *Bazalt dolgulu karışımlarda, %10 lif oranındaki kompozitlerde*, “AFS 40-45” tane dağılımındaki bazalt lifli kompozitin çekme dayanımı (**249,23 MPa**), cam lifli kompozitin çekme dayanımı değerinden (**228,68 MPa**), **%8,98** daha yüksek çıkmıştır.
- *Kuvars dolgulu karışımlarda, %10 lif oranındaki kompozitlerde*, “AFS 40-45” tane dağılımındaki bazalt lifli kompozitin çekme dayanımı (**266,19 MPa**), cam lifli kompozitin çekme dayanımı değerinden (**255,92 MPa**), **%4,01** daha yüksek çıkmıştır.
- *Tüm dolgulu karışımlarda, %10 lif oranında*, “F0,8” tane dağılımındaki kompozitlerde, cam lifli kompozitlerin çekme dayanımları bazalt lifli kompozitlerin çekme dayanımı değerlerinden daha yüksek olarak belirlenmiştir.
- *Silis dolgulu karışımlarda, %10 lif oranındaki kompozitlerde*, “F0,8” tane dağılımındaki cam lifli kompozitin çekme dayanımı (**285,67 MPa**), bazalt lifli kompozitin çekme dayanımı değerinden (**267,88 MPa**), **%6,64** daha yüksek çıkmıştır.
- *Bazalt dolgulu karışımlarda, %10 lif oranındaki kompozitlerde*, “F0,8” tane dağılımındaki cam lifli kompozitin çekme dayanımı (**270,53 MPa**), bazalt lifli kompozitin çekme dayanımı değerinden (**252,61 MPa**), **%7,09** daha yüksek çıkmıştır.
- *Kuvars dolgulu karışımlarda, %10 lif oranındaki kompozitlerde*, “F0,8” tane dağılımındaki cam lifli kompozitin çekme dayanımı (**287,68 MPa**), bazalt lifli kompozitin çekme dayanımı değerinden (**268,03 MPa**), **%7,33** daha yüksek çıkmıştır.
- *Tüm cam lifi oranlarında*, “AFS 40-45” tane dağılımındaki karışımlarda, *silis dolgulu* kompozitlerin çekme dayanımı değeri, bazalt dolgulu kompozitlerden daha yüksek değerde elde edilmiştir. F0,8 tane dağılımında ise, silis ve bazalt dolgulu karışımların dayanım değerlerinde yakın sonuçlar elde edilmiştir.

- Tüm bazalt lifi oranlarında, “F0,8” tane dağılımındaki karışımlarda, *silis dolgulu* kompozitlerin çekme dayanımı değeri, bazalt dolgulu kompozitlerden daha yüksek değerde elde edilmiştir. “AFS 40-45” tane dağılımındaki karışımlarda ise *silis ve bazalt dolgulu* kompozitler arasında anlamlı bir ilişki kurulamamıştır.
- *Hibrit lifli kompozitlerde en yüksek çekme dayanımı değeri (284,39 MPa)*, hibrit dolgulu (%60 bazalt + %40 silis) karışımında elde edilmiştir. Bu dayanım değeri, tüm lifli kompozitler içerisinde en yüksek üçüncü dayanıma sahip olmuştur. En düşük çekme dayanımı değeri **(261,06 MPa)** ise bazalt dolgulu karışımında elde edilmiştir. Silis dolgulu kompozitin çekme dayanımı değeri, **273,72 MPa**, kuvars dolgulu kompozitin çekme dayanımı değeri ise **271,52 MPa** olarak belirlenmiştir.
- *Hibrit lifli kompozitlerde*, en yüksek çekme dayanımına sahip hibrit dolgulu karışımların çekme dayanımı değeri, bazalt dolgulu kompozitlerin çekme dayanımı değerinden **%8,93**, kuvars dolgulu kompozitlerden **%4,74** ve silis dolgulu kompozitlerden **%3,89** daha yüksek olarak belirlenmiştir.

➤ Lifli kompozitler içerisinde en yüksek 5 çekme dayanımı değerini sıralayacak olursak;

1. F 0,8 tane dağılımlı, “kuvars dolgulu”, *%10 cam lifli karışımında*, **287,68 MPa**,
2. F 0,8 tane dağılımlı, “silis dolgulu”, *%10 cam lifli karışımında*, **285,67 MPa**,
3. Hibrit lifli (%6 cam lifi + %4 bazalt lifi), “hibrit dolgulu (%60 bazalt + %40 silis)” karışımında, **284,39 MPa**,
4. Hibrit lifli (%6 cam lifi + %4 bazalt lifi), “silis dolgulu” karışımında, **273,72 MPa**,
5. Hibrit lifli (%6 cam lifi + %4 bazalt lifi), “kuvars dolgulu” karışımında, **271,52 MPa**,

Hibrit lifli kompozitlerin ilk beş çekme dayanımı içerisinde yer aldığı gözlenmiştir. Bu durum sonucunda, hibrit lifli hazırlanan kompozitlerin çekme dayanımı üzerinde etkili olduğu kanaatine varılmıştır.

Gümölcine ve ark., el yatırması yöntemiyle ürettikleri izoftalik UP matrisli, sürekli E-camı ve bazalt lifi takviyeli kompozitler üzerinde yaptıkları çekme testlerinin sonucunda lif türüne bağlı olarak çekme dayanımı değerlerinin değiştiğini belirlemişler ve aynı hacim oranındaki bazalt lifi takviyeli kompozitlerin çekme dayanımını, cam lifi takviyeli kompozitlerden daha yüksek olarak tespit etmişlerdir [82]. Bu sonuçlar, tez çalışmasında en yüksek dayanım değerlerinin elde edildiği AFS 40-45 tane dağılımındaki cam ve bazalt lifli kompozitlerle benzerlik gösterirken, F0,8 tane dağılımında ise farklılık

göstermektedir. Başka bir çalışmada, bazalt liflerin, kompozit malzemeler için takviye amaçlı kullanılmasını araştıran Lopresto ve ark., vakumlu torbalama teknolojisi ve el yatırması yöntemiyle, 300 mm x 300 mm ebatlarında ürettikleri E-camı ve bazalt lif takviyeli lamine kompozitlerin mekanik özelliklerini karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda, E-camı takviyeli numunelerin daha yüksek çekme yükü taşıdığını tespit etmişlerdir [72]. Bu sonuçlar, tez çalışmasında en yüksek dayanım değerlerinin elde edildiği F0,8 tane dağılımındaki cam ve bazalt lifli kompozitlerle benzerlik gösterirken, AFS 40-45 tane dağılımında ise farklılık göstermektedir. Sonuç olarak, lif türünün çekme dayanımı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir.

Yaşar ve Arslan, cam lifli-polyester kompozitler üzerinde lif hacim oranı ve lif doğrultusunun tribolojik özelliklere etkisini incelemek üzere yaptıkları çalışmada, matris içerisine ilave ettikleri lif miktarının artırılmasıyla, yoğunluk ve çekme dayanımlarının arttığını belirlemişlerdir [108]. Bir başka çalışmada ise, Raja, uçucu kül emdirilmiş, kırılmış E-cam lifi keçe takviyeli UP reçineli kompozitler üzerinde çekme testleri gerçekleştirmiş ve lif oranının artırılmasıyla çekme dayanımlarının artış gösterdiğini belirtmiştir [121]. Yukarıdaki sonuçları destekleyen başka bir çalışmada da, Amuthakkannan ve ark., kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde, lif uzunluğunun ve bazalt lif içeriğinin etkisini araştırmışlar ve sonuç olarak, lif uzunluğunun ve ayrıca lif miktarının kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir [128]. Lee ve Jang, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranında lif içeriğine sahip cam lif keçe/PP kompozit malzemelerinin çekme dayanımlarını incelemişler ve lif içeriği arttıkça çekme dayanımlarının yükseldiğini tespit etmişlerdir [133]. Bu sonuçlar, tez çalışmasında elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Çalışmada, lif miktarının çekme dayanımı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir.

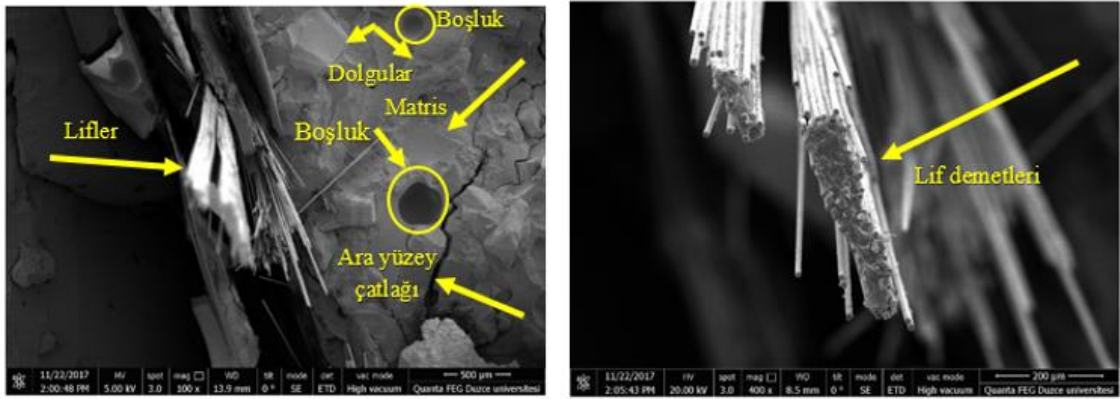
4.2.5.4. Lifli Kompozitlerin SEM Görüntüleri ve Morfolojik Analizi

Üretilen lifli kompozitler içerisinde, %5 ve %10 lif içeren kompozitlerin charpy darbe testleri sonrasında SEM görüntüleri alınmış ve alınan görüntülerin morfolojik analizleri yapılmıştır. AFS 40-45 tane dağılımlı silis dolgulu %5 ve %10 cam lifli kompozitlerin SEM görüntüleri, Şekil 4.43 ve Şekil 4.44’de, AFS 40-45 tane dağılımlı bazalt dolgulu %5 ve %10 cam lifli kompozitlerin SEM görüntüleri Şekil 4.45 ve Şekil 4.46’da, AFS 40-45 tane dağılımlı kuvars dolgulu %5 ve %10 cam lifli kompozitlerin SEM görüntüleri Şekil 4.47 ve Şekil 4.48’de gösterilmiştir. F0,8 tane dağılımlı silis dolgulu %5 ve %10

cam lifli kompozitlerin SEM görüntüleri, Şekil 4.49 ve Şekil 4.50’de, F0,8 tane dağılımlı bazalt dolgulu %5 ve %10 cam lifli kompozitlerin SEM görüntüleri Şekil 4.51 ve Şekil 4.52’de, F0,8 tane dağılımlı kuvars dolgulu %5 ve %10 cam lifli kompozitlerin SEM görüntüleri Şekil 4.53 ve Şekil 4.54’de gösterilmiştir. AFS 40-45 tane dağılımlı silis dolgulu %5 ve %10 bazalt lifli kompozitlerin SEM görüntüleri, Şekil 4.55 ve Şekil 4.56’da, AFS 40-45 tane dağılımlı bazalt dolgulu %5 ve %10 bazalt lifli kompozitlerin SEM görüntüleri Şekil 4.57 ve Şekil 4.58’de, AFS 40-45 tane dağılımlı kuvars dolgulu %5 ve %10 bazalt lifli kompozitlerin SEM görüntüleri Şekil 4.59 ve Şekil 4.60’da gösterilmiştir. F0,8 tane dağılımlı silis dolgulu %5 ve %10 bazalt lifli kompozitlerin SEM görüntüleri, Şekil 4.61 ve Şekil 4.62’de, F0,8 tane dağılımlı bazalt dolgulu %5 ve %10 bazalt lifli kompozitlerin SEM görüntüleri Şekil 4.63 ve Şekil 4.64’de, F0,8 tane dağılımlı kuvars dolgulu %5 ve %10 bazalt lifli kompozitlerin SEM görüntüleri Şekil 4.65 ve Şekil 4.66’da gösterilmiştir. Hibrit dolgulu kompozitlerin SEM görüntüleri Şekil 4.67, Şekil 4.68, Şekil 4.69 ve Şekil 4.70’de gösterilmiştir.

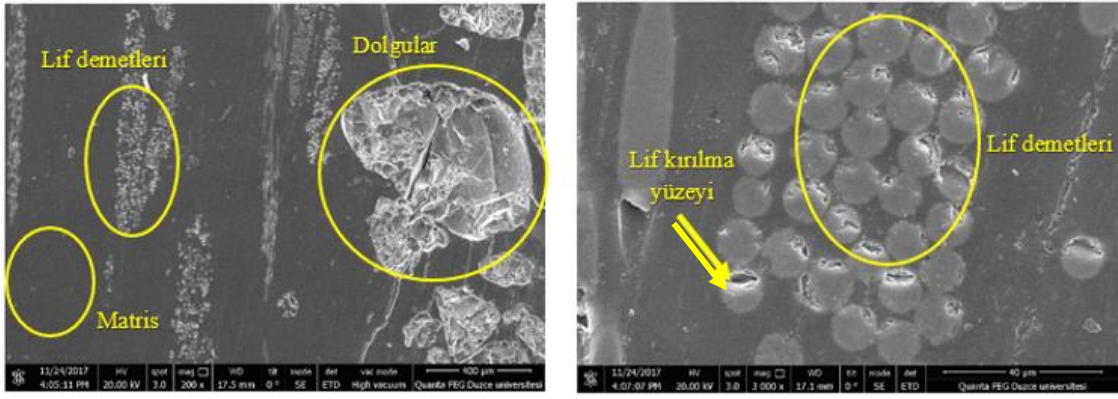
➤ *Cam lifli kompozitlerin SEM görüntüleri*

- “AFS40-45” tane dağılımlı, silis dolgulu, cam lifli kompozitlerin SEM görüntüleri



Şekil 4.43. AFS 40-45 tane dağılımlı, silis dolgulu, %5 cam lifli kompozitler.

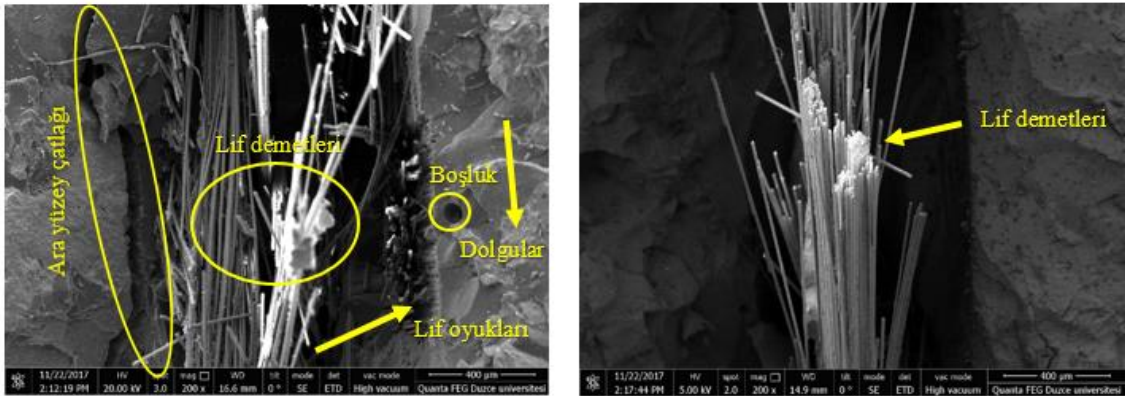
Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, yer yer hava boşluklarının olduğu gözlenmiş ve darbe yönünde matris çatlağı gözlenmiştir. Liflerin darbe mukavemetinde önemli bir rol oynaması ve çatlak yayılımına direnme özelliklerinden dolayı kompozitlerin darbe mukavemetindeki artış lif içeriğinin artmasına bağlıdır. Bu karışım için kullanılan %5 lif oranının ise bu görevi yerine getirebilmek için yetersiz kaldığı düşünülmektedir. Mekanik sonuçlar incelendiğinde de, tüm lifli kompozitler içerisinde bu karışımın ilk 5 sıradaki darbe dayanımına sahip olmadığı gözlenmiştir.



Şekil 4.44. AFS 40-45 tane dağılımlı, silis dolgulu, %10 cam lifli kompozitler.

Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, matris yapının lifleri ve dolguları bütünüyle ıslattığı, hiç hava boşluğunun oluşmadığı ve liflerin homojen dağıldığı gözlenmiştir. Ayrıca, darbe etkisiyle liflerin çekilmeye zorlandığı bölgelerde liflerin çekilmesinden kaynaklanan herhangi bir boşluk oluşmamış ve lif, dolgu ve matris ara-yüzey bağının kuvvetli olduğu gözlenmiştir. Bu karışıma ait kompozitte darbe dayanımındaki artışın, lif içeriğinin %10'a çıkarılması ve ara-yüzey bağının kuvvetli olması olarak yorumlanmıştır. Uygulanan gerilme etkisi altında, etkili ara yüz bağlanma kuvveti nedeniyle yük, lifler tarafından etkili bir şekilde aktarılmıştır. Ayrıca, çekilen liflerin kırılmaya dirençli olduğu ve kırılmaya kadar ani yükü emdiği düşünülmektedir.

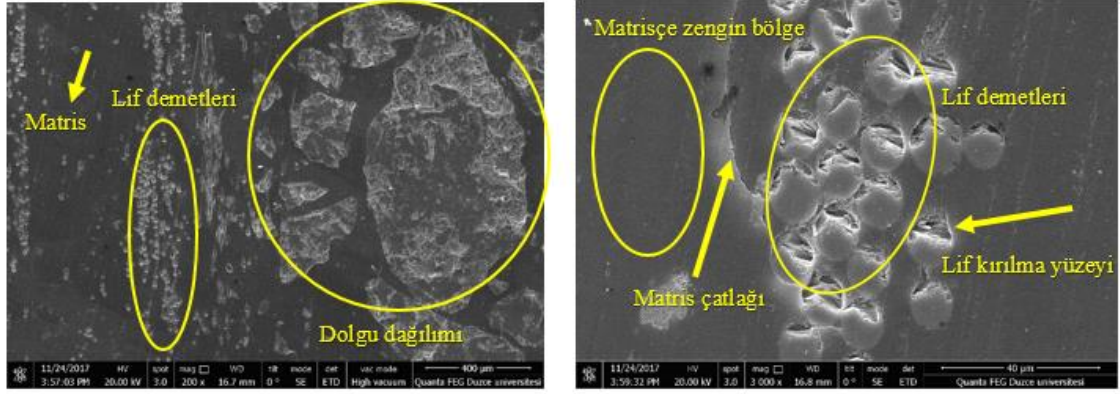
- “AFS40-45” tane dağılımlı, bazalt dolgulu, cam lifli kompozitlerin SEM görüntüleri



Şekil 4.45. AFS 40-45 tane dağılımlı, bazalt dolgulu, %5 cam lifli kompozitler.

Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, yer yer hava boşluklarının olduğu gözlenmiş ve ayrıca bazalt dolgusuyla matris ara yüzey bağının zayıf olmasından kaynaklandığı düşünülen uzunlamasına düzgün bir çatlak oluşumu gözlenmiştir. Bu

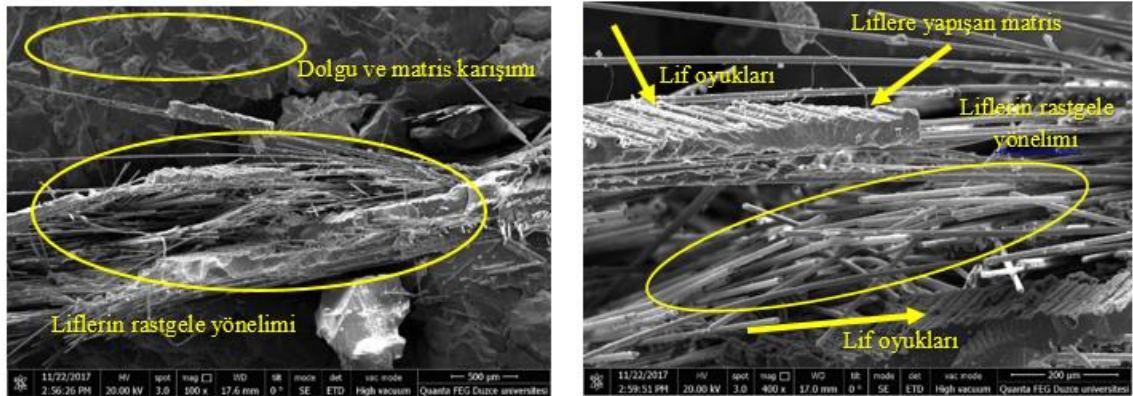
çatlak, liflere düşen gerilme yoğunlaşmasının artmasına sebep olmuştur. Bu karışım için kullanılan %5 lif oranının, bu çatlağı engellemek için yetersiz kaldığı düşünülmektedir. Mekanik sonuçlar incelendiğinde de, tüm lifli kompozitler içerisinde bu karışımın ilk 5 sıradaki darbe dayanımına sahip olmadığı gözlenmiştir.



Şekil 4.46. AFS 40-45 tane dağılımlı, bazalt dolgulu, %10 cam lifli kompozitler.

Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, dolguların homojen dağıldığı, matris yapının dolguları bütünüyle ıslattığı ancak, lifleri tam olarak ıslatamadığı gözlenmiştir. Liflerin tam olarak ıslanamamasından dolayı liflerin yükü eşit paylaşamadığı ve gerilme yoğunlaşması sebebiyle liflerin uç kısımlarında kırıkların ve aynı zamanda matris çatlağının olduğu görülmüştür. Bu durumlardan dolayı, kompozitte beklenen dayanım artışının elde edilemediği düşünülmektedir.

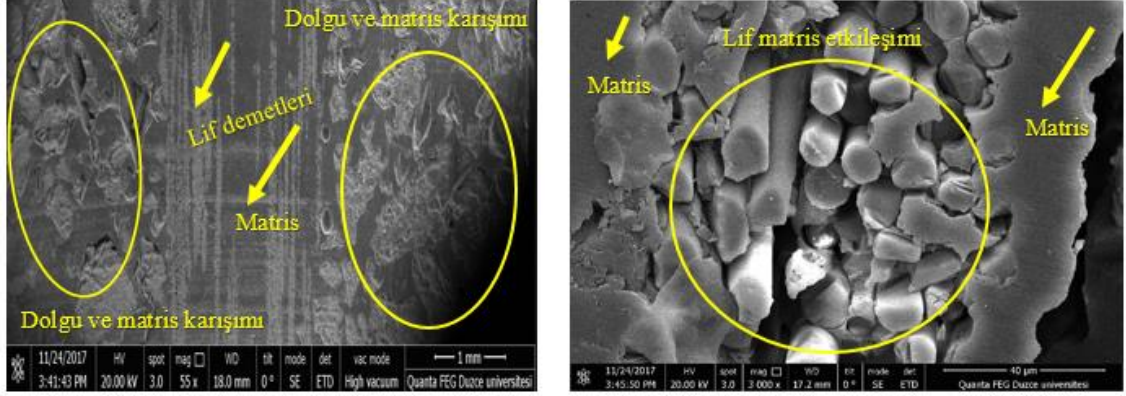
- “AFS40-45” tane dağılımlı, kuvars dolgulu, cam lifli kompozitlerin SEM görüntüleri



Şekil 4.47. AFS 40-45 tane dağılımlı, kuvars dolgulu, %5 cam lifli kompozitler.

Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, dolguların homojen dağıldığı ve liflerin rastgele yönelimlerinin iyi olduğu gözlenmiştir. Bunun yanı sıra, kopan lif parçalarının

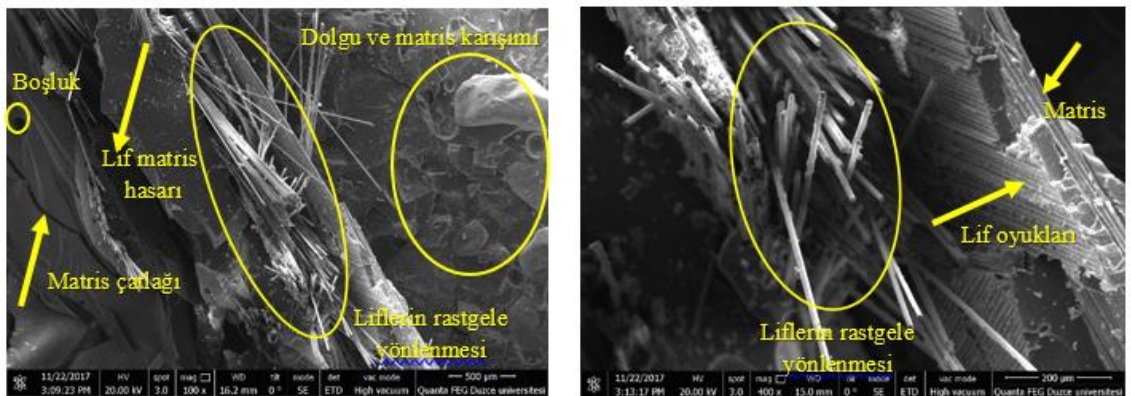
yüzeyinde matris yapının yapışık durumda olduğu ve kırılan matris yüzeyinde lif oyuklarının olduğu gözlenmiştir. Bu durum, matris ile lif ara yüzey bağı dayanımının kuvvetli olduğu anlamına gelmektedir. Ancak, kompozitlerin darbe mukavemetindeki artış lif içeriğinin artmasına bağlı olduğundan dolayı bu karışım için kullanılan %5 lif oranının beklenen dayanım artışının elde edilmesi için yetersiz kaldığı düşünülmektedir.



Şekil 4.48. AFS 40-45 tane dağılımlı, kuvars dolgulu, %10 cam lifli kompozitler.

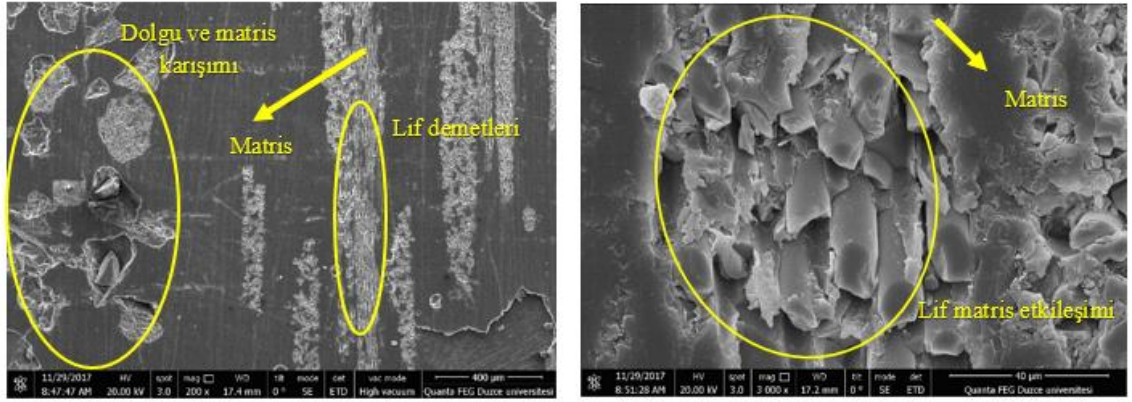
Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, matris yapının lifleri ve dolguları bütünüyle ıslattığı, liflerin ve dolguların homojen dağıldığı gözlenmiştir. Ayrıca, darbe etkisiyle liflerin çekilmeye zorlandığı bölgelerde liflerin çekilmesinden kaynaklanan herhangi bir boşluk oluşmamıştır. Liflerin kırılan yüzeylerinin düzgün olması da lif, dolgu ve matris ara-yüzey bağının kuvvetli olduğunu göstermektedir. Lif içeriğinin %10'a çıkarılması ve etkili ara yüz bağlanma kuvveti nedeniyle kompozite uygulanan gerilmeler, lifler tarafından etkili bir şekilde aktarılmıştır. Ayrıca, çekilen liflerin kırılmaya dirençli olduğu ve kırılmaya kadar ani yükü emdiği düşünülmektedir.

- “F0,8” tane dağılımlı, silis dolgulu, cam lifli kompozitlerin SEM görüntüleri



Şekil 4.49. F0,8 tane dağılımlı, silis dolgulu, %5 cam lifli kompozitler.

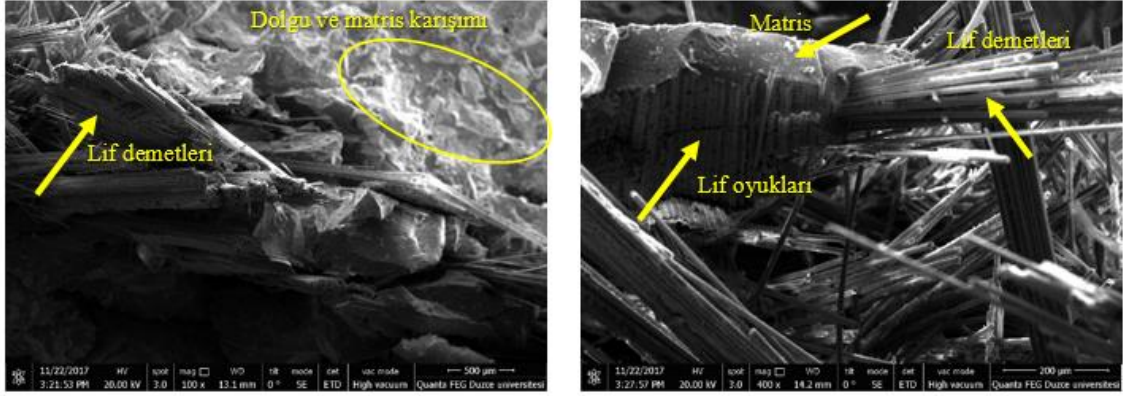
Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, dolguların homojen dağıldığı ve liflerin ratgele yönlenmelerinin iyi olduğu gözlenmiştir. Bunun yanı sıra, kopan lif parçalarının yüzeyinde matris yapının yapışık durumda olduğu ve kırılan matris yüzeyinde lif oyuklarının olduğu gözlenmiştir. Bu durum, matris ile lif ara yüzey bağı dayanımının kuvvetli olduğu anlamına gelmektedir. Bununla birlikte, kompozitte boylamasına düzgün yayılan bir matris çatlağı görülmüştür. Kompozitlerin darbe mukavemetindeki artış lif içeriğinin artmasına bağlı olduğundan dolayı bu karışım için kullanılan %5 lif oranının beklenen dayanım artışının elde edilmesi için yetersiz kaldığı düşünülmektedir.



Şekil 4.50. F0,8 tane dağılımlı, silis dolgulu, %10 cam lifli kompozitler.

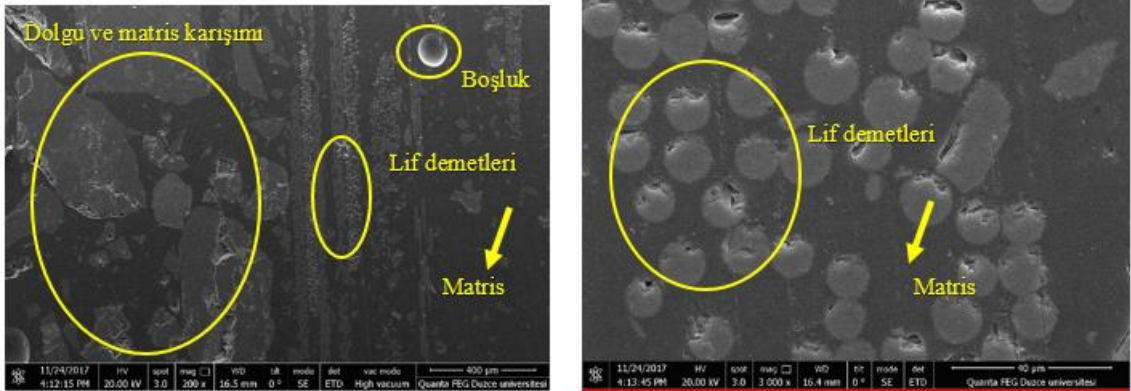
Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, matris yapının lifleri ve dolguları bütünüyle ıslattığı, liflerin ve dolguların homojen dağıldığı gözlenmiştir. Ayrıca, darbe etkisiyle liflerin çekilmeye zorlandığı bölgelerde liflerin çekilmesinden kaynaklanan herhangi bir boşluk oluşmamıştır. Liflerin kırılan yüzeylerinin düzgün olması da lif, dolgu ve matris ara-yüzey bağının kuvvetli olduğunu göstermektedir. Lif içeriğinin %10'a çıkarılması ve etkili ara yüz bağlanma kuvveti nedeniyle kompozite uygulanan gerilmeler, lifler tarafından etkili bir şekilde aktarılmıştır. Ayrıca, çekilen liflerin kırılmaya dirençli olduğu ve kırılmaya kadar ani yükü emdiği düşünülmektedir.

- “F0,8” tane dağılımlı, bazalt dolgulu, cam lifli kompozitlerin SEM görüntüleri



Şekil 4.51. F0,8 tane dağılımlı, bazalt dolgulu, %5 cam lifli kompozitler.

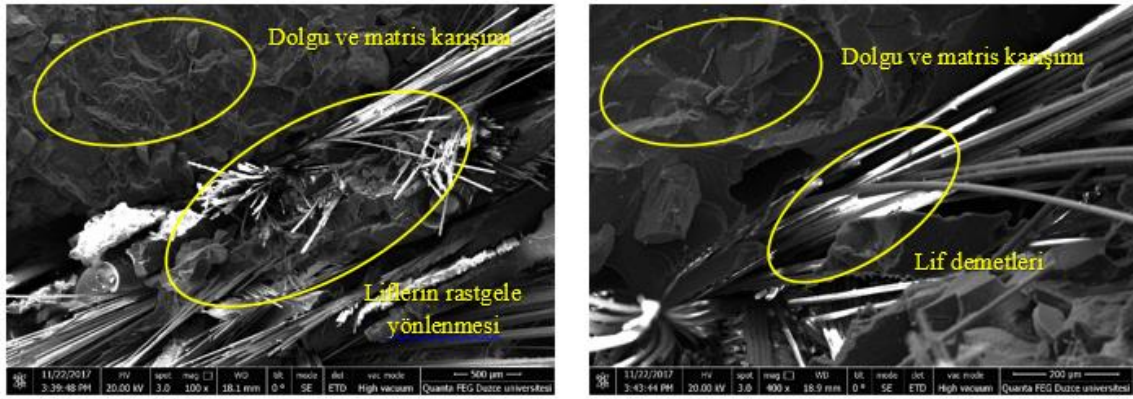
Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, dolguların homojen dağıldığı ve liflerin ratgele yönlenmelerinin iyi olduğu gözlenmiştir. Bunun yanı sıra, matris yapının liflere aderansının iyi olduğu ve kırılan matris yüzeyinde lif oyuklarının olduğu gözlenmiştir. Bu durum, matris ile lif ara yüzey bağı dayanımının kuvvetli olduğu anlamına gelmektedir. Ancak, kompozitlerin darbe mukavemetindeki artış lif içeriğinin artmasına bağlı olduğundan dolayı bu karışım için kullanılan %5 lif oranının, aynı lif oranına sahip diğer kompozitlere benzer şekilde beklenen dayanım artışının elde edilmesi için yetersiz kaldığı düşünülmektedir.



Şekil 4.52. F0,8 tane dağılımlı, bazalt dolgulu, %10 cam lifli kompozitler.

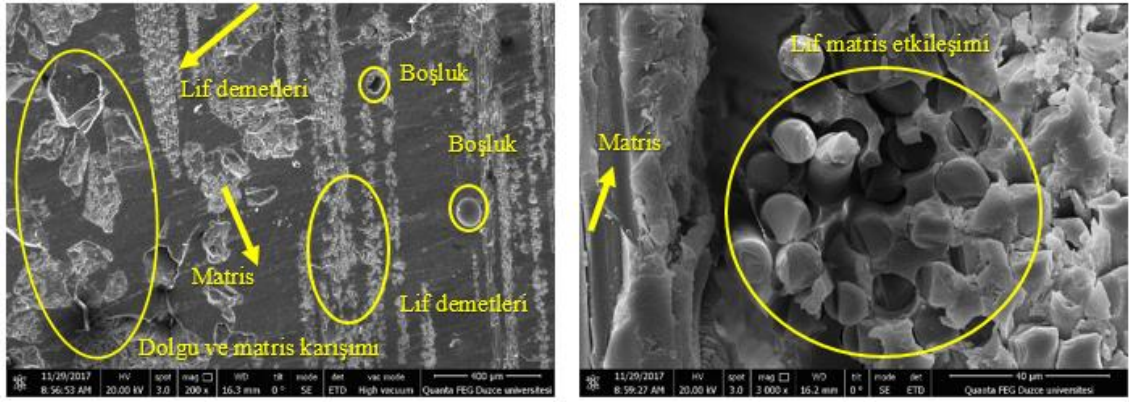
Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, matris yapının lifleri ve dolguları bütünüyle ıslattığı, liflerin ve dolguların homojen dağıldığı gözlenmiştir. Ayrıca, darbe etkisiyle liflerin çekilmeye zorlandığı bölgelerde liflerin çekilmesinden kaynaklanan herhangi bir boşluk oluşmamıştır. Liflerin kırılan yüzeylerinin düzgün olması da lif ve matris ara-yüzey bağının kuvvetli olduğunu göstermektedir. Lif içeriğinin %10'a çıkarılması ve etkili ara yüz bağlanma kuvveti nedeniyle kompozite uygulanan gerilmeler lifler tarafından etkili bir şekilde aktarılmıştır. Ayrıca, çekilen liflerin kırılmaya dirençli olduğu ve kırılmaya kadar ani yükü emdiği düşünülmektedir.

- “F0,8” tane dağılımlı, kuvars dolgulu, cam lifli kompozitlerin SEM görüntüleri



Şekil 4.53. F0,8 tane dağılımlı, kuvars dolgulu, %5 cam lifli kompozitler.

Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, dolguların homojen dağıldığı ve liflerin rastgele yönelmelerinin iyi olduğu gözlenmiştir. Bunun yanı sıra, kırılan matris yüzeyinde lif oyuklarının olduğu gözlenmiştir. Bu durum, matris ile lif ara yüzey bağı dayanımının kuvvetli olduğu anlamına gelmektedir. Ancak, kompozitlerin darbe mukavemetindeki artış lif içeriğinin artmasına bağlı olduğundan dolayı bu karışım için kullanılan %5 lif oranının beklenen dayanım artışının elde edilmesi için yetersiz kaldığı düşünülmektedir.

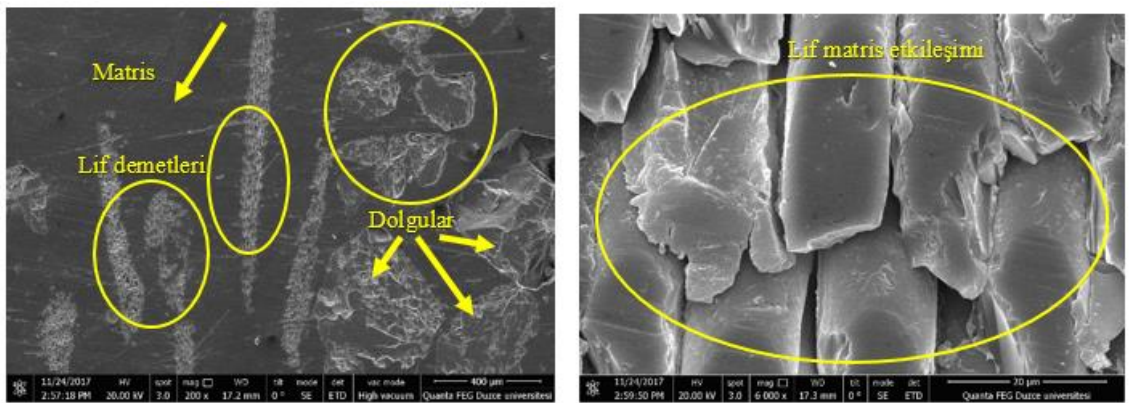


Şekil 4.54. F0,8 tane dağılımlı, kuvars dolgulu, %10 cam lifli kompozitler.

Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, matris yapının lifleri ve dolguları bütünüyle ıslattığı, liflerin ve dolguların homojen dağıldığı gözlenmiştir. Ayrıca, darbe etkisiyle liflerin çekilmeye zorlandığı bölgelerde liflerin çekilmesinden kaynaklanan herhangi bir boşluk oluşmamıştır. Liflerin kırılan yüzeylerinin çok düzgün olması, kırılmadan sonra da liflerin bir arada bulunması ve yer yer dolgu kırıklarının oluşması lif, dolgu ve matris ara-yüzey bağının kuvvetli olduğunu göstermektedir. Lif içeriğinin %10'a çıkarılması ve etkili ara yüz bağlanma kuvveti nedeniyle kompozite uygulanan gerilmeler, lifler tarafından etkili bir şekilde aktarılmıştır. Ayrıca, çekilen liflerin kırılmaya dirençli olduğu ve kırılmaya kadar ani yükü emdiği düşünülmektedir.

➤ *Bazalt lifli kompozitlerin SEM görüntüleri*

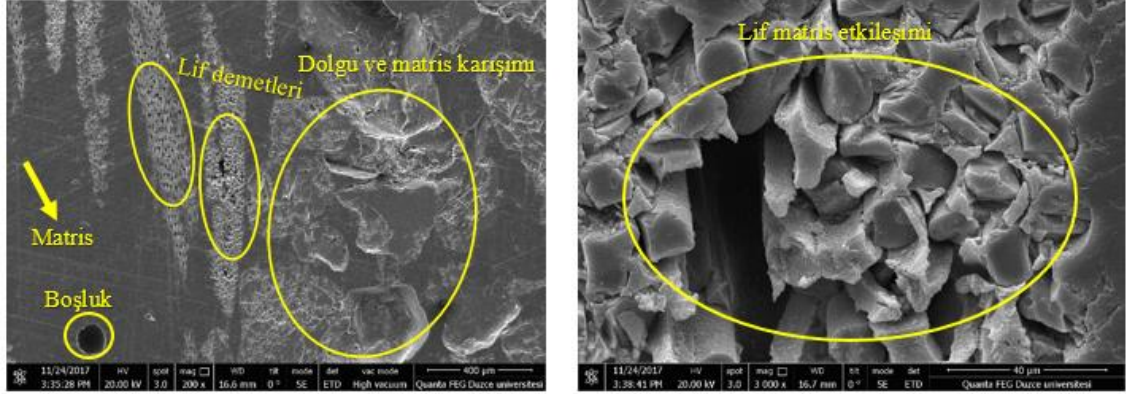
“AFS40-45” tane dağılımlı, silis dolgulu, bazalt lifli kompozitlerin SEM görüntüleri



Şekil 4.55. AFS 40-45 tane dağılımlı, silis dolgulu, %5 bazalt lifli kompozitler.

Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, matris yapının lifleri ve dolguları bütünüyle ıslattığı, hiç hava boşluğunun oluşmadığı ve liflerin homojen dağıldığı

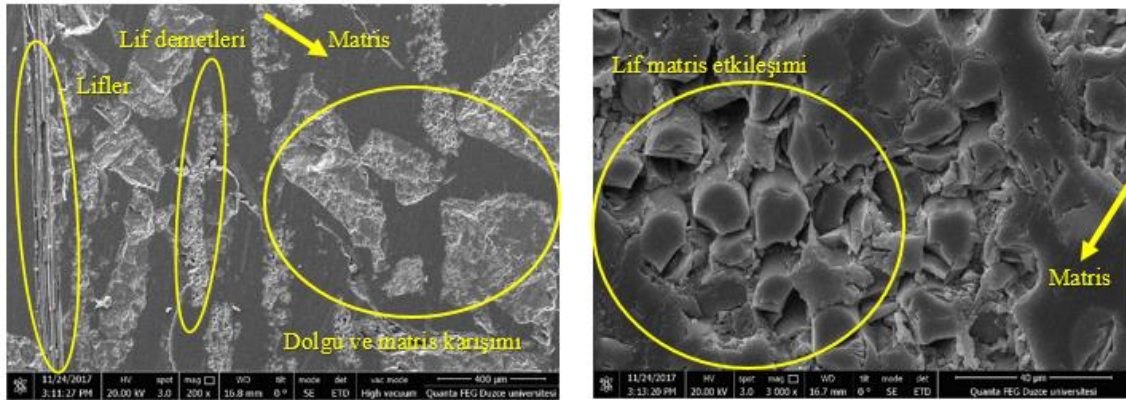
gözlenmiştir. Ayrıca, darbe etkisiyle liflerin çekilmeye zorlandığı bölgelerde liflerin çekilmesinden kaynaklanan herhangi bir boşluk oluşmamıştır. Ancak, kompozitlerin darbe mukavemetindeki artış lif içeriğinin artmasına bağlı olduğundan dolayı bu karışım için kullanılan %5 lif oranının beklenen dayanım artışının elde edilmesi için yetersiz kaldığı düşünülmektedir.



Şekil 4.56. AFS 40-45 tane dağılımlı, silis dolgulu, %10 bazalt lifli kompozitler.

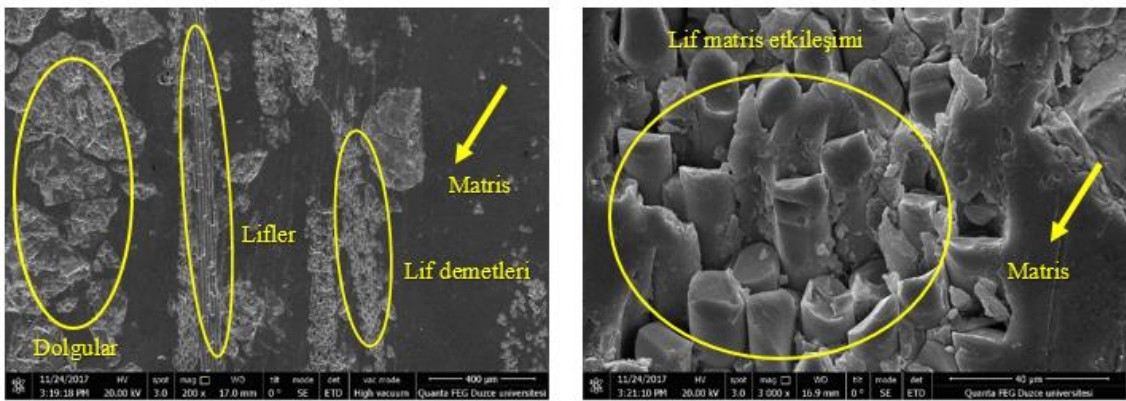
Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, matris yapının lifleri ve dolguları bütünüyle ıslattığı, liflerin ve dolguların homojen dağıldığı gözlenmiştir. Ayrıca, darbe etkisiyle liflerin çekilmeye zorlandığı bölgelerde liflerin çekilmesinden kaynaklanan herhangi bir boşluk oluşmamıştır. Ancak, uygulanan kuvvet doğrultusunda liflerin kuvvet doğrultusunda hareket ederek matris yapıdan ayrıldığı gözlenmiştir. Bununla birlikte matris yapı içerisinde hava boşluklarına rastlanmıştır. Lif içeriğinin %10'a çıkarılması ile kompozitin darbe dayanımı yükselmiş ancak lif ve matris ara-yüzey bağının yeterince kuvvetli olmamasından kaynaklandığı düşünülen yeterli dayanım artışı sağlanamamıştır. Ayrıca, cam lifine kıyasla bazalt liflerinin matris yapıyla çok iyi bir uyum sağlayamadığı düşünülmektedir.

- “AFS40-45” tane dağılımlı, bazalt dolgulu, bazalt lifli kompozitlerin SEM görüntüleri



Şekil 4.57. AFS 40-45 tane dağılımlı, bazalt dolgulu, %5 bazalt lifli kompozitler.

Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, matris yapının lifleri ve dolguları bütünüyle ıslattığı, hiç hava boşluğunun oluşmadığı ve liflerin homojen dağıldığı gözlenmiştir. Ayrıca, darbe etkisiyle liflerin çekilmeye zorlandığı bölgelerde liflerin çekilmesinden kaynaklanan herhangi bir boşluk oluşmamıştır. Ancak, bu kompozit yapıda matris çatlağı, matris dolgu ara yüzey çatlağı, matris lif ara yüzey çatlaklarının olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, kompozitlerin darbe mukavemetindeki artış lif içeriğinin artmasına bağlı olduğundan dolayı bu karışım için kullanılan %5 lif oranının beklenen dayanım artışının elde edilmesi için yetersiz kaldığı düşünülmektedir.

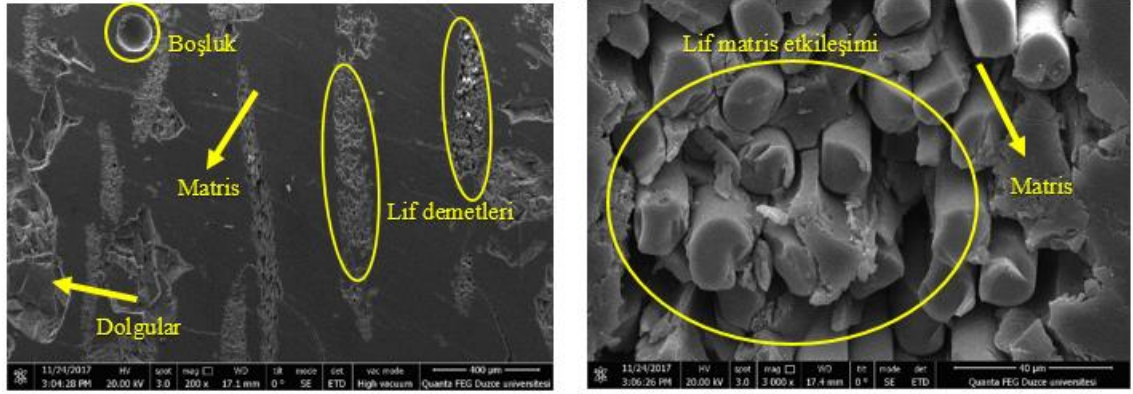


Şekil 4.58. AFS 40-45 tane dağılımlı, bazalt dolgulu, %10 bazalt lifli kompozitler.

Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, matris yapının lifleri ve dolguları bütünüyle ıslattığı, liflerin ve dolguların homojen dağıldığı gözlenmiştir. Ayrıca, darbe etkisiyle liflerin çekilmeye zorlandığı bölgelerde liflerin çekilmesinden kaynaklanan herhangi bir boşluk oluşmamıştır. Ancak, yer yer hava boşlukları gözlenmiş ve dolgular

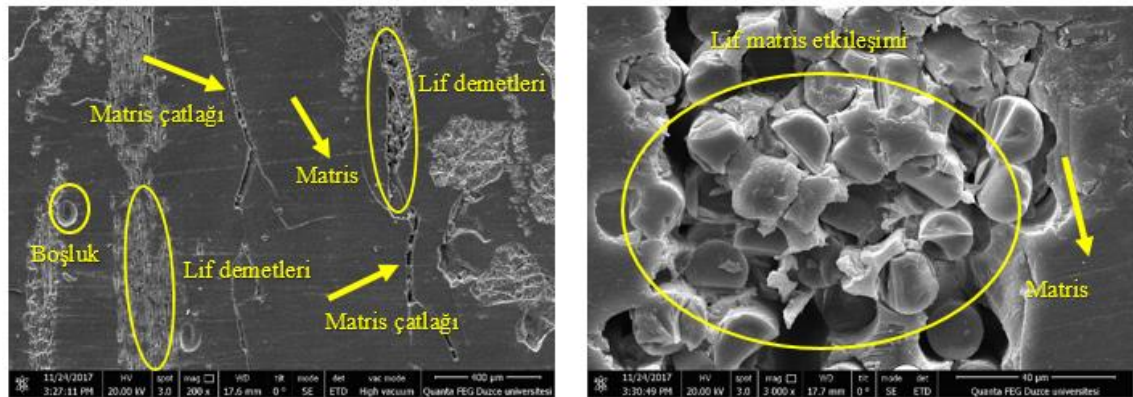
ile matris ara yüzeyinde çatlaklar tespit edilmiştir. Ayrıca, cam lifine kıyasla bazalt liflerinin matris yapıyla çok iyi bir uyum sağlayamadığı da düşünülmektedir. Bu durumlardan dolayı lif içeriğinin %10'a çıkarılmasıyla kompozitin dayanımının arttığı ancak, yeterli artışın sağlanamadığı düşünülmektedir.

• “AFS40-45” tane dağılımlı, kuvars dolgulu, bazalt lifli kompozitlerin SEM görüntüleri



Şekil 4.59. AFS 40-45 tane dağılımlı, kuvars dolgulu, %5 bazalt lifli kompozitler.

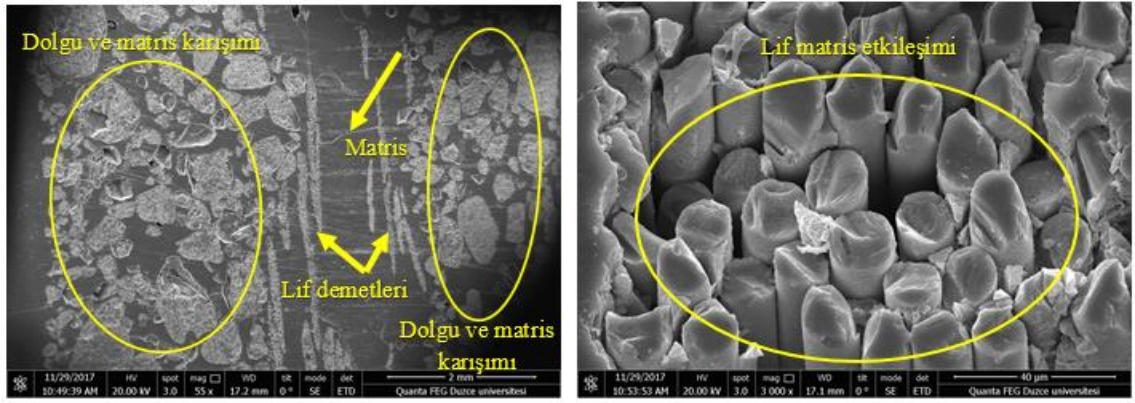
Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, matris yapının lifleri ve dolguları bütünüyle ıslattığı ve liflerin homojen dağıldığı gözlenmiştir. Ayrıca, darbe etkisiyle liflerin çekilmeye zorlandığı bölgelerde liflerin çekilmesinden kaynaklanan herhangi bir boşluk oluşmamıştır. Ayrıca matris çatlakların olduğu gözlenmiş ve bu çatlakların lifli bölgede sonlandığı görülmektedir. Bu durum, matris yapının üzerine gelen yükleri liflere aktardığını ancak, bu karışım için kullanılan %5 lif oranının ise bu yükü taşıyabilmek için yetersiz kaldığı ve bu nedenle kompozitin darbe dayanımının düşük çıktığı düşünülmektedir.



Şekil 4.60. AFS 40-45 tane dağılımlı, kuvars dolgulu, %10 bazalt lifli kompozitler.

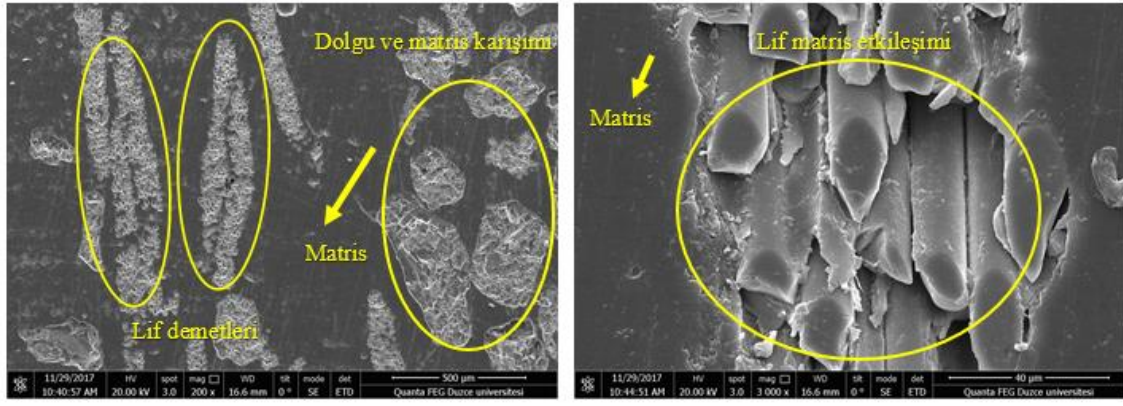
Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, matris yapının lifleri ve dolguları bütünüyle ıslattığı, liflerin ve dolguların homojen dağıldığı gözlenmiştir. Ayrıca, darbe etkisiyle liflerin çekilmeye zorlandığı bölgelerde liflerin çekilmesinden kaynaklanan herhangi bir boşluk oluşmamıştır. Liflerin kırılan yüzeylerinin düzgün olması, kırılmadan sonra da liflerin bir arada bulunması ve yer yer dolgu kırıklarının oluşması lif, dolgu ve matris ara-yüzey bağının kuvvetli olduğunu göstermektedir. Ayrıca matris çatlakların oluştuğu gözlenmiş ve bu çatlakların lifli bölgede sonlandığı görülmektedir. Bu durum, matris yapının üzerine gelen yükleri liflere aktardığını ve lif içeriğinin %10'a çıkarılması ile etkili ara yüz bağlanma kuvvetinin de etkisiyle enerjinin yüksek oranda sönmüldüğünü göstermektedir. Ayrıca, çekilen liflerin kırılmaya dirençli olduğu ve kırılmaya kadar ani yükü emdiği düşünülmektedir.

- “F0,8” tane dağılımlı, silis dolgulu, bazalt lifli kompozitlerin SEM görüntüleri



Şekil 4.61. F0,8 tane dağılımlı, silis dolgulu, %5 bazalt lifli kompozitler.

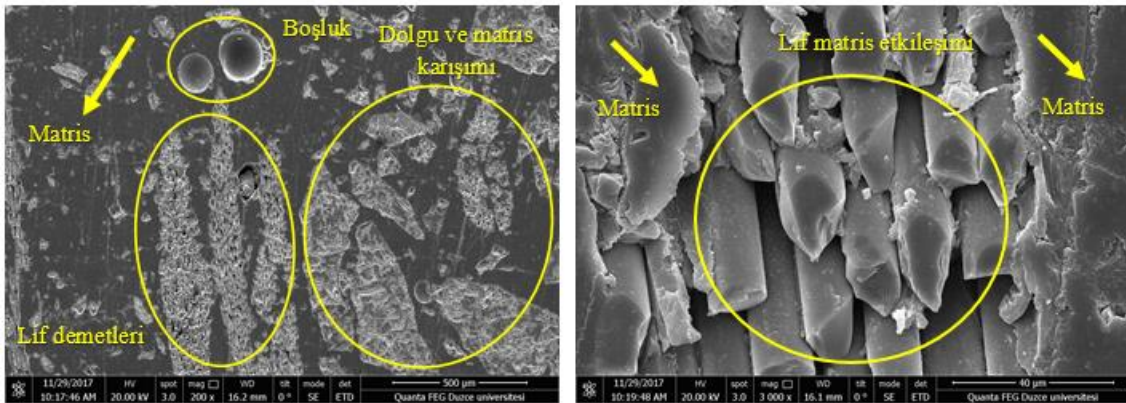
Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, matris yapının lifleri ve dolguları bütünüyle ıslattığı ve liflerin homojen dağıldığı gözlenmiştir. Ayrıca, darbe etkisiyle liflerin çekilmeye zorlandığı bölgelerde liflerin çekilmesinden kaynaklanan herhangi bir boşluk oluşmamıştır. Ayrıca matris çatlaklarının oluştuğu gözlenmiş ve bu çatlakların lifli bölgede sonlandığı görülmüştür. Bu durum, matris yapının üzerine gelen yükleri liflere aktardığını ancak, bu karışım için kullanılan %5 lif oranının ise bu yükü taşıyabilmek için yetersiz kaldığı ve bu nedenle kompozitin darbe dayanımının düşük çıktığı düşünülmektedir.



Şekil 4.62. F0,8 tane dağılımlı, silis dolgulu, %10 bazalt lifli kompozitler.

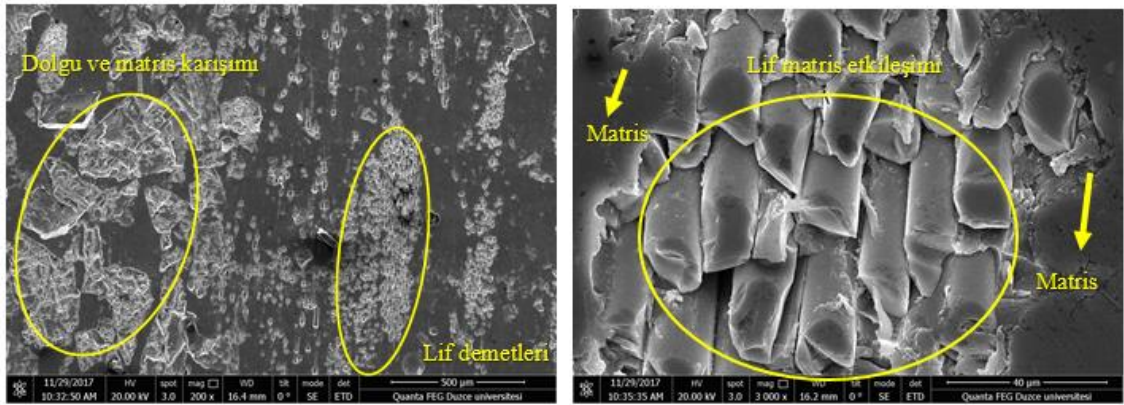
Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, matris yapının lifleri ve dolguları bütünüyle ıslattığı, liflerin ve dolguların homojen dağıldığı gözlenmiştir. Ayrıca, darbe etkisiyle liflerin çekilmeye zorlandığı bölgelerde liflerin çekilmesinden kaynaklanan herhangi bir boşluk oluşmamıştır. Liflerin kırılan yüzeylerinin düzgün olması, kırılmadan sonra da liflerin bir arada bulunması ve yer yer dolgu kırıklarının oluşması lif, dolgu ve matris ara-yüzey bağının kuvvetli olduğunu göstermektedir. Ayrıca matris çatlakların oluştuğu gözlenmiş ve bu çatlakların lifli bölgede sonlandığı görülmektedir. Bu durum, matris yapının üzerine gelen yükleri liflere aktardığını ve lif içeriğinin %10'a çıkarılması ile etkili ara yüz bağlanma kuvvetinin de etkisiyle enerjinin yüksek oranda sönmüldüğünü göstermektedir. Ayrıca, çekilen liflerin kırılmaya dirençli olduğu ve kırılmaya kadar ani yükü emdiği düşünülmektedir.

- “F0,8” tane dağılımlı, bazalt dolgulu, bazalt lifli kompozitlerin SEM görüntüleri



Şekil 4.63. F0,8 tane dağılımlı, bazalt dolgulu, %5 bazalt lifli kompozitler.

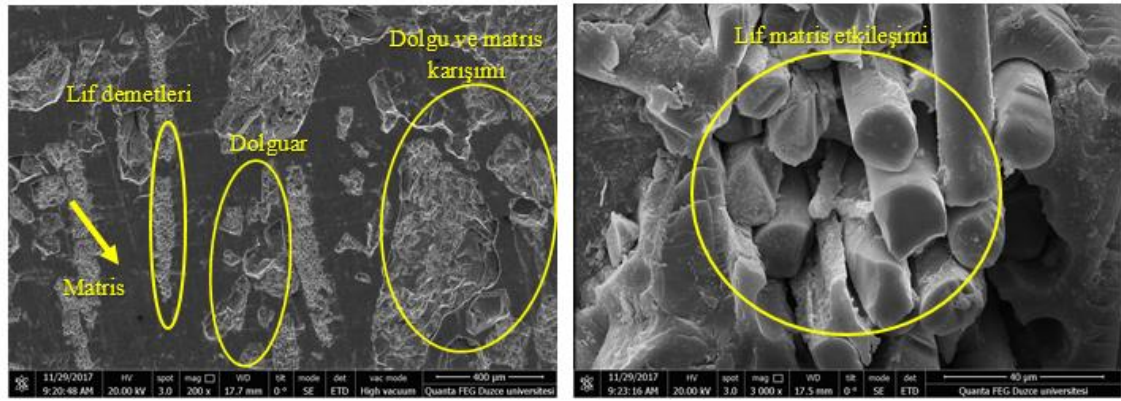
Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, matris yapının lifleri ve dolguları bütünüyle ıslattığı ve liflerin homojen dağıldığı gözlenmiştir. Ayrıca, darbe etkisiyle liflerin çekilmeye zorlandığı bölgelerde liflerin çekilmesinden kaynaklanan herhangi bir boşluk oluşmamıştır. Ancak, matris yapı içerisinde yer yer hava boşluklarının olduğu gözlenmiştir. Kompozitlerin darbe mukavemetindeki artış lif içeriğinin artmasına bağlı olduğundan dolayı bu karışım için kullanılan %5 lif oranının beklenen dayanım artışının elde edilmesi için yetersiz kaldığı düşünülmektedir.



Şekil 4.64. F0,8 tane dağılımlı, bazalt dolgulu, %10 bazalt lifli kompozitler.

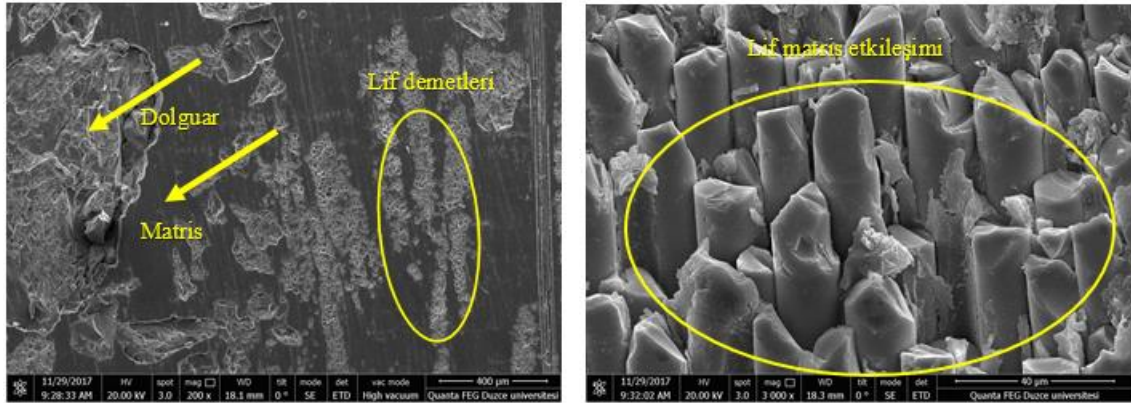
Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, matris yapının lifleri ve dolguları bütünüyle ıslattığı, liflerin ve dolguların homojen dağıldığı gözlenmiştir. Ayrıca, darbe etkisiyle liflerin çekilmeye zorlandığı bölgelerde liflerin çekilmesinden kaynaklanan herhangi bir boşluk oluşmamıştır. Bununla birlikte, matris yapı içerisinde hava boşluklarına rastlanmıştır. Lif içeriğinin %10'a çıkarılması ile kompozitin darbe dayanımı yükselmiş ancak lif ve matris ara-yüzey bağının yeterince kuvvetli olmamasından kaynaklandığı düşünülen yeterli dayanım artışı sağlanamamıştır. Ayrıca, cam lifine kıyasla bazalt liflerinin matris yapıyla çok iyi bir uyum sağlayamadığı düşünülmektedir. Mekanik sonuçlar değerlendirildiğinde de, aynı lif oranlarındaki bazalt lifli kompozitlerin darbe dayanımları genel olarak cam lifli kompozitlere kıyasla daha düşük değerde elde edilmiştir.

- “F0,8” tane dağılımlı, kuvars dolgulu, bazalt lifli kompozitlerin SEM görüntüleri



Şekil 4.65. F0,8 tane dağılımlı, kuvars dolgulu, %5 bazalt lifli kompozitler.

Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, matris yapının lifleri ve dolguları bütünüyle ıslattığı ve liflerin homojen dağıldığı gözlenmiştir. Ayrıca, darbe etkisiyle liflerin çekilmeye zorlandığı bölgelerde liflerin çekilmesinden kaynaklanan herhangi bir boşluk oluşmamıştır. Ancak, matris yapı içerisinde yer yer hava boşluklarının olduğu gözlenmiştir. Kompozitlerin darbe mukavemetindeki artış lif içeriğinin artmasına bağlı olduğundan dolayı bu karışım için kullanılan %5 lif oranının beklenen dayanım artışının elde edilmesi için yetersiz kaldığı düşünülmektedir.

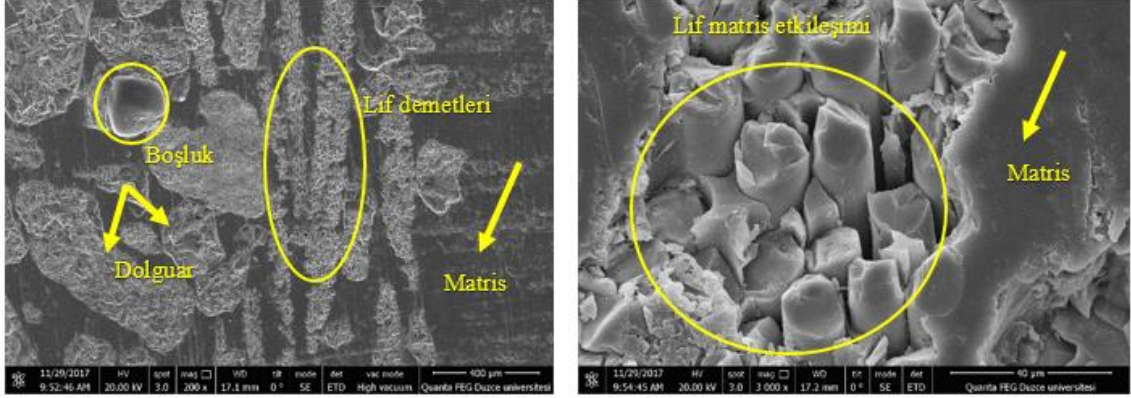


Şekil 4.66. F0,8 tane dağılımlı, kuvars dolgulu, %10 bazalt lifli kompozitler.

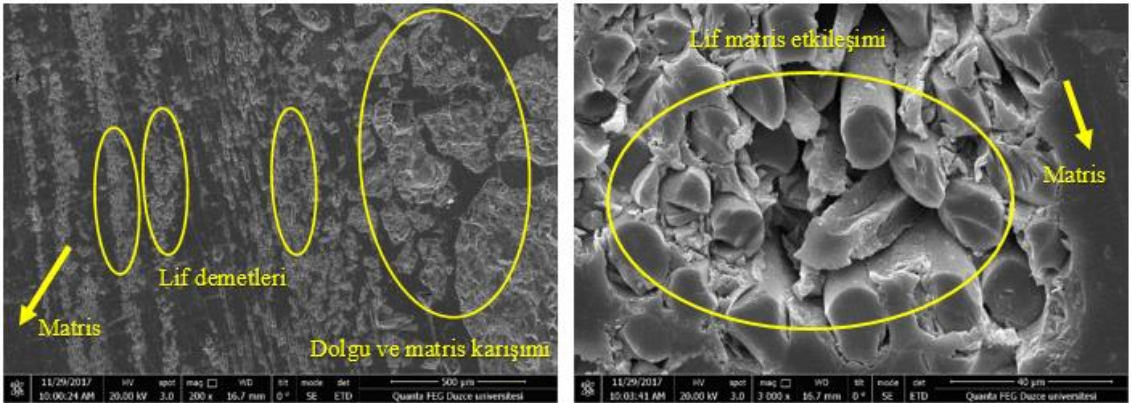
Bu karışıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde, matris yapının lifleri ve dolguları bütünüyle ıslattığı, liflerin ve dolguların homojen dağıldığı gözlenmiştir. Ayrıca, darbe etkisiyle liflerin çekilmeye zorlandığı bölgelerde liflerin çekilmesinden kaynaklanan herhangi bir boşluk oluşmamıştır. Lif içeriğinin %10'a çıkarılması ile kompozitin darbe dayanımı yükselmiş ancak lif ve matris ara-yüzey bağının yeterince kuvvetli

olmamasından kaynaklandığı düşünölen yeterli dayanım artışı sağlanamamıştır. Ayrıca, cam lifine kıyasla bazalt liflerinin matris yapıyla çok iyi bir uyum sağlayamadığı düşünölmektedir. Mekanik sonuçlar değeriendirildiğinde de, aynı lif oranlarındaki bazalt lifli kompozitlerin darbe dayanımları genel olarak cam lifli kompozitlere kıyasla daha düşük değerde elde edilmiştir.

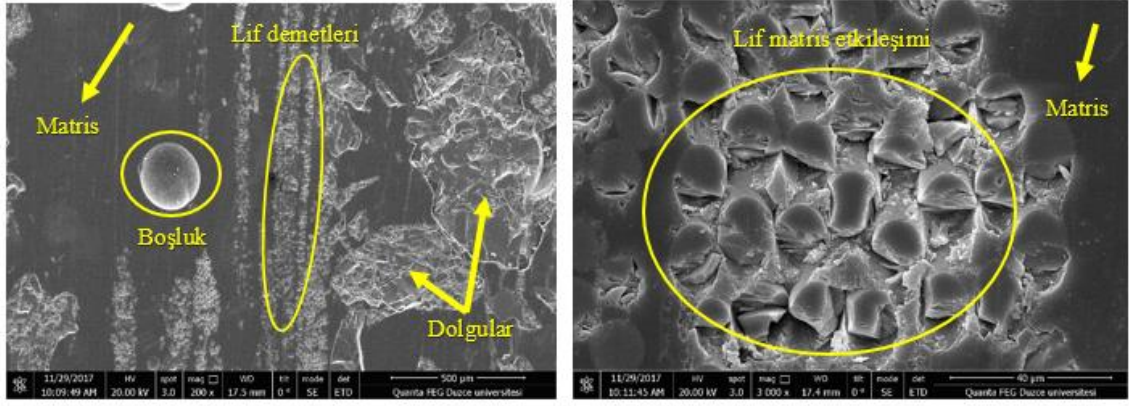
➤ *Hibrit lifli kompozitlerin SEM görüntöleri*



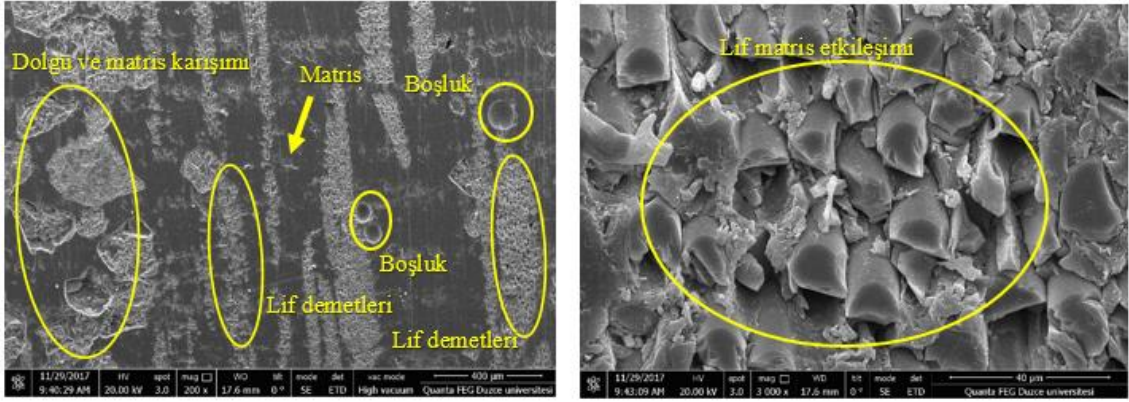
Şekil 4.67. “F0,8” tane dağılımlı, silis dolgulu, hibrit lifli kompozitlerin SEM görüntöleri.



Şekil 4.68. “F0,8” tane dağılımlı, bazalt dolgulu, hibrit lifli kompozitlerin SEM görüntöleri.



Şekil 4.69. “F0,8” tane dağılımlı, kuvars dolgulu, hibrit lifli kompozitlerin SEM görüntüleri.



Şekil 4.70. “F0,8” tane dağılımlı, hibrit dolgulu (%60 bazalt + %40 silis) ve hibrit lifli (%6 cam lifi + %4 bazalt lifi) kompozitlerin SEM görüntüleri.

Tüm hibrit lifli kompozitler için ortak bir değerlendirme yapıldığında, matris yapının lif ve dolguları bütünüyle ıslattığı, liflerin ve dolguların homojen dağıldığı gözlenmiştir. Ayrıca, darbe etkisiyle liflerin çekilmeye zorlandığı bölgelerde liflerin çekilmesinden kaynaklanan herhangi bir boşluk oluşmamıştır. Cam ve bazalt lifli kompozitler üzerinde yapılan SEM analizlerinde, cam lifine kıyasla bazalt liflerinin matris yapıyla çok iyi bir uyum sağlayamadığı yorumlanmıştır. Mekanik sonuçlar değerlendirildiğinde de, aynı lif oranlarındaki bazalt lifli kompozitlerin darbe dayanımları genel olarak cam lifli kompozitlere kıyasla daha düşük değerde elde edildiği görülmüştür. Liflerin hibrit olarak kullanılmasıyla, bazalt liflerinin matris yapıyla ara yüzey bağının zayıf olmasının bir sonucu olarak hibrit lifli kompozitlerde beklenen darbe dayanımlarının elde edilemediği düşünülmektedir. Ayrıca, cam ve bazalt liflerinin birbiriyle uyumlu olmadığı da düşünülmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Farklı reçine türleri, başlatıcı ve kürleştirici oranları, dolgu türleri ve dağılımları ile farklı lif türü ve oranlarında; ham reçine, dolgulu reçine karışımları ve lif takviyeli kompozitler olmak üzere üretilen farklı kompozitler üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda elde edilen veriler üzerinde gerçekleştirilen değerlendirmeler aşağıda sistematik olarak verilmiştir.

Ham Reçine Karışımlarına Ait Sonuçlar

Çalışmada ortoftalik reçine, izoftalik reçine ve katalizör ile farklı oranlara sahip başlatıcının polimerleşme reaksiyonu sonucunda yeni kompozitler üretilmiştir. Üretim esnasındaki reçine karışımının fiziksel özellikleri ile birlikte, kimyasal, termal ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

Çalışma sonucunda, başlatıcı oranının artmasıyla, her iki reçine türünde de jelleşme süresinin azaldığı gözlenmiştir. Artan başlatıcı oranı ile jelleşme sıcaklığının da yükseldiği gözlenmiştir. Pik ekzoterm sıcaklıkları incelendiğinde ortoftalik reçinede, başlatıcı oranına bağlı olarak anlamlı bir değişim görülememiştir. İzoftalik reçinede ise, başlatıcı oranının artması pik ekzotermik sıcaklığının yükselmesine neden olmuştur. İzoftalik reçinenin viskozitesi, ortoftalik reçineden daha yüksek değere sahiptir.

TGA analizinde, optimum parametrelere sahip %1,0 oranında başlatıcı içeren izoftalik ve ortoftalik reçinelerden elde edilen kompozitler incelendiğinde, hem birinci bölgede hem de ikinci bölgede, ortoftalik asitten elde edilen kompozitin termal karalılığının izoftalik reçineden elde edilen kompozite göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

İzoftalik reçinenin stiren içeriği, ortoftalik reçineden daha yüksek oranda çıkmıştır. Stiren içeriğinin yüksek olması mekanik özellikler üzerinde olumlu bir etki yapmıştır.

Kompozitlere ait spektrumlar incelendiğinde, reçinelerde ve stiren molekülünde bulunan 912 cm^{-1} 'deki $\text{C}=\text{C}$ gerilme titreşiminin ortadan kalktığı gözlenmektedir. Bu durum sonucunda, MEKP başlatıcısının, stiren molekülündeki mevcut çift bağları açma suretiyle radikalik polimerleşme reaksiyonunu gerçekleştirdiği gözlenmiştir. Ayrıca 1455 cm^{-1} deki $\text{C}-\text{H}$ etkileşimleri de polimer zincirinin artmasıyla, başlangıçtaki reçinenin mevcut titreşimine oranla artış göstermiştir.

Üretilen kompozitler içerisinde, ortoftalik reçine için çekme dayanımı değerleri **38 MPa-64 MPa** arasında yer alırken, eğilme dayanımları ise **83 MPa-117 MPa** arasında belirlenmiştir. İzofthalik reçine için, çekme dayanımı değerleri **62 MPa-68 MPa** arasında yer alırken, eğilme dayanımları ise **112 MPa-123 MPa** arasında belirlenmiştir. En yüksek mekanik özellikler ortoftalik reçine için %1,0 başlatıcı oranında (**çekme dayanımı: 64 MPa; eğilme dayanımı: 116 MPa**), izofthalik reçine için ise %2,0 başlatıcı oranında (**çekme dayanımı: 68 MPa; eğilme dayanımı: 123 MPa**) elde edilmiş ve aynı zamanda daha yüksek başlatıcı oranlarında çekme ve eğilme dayanımlarında azalmaların olduğu görülmüştür. Ayrıca, her iki reçine türünde de başlatıcı oranı arttıkça reçinelerin kopma uzaması değerlerinin azaldığı ve böylelikle daha kırılgan hale geldikleri de tespit edilmiştir. Bununla birlikte, izofthalik reçinenin %1,0 başlatıcı oranındaki kullanımı sonucu üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerinin de (**çekme dayanımı: 66MPa; eğilme dayanımı: 117 MPa**) en yüksek mekanik özelliklerin elde edildiği %2,0 başlatıcı oranındaki kompozitlere yakın olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, daha az başlatıcı oranı kullanılması neticesinde reçine sarfiyatı da azaltıldığından dolayı, *“hem ortoftalik reçine için hem de izofthalik reçine için optimum reçine karışımının, %1 başlatıcı ve %1 hızlandırıcı oranında elde edildiği kanaatine varılmıştır”*. İzofthalik reçinelerin mekanik dayanımlarının ortoftalik reçinelerden genel olarak daha yüksek değere sahip olmasına rağmen iki reçine arasındaki mekanik dayanım farkı çok fazla olmadığından ve elyaf ıslanması için önemli olan düşük viskozite değeri açısından değerlendirme yapıldığında, *“kompozit malzeme üretiminde ortoftalik reçinelerin kullanılmasının daha uygun olacağı kanaatine varılmıştır”*.

Mevcut çalışmada ayrıca, doymamış polyesterlerin moleküler yapılarının farklı olması, üretim süreçlerinde içerdikleri katkı maddelerinin farklılık göstermesi, polimerleşme için kullanılan başlatıcı ve hızlandırıcı türleri ile oranlarının farklılığı, karışımların iyi homojenize edilmesi için uygulanan ön işlemler ve kompozitlerin kürleşme şartları gibi faktörlerin, kompozitin mekanik özelliklerini etkilediği gözlenmiştir.

Dolgulu Kompozitlere Ait Sonuçlar;

Tüm dolgulu kompozitler içerisinde, en yüksek 5 basınç dayanımı, **“%1,0”** başlatıcı oranında elde edilmiştir.

Tüm dolgulu reçine karışımları içerisinde, en yüksek beş basınç dayanımı sırasıyla;
“F 0,8” tane sınıfındaki “silis dolgulu” reçine karışımında, **130,66 MPa**, “AFS40-45”

tane sınıfındaki “bazalt dolgulu” reçine karışımında, **130,43 MPa**, “AFS40-45” tane sınıfındaki “kuvars dolgulu” reçine karışımında, **129,91 MPa**, “F 0,8” tane sınıfındaki “kuvars dolgulu” reçine karışımında, **129,30 MPa**, ve “F 1,0” tane sınıfındaki “bazalt dolgulu” reçine karışımında, **129,19 MPa** olarak belirlenmiştir. Ancak bu değerler birbirine çok yakın olduğundan dolayı sadece mekanik özelliklere bakılarak en uygun kompozitin seçilmesinin anlamsız olacağı düşünülmektedir. Bu kompozitler arasında en az reçine tüketen dolgulu kompozitin seçiminin daha doğru bir karar olacağı düşünülmektedir. Bu amaçla, yapılan çalışmadaki en önemli hedeflerden biri olan, “daha az reçine tüketiminin sağlanması” amacıyla, farklı başlatıcı oranlarındaki reçine karışımları ile farklı türde ve farklı tane sınıflarındaki dolgu malzemelerinin ayrı ayrı ve hibrit olacak şekilde karıştırılmasıyla üretilen dolgulu kompozitler içerisinde, en az reçine tüketen karışımlar, “F0,8” tane dağılımında ve “%1,0” başlatıcı oranında elde edilirken, en fazla reçine tüketen karışımlar ise “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitlerde elde edilmiştir. En az reçine tüketimlerinin sağlandığı *silis dolgulu* “F0,8” tane dağılımında ve “%1,0” başlatıcı oranında elde edilen reçine tüketim miktarı (**%45**), “F1,0” tane sınıfındaki reçine tüketim miktarından (**%48**), **%8,89** daha az reçine tüketmiş, “AFS 40-45” tane sınıfındaki reçine tüketim miktarından (**%52**) ise, **%15,55** daha az reçine tüketmiştir. Bunun sebebi olarak, “AFS 40-45” tane sınıfındaki kompozitlerin uniform tane dağılımına sahip olması, “F0,8” ve “F1,0” tane sınıfındaki kompozitlerin ise daha iyi derecelenmiş bir dağılıma sahip olması olarak düşünülmektedir. Tanelerin iyi derecelenmesinin, iri tanelerin arasındaki boşlukların daha küçük taneler ile dolmasına sebebiyet vererek kompozitin daha az boşluklu bir yapıda olmasını sağladığı ve bu sayede kompozitin daha az reçine tüketmesine sebep olduğu tespit edilmiştir.

Çalışma sonucunda, %1,0 başlatıcı oranına sahip “F0,8” tane dağılımlı *silis dolgulu* kompozitlerin daha az reçine tükettiği ve daha yüksek mekanik özelliğe sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle, bu çalışmada belirtilen karışım oranlarında ve belirtilen yöntemle dolgulu kompozit üretiminde, %1,0 başlatıcı oranına sahip “F0,8” tane dağılımlı *silis dolgulu* kompozitlerin en uygun karışım olduğu tespit edilmiştir.

Hibrit dolgulu reçine karışımlarına ait basınç dayanımı değerleri ise ilk beş dayanım değeri arasında yer almamıştır. “Hibrit dolgulu kompozitler” içerisinde en yüksek basınç dayanımı değeri **%60 Bazalt + %40 Silis** karışımında **127,42 MPa** olarak elde edilmiştir.

Lifli Kompozitlere Ait Sonuçlar

“Tüm lifli kompozitler içerisinde en yüksek 5 darbe dayanımı”; “F 0,8” tane dağılımlı, kuvars dolgulu, %10 cam lifli karışımda, 4,97 kJ/m², “F 0,8” tane dağılımlı, bazalt dolgulu, %10 cam lifli karışımda, 4,58 kJ/m², “F 0,8” tane dağılımlı, silis dolgulu, %10 cam lifli karışımda, 4,52 kJ/m², “AFS 40-45” tane dağılımlı, kuvars dolgulu, %10 cam lifli karışımda, 4,48 kJ/m², “AFS 40-45” tane dağılımlı, silis dolgulu, %10 cam lifli karışımda, 4,30 kJ/m² olarak belirlenmiştir.

Hibrit lifli kompozitlerin darbe dayanımı değeri, ilk beş kompozit içerisinde yer almamıştır.

“Tüm lifli kompozitler içerisinde en yüksek 5 eğilme dayanımı değeri sırasıyla”; “F 0,8” tane dağılımlı, kuvars dolgulu, %10 bazalt lifli karışımda, 75,25 MPa, “F 0,8” tane dağılımlı, kuvars dolgulu, %10 cam lifli karışımda, 74,1 MPa, “AFS 40-45” tane dağılımlı, kuvars dolgulu, %10 bazalt lifli karışımda, 72,57 MPa, “AFS 40-45” tane dağılımlı kuvars dolgulu, %10 cam lifli karışımda, 70,54 MPa, “F 0,8” tane dağılımlı, silis dolgulu, %10 bazalt lifli karışımda, 72,33 MPa, olarak belirlenmiştir. Bu dayanım değerleri takviyesiz ortoftalik reçine karışımlarının eğilme dayanımlarıyla karşılaştırıldıklarında, eğilme dayanımı değerlerinin **%10,29-%55,48** oranında düştüğü gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak, dolgu malzemelerinin eklenmesiyle toplam hacim içerisindeki reçine miktarının düşmesi ve eklenen dolguların kompozite rijitlik kazandırması ancak eğilme dayanımına katkıda bulunmaması olarak yorumlanmıştır.

Hibrit lifli kompozitlerin eğilme dayanımı değerleri, ilk beş kompozit içerisinde yer almamıştır. Bu durum sonucunda, belirlenen karışım oranları ve belirtilen yöntemle üretilen hibrit lifli kompozitlerin eğilme dayanımı özellikleri bakımından yetersiz kaldığı kanaatine varılmıştır.

“Tüm lifli kompozitler içerisinde en yüksek 5 çekme dayanımı sırasıyla”; “F 0,8” tane dağılımlı, kuvars dolgulu, %10 cam lifli karışımda, 287,68 MPa, “F 0,8” tane dağılımlı, silis dolgulu, %10 cam lifli karışımda, 285,67 MPa, hibrit lifli (%6 cam lifi + %4 bazalt lifi) ve hibrit dolgulu (%60 bazalt + %40 silis) karışımda, 284,39 MPa, hibrit lifli (%6 cam lifi + %4 bazalt lifi), silis dolgulu karışımda, 273,72 MPa, hibrit lifli (%6 cam lifi + %4 bazalt lifi), kuvars dolgulu karışımda, 271,52 MPa olarak belirlenmiştir.

Hibrit lifli kompozitlerin çekme dayanımı değerlerinde iyi sonuçların elde edildiği ve üretilen lifli kompozitler içerisinde bu dayanım değerlerinin ilk beş çekme dayanımı

içerisinde yer aldığı gözlenmiştir. Bu durum sonucunda, hibrit lifli hazırlanan kompozitlerin çekme dayanımı üzerinde etkili olduğu kanaatine varılmıştır.

Lifli kompozitlerin çekme dayanımı değerleri, takviyesiz ortoftalik reçine karışımlarının çekme dayanımlarıyla karşılaştırıldıklarında, çekme dayanımı değerlerinde %657'lere varan oranlarda ciddi yükseliş olduğu gözlenmiştir. Lif takviye malzemelerinin yüksek çekme mukavemetine sahip olmalarından dolayı lifli kompozitlerin çekme dayanımlarının arttığı görülmüştür.

Lifli kompozitler üzerinde yapılan tüm mekanik testler birlikte değerlendirildiğinde, üretilen tüm lifli kompozitler içerisinde, *lif oranı arttırıldıkça mekanik özelliklerin de artış gösterdiği* ve en yüksek mekanik özelliklerin %10 lif oranında elde edildiği belirlenmiştir. Lif oranının kompozitin mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu kanaatine varılmıştır.

“AFS40-45” ve “F0,8” tane dağılımındaki %10 oranındaki *cam ve bazalt lifli kompozitler* içerisinde en yüksek mekanik özellikler kuvars dolgusuyla elde edilmiştir. Bu durum sonucunda, dolgu türünün, kompozitin mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir.

Tüm dolgulu karışımlarda, %10 cam ve bazalt lifi oranında, “F 0,8” tane dağılımındaki kompozitlerin mekanik özellikleri, “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitten daha yüksek olarak belirlenmiştir. Cam ve bazalt lifli kompozitlerde dolgu tane dağılımının, kompozitin mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu kanaatine varılmıştır.

En yüksek dayanım değerlerinin elde edildiği %10 lif oranındaki cam ve bazalt lifli kompozitlerin mekanik özellikleri birbirleriyle karşılaştırıldıklarında, darbe dayanımları bakımından hem “AFS40-45” hem de “F0,8” tane dağılımı için cam lifli kompozitlerin bazalt lifli kompozitlere göre daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Eğilme dayanımı bakımından ise, hem “AFS40-45” hem de “F0,8” tane dağılımı için bazalt lifli kompozitlerin cam lifli kompozitlere göre daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Çekme dayanımlarında, “AFS 40-45” tane dağılımındaki kompozitlerde, bazalt lifli kompozitlerin çekme dayanımları cam lifli kompozitlerin çekme dayanımı değerlerinden daha yüksek olarak belirlenmiştir. “F0,8” tane dağılımındaki kompozitlerde ise, cam lifli kompozitlerin çekme dayanımları bazalt lifli kompozitlerin çekme dayanımı değerlerinden daha yüksek olarak belirlenmiştir. Mekanik özelliklere ait en yüksek dayanım değerleri sıralaması da dikkate alındığında, çalışmada, cam lifli kompozitlerin

mekanik özelliklerinin genel olarak bazalt lifli kompozitlerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, bazalt liflerinin cam liflerine kıyasla daha yüksek birim fiyata sahip olması nedeniyle de, lifli kompozit üretiminde bazalt liflerinin yerine cam liflerinin tercih edilmesinin daha uygun olacağı kanaatine varılmıştır.

Sonuç olarak;

“F 0,8” tane dağılımlı *kuvars dolgulu %10 cam lifli* kompozitlerin en iyi mekanik özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir. Ancak, “F 0,8” tane dağılımlı *silis dolgulu %10 cam lifli* kompozitlerin mekanik özelliklerinin de makul derecede iyi olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, bu karışımın en az reçine tüketen karışım olmasının yanısıra, silis kumunun kuvars kumuna göre endüstriyel sektörde daha kolay temin edilebilmesi, kullanım alanlarının daha çok olması, maden yataklarının daha fazla olması ve birim fiyatının daha düşük olması gibi özellikleri nedeniyle üretilen kompozitler içerisinde bu karışımın tercih edilmesi halinde, istenilen mekanik özelliklere sahip ve aynı zamanda daha ekonomik kompozit üretilebileceği kanaatine varılmıştır.

Bu çalışma neticesinde ayrıca, lif takviye malzemelerinin yüksek çekme mukavemetine sahip olmalarından dolayı lif takviyesinin mekanik özellikleri arttırdığı, lif oranının artırılmasının kompozitin mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu ve kullanılan dolgu türü ve dağılımının da kompozitin mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu kanaatine varılmıştır.

Bu çalışmada belirtilen karışımlar ve belirtilen yöntemler kullanılarak farklı fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler üzerinde çalışmalar genişletilebileceği gibi, farklı türde ve farklı tane dağılımlarına sahip dolgu malzemeleriyle birlikte, farklı türde reçineler (epoksiler) kullanılarak ve farklı lif uzunluklarında ve lif oranlarında hazırlanacak kompozitler üzerinde çalışmalar gerçekleştirilebilir. Farklı çevresel koşullara maruz kalan farklı lif ve dolgulu kompozitlerin Durabilite özelliklerinin araştırılması ve tekrarlı yükler altında yorulma performanslarının incelenmesi gerçekleştirilebilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] H. Ersoy, *Kompozit Malzeme*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Literatür Yayınları, 2001, ss. 388.
- [2] T. J. Reinhart, "Overview of composite materials", in *Handbook of Composites*, 2nd ed., vol. 1, Boston, MA: Springer US, 1998, pp. 21–33.
- [3] İ. Türkmen, ve N. S. Köksal, "Cam elyaf takviyeli polyester matrisli kompozit malzemelerde (CTP) elyaf tabaka sayısına bağlı mekanik özelliklerin ve darbe dayanımının incelenmesi," *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 2, s. 8, ss. 17-30, 2012.
- [4] Y. Şahin, *Kompozit Malzemelere Giriş*. Ankara, Türkiye: Gazi Kitabevi, 2000, ss. 1-11.
- [5] M. G. Yılmaz, "Cam elyaf katkılı doymamış polyester malzemelerde mineral katkıların mekanik ve tribolojik özellikleri," Yüksek lisans tezi, Metal Eğitimi Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2006.
- [6] E. Karadeniz, "Elyaf takviyeli plastik kompozitlerin mukavemeti," Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 1989.
- [7] D. R. Aaskeland, P.P. Fulay, W.J. Wright, and D.K. Bhattacharya, *The Science And Engineering of Materials*, 6th ed., Global Engineering, 2011, pp. 601-679.
- [8] R. Jones, *Mechanics of Composite Materials*, 2nd ed., Taylor & Francis, 1999, pp. 1-15.
- [9] W. D. Callister and J. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering*, 8th ed., 2013, böl. 14, 15, 16, pp. 532-672.
- [10] T. P. Sathishkumar, S. Satheeshkumar, and J. Naveen, "Glass fiber-reinforced polymer composites – a review," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 33, no. 13, pp. 1258–1275, 2014.
- [11] A. Can, *Makine Tasarımcıları İçin Malzeme Bilgisi*, İstanbul, Türkiye: Birsan yayınevi, 2010, ss. 235-247..
- [12] K. Onaran, *Malzeme Bilimi*, 5. baskı, İstanbul, Türkiye: Bilim Teknik Yayınevi, 1995, ss. 328-366.
- [13] Y. Boztoprak, ve diğ., "Yapı sektöründe kullanılan cam elyaf takviyeli plastiklerin (CTP) sünme davranışı," *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, Turkey, 2009.
- [14] S. R. Reid and G. Zhou, *Impact Behaviour of Fibre-Reinforced Composite Materials and Structures*, CRC Press, 2000, pp. 1-7.
- [15] F. C. Campbell, *Manufacturing Processes For Advanced Composites*, Elsevier, 2004, pp. 514.
- [16] S. Mazumdar, *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*, CRC Press, 2002, pp. 28-31.

- [17] S. Doğanay ve Y. Ulcay, “Farklı oranlarda takviye edilmiş cam lifi polyester kompozitlerin deniz suyu etkisi altında yorulma davranışının incelenmesi,” *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 12, s. 2, ss. 85–95, 2007.
- [18] Y. Ulcay, M. Akyol ve R. Gemici, “Polimer esaslı lif takiyeli kompozit malzemelerin arabirim mukavemeti üzerine farklı kür metotlarının etkisinin incelenmesi,” *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi*, c.7, s. 1, ss. 93–116, 2002.
- [19] H. V. V. Lawrence, *Malzeme Bilimine Giriş*, 4th ed., İstanbul, Türkiye: Birsan Yayınevi, 1998, pp. 186-207.
- [20] M. Farag, *Materials and Process Selection in Engineering*, Applied Science Publishers LTD, 1979, pp. 50-72.
- [21] W. Smith, "Polimer Malzemeler," *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, 3. baskı, böl. 7, İstanbul, Türkiye: Literatür Yayınları, 2009, ss. 307-388.
- [22] W. Hayden, W. Moffatt, and J. Wulff, "Mechanical Behavior," in *The Structure and Properties of Materials*, vol. 3, John Wiley, 1965, pp. 218–229.
- [23] H. Yıldızhan, “Polimer matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi Bölümü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2008.
- [24] C. Hall, *Polymer Materials*, The Macmillan Press LTD, 1989, pp. 1-180.
- [25] U. Edlund and A. C. Albertsson, “Polyesters based on diacid monomers,” *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 55, no. 4, pp. 585–609, 2003
- [26] M. Çakır, G. Kartal, ve H. Demirer, “Akrilik elyaf takviyeli polyester kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi,” *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, Turkey, May, 2011, pp. 16–18.
- [27] K. K. Chawla, *Composite Materials: Science and Engineering*, 2nd ed., New York, NY: Springer New York, 1998, pp. 80-153.
- [28] I. Varma and V. Gupta, *Thermosetting Resin—Properties*, 2000, pp. 1-56.
- [29] O. C. Zask and S. H. Goodman, "Unsaturated Polyester and Vinyl Ester Resins," in *Handbook of Composites*, 1998, pp. 34–47.
- [30] H. Boenig, *Unsaturated Polyesters: Structure And Properties*. Elsevier Publishing Company, 1964.
- [31] N. Gökçe, “Effect of fiber and resin type on the axial and circumferencial tensile strength of fiber reinforced polyester pipe,” M.S. thesis, Polymer Science and Technology Department, Middle East Technical University, Ankara, Türkiye, 2008.
- [32] J. Jacobs and T. Kilduff, *Engineering Materials Technology: Structures, Processing, Properties, and Selection*, 2nd ed., Prentice Hall, 1994, pp. 263-299.
- [33] L. Horath, *Fundamentals of Materials Science for Technologists: Properties, Testing and Laboratory Exercises*, 2nd ed., Prentice Hall, 2001, pp. 100-133.
- [34] B. Baradan, H. Yazıcı ve S. Aydın, *Beton*, İzmir, Türkiye: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 2012.
- [35] R. Timings, *Materials Technology Level 3*. Longman Group Limited, 1995, pp. 199-266.
- [36] H. V. V. Lawrence, *Materials for Engineering: Concepts and Applications*.

- Addison-Wesley Publishing, 1982, pp. 200-234.
- [37] P. Thornton, *Fundamentals of Engineering Materials*, Prentice Hall, 1985, pp. 496-599.
- [38] T. P. Sathishkumar, et al., "Characterization of natural fiber and composites – A review," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 32, no. 19, pp. 1457-1476, 2013.
- [39] K. L. Edwards, "An overview of the technology of fibre-reinforced plastics for design purposes," *Materials & Design*, vol. 19, no. 1, pp. 1–10, 1998.
- [40] K. G. Budinski and M.K. Budinski, *Engineering Materials: Properties and Selection*, 8th ed., Pearson Prentice Hall, 2005, pp. 194-206.
- [41] M. J. Owen, V. Middleton, and I. A. Jones, *Integrated Design and Manufacture Using Fibre-Reinforced Polymeric Composites*, 1st ed., CRC Press, 2000, pp. 1-23.
- [42] C. Dong, "Development of a model for predicting the transverse coefficients of thermal expansion of unidirectional carbon fibre reinforced composites," *Applied Composite Materials*, vol. 15, no. 3, pp. 171–182, 2008.
- [43] R. Kulkarni and O. Ochoa, "Transverse and longitudinal CTE measurements of carbon fibers and their impact on interfacial residual stresses in composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 40, no. 8, pp. 733–754, 2006.
- [44] D. D. L. Chung, *Composite Materials: Science and Applications*, 2nd ed., Springer Science & Business 2010.
- [45] B. D. Agarwal, L. J. Broutman, and K. Chandrashekara, *Analysis and Performance of Fiber Composites*, 3rd ed., John Wiley, 2006, pp. 6-45.
- [46] N. Beylikçi, "Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin, elyaf yönü, boyu ve çapının değişimine göre mekanik özelliklerinin değişiminin bilgisayar yardımı ile incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Trakya Üniversitesi, Edirne, Türkiye, 1994.
- [47] M. S. Sreekala, et al., "The mechanical performance of hybrid phenol-formaldehyde-based composites reinforced with glass and oil palm fibres," *Composites Science and Technology*, vol. 62, no. 3, pp. 339–353, 2002.
- [48] K. Singha, "A short review on basalt fiber," *Journal of Textile Science*, vol. 1, no. 4, pp. 19–28, 2012.
- [49] A. B. A. Hariharan and H. P. S. A. Khalil, "Lignocellulose-based hybrid bilayer laminate composite: part I - studies on tensile and impact behavior of oil palm fiber-glass fiber-reinforced epoxy resin," *Journal of Composite Materials*, vol. 39, no. 8, pp. 663–684, 2005.
- [50] J. Hartikainen, et al., "Mechanical properties of polypropylene composites reinforced with long glass fibres and mineral fillers," *Plastics, Rubber and Composites*, vol. 33, no. 2/3, pp. 77–84, 2004.
- [51] L. S. Sutherland and C. G. Soares, "Effect of laminate thickness and of matrix resin on the impact of low fibre-volume, woven roving E-glass composites," *Composites Science and Technology*, vol. 64, no. 10, pp. 1691-1700, 2004.
- [52] P. K. Mallick, *Composites Engineering Handbook*, New York, USA: M. Dekker, 1997.

- [53] M. M. Schwartz, *Composite Materials Handbook*, McGraw-Hill, 1984, pp. 1.22-1.29.
- [54] D. J. Vaughan, "Fiberglass Reinforcement," in *Handbook of Composites*, Boston, MA: Springer US, vol. 7, 1998, pp. 131–155.
- [55] M. Sarıbıyık, M. Turhan, ve A. Sarıbıyık, "Cam elyaf takviyeli plastiklerin mekanik özelliklerine elyaf hacim oranlarının etkileri," *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, Turkey, 2009, pp. 13–15.
- [56] D. Feldman and A. Arbalata, *Synthetic Polymers: Technology, Properties, Applications*, Springer Science & Business Media, 1996.
- [57] P. Delhaes, *Fibers and Composites*, CRC Press, 2003.
- [58] J. Ó. Erlendsson, "Continuous basalt fiber as reinforcement material in polyester resin," M.S. thesis, Civil Engineering with Specialization in Structural Design, Reykjavík University, 2013.
- [59] T. Czigány, J. Vad, and K. Pölöskei, "Basalt fiber as a reinforcement of polymer composites," *Periodica Polytechnica*, vol. 49, no. 1, pp. 3–14, 2005.
- [60] C. Colombo, L. Vergani, and M. Burman, "Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites," *Composite Structures*, vol. 94, no. 3, pp. 1165–1174, 2012.
- [61] E. Quagliarini, et al., "Tensile characterization of basalt fiber rods and ropes: A first contribution," *Construction and Building Materials*, vol. 34, pp. 372–380, 2012.
- [62] P. Banibayat and A. Patnaik, "Variability of mechanical properties of basalt fiber reinforced polymer bars manufactured by wet-layup method," *Materials & Design*, vol. 56, pp. 898–906, 2014.
- [63] V. Fiore, et al., "A review on basalt fibre and its composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 74, pp. 74–94, 2015.
- [64] J. Militky, V. Kovacic and V. Bajzík, "Mechanical properties of basalt filaments," *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, vol. 15, no. 5-6, pp. 49–53, 2007.
- [65] R. Parnas, M. Shaw, and Q. Liu, "Basalt fiber reinforced polymer composites," New England Transportation Consortium (No. NETC 63), Rep. 03-07, 2007.
- [66] (08.11.2017), basalt and & quot; lava rocks & quot;, [Online]. Erişim: <http://meteorites.wustl.edu/id/lavarocks.htm>
- [67] (08.11.2017), Basalt - Igneous rocks, [Online]. Erişim: <http://www.sandatlas.org/basalt/>
- [68] (08.11.2017), Basalt: Igneous Rock - Pictures, Definition, Uses & amp; More, [Online]. Erişim: <http://geology.com/rocks/basalt.shtml>
- [69] (08.11.2017), Geology - rocks and minerals, [Online]. Erişim: https://flexiblelearning.auckland.ac.nz/rocks_minerals/rocks/basalt.html
- [70] A. Amaro, et al., "Polymer composites reinforced with basalt fibers," in *1st International Conference on Natural Fibers*, Guimarães, Portugal, 2013, pp. 1–2.
- [71] X. Wang, Z. Wang, Z. Wu, and F. Cheng, "Shear behavior of basalt fiber reinforced polymer (FRP) and hybrid FRP rods as shear resistance members," *Construction and Building Materials*, vol. 73, pp. 781–789, 2014.

- [72] V. Lopresto, C. Leone and I. De lorio, "Mechanical characterisation of of basalt fibre reinforced plastic," *Composites Part B: Engineering*, vol. 42, no. 4, pp. 717–723, 2011.
- [73] T. M. Borhan, "Properties of glass concrete reinforced with short basalt fibre," *Materials & Design*, vol. 42, pp. 265–271, 2012.
- [74] B. Wei, H. Cao, and S. Song, "Surface modification and characterization of basalt fibers with hybrid sizings," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 42, no. 1, pp. 22–29, 2011.
- [75] S. E. Artemenko and Y. A. Kadykova, "Polymer composite materials made from carbon, basalt, and glass fibres. Structure and Properties," *Fibre Chemistry.*, vol. 35, no. 1, pp. 226–229, 2003.
- [76] J. Sim, C. Park, and D. Y. Moon, "Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures," *Composites Part B: Engineering*, vol. 36, no. 6–7, pp. 504–512, 2005.
- [77] B. Wei, H. Cao, and S. Song, "Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibers," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, no. 18–19, pp. 4708–4715, 2010.
- [78] V. K. Van de Velde, P. Kiekens, and L. Van Langenhove, "Basalt fibres as reinforcement for composites," *In Proceedings of 10th International Conference on Composites/Nano Engineering*, New Orleans, LA, USA, 2003, pp. 5–6.
- [79] (08.11.2017), Basaltex - The thread of stone, [Online]. Erişim: <http://www.basaltex.com/en/products.aspx>
- [80] B. Wei, H. Cao, and S. Song, "Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment," *Materials & Design*, vol. 31, no. 9, pp. 4244–4250, 2010.
- [81] (08.11.2017), Spinteks. [Online]. Erişim: <http://www.spinteks.com/tr~uygulama- alanlari~160~bazalt.html>
- [82] T. Gümölcine, ve diğ., "İzofталik polyester matrisli sürekli E-camı ve bazalt fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine deneysel bir çalışma," *Sigma*, c. 5, ss. 104–115, 2013.
- [83] Y. Swolfs, L. Gorbatikh, and I. Verpoest, "Fibre hybridisation in polymer composites: A review," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 67, pp. 181–200, 2014.
- [84] M. M. Thwe and K. Liao, "Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites," *Composites Science and Technology*, vol. 63, no. 3, pp. 375–387, 2003.
- [85] S. Y. Fu, G. Xu, and Y. W. Mai, "On the elastic modulus of hybrid particle/short-fiber/polymer composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 33, no. 4, pp. 291–299, 2002.
- [86] J. Karger-Kocsis, "Reinforced polymer blends," *Polymer blends*, no. January 2000, vol. 2, pp. 395, 2000.
- [87] G. Marom, et al., "Hybrid effects in composites: conditions for positive or negative effects versus rule-of-mixtures behaviour," *Journal of Materials Science*, vol. 13, no. 7, pp. 1419–1426, 1978.

- [88] G. Kretsis, "A review of the tensile, compressive, flexural and shear properties of hybrid fibre-reinforced plastics," *Composites*, vol. 18, no. 1, pp. 13–23, 1987.
- [89] Z. S. Wu, et al., "Electrical and mechanical characterization of hybrid CFRP sheets," *Journal of Composite Materials*, vol. 40, no. 3, pp. 227–244, 2006.
- [90] G. Czél and M. R. Wisnom, "Demonstration of pseudo-ductility in high performance glass/epoxy composites by hybridisation with thin-ply carbon prepreg," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 52, pp. 23–30, 2013.
- [91] P. W. Manders and M. G. Bader, "The strength of hybrid glass/carbon fibre composites Part 1 Failure strain enhancement and failure mode," *Journal of Materials Science*, vol. 16, pp. 2233–2245, 1981.
- [92] M. G. Phillips, "Composition parameters for hybrid composite materials," *Composites*, vol. 12, no. 2, pp. 113–116, Apr. 1981.
- [93] D. L. Motoc, J. Ivens, and N. Dadirlat, "Coefficient of thermal expansion evolution for cryogenic preconditioned hybrid carbon fiber/glass fiber-reinforced polymeric composite materials," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 112, no. 3, pp. 1245–1251, 2013.
- [94] C. Zweben, "Tensile strength of hybrid composites," *Journal of Materials Science*, vol. 12, no. 7, pp. 1325–1337, 1977.
- [95] P. W. Manders and M. G. Bader, "The strength of hybrid glass/carbon fibre composites - Part 2 A statistical model," *Journal of Materials Science*, vol. 16, no. 8, pp. 2246–2256, 1981.
- [96] B. W. Rosen, "Tensile failure of fibrous composites," *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, vol. 2, no. 11, pp. 1985–1991, 1985.
- [97] C. M. Landis and R. M. McMeeking, "Stress concentrations in composites with interface sliding, matrix stiffness and uneven fiber spacing using shear lag theory," *International Journal of Solids and Structures* vol. 36, no. 28, pp. 4333–4361, 1999.
- [98] W. A. Curtin, "Dimensionality and size effects on the strength of fiber-reinforced composites," *Composites Science and Technology*, vol. 60, no. 4, pp. 543–551, 2000.
- [99] M. R. Nedele and M. R. Wisnom, "Stress concentration factors around a broken fibre in a unidirectional carbon fibre-reinforced epoxy," *Composites*, vol. 25, no. 7, pp. 549–557, 1994.
- [100] Y. Swolfs, et al., "Stress concentrations in an impregnated fibre bundle with random fibre packing," *Composites Science and Technology*, vol. 74, pp. 113–120, 2013.
- [101] A. E. Scott, et al., "In situ fibre fracture measurement in carbon-epoxy laminates using high resolution computed tomography," *Composites Science and Technology*, vol. 71, no. 12, pp. 1471–1477, 2011.
- [102] S. Pimenta and S. T. Pinho, "Hierarchical scaling law for the strength of composite fibre bundles," *Mechanics and Physics of Solids*, vol. 61, no. 6, pp. 1337–1356, 2013.
- [103] L. N. Phillips, "On the usefulness of glass-fibre-carbon hybrids," in *British Plastics Federation Congress*, Brighton, United Kingdom, 1976.
- [104] M. R. Wisnom, B. Khan, and S. R. Hallett, "Size effects in unnotched tensile strength of unidirectional and quasi-isotropic carbon/epoxy composites," *Composite*

- Structures*, vol. 84, no. 1, pp. 21–28, 2008.
- [105] M. Jawaid and H. P. S. Abdul Khalil, “Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review,” *Carbohydrate Polymers*, vol. 86, no. 1, pp. 1–18, 2011.
- [106] E. Ateş, K. Aztekin, and R. Çakır, “Determination of the density and compression strength optimization of without filling material composites,” *Journal of Engineering and Natural Sciences*, vol. 28, no. 266, pp. 287–297, 2010.
- [107] J. Mijović and J. Wijaya, “Review of cure of polymers and composites by microwave energy,” *Polymer Composites*, vol. 11, no. 3, pp. 184–191, 1990.
- [108] İ. Yaşar ve F. Arslan, “Sürekli cam elyaf takviyeli polyester matrisli kompozitlerde elyaf hacim oranı ve elyaf doğrultusunun tribolojik özelliklere etkisi,” *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, c. 24, ss. 181–191, 2000.
- [109] H. Haddad and M. Al Kobaisi, “Influence of moisture content on the thermal and mechanical properties and curing behavior of polymeric matrix and polymer concrete composite,” *Materials & Design*, vol. 49, pp. 850–856, 2013.
- [110] M. S. Khan, G. Simpson and C. R. A. Townsend, “A comparison of the mechanical properties in compression of two resin systems,” *Materials letters*, vol. 52, no. 3, pp. 173–179, 2002.
- [111] F. Mahdi, H. Abbas, and A. A. Khan, “Strength characteristics of polymer mortar and concrete using different compositions of resins derived from post-consumer PET bottles,” *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 1, pp. 25–36, 2010.
- [112] E. Ateş ve K. Aztekin, “Parçacık ve fiber takviyeli polimer kompozitlerin yoğunluk ve basma dayanımı özellikleri,” *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 26, s. 2, ss. 479–486, 2011.
- [113] J. Vidales, et al., “Polymer mortars prepared using a polymeric resin and particles obtained from waste pet bottle,” *Construction and Building Materials*, vol. 65, pp. 376–383, 2014.
- [114] E. H. Hwang, et al., “Mechanical/physical characteristics of polymer mortar recycled from rapid-chilled steel slag,” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 15, no. 5, pp. 628–634, 2009.
- [115] A. Akıncı, “Mechanical and morphological properties of basalt filled polymer matrix composites,” *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 35, no. 1, pp. 29–32, 2009.
- [116] E. Ateş and S. Barnes, “The effect of elevated temperature curing treatment on the compression strength of composites with polyester resin matrix and quartz filler,” *Materials & Design*, vol. 34, pp. 435–443, 2012.
- [117] E. Ateş, “Optimization of compression strength by granulometry and change of binder rates in epoxy and polyester resin concrete,” *Journal of Reinforced Plastics And Composites*, vol. 28, no. 2, pp. 235–246, 2008.
- [118] M. Gürü, Y. Akyüz, ve E. Akın, “Mermer tozu/polyester kompozitlerde dolgu oranının mekanik özelliklere etkileri,” *Politeknik Dergisi*, c. 8, s. 3, ss. 271–274, 2005.
- [119] R. Sakin, I. Ay, and R. Yaman, “An investigation of bending fatigue behavior for

- glass-fiber reinforced polyester composite materials,” *Materials & Design*, vol. 29, no. 1, pp. 212–217, 2008.
- [120] C. Varga, et al., “Improving the mechanical properties of glass-fibre-reinforced polyester composites by modification of fibre surface,” *Materials & Design*, vol. 31, no. 1, pp. 185–193, 2010.
- [121] R. S. Raja, K. Manisekar, and V. Manikandan, “Study on mechanical properties of fly ash impregnated glass fiber reinforced polymer composites using mixture design analysis,” *Materials & Design*, vol. 55, pp. 499–508, 2014.
- [122] K. J. Wong, U. Nirmal, and B. K. Lim, “Impact behavior of short and continuous fiber-reinforced polyester composites,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 29, no. 23, pp. 3463–3474, 2010.
- [123] R. Kaundal, A. Patnaik, and A. Satapathy, “Mechanical characterizations and development of erosive wear model for Al₂O₃-filled short glass fiber-reinforced polymer composites,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 0, no. 0, pp. 1–16, 2016.
- [124] P. Singh, “Mechanical properties and swelling behavior of short glass fiber reinforced polyester composites,” *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 18, no. 6, pp. 543–559, 2005.
- [125] N. E. Marcovich, et al., “Resin-sisal and wood flour composites made from unsaturated polyester thermosets,” *Composite interfaces*, vol. 16, no. 7–9, pp. 639–657, 2009.
- [126] N. Gull, et al., “Synthesis and characterization of zinc oxide (ZnO) filled glass fiber reinforced polyester composites,” *Materials & Design*, vol. 67, pp. 313–317, 2015.
- [127] H. Gu, “Behaviours of glass fibre/unsaturated polyester composites under seawater environment,” *Materials & Design*, vol. 30, no. 4, pp. 1337–1340, 2009.
- [128] P. Amuthakkannan, et al., “Effect of fibre length and fibre content on mechanical properties of short basalt fibre,” *Materials Physics and Mechanics*, vol. 16, pp. 107–117, 2013.
- [129] V. Manikandan, et al., “Investigation of the effect of surface modifications on the mechanical properties of basalt fibre reinforced polymer composites,” *Composites Part B Engineering*, vol. 43, no. 2, pp. 812–818, 2012.
- [130] İ. Mıstık ve N. Merdan, “Dokuma bazalt-cam ve fındık kabuğu takviyeli polimer kompozitlerinin eğilme dayanımı ve ısı geçirgenliklerinin incelenmesi,” *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 20, s. 10, ss. 119–126, 2012.
- [131] S. Y. Fu and B. Lauke, “Effects of fiber length and fiber orientation distributions on the tensile strength of short-fiber-reinforced polymers,” *Composites Science and Technology*, vol. 56, no. 2, pp. 1179–1190, 1996.
- [132] M. Yazıcı ve S. Ülkü, “İki boyutlu rasgele dağılı e-cam lifi/ polyester matris kompozitlerde yükleme hızının mukavemet üzerine etkisinin incelenmesi,” *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 8, s. 1, ss. 53–57, 2003.
- [133] N. J. Lee and J. Jang, “The effect of fibre content on the mechanical properties of glass fibre mat/polypropylene composites,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 30, no. 6, pp. 815–822, 1999.

- [134] P. Amuthakkannan, V. Manikandan, and M. Uthayakumar, "Mechanical properties of basalt and glass fiber reinforced polymer hybrid composites," *Journal of Advanced Microscopy Research*, vol. 9, no. 1, pp. 44-49, 2014.
- [135] M. T. Isa, et al., "Effect of fiber type and combinations on the mechanical, physical and thermal stability properties of polyester hybrid composites," *Composites Part B Engineering*, vol. 52, pp. 217–223, 2013.
- [136] S. Mishra *et al.*, "Studies on mechanical performance of biofibre/glass reinforced polyester hybrid composites," *Composites Science and Technology*, vol. 63, no. 10, pp. 1377–1385, 2003.
- [137] A. Atiqah, et al., "Development of kenaf-glass reinforced unsaturated polyester hybrid composite for structural applications," *Composites Part B Engineering*, vol. 56, pp. 68–73, 2014.
- [138] *Plastics-Liquid Resins-Determination Of Density By The Pyknometer Method*, ISO 1675, 1985.
- [139] *Plastics-Unsaturated Polyester Resins-Measurement Of Gel Time At Ambient Temperature*, ISO 2535, 2001.
- [140] *Standard Test Method for Gel Time of Solventless Varnishes*, ASTM D 3056, 2008.
- [141] *Standard Test Method for Gel Time and Peak Exothermic Temperature of Reacting Thermosetting*, ASTM D 2471, 1999.
- [142] *Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational Viscometer*, ASTM D2196, 2015.
- [143] *Reinforcement Products -Determination Of Moisture Content*, ISO 3344, 1997.
- [144] *Plastics -- Standard Atmospheres For Conditioning And Testing*, ISO 291, 2008.
- [145] *Plastics - Determination Of Tensile Properties - Part 1: General Principles*, ISO 527-1, 2012.
- [146] *Plastics -Determination of Flexural Properties*, ISO 178, 2010.
- [147] *Standard Test Methods for Compressive Strength of Chemical-Resistant Mortars, Grouts, Monolithic Surfacing, and Polymer Concretes*, ASTM C579 - 01, 2012.
- [148] *Plastics - Determination of Charpy Impact Properties - Part 1: Non-Instrumented Impact Test*, ISO 179-1, 2010.
- [149] *Fibre-Reinforced Plastic Composites -Determination Of Flexural Properties*, ISO 14125, 1998.
- [150] *Plastik Boru Sistemleri - Cam Elyaf Takviyeli Termoset Plastik (Grp) Borular - Başlangıç Görünür Çember Çekme Mukavemetinin Tayini*, TS EN 1394, 1999.
- [151] S. Waigaonkar, B. J. C. Babu, and A. Rajput, "Curing studies of unsaturated polyester resin used in FRP products," *Indian Journal Engineering Material Science*, vol. 18, pp. 31–39, 2011.
- [152] J. L. Martín, "Kinetic analysis of an asymmetrical DSC peak in the curing of an unsaturated polyester resin catalysed with MEKP and cobalt octoate," *Polymer*, vol. 40, no. 12, pp. 3451-3462, 1999.
- [153] C. Tolun, "Dikdörtgen elasto-plastik kompozit plakların dinamik analizi,"

- Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2008.
- [154] K. Laoubi, et al., “Thermal behavior of E-glass fiber-reinforced unsaturated polyester composites,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 56, pp. 520-526, 2014.
- [155] M. M. Marliana *et al.*, “Flame retardancy, thermal and mechanical properties of kenaf fiber reinforced unsaturated polyester/phenolic composite,” *Fibers and Polymers*, vol. 17, no. 6, pp. 902–909, 2016.
- [156] X. Cao and L. J. Lee, “Control of shrinkage and residual styrene of unsaturated polyester resins cured at low temperatures: I. Effect of curing agents,” *Polymer*, vol. 44, no. 6, pp. 1893-1902, 2003.
- [157] C. Sriloy, et al., “Effects of silica based fillers, surface treatment and curing method on mechanical properties of silica/unsaturated polyester composites,” *Macromolecular research*, vol. 18, no. 4, pp. 372–379, 2010.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :ŞEVKİ EREN
Doğum Tarihi ve Yeri :15.08.1979
Yabancı Dili :İNGİLİZCE
E-posta :sevkierenn@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Kompozit Malz. Tek.	Düzce Üniversitesi	2018
Y. Lisans	Yapı Eğitimi	Süleyman Demirel Üniversitesi	2006
Lisans	Yapı Eğitimi	Gazi Üniversitesi	2002
Lise	Yapı Bölümü	Çınarlı Endüstri Meslek Lisesi	1996