



**ZİRKONYUM VE HAFNİYUM KATKILI KARBON FİBER TAKVİYELİ
POLİMER MATRİSLİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN TERMAL VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Esra ÖZTÜRK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Esra ÖZTÜRK

07/04/2025

ZİRKONYUM VE HAFNİYUM KATKILI KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMER
MATRİSLİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN TERMAL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Esra ÖZTÜRK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2025

ÖZET

Karbon fiber takviyeli polimer kompozitler, özellikle havacılık endüstrisinde önemli bir yere sahiptir. Kompozitlerin ağırlıkları artırılmadan veya işlenebilirlikleri olumsuz etkilenmeden, düşük oranlarda çeşitli katkı maddeleri eklenerek kompozitlerin performansının iyileştirilebileceği bilinmektedir. Bu çalışmada, epoksi reçine içerisine farklı oranlarda Zr ve Hf katkılanarak karbon fiber takviyeli polimer matrisli hibrit kompozitler üretilmiş ve bu katkıların kompozitlerin termal ve mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, epoksi reçine içerisine %0.5, %1, %1.5 ve %2 ağırlık oranlarında Zr ve Hf tozları ayrı ayrı katkılanarak farklı sıcaklıklarda kürlenmiştir. Numunelerin yoğunluk ve hacimsel hesaplamaları, Shore D sertlik ölçümleri yapılmış ve kütleme sıcaklıklarının numune yüzeylerine etkisi incelenmiştir. Daha sonra aynı oranlardaki Zr ve Hf tozları epoksi reçine içine katkılanarak el yatırma yöntemiyle karbon fiberlere uygulanmış ve vakum torbalama yöntemiyle 23 °C’de kütleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozitlere DSC, çekme, eğme testleri ve SEM-EDS uygulanmıştır. Çalışma sonucunda; partikül katkılı kompozitlerde, Zr ve Hf katkılarının 23 °C’de kürlenmiş tüm numunelerin yoğunluk ve hacimlerinde artışa neden olurken, Shore D sertlik değerlerinde hafif bir düşüşe neden olduğu gözlemlenmiştir. Kütleme sıcaklığındaki artışın numune yüzeylerinde bozulmalara neden olduğu gözlemlenmiştir. Karbon fiber takviyeli hibrit kompozitlerde, her iki katkı maddesinin de çekme gerilim değerlerinde artış sağladığı, Zr katkılı kompozitlerde, %1.5 katkı oranında maksimum değer elde edilirken; Hf katkılı kompozitlerde, katkı oranı arttıkça çekme gerilim değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Zr ve Hf katkılarının tüm kompozitlerin ILSS (tabakalar arası kayma mukavemeti) değerlerini artırdığı gözlemlenmiştir. DSC analizinde ise her iki katkı maddesinin polimerleşme entalpi değerlerinde düşmeye neden olduğu gözlemlenmiştir. SEM-EDS ile mikroyapı analizleri yapılmıştır.

Bilim Kodu : 91512
Anahtar Kelimeler : Polimer kompozit, hibrit kompozit, karbon fiber, epoksi reçine, zirkonyum, hafniyum, termal ve mekanik özellikler
Sayfa Adedi : 79
Danışman : Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ
İkinci Danışman : Dr. Erdem MERMER

INVESTIGATION OF THERMAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF
ZIRCONIUM AND HAFNIUM DOPED CARBON FIBER REINFORCED POYMER
MATRIX HYBRID COMPOSITES

(M. Sc. Thesis)

Esra ÖZTÜRK

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2025

ABSTRACT

Carbon fiber reinforced polymer composites have an important place particularly in the aerospace industry. It is known that the performance of composites can be improved by adding various additives in low amounts, without increasing their weight or adversely affecting their processability. In this study, hybrid carbon fiber reinforced polymer matrix composites were produced by adding varying amounts of Zr and Hf into the epoxy resin, and the effects of these additives on the thermal and mechanical properties of the composites were investigated. For this purpose, Zr and Hf powders were separately added to the epoxy resin at 0.5%, 1%, 1.5%, and 2% weight ratios and cured at different temperatures. The density and volumetric calculations of the samples, Shore D hardness measurements were performed and the effects of curing temperatures on the sample surfaces were investigated. Then, Zr and Hf powders at the same weight ratios were added to the epoxy resin and applied to the carbon fibers using the hand lay-up method, followed by a curing process at 23°C using the vacuum bagging technique. DSC, tensile, and bending tests and SEM-EDS analysis were performed on the produced composites. As a result of the study, it was observed that the Zr and Hf additions in the particle-reinforced composites resulted in an increase in the density and volume of all samples cured at 23°C, while causing a slight decrease in the Shore D hardness values. It was observed that the increase in curing temperature caused degradation on the sample surfaces. In carbon fiber reinforced hybrid composites, it was observed that both additives resulted in an increase in tensile stress values. The maximum value was obtained at a 1.5% addition ratio in Zr-doped composites, while in Hf-doped composites, tensile stress values increased as the addition ratio increased. It was observed that the additions of Zr and Hf increased the ILSS (interlaminar shear strength) values of all the composites. In the DSC analysis, it was observed that both additives caused a decrease in the polymerization enthalpy values. Microstructural analyses were performed using SEM-EDS.

Science Code : 91512

Key Words : Polymer composite, hybrid composite, carbon fiber, epoxy resin, zirconium, hafnium, thermal and mechanical properties

Page Number : 79

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Hanifi ÇİNİCİ

Co-Supervisor : Dr. Erdem MERMER

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans süresince beni her alanda destekleyen ve yönlendiren, çalışmalar için her türlü imkânı sağlayan, her konuda bilgi ve birikimlerinden faydalandığım değerli danışman hocalarım Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ ve Dr. Erdem MERMER'e teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmalarımın bir kısmında Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi laboratuvarında çalışma imkânı sağlayan, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği öğretim üyesi Doç. Dr. Mehmet Fatih ÖKTEM'e teşekkürlerimi sunarım. Tez sürecim boyunca beni destekleyen ve her zaman yanımda olan değerli arkadaşım Cansu TARAKÇI'ya teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, daima yanımda olan ve bu günlere gelmemi sağlayan aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER	3
2.1. Kompozit Malzemeler.....	3
2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	4
2.2.1. Matris malzemesine göre kompozitler	5
2.2.2. Takviye malzemesine göre kompozitler	11
2.3. Karbon Fiber Takviyeli Kompozitler	14
2.3.1. Karbon fiber.....	15
2.3.2. Karbon fiber üretimi	17
2.4. Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	17
2.4.1. El yatırma yöntemi	18
2.4.2. Reçine transfer kalıplama yöntemi	20
2.4.3. Püskürtme yöntemi	21
2.4.4. Elyaf sarma yöntemi	22
2.4.5. Vakum torbalama	23
2.4.6. Profil çekme (Pultrüzyon)	24

	Sayfa
2.4.7. Otoklav yöntemi	24
2.4.8. Vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemi (VRTM).....	25
3. LİTERATÜR TARAMASI	27
3.1. Kompozit Malzemelerde Reçine İçine Eklenen Katkı Malzemeleri ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	27
4. MALZEME VE METOT	33
4.1. Malzemeler.....	33
4.2. Üretim Yöntemleri	33
4.3. Karakterizasyon Teknikleri	37
4.3.1. Partikül katkılı reçine için karakterizasyon teknikleri	37
4.3.2. Karbon fiber takviyeli kompozit için karakterizasyon teknikleri.....	38
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	43
5.1. Partikül Katkılı Reçinelerin Karakterizasyonu	43
5.1.1. Yoğunluk ölçümleri ve hacimsel hesaplamalar	43
5.1.2. Shore D sertlik ölçümleri.....	45
5.1.3. Farklı oranlarda partikül katkısı ve farklı kürleme sıcaklıklarının etkisi .	47
5.2. Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Karakterizasyonu	50
5.2.1. Çekme testi	50
5.2.2. Eğme testi	53
5.2.3. DSC testi.....	57
5.2.4. SEM-EDS analizi	64
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	69
6.1. Sonuçlar.....	69
6.2. Öneriler	71
KAYNAKLAR.....	73
ÖZGEÇMİŞ	79

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Kompozit malzemelerin kullanıldığı sektörler ve kullanım yerleri.....	4
Çizelge 4.1. Metal tozlarının özellikleri	33



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kompozit malzemenin yapısı.....	4
Şekil 2.2. Kompozit malzemelerin matris ve takviye elemanına göre sınıflandırılması	5
Şekil 2.3. Fiber, matris ve fiber takviyeli kompozitin gerilme-gerinim grafiği	7
Şekil 2.4. Termoplastiklerin doğrusal polimer bağı	8
Şekil 2.5. Termosetlerin çapraz polimer bağı.....	9
Şekil 2.6. Epoksi reçinenin şematik gösterimi	11
Şekil 2.7. Sürekli elyaf takviyeli polimer kompozit malzeme	13
Şekil 2.8. Kısa elyaf takviyeli kompozit malzeme.....	13
Şekil 2.9. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler	14
Şekil 2.10. Karbon fiber takviyeli polimer kompozitin yapısı.....	14
Şekil 2.11. El yatırma yöntemi.....	19
Şekil 2.12. Prepreg üretim prosesi akış şeması	19
Şekil 2.13. Reçine transfer kalıplama sistemi	21
Şekil 2.14. Püskürtme yöntemi uygulaması.....	22
Şekil 2.15. Elyaf sarma yöntemi uygulaması.....	23
Şekil 2.16. Profil çekme yöntemi uygulaması.....	24
Şekil 2.17. Otoklav şematik gösterimi	25
Şekil 2.18. Vakumla reçine transfer kalıplama uygulaması	26
Şekil 5.1. Katkısız ve Zr katkılı numunelerin yoğunluk değerleri	43
Şekil 5.2. Katkısız ve Hf katkılı numunelerin yoğunluk değerleri.....	44
Şekil 5.3. Katkısız ve Zr katkılı numunelerin hacimsel hesaplama değerleri	44
Şekil 5.4. Katkısız ve Hf katkılı numunelerin hacimsel hesaplama değerleri.....	45
Şekil 5.5. Katkısız ve Zr katkılı numunelerin Shore D sertlik değerleri	46
Şekil 5.6. Katkısız ve Hf katkılı numunelerin Shore D sertlik değerleri	47

Şekil	Sayfa
Şekil 5.7. Katkısız ve Zr katkılı kompozitlerin gerilim-gerinim grafiği	51
Şekil 5.8. Katkısız ve Zr katkılı kompozitlerin çekme gerilim değerleri	51
Şekil 5.9. Katkısız ve Hf katkılı kompozitlerin gerilim-gerinim grafiği.....	52
Şekil 5.10. Katkısız ve Hf katkılı kompozitlerin çekme gerilim değerleri	52
Şekil 5.11. Katkısız ve Zr katkılı kompozitlerin kuvvet-yer değiştirme grafiği	54
Şekil 5.12. Katkısız ve Zr katkılı kompozitlerin ILSS değerleri.....	54
Şekil 5.13. Katkısız ve Hf katkılı kompozitlerin kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	55
Şekil 5.14. Katkısız ve Hf katkılı kompozitlerin ILSS değerleri	56
Şekil 5.15. Katkısız ve Zr katkılı kompozitlerin polimerleşme sıcaklık değerleri.....	58
Şekil 5.16. Katkısız kompozitlerin DSC grafiği	58
Şekil 5.17. %0.5 Zr katkılı kompozitin DSC grafiği.....	59
Şekil 5.18. %1 Zr katkılı kompozitin DSC grafiği.....	59
Şekil 5.19. %1.5 Zr katkılı kompozitin DSC grafiği.....	59
Şekil 5.20. %2 Zr katkılı kompozitin DSC grafiği.....	60
Şekil 5.21. Katkısız ve Zr katkılı kompozitlerin polimerleşme entalpi değişim değerleri	60
Şekil 5.22. Katkısız ve Hf katkılı kompozitlerin polimerleşme sıcaklık değerleri	61
Şekil 5.23. %0.5 Hf katkılı kompozitin DSC grafiği	61
Şekil 5.24. %1 Hf katkılı kompozitin DSC grafiği	62
Şekil 5.25. %1.5 Hf katkılı kompozitin DSC grafiği	62
Şekil 5.26. %2 Hf katkılı kompozitin DSC grafiği	62
Şekil 5.27. Katkısız ve Hf katkılı kompozitlerin polimerleşme entalpi değişim değerleri	63

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Metal matrisli kompozit malzeme.....	6
Resim 2.2. Karbon fiberle insan saçının karşılaştırılması.....	15
Resim 2.3. Karbon fiber kumaş.....	16
Resim 2.4. Vakum torbalama yöntemi uygulaması.....	23
Resim 4.1. a) Karbon fiber b) Epoksi reçine c) Zr tozu d) Hf tozu.....	33
Resim 4.2. a) Analitik terazide yapılan ölçüm b) Reçine içine metal tozu katkılanması c) Speed Mixer’da karışım.....	34
Resim 4.3. a) Kalıplara alınan reçineler b) Nüve FN 120 etüv	35
Resim 4.4. El yatırma yöntemi ile kompozit üretimi	35
Resim 4.5. a) Ayırıcı ile kaplanmış numunelerin üzerine serilen reçine emici kat b) Vakum torbalama işlemi	36
Resim 4.6. WSA-224T analitik terazi	37
Resim 4.7. Shore D sertlik ölçüm cihazı.....	38
Resim 4.8. INSTRON 34TM-30 çekme testi cihazı	39
Resim 4.9. a) INSTRON 5985 eğme testi cihazı, b) kompozit malzemeye uygulanan eğme testi	40
Resim 4.10. DSC Q20 V24.11 Build 124 cihazı.....	40
Resim 5.1. %0.5 Zr katkılı a) 23°C, b) 46°C, c) 66°C ve d) 86°C’de kürlenmiş numuneler.....	48
Resim 5.2. 23°C’de kürlenmiş a) %0. 5, b)%1, c)%1.5, d) %2 Zr katkılı numuneler.....	48
Resim 5.3. %0.5 Hf katkılı a) 23°C, b) 46°C, c) 66°C ve d) 86°C’de kürlenmiş numuneler.....	49
Resim 5.4. 23°C’de kürlenmiş a) %0.5, b)%1, c)%1.5, d) %2 Hf katkılı numuneler..	49
Resim 5.5. a) Katkısız b) %0.5 c) %1 d) %1.5 ve e)%2 Zr katkılı kompozitlerin SEM görüntüleri.....	65
Resim 5.6. a) %0.5 b) %1 c) %1.5 ve d)%2 Hf katkılı kompozitlerin SEM görüntüleri.....	66

Resim	Sayfa
Resim 5.7. Zirkonyumun a) SEM görüntüsü, b) EDS analizi.....	67
Resim 5.8. Hafniyumun a) SEM görüntüsü, b) EDS analizi.....	67



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
μ	Mikron
μm	Mikrometre
cm^3	Santimetreküp
d	Yoğunluk
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
g	Gram
ILSS	Tabakalar Arası Kesme Mukavemeti
J	Joule
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
mW	Miliwatt
N	Newton
Nm	Newton-metre
PAN	Poliakrilonitril
ppm	Milyonda bir birim
T_g	Camsı geçiş sıcaklığı
T_p	Polimerleşme sıcaklığı
V	Hacim
VRTM	Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama
ΔH_p	Polimerleşme entalpisi

1. GİRİŞ

Son yıllarda teknolojinin hızla ilerlemesi sonucunda toplumun gereksinimleri de aynı şekilde değişmektedir. Teknolojinin gelişmesi ile geleneksel malzemeler ihtiyaçları karşılayamamış ve böylece kompozit malzemeler geliştirilmiştir. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra günümüze kadar olan süreçte kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerine yapılan çalışmalar ve bu özelliklerin geliştirilebilmesi için yapılan çalışmalar gün geçtikçe artış göstermiştir. Sonraki zamanlarda çeşitli alanlarda kullanımları yaygınlaşmış ve hâlâ da yaygınlaşmaktadır.

Kompozit malzeme makro ölçüde birbiriyle aynı olmayan metal, seramik ve polimer malzemelerin iki veya daha fazlasının üstün özelliklerini bir ara yüzey boyunca tek bir malzeme toplamak veya yeni mekanik özelliklere sahip başka bir malzeme oluşturmak için farklı prosedürlerin uygulanmasıyla birleştirilen malzemelerdir. Kompozit malzemeleri oluşturan malzemeler kendi özelliklerini korurlar.

İlk çağlarda insanlar kırılgan olan malzemelerin içine bitkisel ve hayvansal elyaflar ekleyerek kırılganlıklarının ortadan kalktığını fark etmişlerdir. Saman katkılarak yapılan kerpiç tuğlalar örneklerden biridir. Eski çağlarda savaşlarda silahların etkisinden korunmak için kalın deriler ve metal zırhlar kullanılmış fakat bu koruyucu giysiler hem ağır ve hem de kullanıcının hareketini kısıtlayıcı olması, insanların yeni malzeme arayışına sebep olmuştur. Kompozitlerin gelişmesiyle çelikten daha dayanıklı balistik koruyucu malzemeler ortaya çıkmıştır. Kompozit malzemeler ilgili yapılan ilk çalışmalar 1940'lı yılların başlarında gerçekleştirilmiştir.

Kompozit malzemelerde en az iki malzemenin farklı özellikleri bir arada bulunduğu için rijitlik, çekme ve yorulma dayanımı, yüksek ısıya karşı duyarlılığı, basınç ve eğilime karşı dayanıklılığı, ve korozyon direncinin yüksek, yoğunluğunun düşük, kırılmaya karşı dayanımının yüksek olması gibi özellikler bulunmaktadır. Bundan dolayı savunma ve havacılık sektörü başta olmak üzere inşaat, uzay teknolojileri, otomotiv endüstrisi, denizcilik, robotik teknoloji, nükleer endüstri, sağlık sektörü ve kimya endüstrisi gibi birçok alanda yaygın biçimde kullanılmaktadır [1-6].

Bu tez çalışmasında, epoksi reçine içine %0.5, %1, %1.5 ve %2 ağırlık oranında Zr ve Hf katkılanarak karbon fiber takviyeli polimer matrisli hibrit kompozitler üretilmiş ve Zr ve Hf katkısının kompozitlerin yapısal, termal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmanın amacı, katkı maddesi olarak literatürde kullanılmamış olan Zr ve Hf tozu ile polimer kompozitlerin termal ve mekanik özelliklerini iyileştirerek havacılık ve uzay sanayinde kullanılabilecek kompozit türü geliştirmek ve literatüre katkı sağlamaktır. Bu çalışmada iki çeşit üretim yapılmıştır. Birincisi partikül katkılı kompozitler, ikincisi ise partikül katkılı karbon fiber takviyeli hibrit kompozitlerdir. Üretilen numunelerin, kütleme sıcaklık farkının numune yüzeyine etkisi incelenmiştir. Yoğunluk ve hacimsel hesaplamalar ve sertlik ölçümleri yapılmıştır. Üretilen karbon fiber takviyeli hibrit kompozitlerin çekme testi, eğme testi, DSC testi ve SEM-EDS analizleri yapılmıştır. Sonuçlar analiz edilerek, tozların hangi katkı oranında ve hangi kütleme sıcaklığında üretilen kompozit malzemelerin özelliklerini en iyi seviyelere çıkardığı tespit edilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

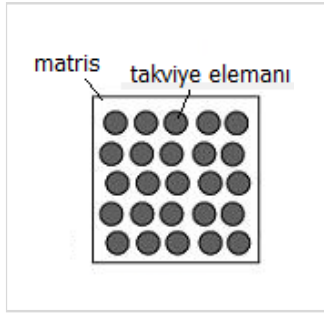
2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme, iki ya da daha fazla sayıdaki malzemenin en iyi özelliklerini tek bir malzemede toplamak için makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Kompozit malzeme üretimi için kullanılan malzemeler birbiri içinde çözünmez ve kendi özelliklerini kaybetmeden yeni malzeme oluştururlar. Kompozitler mikro yapı olarak heterojen ama makro yapı olarak homojendirler [1]. Kompozit malzemelerin diğer malzemelere göre üstün özellikleri;

- Düşük sürtünme katsayısı
- Yüksek mukavemet/yoğunluk oranı
- Düşük ağırlık
- Yüksek sıcaklık performansı
- Yüksek korozyon direnci
- Yüksek yorulma ve aşınma dayanımı
- Yüksek mekanik dayanım
- Yüksek kırılma tokluğu
- Elektrik iletkenliği veya elektriksel direnç
- Titreşim sönümleme
- Hava koşulları ve uv ışınlarına karşı dayanımı

olarak verilebilir [1-3].

Kompozit malzemeler matris ve takviye fazından oluşur. Matris fazı, malzeme üzerine uygulanan kuvveti kopmadan veya çözülmeden ara yüzey aracılığıyla takviye faza ulaştırılarak kuvveti yapı içerisine dağıtmasını sağlar. Bu sayede tahribat engellenmiş olur [4]. Kompozit malzemenin yapısı Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Kompozit malzemenin yapısı [5]

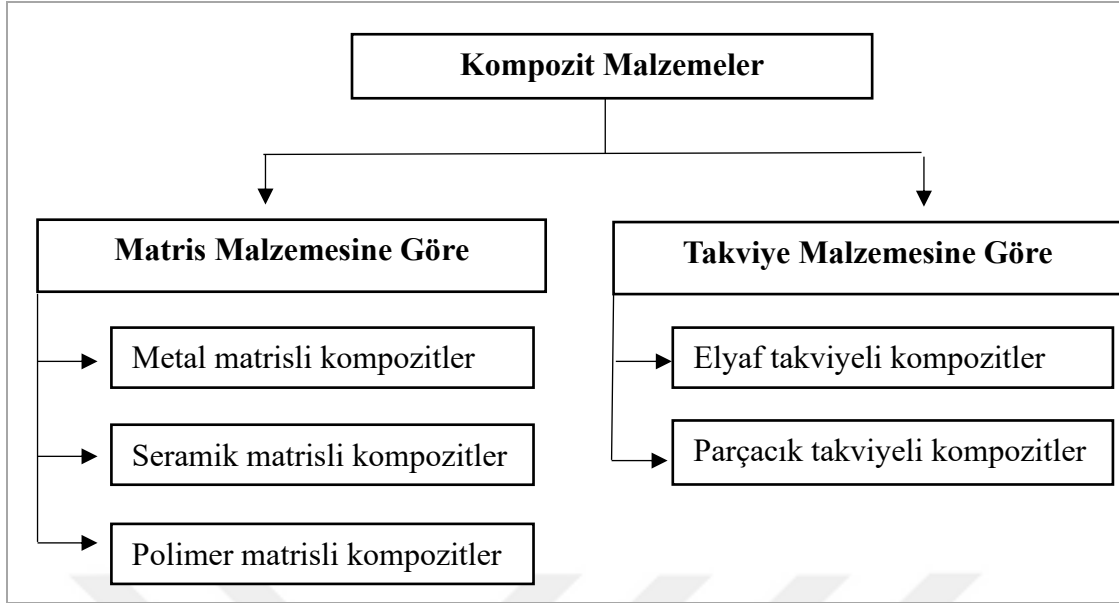
Kompozitler, hafif olduğu için havacılık ve uzay endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde kimya endüstrisi, inşaat, otomotiv, gıda, elektrik ve denizcilik gibi sektörlerde kullanılmakta ve kompozitlerle ilgili araştırmalar devam etmektedir. Kompozit malzemelerin yaygın olarak kullanıldığı sektörler ve kullanım yerleri Çizelge 2.1’de verilmiştir [6].

Çizelge 2.1. Kompozit malzemelerin kullanıldığı sektörler ve kullanım yerleri [6]

Sektör	Kullanım yeri
Savunma sanayi	Kurşun geçirmez panel ve miğferler
Havacılık	Helikopter ve uçakların gövde parçalarında, uçakların burun ve kanatlarında
Otomotiv	Otobüs ve kamyon yan panelleri, otomobil kaportaları
Denizcilik	Motorlu tekne ve yelkenliler, şamandıralar, filikalar, iskeleler
Elektrik	Antenler, sigorta kutuları, yalıtkan platformlar, izolatörler, kablo taşıyıcılar, kablo kanalları, elektrik direkleri, merdivenler
İnşaat ve yapı	İç ve dış cephe kaplamaları, çatı kaplama levhaları, prefabrik binalar, beton kalıplar, taşıyıcı profiller, dekoratif uygulamalar
Kimya	Kimyasal tesis zemin ızgaraları, asit tankları ve kaplamaları

2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozitlerin yapılarında çok sayıda farklı malzeme kullanılabilir. Bu da kompozitlerin sınıflandırılmasında keskin sınırlar çizilmesine engel olur. Fakat matrislere ve takviye elemanlarına göre sınıflandırma yapılabilmektedir [6,7]



Şekil 2.2. Kompozit malzemelerin matris ve takviye elemanına göre sınıflandırılması

2.2.1. Matris malzemesine göre kompozitler

Metal matrisli kompozitler

Ana yapısı metallerden oluşan bu kompozitlerde takviye malzemesi olarak genellikle seramikler ya da metaller kullanılır [8]. Bu kompozitlere bir yük uygulandığı zaman bu yük tüm yapıya dağılır. Yükün dağılımı malzeme yapısının daha sağlam olmasını sağlamaktadır. Metal matrisli kompozitler makine ve metalurji sektöründe yaygın olarak kullanılmasının sebebi tokluk ve mukavemet değerlerinin diğer malzemelere göre daha yüksek olmasıdır [9].

Havacılık, savunma ve otomotiv sanayiinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bakır, magnezyum, titanyum, alüminyum, çinko ve nikel gibi hafif metaller matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Metal matrisler her takviye malzemesi ile iyi bir arayüzey bağı oluşturamayabilir. Bu da metal matrisli kompozitlerin üretimleri zorlaştırarak maliyetini artırır. Resim 2.1’de metal matrisli kompozit malzemeler gösterilmiştir [10].



Resim 2.1. Metal matrisli kompozit malzeme [10]

Seramik matrisli kompozitler

Bir veya daha fazla metal ve ametalin birleştirilmesi ile oluşturulan inorganik yeni malzemeler seramik malzeme olarak adlandırılır [9]. Seramikler kovalent veya iyonik bağa sahiptir. Seramik malzemelerin yapıları kararlıdır. Yüksek mukavemete ve ısıl dayanıma sahiptir fakat gevrek ve çok sert oldukları için kullanım alanları daralmıştır. Seramik malzemeler; endüstriyel fırınlar, zırhlar, optik sanayi, fren diskleri, elektrik-elektronik, sıcak gaz filtreleri, türbin motor parçaları ve egzoz valfleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Silisyum nitrid, silisyum karbür ve alumina, en temel kullanılan seramik matrisleridir. Resim 2.2’te seramik matrisli kompozit malzemelere örnek gösterilmiştir [10-11].

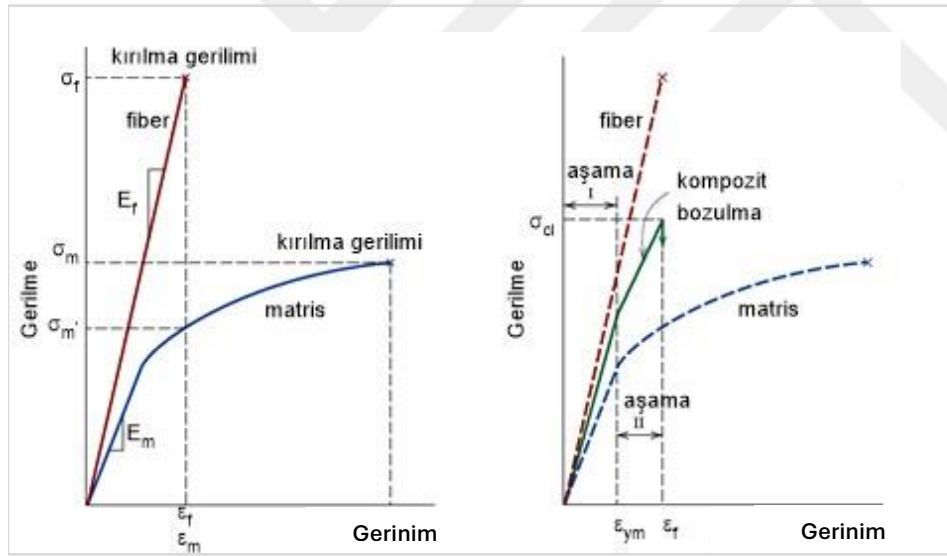
Polimer matrisli kompozitler

Monomer adı verilen küçük moleküllerin belirli ortam şartlarında birbirine eklenmesi ile oluşan uzun zincirli yapıya polimer malzeme denir. Polimerler düşük üretim maliyetleri ve kolay şekil alabildikleri için yaygın olarak kullanılabilir [10-11].

En önemli özelliklerinden biri yüksek özgül mukavemet değerine sahip olmasıdır. Cam lifli polimerlerde ve yüksek mukavemetli çeliklerde özgül mukavemet değerleri sırasıyla 620 Nm/gr ve 110 Nm/gr’dır. Özgül elastisite değeri ise alüminyumun 5 katı kadardır. Savunma havacılık ve otomotiv sanayi gibi alanlarda kullanılan malzemelerde hem dayanımın hem de hafiflik istenilmektedir. Bu alanlarda alüminyum alaşımları yerine tercih edilmektedir. Kompleks parçaların imalatında, farklı takviye malzemeleri ile çok iyi uyum sağlayabildikleri için üretimlerini kolaylaştırmıştır [10].

Polimer kompozitler, sertlikleri düşük olduğu için zayıf malzemelerdir. Bu malzemelerin mekanik özelliklerini geliştirmek ve yapısal olarak güçlendirerek kullanılabilir duruma getirmek için sürekli ve süreksiz elyaflar ile takviye edilerek güçlendirilmesi gerekir. Polimer matrisler elyafları birbirine bağlayarak gelen yük ve darbeleri elyaflara aktararak malzemeyi korur. Matrisler elyaflarla göre düşük mekanik özelliklere sahip olmasına rağmen kompozitlerin termal genleşme katsayısı, termal direnç basma mukavemeti, kesme mukavemeti ve yorulma mukavemeti gibi birçok mekanik özelliğini etkilerler [12].

Fiber, matris ve fiber takviyeli kompozitin gerilme-gerinim grafiği Şekil 2.3'te görülmektedir. Bu grafikte yüksek mukavemet, yüksek kırılma uzaması ve yüksek rijitlik gibi özellikler sıralanabilmektedir. Matris gerilme-gerinim eğrisi malzemenin dayanımı hakkında bilgiler vermektedir. Matris kırılma direnci ve dayanımı, kırılma öncesi ne kadar çok deformasyon kabul ettiğine bağlıdır.



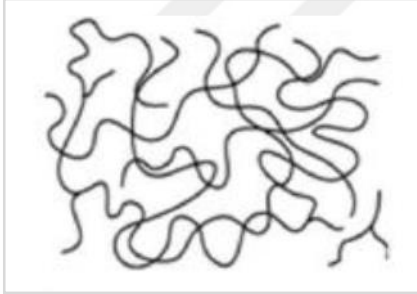
Şekil 2.3. Fiber, matris ve fiber takviyeli kompozitin gerilme-gerinim grafiği [12]

Elyaf takviyesi ve polimer matris arasında yapışmanın yüksek olması önemlidir. Arayüzey bağı ne kadar kuvvetliyse kompozit malzemeye uygulanan yükler de yüksek oranda aktarılacak, kırılma veya fiber-matris ayrışması önlenmiş olur [13]. Polimer matrisli kompozit malzemelerin, matris kısmı polimerler, termoplastikler, termosetler ve elastomerler olarak üç gruba ayrılırlar [9].

Termoplastikler

Termoplastikler, oda sıcaklığında katı malzemelerdir. Isıtıldıkları zaman geçiş sıcaklığı (T_g) ile yumuşamaya başlarlar. Camsı geçiş sıcaklığını (T_g) geçmesi ile de akışkan bir hal almaya başlarlar [12]. Isıtıldığında özelliklerini kaybetmediği için termoplastikler tekrar tekrar işlenip şekillendirilebilme özelliğine sahiptirler. Termal genleşme katsayıları metallere göre yüksektir ancak termal iletkenlikleri metallere kıyasla düşüktür. Elektrik yalıtkanlıkları, yüksek darbe dayanımları ve sertlikleri yüksek ancak mukavemetleri düşüktür. Sünek olmaları da termoplastiklerin bazı ayırt edici özelliklerindendir [9].

Yapılarında kovalent ve van der waals bağlarına sahiptirler. Termoplastiklerin çeşitleri fazladır ancak matris olarak kullanımı çok yaygın değildir [4]. Termoplastikler, kendi özelliklerini kaybetmeden yeniden ısıtılabilir, geri dönüştürülebilir ve yeniden kalıplanabilir. Termoplastiklerin bağ yapısı Şekil 2.4'te verilmiştir. Bu malzemeler ısıyla şekillendirme, ekstrüzyon ve enjeksiyonla kalıplama gibi işlemlerde kullanılır. En önemli termoplastikler; naylon, polietilen, akrilikler, polistiren, selülozikler, karbon florür ve vinillerdir [11, 12].



Şekil 2.4. Termoplastiklerin doğrusal polimer bağı [14]

Elastomerler

Elastomerlere bir çekme kuvveti uygulandığı zaman %500 gibi uzama gösterirler. Bu kuvvet geri bırakıldığında eski haline tekrar dönebilen viskoelastik, ağısı yapıya sahip ve çapraz bağlı bir malzemedir. İki çeşit yaygın olarak bilinen elastomer vardır. Bunlar; doğal ve sentetik kauçuktur [9].

Termosetler

Termosetler, reçine ile bir katalizörün ya da sertleştiricinin karıştırılmasıyla kimyasal tepkime oluşması sonucu sert ve ergimez bir yapı haline gelen malzemelerdir [13]. Termosetlerin molekül zincirleri birbirine çapraz bağlar ile bağlanırlar. Çapraz bağlara sahip olduğu için termoplastikler gibi ısıtıldığı zaman tekrar tekrar şekillendirilemezler. Termoset malzemeler, basınç ve ısı ile şekillenerek son halini alırlar [9].

Elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde genellikle sıvı halde bulunan termosetler kullanılır. Termoset reçineler izotropik ve düşük vizkozitelidir. Vizkoziteleri düşük olduğu için elyaf takviyeli kompozit üretiminde yaygın olarak kullanılırlar. Isıtılma sırasında yapılarında oluşan kovalent çapraz bağlanmalar eğme ve dönme hareketlerini engellemektedir [4]. Termosetlerin yapılarındaki çapraz bağ Şekil 2.5'te görülmektedir.



Şekil 2.5. Termosetlerin çapraz polimer bağı [14]

Termoset reçineler normalde sıvı halde olduğu için termoset kompozitleri işlemesi kolaydır. Elyafların termoset reçine ile ıslatılabilmesi sıvı oldukları için kolaydır. Termoset reçineler sıvı olduğu için üretilen kompozitlerde oluşan gözenek ve boşluk daha azdır. Termoset kompozitlerin işlenmesinde, basınç ve ısı gereksinimi termoplastik kompozitlere göre daha azdır. Bu da enerji kazanımı sağlar [15].

Termoset reçineler kurlenme sonrasında ısıtıldıklarında bir daha sıvı hale gelmezler. Belirli bir sıcaklığın üzerine çıkıldığında ise mekanik özellikleri önemli ölçüde değişir. Bu sıcaklık camsı geçiş sıcaklığı (T_g) olarak bilinmektedir. Her termoset farklı camsı geçiş sıcaklığına sahiptir. Bu sıcaklık kurlenme derecesine ve reçine-sertleştirici karışım oranına bağlıdır. Camsı geçiş sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda termosetler katı yapıdan daha esnek olan, amorf yapıya doğru değişim gösterir. Camsı geçiş sıcaklığının üzerinde, kompozitin suya

karşı direnç, reçine modülü ve renk stabilitesi gibi özelliklerinde hızlı bir şekilde düşme gözlenmektedir. Birçok reçine çeşidi kompozit endüstrisinde kullanılmaktadır ancak üç temel reçine yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar; poliester, vinilester ve epoksidir [13].

Poliester: Kullanımı kolay ve maliyetleri oldukça düşük bir polimerdir. 100°C sıcaklık altında mekanik özellikleri iyi olan polyesterler cam takviyeli polimer kompozit üretiminde en yaygın kullanılan reçinedir [11]. Çevresel dayanımları yüksek ve üretimi kolaydır. Genel olarak denizcilik, kimya, otomotiv ve elektriksel uygulamalarda kullanılır [4]. Zehirli gazlar açığa çıkarması, kürlenme sonrası çekme oranının çok yüksek olması ve kısa raf ömürlü olması gibi dezavantajlara sahiptir [9].

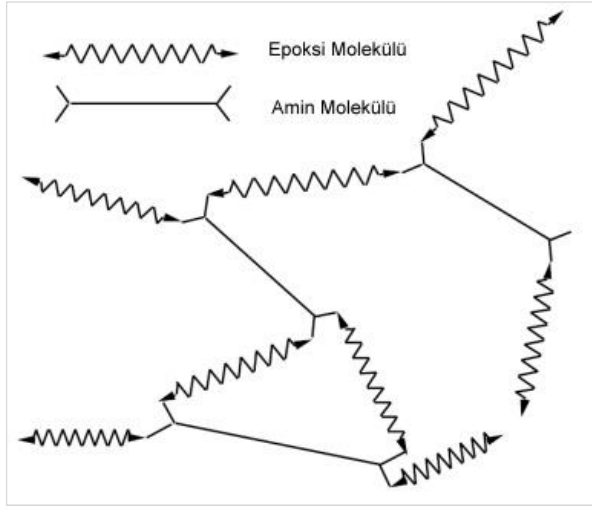
Vinilester: Vinilesterler yapısal olarak poliester ile epoksi reçinelerin en iyi özelliklerini yapısında birleştirmiş olan bir reçine türüdür. Poliesterlere göre maliyetleri yüksektir. Esterlerle karşılaştırıldığında ise dirençleri daha iyidir. Yorulma ve darbelere karşı dayanıklıdır. Su absorpsiyonu düşüktür. Sıcaklık/ısıl dayanım özellikleri de çok iyidir. Vinilester reçineler karbon, aramid ve cam elyaf ile uyumlu olarak kullanılır. Kimyasallara karşı dayanıklıdır. Rüzgâr türbin kanatları, depo ve tekne üretiminde kullanılır [4, 11].

Epoksi: Epoksi, günümüzde reçine türleri arasında en yüksek performansa sahip reçinedir. Epoksiler diğer reçinelere kıyasla daha üstün özellikler gösterdiği için havacılık sanayiindeki yaygın olarak kullanılmaktadır [13].

Epoksi, iki karbon atomuna bir oksijen atomunun bağlanmasıyla oluşan kimyasal bir gruptur. Epoksi reçineler 5 -150 °C arasında, kolaylıkla kürlenebilir. Kürlenme süresi sertleştirici türü ve oranına bağlıdır. Epoksiler katalizör yerine sertleştirici ile kürlendiği için poliester reçinelerden farklıdır. Sertleştirici genellikle amin grubudur ve epoksinin kürlenmesi için kullanılmaktadır.

İki epoksi grubun her bir amin gruba bağlanmasıyla kürlenme sürecindeki kimyasal tepkime oluşur. Epoksi reçinelerde kullanılan sertleştiricinin özellikleri ortaya çıkan kompozit malzemeyi büyük ölçüde etkilemektedir. Reçine ve sertleştiricinin karışım oranı önemlidir. Eğer sertleştirici ve epoksi doğru oranlarda karıştırılmazsa, tepkimeye giremeyen fazla reçine veya sertleştirici matris içinde kalır bu da kompozitin özelliklerini olumsuz yönde etkileyecektir. Reçine üreticileri karışım oranlarının doğru kullanılması için reçine ve

sertleştirici kütle veya hacim oranlarını formüle ederler [15]. Epoksi reçinenin şematik gösterimi Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Epoksi reçinenin şematik gösterimi [13]

Düşük ağırlık, yüksek yük taşıma yapısı, yüksek kopma mukavemeti, yüksek aşınma direnci, iyi balistik performans ve yüksek sıcaklıkta çalışabilmeleri nedeniyle epoksi reçineler özellikle havacılık sektöründe elyaf takviyeli kompozit malzemeler ile yaygın olarak kullanılmaktadır. Epoksi reçine ile üretilen elyaf takviyeli kompozitler mükemmel yapışma özelliklerine sahiptir [11]. Yüksek sıcaklıklara dayanımı, uygulanan kür işlemleri ile 150-200 °C artırılabilir. Epoksiler %2'den az büzülme oranına sahiptir. Tüm fiber takviyeli kompozitlerde kullanılabilirler. Genellikle havacılıkta karbon elyaflarla birlikte kullanılırlar [16].

2.2.2. Takviye malzemesine göre kompozitler

Yapılarında çok sayıda farklı takviye malzemesi kullanılabildiği için kompozitleri gruplandırırken kesin sınırlar ile ayırmak zordur ancak yapıdaki malzemelerin türüne göre bir sınıflama yapılabilir [16]. Kompozit malzemeler, takviye elemanlarının türüne göre elyaf takviyeli ve parçacık takviyeli olarak ayrılabilir [9].

Elyaf takviyeli kompozitler

Matris malzemesi içine elyafların eklenmesiyle elyaf takviyeli kompozitler oluşturulur. Bu kompozitlerde matrisin görevi elyafları bir arada tutmak ve kompozit malzemeye gelen yükü

homojen bir şekilde tüm elyaflara dağılmasını sağlamaktadır. Kullanılan matris ve elyaf oranları kompozit malzemenin mekanik özelliklerine önemli ölçüde etki edebilir. Kompozit malzemelerde matris içindeki elyaf oranları belli bir seviyeye kadar arttığında mukavemet değerleri artmaktadır ancak bu seviyenin daha fazla üzerine çıkıldığı zaman elyaflar matris tarafından tam bağlanamayacağından, mukavemet değeri düşmektedir. Elyaf çapları da kompozit malzemelerin mukavemet değerlerine etki etmektedir. Elyaf çapı ne kadar küçükse matrisin elyafları bağlama kapasitesi artar, bu da mukavemeti artırır [9]. Elyaflar, doğal ve sentetik elyaflar olarak iki gruba ayrılır. Doğal elyaflar bitkisel, hayvansal ve mineral kaynaklıdır. Hayvansal elyaflar deve tüyü, yün ve doğal ipek örnek verilebilir. Bitkisel elyaflar kendir, pamuk, keten ve kenevir olarak verilebilir. Mineral kaynaklı elyaflar amyant ve asbest kristal yapıya sahiptir. Sentetik elyaflar organik ve inorganiktir. Karbon, cam, bazalt, metal örnek verilebilir [4].

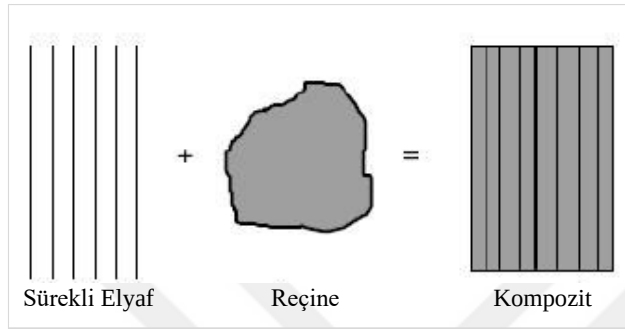
Kompozit malzemelerde kullanılan başlıca elyaf türleri:

- Karbon elyafı (PAN-Poliakrilonitril ve zift kökenli)
- Aramid (Aromatik Poliamid) elyafı (Ticari ismi: Kevlar-DuPont)
- Cam elyafı
- Bor elyafı
- Oksit elyafı
- Yüksek yoğunluklu polietilen elyafı
- Poliamid elyafı
- Poliester elyafı
- Doğal organik elyaflar
- Seramik elyaflar

Takviye malzemeleri arasında en çok kullanılan ve fiyat olarak da en uygun olan takviye malzemesi camdır. Düşük yoğunluk ve yüksek dayanıma sahip aramid ve karbon elyaflar yüksek maliyetlerine rağmen, maliyetin göz ardı edildiği başta havacılık ve uzay sanayi olmak üzere geniş bir kullanıma sahiptir [17].

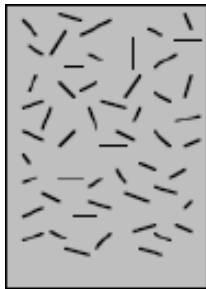
Elyaf takviyeli kompozitler, matris fazın sürekli ya da kısa formdaki elyaflarla takviyelendirilmesi ile üretilmektedir. Sürekli elyafların matris içinde yönlenebilirken, kesikli elyafta bu durum söz konusu değildir [18]. Kompozit malzeme üretim yöntemi ve

uygulama alanlarına göre elyaf türü seçilir. Sürekli elyaflar yapısal uygulamalar için tavsiye edilir, kısa elyaflar ise yapısal olmayan uygulamalarda tavsiye edilmektedir. Profil çekme, elyaf sarma ve rulo sarımında Sürekli elyaflar kullanılırken; enjeksiyon ve baskı kalıplamada kısa elyaflar kullanılmaktadır [6]. Reçine içine sürekli elyaf ilave edilerek üretilmiş elyaf takviyeli kompozit malzemelerin gösterimi Şekil 2.7’de gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Sürekli elyaf takviyeli polimer kompozit malzeme [4]

Kısa elyaf takviyeli kompozitlerdeki gerilme dağılımı, sürekli elyaf takviyeli kompozitlerden daha karmaşıktır. Kısa elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf içeriği, oranı ve yönelimin değişmesi mukavemet tahminini daha da zorlaştırır [19]. Ancak sürekli elyaf takviyeli kompozitlere göre daha iyi işlenebilirlik, daha düşük üretim maliyeti ve daha yüksek otomatik üretim kapasitesine sahip oldukları için sanayi uygulamalarında kullanımı giderek artmaktadır [20]. Kısa elyaflar reçine içine eklenerek üretilmiş elyaf takviyeli kompozit malzeme Şekil 2.8’de gösterilmiştir [7].

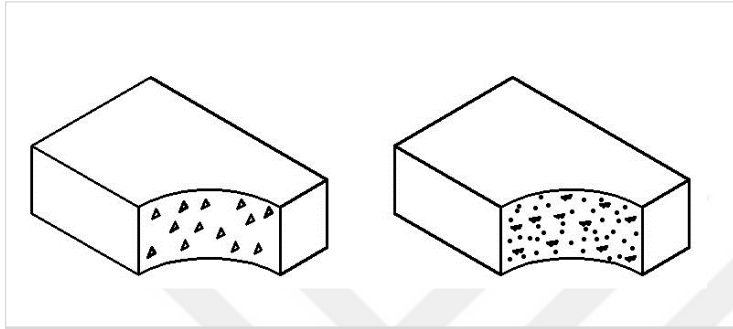


Şekil 2.8. Kısa elyaf takviyeli kompozit malzeme [7]

Parçacık takviyeli kompozitler

Bir matris malzemesine küçük boyutlu farklı malzemelerin homojen olarak karıştırılması ile oluşurlar [8]. Parçacık takviyeli kompozitlerde yapı içerisindeki parçacıklarının sertlik

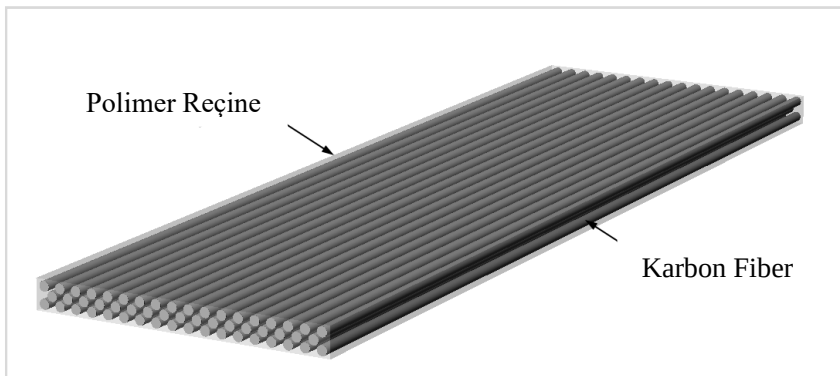
değerleri malzemelerin mukavemetine etki eder. Bu kompozitlerin en yaygın türü, polimer bir matris içinde metal parçacıkların eklenmesidir. Polimer matris içine katılan metal parçacıklar kompozit malzemeye elektrik ve ısı iletkenlik kazandırır. Metal matrisli kompozit malzemelere sertlik ve yüksek sıcaklık dayanımı kazandırmak için matris içine seramik parçacıklar katılır [9]. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler Şekil 2.9’da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler [9]

2.3. Karbon Fiber Takviyeli Kompozitler

Karbon fiber takviyeli polimer kompozitler, polimer bir reçinenin karbon fiberlerle güçlendirilmesiyle oluşturulan gelişmiş bir kompozit malzemedir. Burada polimer reçine elyafları tutan matris, karbon fiberler ise takviye malzemesi olarak işlev görür [21]. Karbon fiber takviyeli polimer kompozitin yapısı Şekil 2.10’da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Karbon fiber takviyeli polimer kompozitin yapısı [21]

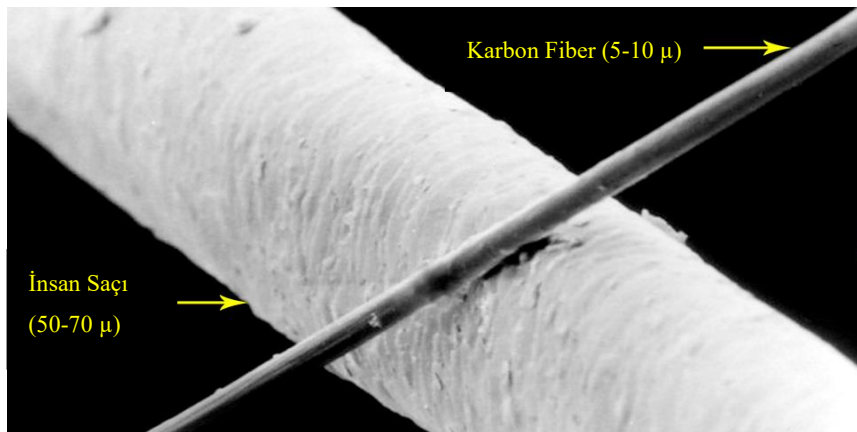
Karbon fiber takviyeli polimer kompozitler havacılık, mimari, denizcilik, otomotiv ve tıbbi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kompozitler düşük yoğunlukta olağanüstü

mekanik ve korozyon direnci özelliklerine sahiptir. Ayrıca hafiflik, termal ve elektriksel iletkenlik, yüksek yorulma direnci, iyi kimyasal direnç, yüksek mukavemet-ağırlık oranı gibi birçok üstün performansa sahiptir. Özellikle havacılık ve uzay sanayiinde uçak bileşenlerinde kullanımının ciddi oranda artmasının sebebi, düşük ağırlıkları sayesinde yakıt tüketimini azaltmada önemli bir rol oynamasıdır [21- 25]. Bu üstün özelliklerinden dolayı seramik, polimer ve karbon matrislere takviye malzemesi olarak kullanılmasıyla daha iyi özelliklere sahip kompozit malzemelerin üretilmesini sağlarlar [4].

Karbon fiber kullanımının artması ile ulaşım endüstrisi gibi enerji verimliliğinin artırılacağı veya rüzgâr türbini kanatları gibi büyük yapıların inşa edilebileceği alanlarda düşük yoğunluklu ve yüksek mukavemetli bir malzeme olarak endüstrileri etkilemektedir. [21 - 25].

2.3.1. Karbon fiber

Karbon fiberlerin bilinen ilk kullanımı 1879 yılında elektrik lambalarında Thomas Edison tarafından kullanılmasıdır [26]. Karbon fiberlerin %90'dan fazlasını karbon (C) ve geri kalan %10'luk kısmını ise azot (N), oksijen (O) ve hidrojen (H) elementleri oluşturmaktadır [4,21,27]. Karbon fiberler, insan gözüyle görülebilen çok ince filamentlerdir. Çapı yaklaşık 5–10 μm 'dir [7]. Karbon fiberler insan saçından çok daha incedir. Karbon fiber ile insan saçının karşılaştırılması Resim 2.2'de gösterilmiştir [21].



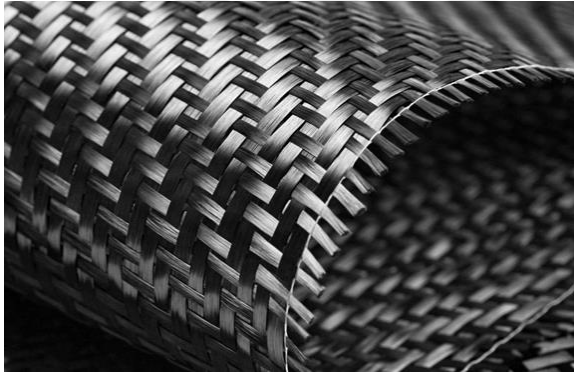
Resim 2.2. Karbon fiberle insan saçının karşılaştırılması [21]

Karbon fiberler, sahip olduğu mikroyapı sayesinde mükemmel mekanik özelliklere sahiptir. Karbon fiberler birlikte kullanıldıkları malzemeler ile reaksiyona girmezler bunun nedeni

kimyasal olarak inert olmalarıdır. Termal ve elektriksel iletkenlikleri yüksektir. Karbon fiberin mikroyapısındaki molekül bağlarından dolayı ısıya karşı boyutsal stabilitesi yüksektir. Karbon fiberlerin en büyük dezavantajı yüksek maliyetli olmasıdır [7].

Karbon fiberlerin termal genleşme katsayısı yaklaşık olarak sıfırdır. Bu nedenle kompozitlerde karbon fiber kullanılması malzemenin termal genleşmesini düşürür [2]. Boyutları, onlarca ve yüzlerce nanometre aralığındadır. Farklı boyutlarda olmaları elyafların mekanik özelliklerini etkiler. Karbon fiberler çeliğe kıyasla 4,5 kat daha hafif olup, moleküler yapısındaki karbon atomları sayesinde çelikten 3 kat daha yüksek dayanıklılığa sahiptir [4].

Birçok özel mühendislik problemini çözmek için karbon fiberler değişik fiziksel ve mekanik özelliklerde üretilebilir. Karbon fiberler, çekme elastiklik modülüne göre standart, orta, yüksek ve ultra yüksek modül olmak üzere dört farklı şekilde sınıflandırılabilir. Fiber çapları da ortalama 4 ile 10 μm aralığındadır. Bu fiberler sürekli ve kırılmış olarak iki çeşittir [12]. Resim 2.3'te karbon fiber kumaş görülmektedir.



Resim 2.3. Karbon fiber kumaş [28]

Karbon fiber genellikle PAN (Poliakrilonitril), zift ve selülöz (Rayon)'dan elde edilir. PAN tabanlı karbon fiberler, ziftten elde edilen fiberlere göre daha yaygın olarak kullanılır. Çünkü PAN esaslı karbon fiberler daha iyi mekanik özelliklere sahiptir. Rayonlar ise maliyetleri çok yüksek olduğu için tercih edilmezler. Elastik modülü düşük olan fiberlerde kullanılmaktadır [4,7].

2.3.2. Karbon fiber üretimi

PAN'dan karbon fiber üretimi, birbirini takip eden dört aşamada gerçekleşir. Bunlar; oksidasyon, karbonizasyon, grafitizasyon ve kaplamadır [17].

Oksidasyon: Karbon elyaf üretiminde ilk olarak PAN fiber bobini gerilmiş durumda, 200-300°C'de hava ortamında oksidasyona uğrattılır. Bu işlem sırasında, elyafların rengi sırası ile beyazdan kahverengiye sonra da siyaha döner [4,7].

Karbonizasyon: Oksidasyonun ardından 1000-1500°C de N₂ veya argon atmosferi altında karbonlaştırma işlemi uygulanır. Bu işlemde PAN fiberlerde bulunan karbon olmayan elementler (H ve N) uzaklaştırılır. Karbon olmayan elementlerin uzaklaştırılması ile sadece karbondan oluşan fiber üretilir. Karbonlaştırma işlemi fiberlerin çekme dayanımını büyük miktarda artırır [4, 7, 27].

Grafitizasyon: Karbonizasyon işleminden sonra karbon fiberlerin belli bir kristallik derecesine ulaşması için, sıcaklık artırılarak 2300-3000 °C gibi daha yüksek bir sıcaklıkta ısıtıl işlem olan grafitizasyon yapılabilmektedir. Bu aşamada gerilme uygulamaları ve çalışılan sıcaklık değeri karbon fiberlerin mekanik özelliklerini belirler. Son olarak elyaf-matris yapışkanlık derecesini artırmak için öncelikle yüzeyleri iyice temizlenir ve elektrolit banyoya yatırılır [4, 7, 17, 27].

Kaplama: Temizlenen elyafların sonraki işlemlerde aşınmasını önlemek ve korunması için epoksi reçinelerle kaplanır. Kompozit malzemede kullanılacak olan reçine ile elyaf arasında bir ara yüzey oluşturmak için yapılmaktadır [4,17].

2.4. Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

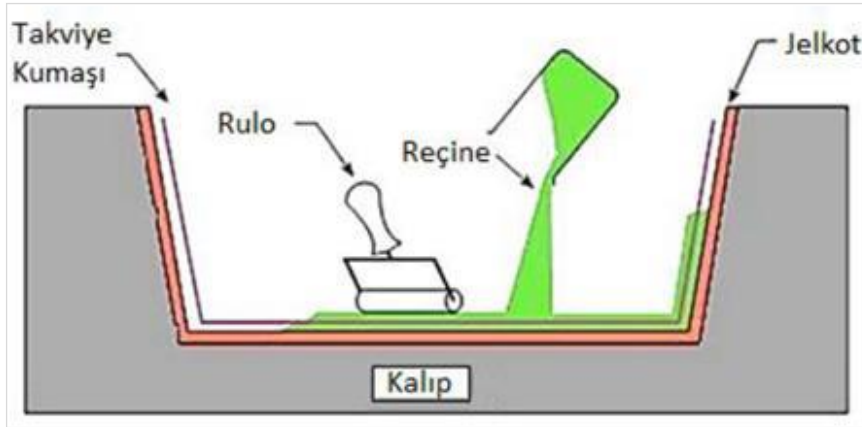
Kompozit yapılarda kullanılan üretim teknikleri, kompozit malzemelerdeki birden fazla ve farklı malzeme içerdiğinden dolayı metal işlemede kullanılan tekniklerden oldukça farklıdır. Kompozit parçaların imalatı için çeşitli kompozit hammadde türleri kullanır. Bunlar; elyaflar, reçineler, kumaşlar, prepregler ve kalıplama bileşenleridir. Her bir kompozit parça üretimi için farklı malzeme sistemleri ve farklı işleme koşulları gereklidir. Her bir üretim tekniğinin işleme, parça boyutu, parça şekli, parça maliyeti vb. açılarından avantajları ve dezavantajları vardır.

Polimerizasyon (sertleşme) polimer matrisli kompozit üretiminde belirleyici rolü vardır. Polimerizasyondan önce matris ve takviye malzemeleri birbirlerine bağlanmadan bulunurlar. Bu işlem sonrasında kimyasal birleşme olduğu için matris malzemesi sıvı formdan katı forma geçer. Kimyasal süreç, katalizör takviyesi veya sıcaklıkla etkilenir. Isı, basınç ve zaman polimerizasyonu etkileyen parametrelerdir. Polimer matrisli kompozit üretiminde fiberin iyi şekilde ıslatılması ve matris içerisine doğru şekilde dizilmiş olması önemlidir. Bunlar üretimi etkiler. Diğer unsurlar, maliyet, hedeflenen üretim süresi, parçanın boyut ve şekildir. Doğru üretim tekniğinin ve doğru proses parametrelerinin seçilmesiyle kompozit parça üretiminin başarısı belirlenir. Bu üretim teknikleri seçilirken üretim hızına, maliyetine, mukavemet ve parçanın şekil-boyut gereksinimlerine bakılır. Bu yöntemlerden başlıcaları aşağıdadır [29-31].

2.4.1. El yatırma yöntemi

El yatırma, en eski ve en basit fiber takviyeli polimerik kompozit malzeme üretim yöntemidir. Takviye malzemesi olarak elyaflar (karbon, cam, aramid) kullanılmaktadır. Matris malzemesi olarak da en çok epoksi ve polyester kullanılır. Bunlara ek olarak vinilester ve fenolik reçineler de tercih edilmektedir. El ile uygulandığı için düşük viskoziteli reçine seçilmelidir. El ile uygulanması sebebiyle en büyük dezavantajı, ürün kalitesinde ve sürekliliğinde olumsuz durumlar olabilir. Ürünün kalitesi üretim yapan kişiye göre farklılık gösterir. Kalınlık kontrolü yapmak zordur.

El yatırması yönteminde, kullanılacak kalıp temizlenir ardından kalıba kalıp ayırıcı uygulanır. Kalıp ayırıcı olarak kalıba vaks ya da jelkot uygulanabilir, bu kompozit parçaların kalıptan ayrılmasını kolaylaştırır, pürüzsüz ve parlak yüzeye sahip olmasını sağlar. Jelkot sertleştikten sonra elyaflar hazırlanmış olan kalıba serilir. Hazırlanan reçine, yerleştirilmiş fiberlere fırça veya rulo yardımıyla fiberleri ıslatacak şekilde sürüm yapılır. Reçinenin fiberlere iyi emdirilmesi ve homojen dağılımı sağlanmaktadır. Kaç kat serim yapılacaksa ona ulaşıncaya kadar her katmana bu şekilde uygulama devam ettirilir. Serim işleminden sonra kürleme işlemi genellikle oda sıcaklığı ve atmosferik basınç altında yapılmaktadır. Kullanılan reçinenin türüne göre kürleşme süresi farklılık gösterir. Kürleme bitene kadar beklenir ve sonrasında elde edilen ürün kalıptan çıkarılabilir [31-37]. Şekil 2.11’de el yatırma yöntemi ile üretim gösterilmiştir.

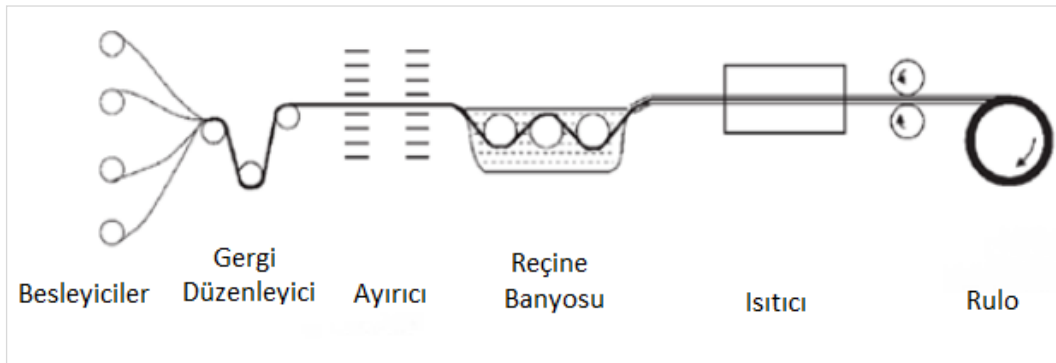


Şekil 2.11. El yatırma yöntemi [37]

Hafiflik sağlamak, termal ve mekanik özelliklerini artırmak, tutuşmayı önlemek için reçineye değişik katkı maddeleri eklenebilmektedir. El yatırma tekniği ile elyaf-reçine oranı %30'larda kompozit üretimi yapılabilir. Daha fazla elyaf hacim oranı elde etmek için prepregler kullanılabilir. [33].

Prepreg: Prepreg, az miktarda reçine emdirilmiş elyaflardan oluşan kısmen kurutulmuş ve kürlleme için hazır elyaflardır. Havacılık sanayisinde yaygın kullanılırlar. Prepregler, 3 ile 50 inç arasında genişliğe sahiptir. Prepreglerle farklı yönlerde serim yapılabilir. Parça üretimi yüksek basınç ve sıcaklık altında vakum torbalama ve kürlleme işlemi ile yapılabilir [33, 34].

Bir prepregin nasıl üretildiğinin şeması Şekil 2.12'de gösterilmektedir. Prepreg üretimi için besleyiciler, gergi düzenleyici, ayırıcı, reçine banyosu ve ısıtıcı gibi aşamalar yer alır [30].



Şekil 2.12. Prepreg üretim prosesi akış şeması [30]

Prepreg üretiminde kuru fiberler reçine banyosunun içerisindeki merdanelerden geçerken reçine ile ıslanırlar. Daha sonra, ıslanmış fiberler kür tepkimesini başlatmak için ısıtılır. Reçineye ısı ve basınç uygulanması ile kürlenme tamamen gerçekleşir. Bu aşamadan sonra geri döndürülemez ve çözünemez çünkü yapı sertleşmiş olur. Sonrasında prepregler saklama sürecinde birbirlerine yapışmasını önleyecek bir ayırıcı film uygulanarak makaraya sarılır. Kullanım ve raf ömürleri, reçine emdirilmiş kumaşlarda dikkat edilmesi gereken önemli bir noktadır. Raf ömrü süresince prepreg, soğuk depolarda veya oda sıcaklığında saklanır bu polimer matrisin termoset mi yoksa termoplastik mi olduğuna bağlıdır. Raf ömrü üretim tarihi ile son parçanın üretildiği zamana kadarki süredir. Kullanım ömrü ise, kumaşların soğuk depodan çıkartıldıktan sonra, oda sıcaklığında geçen kullanım süresine denir. Üretici firmanın belirlediği malzemenin kullanım ve raf ömrü bitmeden istenilen özellikteki parça üretimi tamamlanmalıdır [30, 34]

Prepreglerin üretimi kolaydır ancak üretimde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta prepregler ile üretilen kompozit yapının sahip olduğu ağırlık, maksimum kazanıma ulaşma özellikleri açısından %50 kumaş ve % 50 reçine olmalıdır. Karbon prepreg kompozitler termoset ve termoplastik olarak iki sınıfa ayrılmaktadırlar. Prepreg üretiminde genellikle termoset bir malzeme olan epoksi kullanılır. Prepregler yaklaşık olarak %35 oranında reçine içermektedirler. Maliyeti yüksek olması prepreglerin dezavantajıdır. Fiber, reçine ve kürlenme maliyetleri azaltılsa bile prepregler daha maliyetlidir [30,38]

Prepregler, yüksek mekanik özellikler, süper hafiflik, ısıl direnç ve tokluk gibi özelliklerinden dolayı havacılık sanayiinde tercih edilmektedir. Enerji, uzay, savunma denizcilik, inşaat ve ulaşım alanlarında kullanılmaktadır. Özellikle rüzgâr türbin kanat üretiminde hazır prepregler yaygın olarak kullanılmaktadır [38].

2.4.2. Reçine transfer kalıplama yöntemi

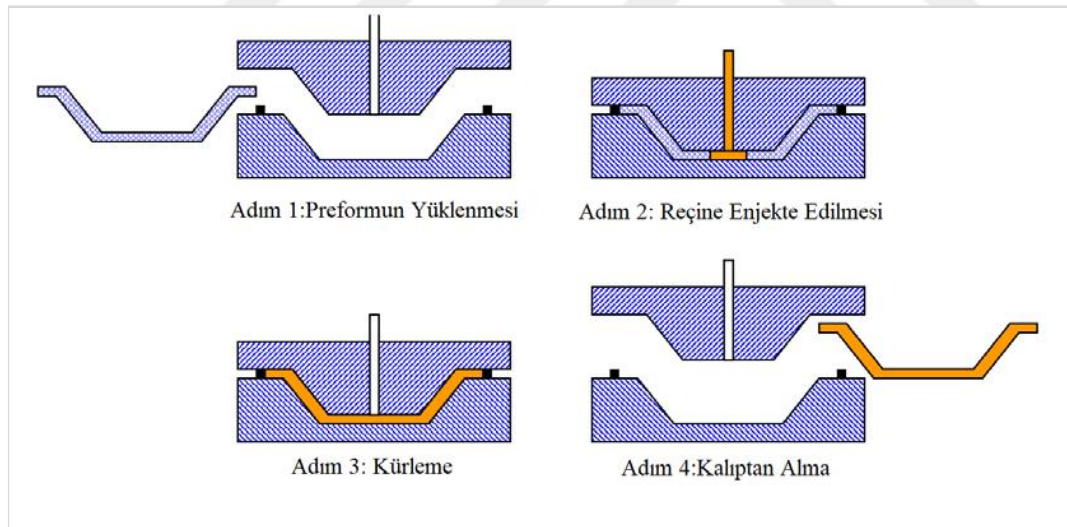
Reçine transfer kalıplama yöntemi ile kompozit üretimi el yatırma yöntemine göre daha seri ve daha uzun vadeli olduğu için daha fazla tercih edilmektedirler. Düşük maliyete sahip bir yöntemdir. Reçine transfer kalıplama yöntemi ile üretilen kompozitlerin yüzey özelliklerinin iki parçalı kalıp kullanıldığından dolayı iyi olması beklenir. Reçine transfer kalıplama jelkotlu veya jelkotsuz olarak yapılabilmektedir. Parçaların her iki yüzeyinin de düzgün olması isteniyorsa iki parçaya da jelkot kullanılmalıdır. Yüzeylerde pürüzlülük oluşmaz,

üretileen parçalar parlak görünürler. Üretim aşamasında öncelikle takviye malzemesi kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Ardından basınç altında boşluğa reçine enjekte edilir. Sıvı haldeki reçine boşluk tamamen doldurduktan sonra sertleşmeye başlar. Kür işlemi tamamlandıktan sonra kalıptan çıkarılan ürüne ileri kürleme işlemi yapılır [38-43].

RTM yönteminin avantajları;

- Kürleme süresinin kısa olması
- Fiber hacim kontrolünün kolay olması
- Kompleks parçaların imalatının kolay olması
- Soğutma sistemine gerek olmaması
- Üretilen ürünlerin yüksek kalitede olması

Son ürün için iyi boyutsal kontrol yapılabilmesi [39]. Reçine transfer kalıplama yöntemi ile üretim sistemi Şekil 2.13'te gösterilmiştir.

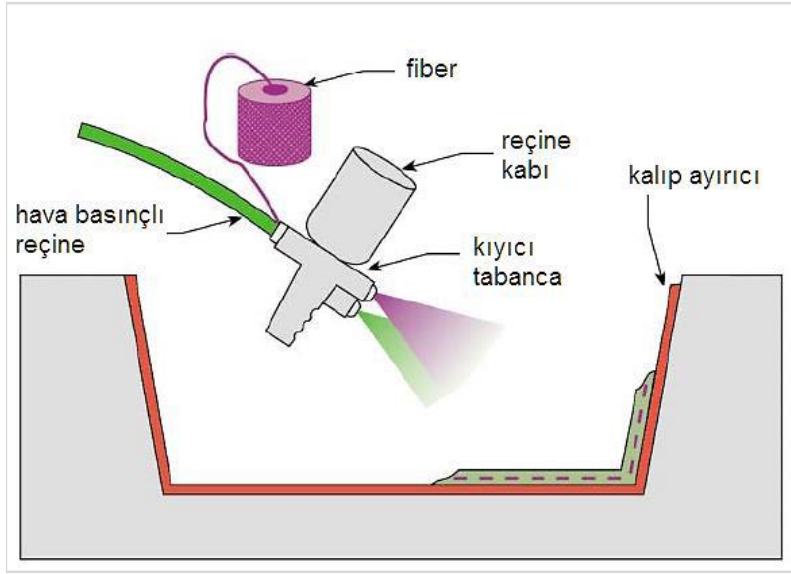


Şekil 2.13. Reçine transfer kalıplama sistemi [34]

2.4.3. Püskürtme yöntemi

Püskürtme yönteminin el yatırma yöntemi ile benzerlikleri vardır. Bu yöntemde özel bir tabanca ile kırılmış elyaflar kalıp yüzeyine, içine sertleştirici katılmış reçine ile püskürtülür. Fiberler tabanca üzerindeki kesici sayesinde kırılır. Tabanca, rastgele bir şekilde kırılmış elyaflı reçine karışımını yüzeye uygular. El yatırmada yöntemine benzer şekilde rulo ile

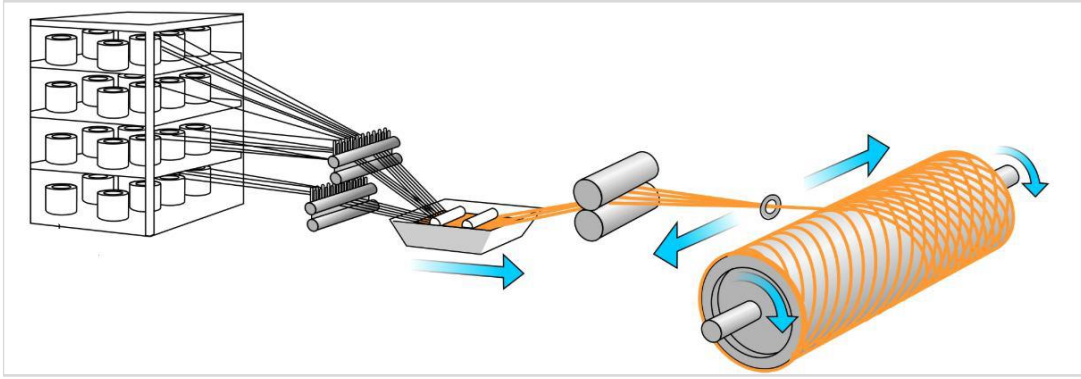
yüzeyi düzeltme ve reçine içinde kalan havayı çıkarma işlemi uygulanır. Takviye malzemesi olarak da elyaf ve matris malzemesi olarak genellikle polyester reçine kullanılmaktadır. Püskürtme yöntemi ile üretilen parçaların mekanik özellikleri düşüktür. Bunun sebebi kırılmış elyaf ile uygulanmasıdır. Püskürtme yöntemi, el yatırma yönteminden çok daha hızlı, ucuz ve karmaşık parça üretimi için de uygundur [40-42]. Püskürtme yöntemi Şekil 2.14'te gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Püskürtme yöntemi uygulaması [40]

2.4.4. Elyaf sarma yöntemi

Elyaf sarma yöntemi, sürekli elyafların birkaç katmanda dönen bir mandrel üzerine sarılmasıyla oluşur. Bu proses, ıslak veya kuru elyaf sarımı olarak iki şekilde gerçekleşir. Islak elyaf sarmada, sarmadan önce elyafa sıvı ve ısıyla sertleşen bir reçine uygulanır. Bu reçine emdirme, sarım işleminden önce yapılır. Kuru elyaf sarımında ise reçine sarım işlemi sırasında sarılan elyafla birlikte mandrel üzerine püskürtülür. Sarma işlemi esnasında takviye malzemesi olarak kullanılan ekyafa kuvvet uygulanmaktadır. Bu teknik ile boru, basınçlı kap ve roket gövdeleri gibi silindirik parçaların üretimi yapılabilmektedir. Ürün çapları 25 mm'den başlayarak 6 m'ye kadar üretilir. Silindirik parçaların üretimi için genellikle termoset reçine olan epoksi ve poliester tercih edilmektedir. Fenolikler, poliimidler ve silikon reçinelerin yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanım alanı sınırlıdır [37-42]. Şekil 2.15'te elyaf sarma yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Elyaf sarma yöntemi uygulaması [41]

2.4.5. Vakum torbalama

Vakum torbalama yöntemi; büyük ve karmaşık şekilli parçaların üretilbildiği, el yatırmanın gelişmiş bir uygulamasıdır. Bu yöntemde, el yatırma işleminin devamında vakum torbalama yapılmaktadır [40]. Vakum torbalama yöntemi Resim 2.4'te gösterilmiştir.

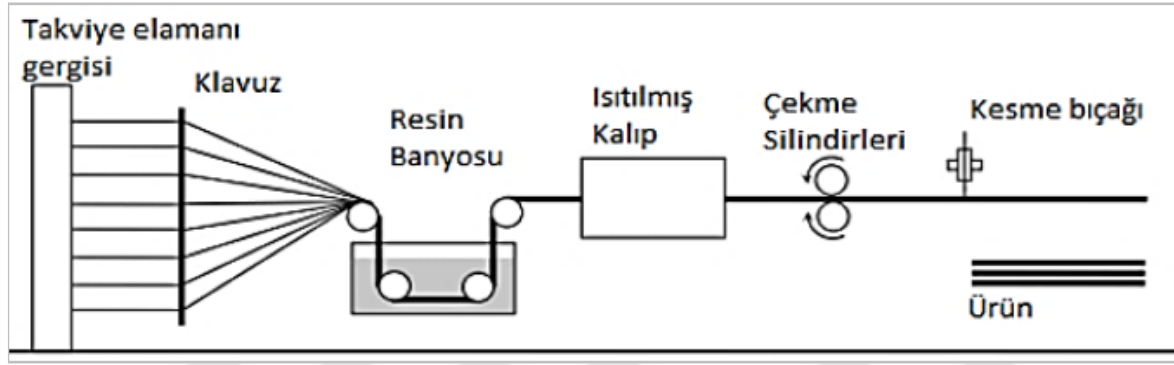


Resim 2.4. Vakum torbalama yöntemi uygulaması [16]

1 atmosferlik basınç uygulayarak vakumlama yapılır [42]. Vakum hava boşluklarının ortadan kaldırılmasına ve reçinenin elyafların arasına nüfuz etmesi kolaylaşarak fazla reçinenin de dışarı atılması sağlar. Vakumlama süresince malzeme de kürlenerek sertleştirilmiş olmaktadır. Vakum torbalama, laminatların yapısal bütünlüğünü sağlamak ve kalitesini artırmak için kompozit üretiminde yaygın olarak kullanılır [37,40, 43]

2.4.6. Profil çekme (Pultrüzyon)

Profil çekmenin kompozit malzeme üretim yöntemleri arasında önemli bir yeri vardır. Bu yöntemle farklı malzeme türleri ve profil geometrisi olarak geniş bir aralıkta kompozit üretimi yapılabilmektedir [41]. Düşük maliyetli üretim yöntemidir ve seri üretime uygundur [38]. Reçine banyosundan ıslanarak çıkan fiberlerin çekilmesi ve kürlleme işlemi ile sert profiller elde edilebilir. Bu yöntem ile boru profiller, çubuklar gibi ürünler üretilebilir [39]. 2 ila 30 mm arasında değişen kalınlıklarında birçok farklı içi dolu ve boş parçalar üretebilir [31]. Profil çekme yöntemi Şekil 2.16’da gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Profil çekme yöntemi uygulaması [37]

Bu yöntemde 120-150°C'deki bir kalıp içerisinde reçine banyosundan geçirilmiş takviye elemanları çekilir. Kalıp yüksek sıcaklıkta olduğu için malzeme geçişi esnasında reçinenin kürlenmesini sağlar. Profil çekme yöntemi ile çok yüksek mukavemetli kompozit malzemeler üretilmektedir [41- 43]. Bu yöntemle üretilen kompozitler fazladan bir işlem gerektirmezler [39].

2.4.7. Otoklav yöntemi

Bu yöntem basınçlı kap içerisinde gerçekleştirilen iç basıncın, sıcaklığın ve nüfuz etmenin kontrol edilebildiği bir üretim yöntemidir. Vakum torbalamadan farklı olarak fırın yerine bir otoklav kullanılmaktadır. Otoklav yönteminde kontrol sağlanması daha kolay olduğu için özel amaçlara yönelik yüksek kalitede kompozit malzemeler üretilebilmektedir [40,43].

Bu yöntemde sırasıyla; üretimi yapılacak parçanın genellikle prepreg kullanılarak tabakalama işlemi ve vakum torbalaması yapılmaktadır. Daha sonra kontrol edilebilir basınç

ve sıcaklık altında, kürlenme işlemleri için otoklavın içine yerleştirilir. Yüksek pişme sıcaklıklarında, tutuşma ve yanmayı önlemek amacıyla azot gazı daha çok tercih edilmektedir [40].

Bu yöntem ile üretilen kompozit parçaların kürlenmesi belirli bir reçeteye göre yapılır. Kürlenme sonunda, istiflenmiş katmanlar reçine ile birleşir ve rijit bir parçaya dönüşür. Bu sistemde, basınç ve sıcaklığı kontrol edebilmek için kontrol sistemi ve tüm sistemin düzgün çalışabilmesini sağlamak amacıyla elektrik sistemi, gaz üretme sistemi ve vakum sistemi bulunmaktadır [30].

Maliyeti yüksek olduğu için yüksek kalitede ürün istendiğinde kullanılan yöntemdir. Otoklav büyük boyuttaki kompozit parçaların ya da çok sayıda fazla küçük parçanın aynı anda kürleme işlemini gerçekleştirebilir [30, 31]. Otoklavın arka tarafında ısıtıcı, soğutucu ve bunların arkasında fan bulunmaktadır. Otoklavın arkasındaki fan tarafından gaz, üflenir ve elektrikli ısıtıcıların üzerinden geçer. Isınan gaz otoklavın ön kapısına çarpar ve ardından parçaları ısıtmak için otoklavın merkezine geri döner. Otoklav içerisindeki parçaların soğutulması da yine benzer yöntemle hava akışının soğutucu sistem üzerinden geçmesiyle uygulanır. Kompozit parça üretiminde kullanılan otoklav içerisindeki hava akışı ve ısı dağılımı homojen olmalıdır. Otoklavın çalışma sistemi Şekil 2.17’de gösterilmiştir [30].

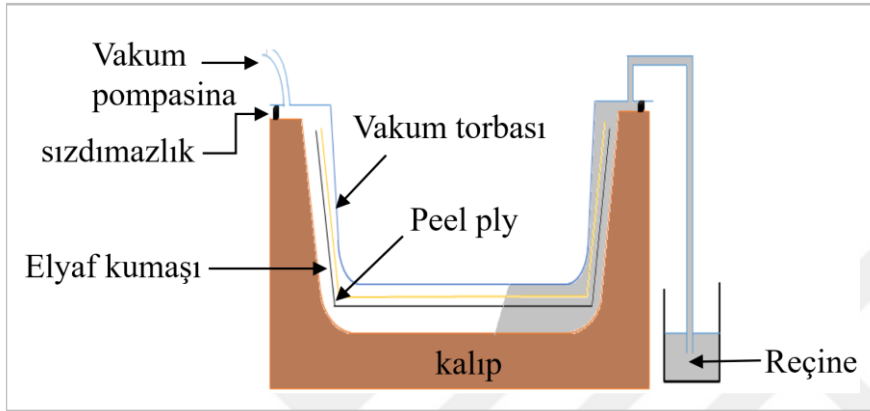


Şekil 2.17. Otoklav şematik gösterimi [30]

2.4.8. Vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemi (VRTM)

VRTM yöntemi, düşük maliyetle yüksek kalitede karmaşık kompozit parçalar üretmek için geliştirilmiş bir yöntemdir. Özellikle son yirmi yılda bu yöntem fiber takviyeli polimer

kompozit laminatların üretimi için yaygın olarak kullanılan bir işlem olmuştur. VRTM deniz, enerji, havacılık başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Kuru fiber preformu, bir reçine dağıtım ortamına ardından vakum torbasına yerleştirilir. Torbadaki vakum basıncının etkisiyle reçine liflerin arasından akar. Son olarak ürün kurlenmek üzere fırına konur. İşlem akışı kapalı kalıp prosesinde gerçekleşmektedir. Vakumla reçine transfer kalıplama uygulaması Şekil 2.18’de gösterilmiştir [44-46].



Şekil 2.18. Vakumla reçine transfer kalıplama uygulaması [44]

VRTM sürecinin başlıca avantajlar;

- Esnek kalıp tasarımına sahiptir
- Karmaşık ve büyük parçalar yüksek kalitede üretilebilir.
- Farklı geometrilerde parça üretmek için VRTM kalıbı kolaylıkla modifiye edilebilir.
- Vakum torbası plastik ve şeffaf olduğundan dolayı reçine infüzyon işlemi sırasında kuru bir nokta görünür olduğu için anında müdahale edilebilir [46].

3. LİTERATÜR TARAMASI

3.1. Kompozit Malzemelerde Reçine İçine Eklenen Katkı Malzemeleri ile İlgili Yapılan Çalışmalar

He ve diğerleri (2011), epoksi reçine içine nano- CaCO_3 katkılayarak epoksi dökümleri ve karbon fiber takviyeli polimer kompozitler üretilmiş, nano- CaCO_3 katkısının kompozitlerin termal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Düşük miktarda (%2-6 ağırlıkça) nano- CaCO_3 katkılanmış epoksi dökümlerinin termal kararlılığı ve mekanik özelliklerinin arttığı görülmüştür. Bunun nedeni, arayüzey bağının iyileşmesi olarak gösterilmiştir. Benzer şekilde, reçine içine nano- CaCO_3 katkısı karbon fiber takviyeli kompozitlerin de mekanik özelliklerini artırılmıştır [47].

Kim ve diğerleri (2017), zirkonyum oksit emdirilmiş halloysit nanotüpler (Zr/HNT'ler) epoksi reçinelere eklenerek kompozitler üretilmiştir. %2.5, %5, %7.5 ve %10 ağırlık oranında Zr/HNT ve işlenmemiş HNT epoksi içine eklenerek 80 °C'da 30 dakika boyunca eklenen katkı miktarıyla karıştırılmıştır. Ardından iki aşamada 170 °C'de 1 saat ve 190 °C'de 2 saat olacak şekilde kürlenmiştir. Epoksi kompozitlerin ısı genleşme katsayısı, katkı maddesi (HNT, Zr/HNT) içeriği arttıkça azalmıştır. HNT'lere zirkonyum oksit eklenmesiyle, epoksi kompozitlerin eğilme mukavemetleri ve eğilme modülleri gelişmiştir [48].

Zhang ve diğerleri (2020), epoksi reçine içine grafen katkı malzemesi eklenerek, termal iletkenliğe sahip elektronik cihazlar için epoksi kapsülleme malzemesi geliştirilmesi amaçlanmıştır. Grafen katkısı epoksi reçinenin hidrofobik özelliğini artırmıştır. Böylece malzemelerin yüzeyindeki su veya aşındırıcı çözelti adsorpsiyonunu sınırlayabilir. Bu da ekipmanın güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlayabilir. Grafen katkısı termal iletkenliği de artırmıştır. Grafenin %0,1 ağırlık oranıyla katlanması epoksi reçinenin termal iletkenliğini 1,6 kat artırdığını göstermiştir [49].

Li ve diğerleri (2001), nano boyutta ZnO katkılı politetrafloroetilen (PTFE) kompozit blokların sürtünme ve aşınma özellikleri incelemiştir. Deneysel sonuçlar, PTFE'ye nano boyutta ZnO katkılanması ile aşınma ve sürtünme tahribatının büyük ölçüde azaltılabileceği görülmüştür. Nano- ZnO katkılı politetrafloroetilenlerin sürtünme özelliği katkısızdan daha yüksek görülmüştür. En yüksek sürtünme özelliği hacimce %15 katkılı kompozitte gözlemlenmiştir. PTFE'ye ZnO katkısı kompozitlerin mikro yapısını değiştirmiş ve

sürtünme işlemi sırasında tahrip olmasını engellemiştir. Böylece nano boyuttaki çinko oksitin aşınma önleyici özellik gösterdiği gözlemlenmiştir [50].

Aydın (2021), borik asit parçacıkları eklenmiş polyester matrisli, cam ve karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik özellikleri deneysel yöntemlerle araştırılmıştır. Polyester reçine içine ağırlıkça %1, %5 ve %10 oranlarında borik asit eklenmiş ve el yatırma yöntemi ile kompozit levhalar üretilmiştir. Aşınma testi sonucunda, borik asitin yağlayıcı özelliği sayesinde kompozitlerin sürtünme katsayısı değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. Borik asit katkısı kompozit malzemelerin çekme dayanım değerleri iyileştirilmiştir. Parçacık oranının artmasıyla aşınma direncinin katkısız numunelere oranla bazı numunelerde %5-%50 arasında arttığı ve çekme mukavemet dayanımının da %32'lere kadar iyileştiği gözlemlenmiştir [51].

Medina ve diğerleri. (2015), epoksi reçine içine nano ZrO_2 katkılanarak üretilen kompozitlerin yapısal, mekanik ve termal özellikleri incelenmiştir. Nano ZrO_2 katkısı şeffaf olan reçineleri opak hale getirmiştir. ZrO_2 katkı oranı arttıkça aglomerasyonun attığı görülmüştür. ZrO_2 katkılanmış epoksi matrisin çekme modülü katkısız kompozitten yüksek elde edilmiştir. Katkı oranı arttıkça çekme modülü de artmıştır. ZrO_2 katkısı ile partiküller polimer matrisle etkileşime girmiş ve net hareketliliği azaltması nedeniyle epoksi matrisin camsı geçiş sıcaklığını da artırdığı görülmüştür. Eklenen parçacıklar yayılan çatlakların engellenmesini sağladığı için ZrO_2 katkısı numunelerin kırılma tokluğunu artırmıştır. SEM ile kırılma yüzeyleri incelenmiş ve eklenen nanopartiküllerin çatlak sabitleme, çatlak sapması ve boşluk oluşumuna neden olduğu gözlemlenmiştir [52].

Bezerra Dias ve diğerleri (2019), Ag/ZnO nanopartikülleri ile katkılanmış reçine ile üretilen kompozit malzemenin antibakteriyel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Ağırlıkça %1 ve %2'ye karşılık gelen nanopartiküller cam kap içindeki reçineye eklenerek metal spatula ile manuel olarak 1 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ag/ZnO nanopartiküllerin katkılanması kompozit reçinenin basınç dayanımını hafifçe artırmıştır. Bu nanopartiküllerin katkılanması kompozit reçine yüzeyindeki bakteri çoğalmasını da önemli ölçüde engellemiştir [53].

Elsafi ve diğerleri (2022), ZrO_2 ve B_2O_3 katkılanmış epoksi reçine ile üretilen kompozitlerin foton yayılımı incelenmiştir. Ağırlıkça %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında ZrO_2 ve her eklenen ZrO_2 oranı için %15 B_2O_3 reçine içine eklenmiş ve karıştırılmıştır. Sonuç olarak,

tüm parametreler ZrO_2 katkılanmış epoksi kompozitlerin radyasyon koruma özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir [54].

Gull ve diğerleri (2015), farklı oranlarda çinko oksit (ZnO) polyester reçine içine katkılanarak üretilen cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik ve termal davranışları incelenmiştir. ZnO katkılanmış polyester reçine ile cam elyaf takviyeli polimer kompozitler el yatırma tekniği ve ardından basınçlı kalıplama ile üretilmiştir. Ağırlıkça %3 ZnO katkılanmış cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin eğilme dayanımı, katkısız kompozite kıyasla önemli ölçüde (%62,12'ye kadar) artmıştır. Sertlik, darbe dayanımı ve termal kararlılığın da ZnO katkı oranı ile kademeli olarak arttığı gözlemlenmiştir [55].

Pinto ve diğerleri (2015), epoksi reçine içine TiO_2 nanopartikülleri katkılanarak polimer nanokompozitler üretilmiş ve mekanik özellikleri incelenmiştir. TiO_2 nanopartiküllerinin katkılanması ile düşük dolgu içeriklerinde bile çekme dayanımı, kırılma tokluğu, kırılma enerjisi, eğilme dayanımı, kopma uzaması, yorulma ve aşınma direnci gibi önemli mekanik özelliklerini iyileştirebileceği görülmüştür. Mekanik özelliklerin çoğu çok düşük katkı oranlarında bile (ağırlıkça %1) iyileşme göstermiştir. Mekanik özelliklerin optimum elde edildiği katkı oranı ağırlıkça %3-5'dir [56].

Florek ve diğerleri (2021), karbon fiber ve epoksi reçine arasındaki yapışmayı iyileştirmek için polimer matrise grafen oksit nanopartikülleri eklenmiştir. Reçine içine ağırlıkça %0.5, %1.0 ve %1.5 grafen oksit nanopartikülleri eklenerek homojen oluncaya kadar 10 dakika boyunca karıştırılarak sertleşmeye bırakılmıştır. Diğer adımda karbon fiber takviyeli kompozitler için %1 oranında grafen oksit nanopartikülleri karıştırılarak reçine hazırlanmış ve karbon fiberlere uygulanmıştır. 72 saat basınç altında kürlenmiştir. Üç nokta eğilme testinde optimum ekleme oranının ağırlıkça %0,3 olduğu gözlemlenmiştir. Daha fazla grafen oksit eklenmesi, kompozitin mekanik özelliklerinde azalmaya neden olmuştur. Grafen oksit içermeyen numunelerde çatlak yayılmasının, arayüz sınırları boyunca gerçekleştiğini görülmüştür. Grafen oksit katkılı numunelerde reçinenin elyafa iyi bir şekilde yapıştığı ve uygulanan yüklerin takviyeye aktarılmasına katkıda bulunduğu gözlemlenmiştir [57].

Tsantzalis ve diğerleri (2006), epoksi matris, karbon nanofiberler ve piezoelektrik parçacıklarla katkılanarak karbon fiber takviyeli polimer kompozitler üretilmiş ve kırılma tokluğu incelenmiştir. %1 karbon nanofiber katkılanması kırılma enerjisinde %100'lük bir

artış sağlarken, piezoelektrik parçacıklarının katkılanması kırılma tokluğunda azalmaya neden olmuştur [58].

Ceylan (2022), ağırlıkça %0, %0.5, %1, %2 ve %4 oranlarında TiO₂ ve talk reçine içine katkılanmıştır. Bu karışım, karbon fiberlere uygulanarak kompozitler üretilmiş ve mekanik özellikleri incelenmiştir. En iyi çekme dayanımı %0.5 talk ve %1 titanyum dioksit eklenmiş numunelerde elde edilmiştir. Ancak Talk katkısında, %0.5 katkı oranının artırılması ile %1, %2 ve %4 katkı oranlarında çekme mukavemetinin azaldığı görülmüştür. TiO₂ katkısında, katkı oranının artması ile çekme mukavemetinde bir değişiklik görülmemiştir. Bu nedenle, katkısız, talk ve TiO₂ katkılı kompozitler karşılaştırıldığında katkı oranlarının mukavemet değerlerini farklı oranlarda değiştirdiği gözlemlenmiştir [59].

Fan ve diğerleri (2019), epoksi reçine içine ağırlıkça %0,3 %0,5 ve %0,8 oranlarında grafen oksit katkılanarak numuneler üretilmiştir. Grafen içeriğinin reçinenin viskozitesi ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Grafen oksit içeriğinin artmasıyla, kompozitin viskozitesi azalmıştır. %0,3 ve %0,5 grafen katkısında reçine viskoziteleri yakın çıkmıştır ancak oran %8'e çıktığında viskozitenin belirgin şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Grafen katkılı tüm kompozitlerin çekme dayanımının katkısız kompozitten yüksek olduğu görülmüştür. Maksimum çekme dayanımı %0.3 katkılı kompozitte elde edilmiş ve yaklaşık olarak %16 arttığı gözlemlenmiştir. Ancak %0.3'ten sonraki katkı oranının artması ile çekme dayanımında düşme gözlemlenmiştir [60].

Yu Wang ve diğerleri (2020), farklı boyut ve oranlarda nano-Cu ve nano-Ag metal nanopartikülleri epoksi reçinesine katkılanarak düz akım voltajı altında yalıtkanlarda yüzey yük birikiminin bastırılması amaçlanmıştır. 10 nm parçacık boyutunda 60 ppm, 120 ppm, 200 ppm ve 300 ppm oranlarında nano-Cu ve yaklaşık 10 nm ve 50 nm parçacık boyutunda ve 120 ppm Ag reçine içine eklenmiştir. Eklenen partikül boyutu ne kadar büyükse, performans o kadar düşmüştür. Aglomerasyon olmadığı durumlarda performans daha yükselmiştir. Parçacık boyutunun küçük olması istenilen özellikleri artırmıştır. Cu nanopartiküllerdeki etkinin gümüşten biraz daha iyi olduğu gözlemlenmiştir [61].

Şen (2022), epoksi matris içine grafen nanopartikül katkılanarak üretilen aramid fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Ağırlıkça %0.25, %0.5, %1 ve %2 oranlarında grafen nanopartikül epoksi matris içerisine ilave edildikten sonra el yatırma ve

vakum infüzyon yöntemiyle kompozit plakalar üretilmiştir. En yüksek çekme gerilim değeri katkısız numunede elde edilmiştir. %0.25 grafen katkısı yapı içinde aglomerasyona neden olduğu için çekme dayanımını düşürmüştür. Grafen miktarının artması katkısız kompozite göre eğme dayanımını artırmıştır [62].

Eletsii ve diğerleri (2015), farklı boyutlarda karbon nanotüpler polimer matrise katkılanmış ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. Karbon nanotüplerin büyük en boy oranı nedeniyle, az miktarda katkı oranları bile (%0,01-%0,1 seviyesinde) malzemenin iletkenliğini artırmaktadır. Malzemeyi yalıtkanen iletken hale getirir [63].

Wu ve diğerleri (2020), reçine içine farklı oranlarda (%0, %1, %2, %4, %8) nano-MgO katkılanarak üretilen kompozitlerin basınç dayanımı ve aşınma direnci sonuçları incelenmiştir. Nano-MgO katkılanmış kompozitlerin aşınma direncinin arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, nano-MgO içeriği arttıkça basınç dayanımı değerlerinde düşme gözlemlenmiştir [64].



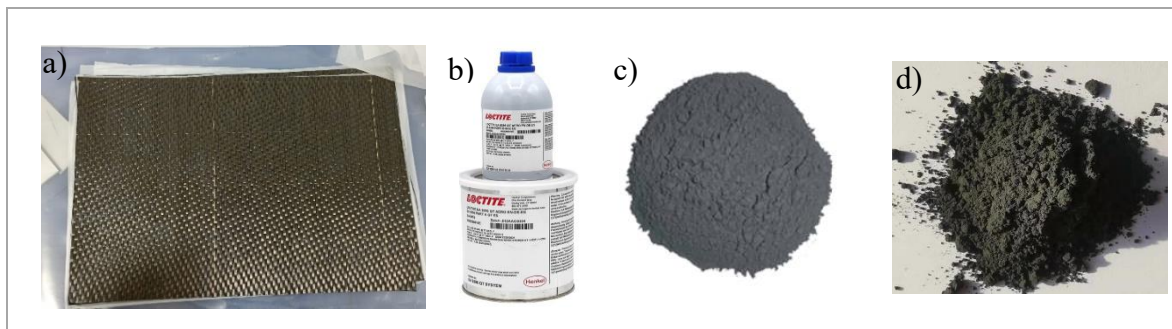
4. MALZEME VE METOT

4.1. Malzemeler

Bu çalışmada, takviye malzemesi olarak 5H 370 g/m² saten dokuma karbon fiber kumaş kullanılmıştır. Karbon fiberler kumaşlar 300x300mm boyutlarındadır. Polimer matris malzemesi olarak LOCTITE EA 9396 AERO (Hysol EA 9396) epoksi reçine kullanılmıştır. Epoksi, reçine ve sertleştirici olarak 2 bileşenden oluşur. Hysol EA 9396 düşük vizkozitelidir. Oda sıcaklığında saklama ve kurlenme özelliklerine sahiptir. Düşük ve yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanım gösterir. Partikül olarak titanyum grubu olarak geçen 4B grubu metallerinden Zr ve Hf tozları kullanılmıştır. Zr ve Hf metallerinin iyonik çap değerleri, fiziksel ve kimyasal özellikleri çok benzerdir. Kullanılan metal tozlarının özellikleri Çizelge 4.1’de ve kullanılan malzemeler Resim 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Metal tozlarının özellikleri

Metal Tozları	Safılık (%)	Parçacık Boyutu	Biçim	CAS Numaraları	Yoğunlukları (g/cm ³)	Erime Noktası (°C)
Zr	99.9	325 Mesh	Toz	7440-67-7	6.52	1852
Hf	99.9	325 Mesh	Toz	7440-58-6	13.3	2222



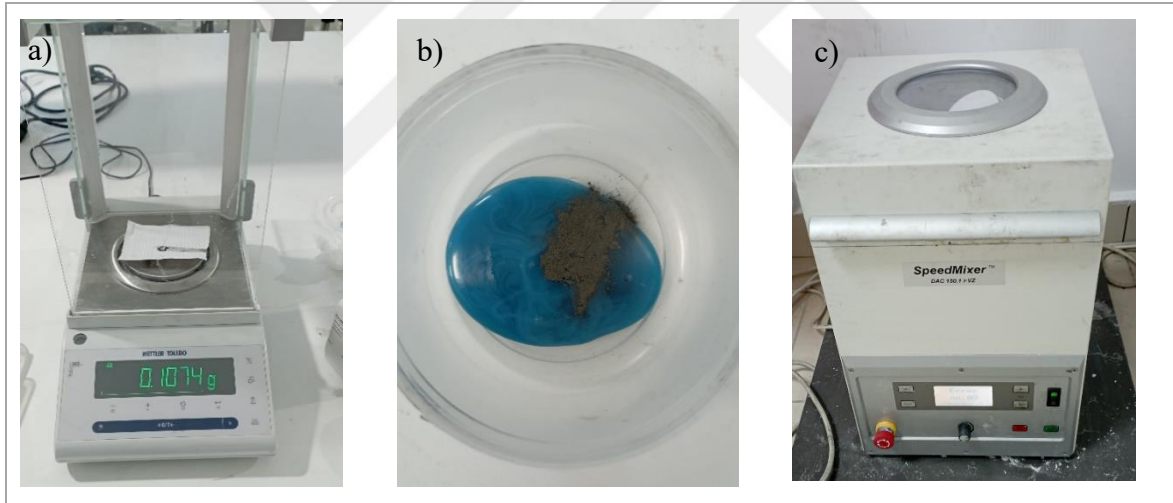
Resim 4.1. a) Karbon fiber b) Epoksi reçine c) Zr tozu d) Hf tozu

4.2. Üretim Yöntemleri

Bu çalışmada iki çeşit üretim yapılmıştır. Birincisi, Zr ve Hf katkılı reçine numuneleridir. İkincisi, Zr ve Hf katkılı karbon fiber takviyeli kompozitlerdir. LOCTITE EA 9396 AERO epoksi reçine üreticisi karışım oranlarını 100 A (epoksi), 30 B (sertleştirici) olacak şekilde

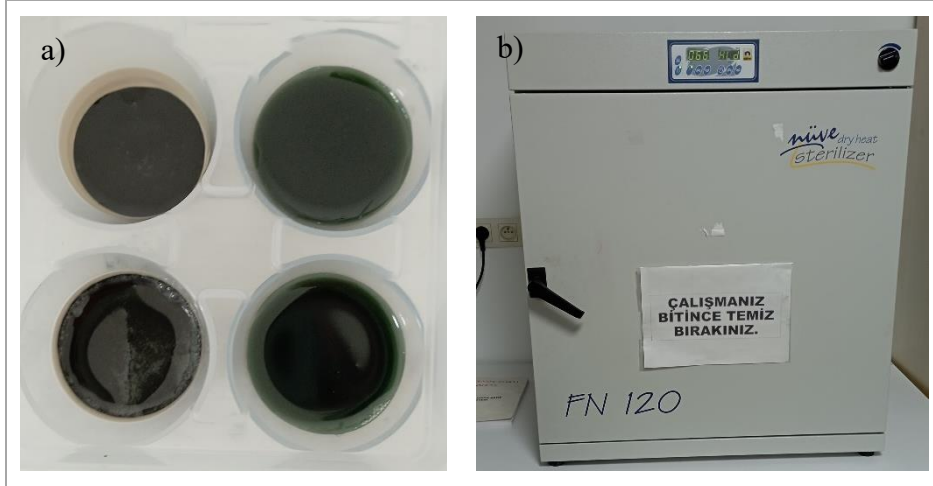
ve kürleme sıcaklıklarını da 23°C’de 1 saat ya da 66°C’de 3-5 gün olarak belirlemiştir [65]. Firmanın belirlediği sıcaklıkların 20°C altı ve 20°C üstü alınarak kürleme sıcaklıkları 23°C, 46°C, 66°C ve 86°C olarak belirlenmiş ve kürleme sıcaklık farklarının etkileri incelenmiştir.

İlk üretimde; %0.5, %1, %1.5, %2 ağırlık oranlarında Zr ve Hf katkılı ve katkısız numuneler üretilmiştir. Numuneler 5'er gram olacak şekilde ayarlanmıştır. %0.5, %1, %1.5 ve %2 oranlarında Zr ve Hf tozları, her toz oranı için ayrı ayrı hesaplanmış olan epoksi reçine ve sertleştirici miktarının ölçümleri WSA-224T analitik terazi kullanılarak yapılmıştır. Ardından Speed Mixer DAC 150.1 FVZ cihazında karışımlar yapılmıştır. Epoksi reçine içine Zr ve Hf tozları ayrı ayrı katkılanarak Speed Mixer’da 5 dakika boyunca 2500 rpm’de karıştırılmıştır. Sonra sertleştirici eklenerek aynı karıştırma işlemi 5 dakika daha uygulanmıştır. Toplamında 10 dakika boyunca 2500 rpm’de karışım işlemi uygulanmıştır. İlk üretim için yapılan işlemler sırasıyla Resim 4.2’ de gösterilmiştir.



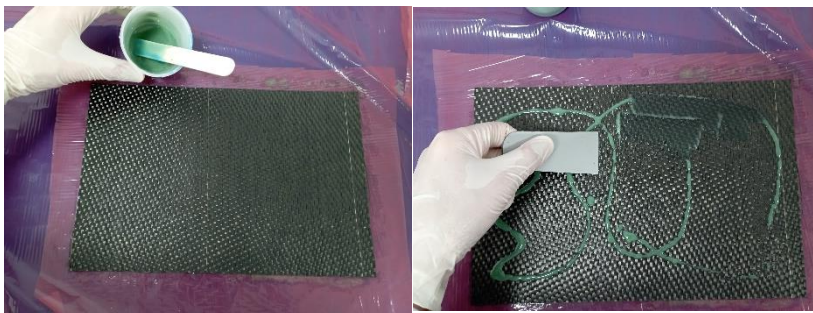
Resim 4.2. a) Analitik terazide yapılan ölçüm b) Reçine içine metal tozu katkılanması c) Speed Mixer’da karışım

Karıştırılan numuneler kalıplara alınmış ve 23°C’de kürlenecek numuneler laboratuvar ortamında 3-5 gün; 46°C, 66°C ve 86°C’de kürlenecek numuneler de sıcaklığı önceden ayarlanmış olan etüvde 1 saat boyunca kürlenmiştir. Kürleme işlemi için Nüve FN 120 Kuru Hava Sterilizatörü / etüv kullanılmıştır. %0.5 Zr ve Hf katkılı reçineler 23°C, 46°C, 66°C ve 86°C’de; %1, %1.5 ve %2 katkılı numuneler yalnızca 23°C’de kürlenmiştir. Resim 4.3’de kalıplara alınmış reçineler ve kürleme işlemi için etüv görülmektedir.



Resim 4.3. a) Kalıplara alınan reçineler b) Nüve FN 120 etüv

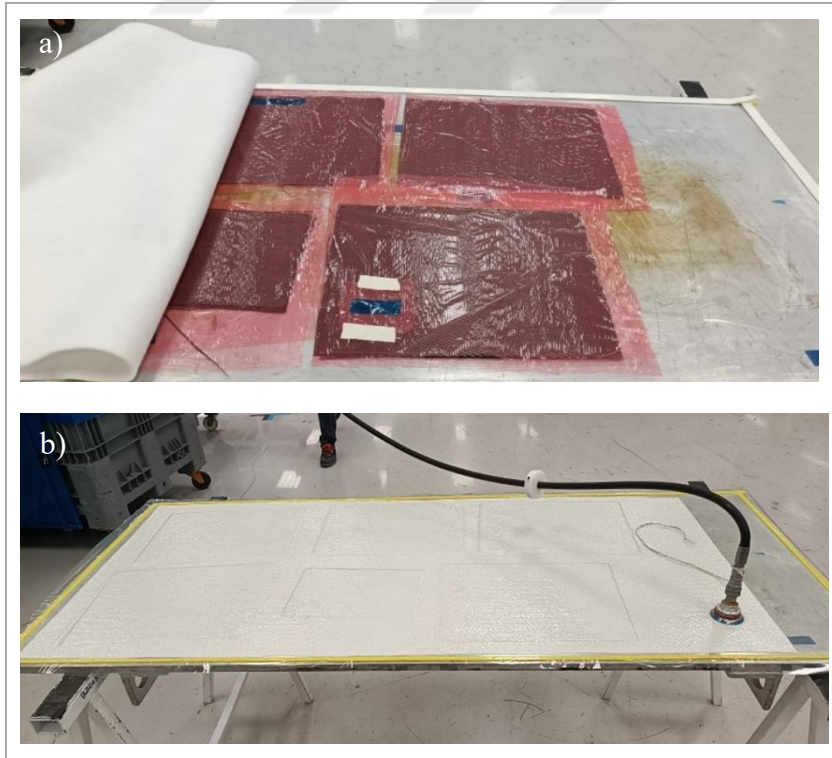
İkinci üretimde; %0.5, %1, %1.5 ve %2 oranlarında Zr ve Hf epoksi reçine içine katkılanarak ilk üretimde olduğu gibi Speed Mixer'daki karışımları yapılmış ve ardından el yatırma yöntemi ile 300x300mm boyutlarında kesilmiş olan karbon fiber kumaşlara uygulanmıştır. Serimler 5'er kat olacak şekilde yapılmıştır. İlk olarak karbon fiber zemine serilmiş ve reçine ile tamamen ıslatılarak reçinenin karbon fiberlere nüfuz etmesi sağlanmıştır. Ardından ikinci kata geçilerek aynı işleme devam edilmiştir. 5 kat olacak şekilde serimler yapılmıştır. Tüm katların eşit miktarda reçine ile ıslanabilmesi ve kat aralarında eşit miktarda Zr ve Hf tozu bulunması için her kat serimde karışım yeniden hazırlanmıştır. Resim 4.4' te el yatırma yöntemi ile üretim gösterilmiştir.



Resim 4.4. El yatırma yöntemi ile kompozit üretimi

Serimleri yapılan numuneler, 23°C'de 1 atmosferlik basınç altında vakum torbalama işlemi ile 3-5 gün boyunca kürlenmiştir. Vakum torbalama işleminde, sırasıyla reçine geçirgenliğini sağlayan ayrıcı bir kat ardından reçine emici kat ve son olarak en üste hava geçirmeyen vakum torbası kullanılmıştır. Öncelikle kompozitler düz plaka halinde üretildiği için düz bir zemine sahip olan vakum masasına alınmıştır. Serimleri yapılmış olan kompozit

malzemelerin alt ve üstüne reçine geçirgenliğini sağlayan naylon ayırıcı kat ile eşit olarak kaplanmıştır. Ayırıcı kat, vakum işlemi ile fazla gelen reçinenin kompozit malzeme arasından sızarak reçine emici kata geçmesini sağlamaktadır. Reçine emici kat kalın bir tabaka halinde naylon ayırıcı katın üzerine serilmiştir. Bu katın amacı naylondan geçen fazla reçineyi emmektedir. Ardından masa etrafına çift taraflı hava geçirmeyen sızdırmazlık bandı yapıştırılır. İşlemin uygulanacağı vakum masası boyutunda hazırlanmış olan hava geçirmeyen vakum torbası sızdırmazlık bandı üzerine bant boyunca bir kenardan başlanarak yapıştırılır. Vakum torbası yapıştırıldıktan sonra vakum ayağının alt kısmına denk gelen yerde vakum torbası üzerinde küçük bir kesik açılır. Bu kesiğe vakum ayağının yerleştirilir. Son olarak vakum ayağına vakum pompası takılır ve vakum sistemi çalıştırılır. Vakum işlemi malzemenin kurlenme süresi boyunca devam eder. Kurlenme ile sertleşmiş olan kompozit malzemeler vakum torbası ve ara katmanlar kaldırılarak çıkarılır. Vakum torbalama, oluşan hava boşluklarını ortadan kaldırıp reçinenin karbon fiberlerin arasına nüfuz etmesini kolaylaştırarak bütün katmanlar arasında daha iyi yayılmasını ve fazla reçinenin de dışarı atılmasını sağlamıştır. Böylelikle kompozit malzemedeki daha homojen bir reçine dağılımı elde edilmiştir. Resim 4.5’ te vakum torbalama işlemi sırasıyla gösterilmiştir.



Resim 4.5. a) Ayırıcı ile kaplanmış numunelerin üzerine serilen reçine emici kat b) Vakum torbalama işlemi

4.3. Karakterizasyon Teknikleri

4.3.1. Partikül katkılı reçine için karakterizasyon teknikleri

Yoğunluk ölçümü ve hacimsel hesaplamalar

Arşimet prensibi ile yoğunluğunun(d) belirlenmesi analitik terazi kullanılarak yapılmıştır. Resim 4.6' da ölçümlerin yapıldığı WSA-224T analitik terazi görülmektedir. İlk olarak numuneler kuru olarak tartılmıştır. Daha sonra numuneler beher içerisindeki sıvıya metal bir askı ile daldırılarak ± 0.01 g hassasiyetteki terazi kullanılarak ölçümler yapılmıştır. Yoğunluk ölçümleri saf su kullanılarak yapılmıştır.



Resim 4.6. WSA-224T analitik terazi

Numunelerinin teorik ve kütleme sonrası son hacim hesaplamaları yapılmıştır. Öncelikle üretilen numunelerin teorik olarak hacmi hesaplanmıştır. Sonra arşimet prensibi ile yoğunlukları ölçülmüş ve son hacim hesabı yapılmıştır. Bu iki hacim arasındaki fark alınarak hacimsel kayıp ya da artış belirlenmiştir.

Teorik hacim $V_t = \frac{\pi}{3} \cdot h \cdot (r_1^2 + r_1 \cdot r_2 + r_2^2)$ formülü ile hesaplanmıştır.

Son hacim $V_s = m/d$ formülü ile hesaplanmıştır.

Shore D sertlik ölçümleri

Numunelerinin sertliği, Shore sertlik ölçme yöntemi ile ölçülmüştür. Shore sertlik testinde, penetrasyon derinliği, malzemeye nüfuz eden yay yüklü sertleştirilmiş çelik bir girinti ile ölçülür. Malzeme yüzeyinde oluşan girinti derinliği, 0 ile 100 Shore arasında bir ölçekte ölçülen Shore sertliğinin bir ölçüsüdür. Farklı Shore ölçekleri vardır. Bu çalışmada; sert elastomerler, plastikler, katı termoplastik ve termosetler için kullanılan Shore D ölçeği ile ölçülmüştür. Shore D sertlik ölçüm testi Resim 4.7’de verilen TYPE D DUROMETER cihazı ile ASTM D2240 standartlarına göre yapılmıştır.



Resim 4.7. Shore D sertlik ölçüm cihazı

4.3.2. Karbon fiber takviyeli kompozit için karakterizasyon teknikleri

Çekme testi

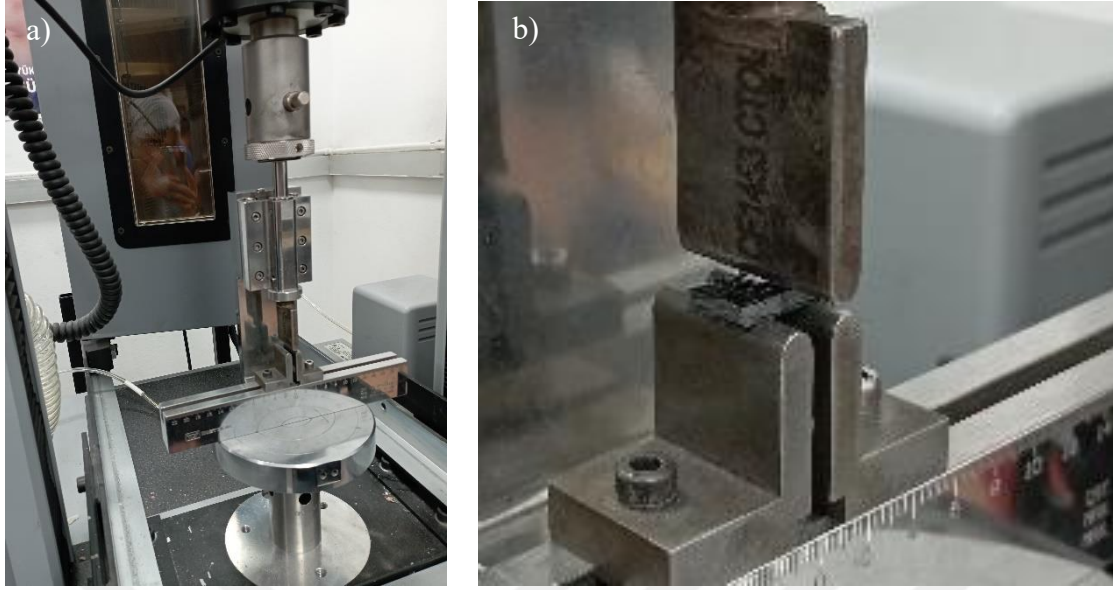
Çekme testi; uzama, çekme modülü, çekme mukavemeti, akma noktası ve kırılma noktası gibi temel mekanik özellikleri verir. Çekme testi INSTRON 34TM-cihazı kullanılarak, ASTM D 638–10 standartlarına göre yapılmıştır. Çekme testi ile gerilim- gerinim grafikleri ve çekme gerilim değerleri elde edilmiştir. Resim 4.8’de INSTRON 34TM-cihazı, çekme testi öncesi ve çekme testi sonrası kompozit malzeme gösterilmiştir.



Resim 4.8. INSTRON 34TM-30 çekme testi cihazı

Eğme testi

Fiber takviyeli kompozitlerin tabakalar arası kayma mukavemeti (ILSS), kompozitin tabaka seviyeleri arasındaki kayma mukavemetini tanımlar ve kısa eğme testinde belirlenir. Eğme testi, malzemenin yüzeyine paralel olacak şekilde kırılıncaya kadar bir kuvvet uygulayarak çalışır. Bu test, malzemenin bu tür bir kuvvete direnme yeteneğinin ölçüsü olan kayma mukavemetinin belirlenmesini sağlar. Eğme testi INSTRON 5985 cihazı ile EN 2563 standartlarına göre yapılmıştır. Resim 4.9’da INSTRON 5985 cihazı ve kompozit malzemeye uygulanan eğme testi görüntüleri verilmiştir.



Resim 4.9. a) INSTRON 5985 eğme testi cihazı, b) kompozit malzemeye uygulanan eğme testi

DSC testi

DSC testi, malzemelerin termal davranışını incelemek ve karakterize etmek için kullanılmıştır. DSC ile kompozit malzemelerin polimerleşme sıcaklığı ve polimerleşme entalpisine ulaşılmıştır. Testler Resim 4.10’da verilen DSC Q20 V24.11 Build 124 ile EN 6064 standartlarına göre yapılmıştır.



Resim 4.10. DSC Q20 V24.11 Build 124 cihazı

SEM-EDS analizi

SEM (taramalı elektron mikroskobu) malzemenin mikroyapı analizinde kullanılmıştır. SEM, kompozit malzeme içinde oluşan boşluk ve toz dağılımlarını yüksek çözünürlükle görüntüleme sağlamıştır. SEM'in bağlı olduğu EDS (Enerji Dağılım Spektroskopisi) ile numunede bulunan elementlerin dağılımı ve konsantrasyonları belirlenerek, mikroyapı analizi ile malzemenin bileşenlerinin daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesini sağlamıştır. Analizler Zeiss EVO taramalı elektron mikroskobu ile yapılmıştır.





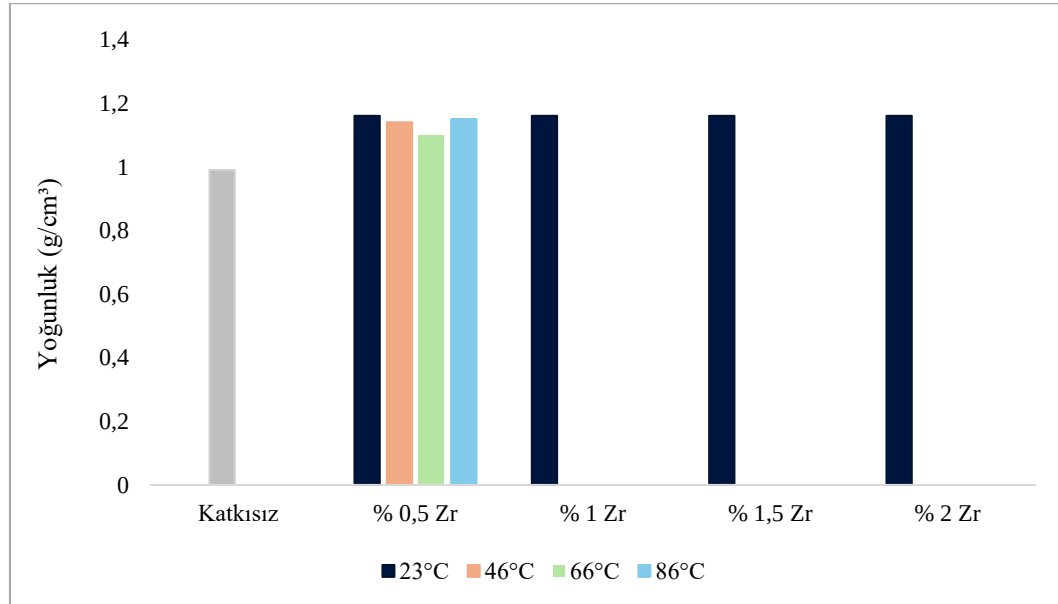
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Partikül Katkılı Reçinelerin Karakterizasyonu

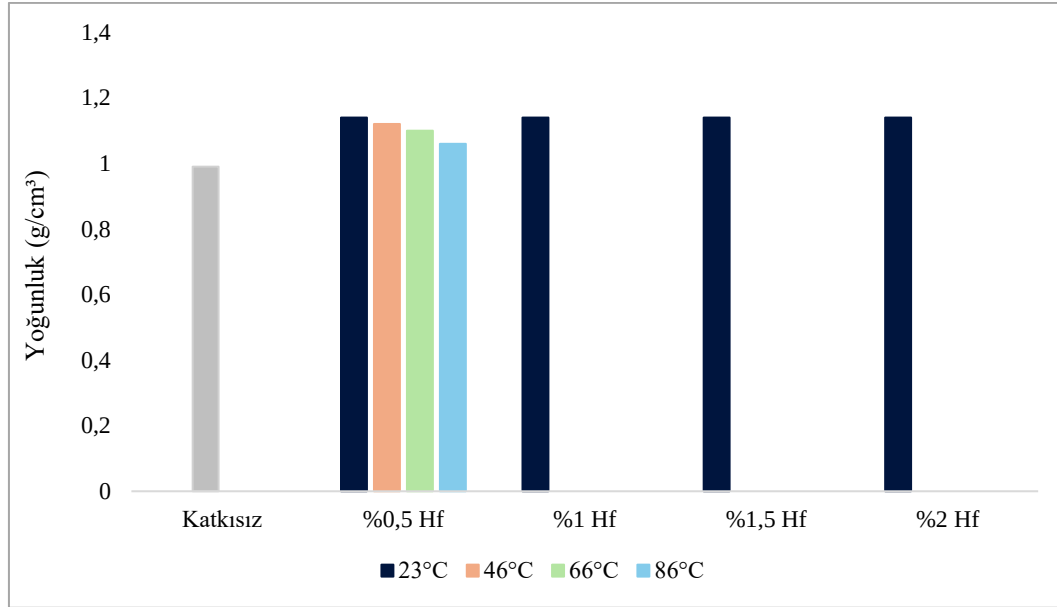
5.1.1. Yoğunluk ölçümleri ve hacimsel hesaplamalar

Yoğunluk sonuçlarına bakıldığında Zr ve Hf katkısı tüm numunelerin yoğunluğunu artırdığı görülmüştür. Katkısız numunenin yoğunluğu 0.99 g/cm^3 elde edilirken, 23°C 'de %0.5, %1, %1.5 ve %2 Zr katkı oranlarının tamamında 1.16 g/cm^3 elde edilmiştir. %0.5 Zr katkısında sıcaklığın 23°C 'den 86°C 'ye çıkması ile yoğunluklar sırasıyla 1.16, 1.14, 1.1 ve 1.15 g/cm^3 elde edilmiştir.

23°C 'de %0.5, %1, %1.5 ve %2 Hf katkı oranlarının tamamında 1.14 g/cm^3 elde edilmiştir. %0.5 Zr katkısında sıcaklığın 23°C 'den 86°C 'ye çıkması ile yoğunluklar sırasıyla 1.14, 1.12, 1.1 ve 1.06 g/cm^3 elde edilmiştir. Katkılanan zirkonyum ve hafniyumun yoğunlukları reçinenin yoğunluğundan yüksek olduğu için partikül katkılanmış reçinelerin yoğunluklarının arttığı görülmüştür. Şekil 5.1'de katkısız ve Zr katkılı numunelerin, Şekil 5.2'de katkısız ve Hf katkılı numunelerin yoğunluk değerleri verilmiştir.

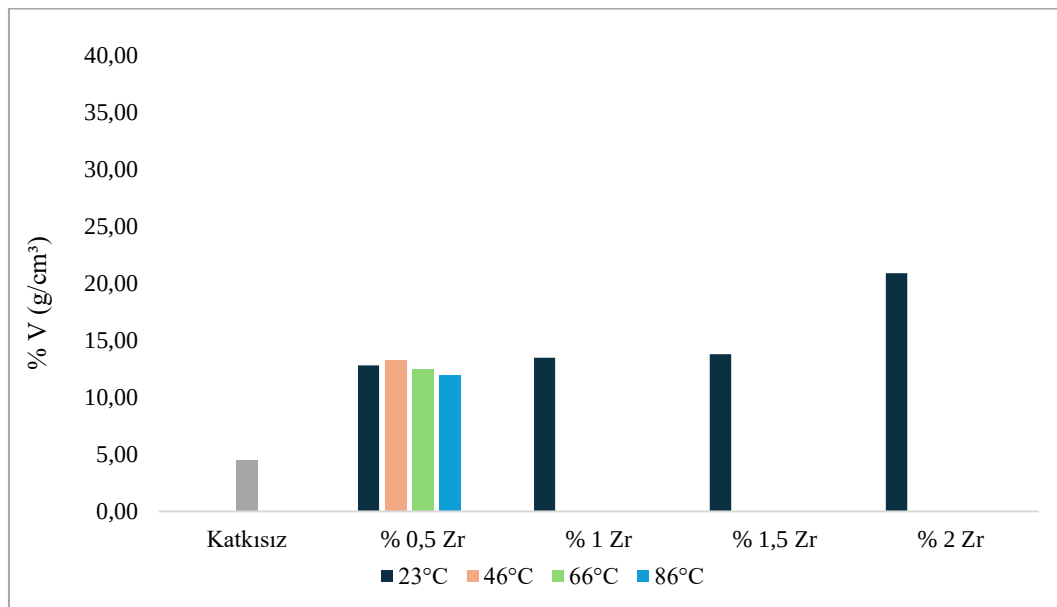


Şekil 5.1. Katkısız ve Zr katkılı numunelerin yoğunluk değerleri



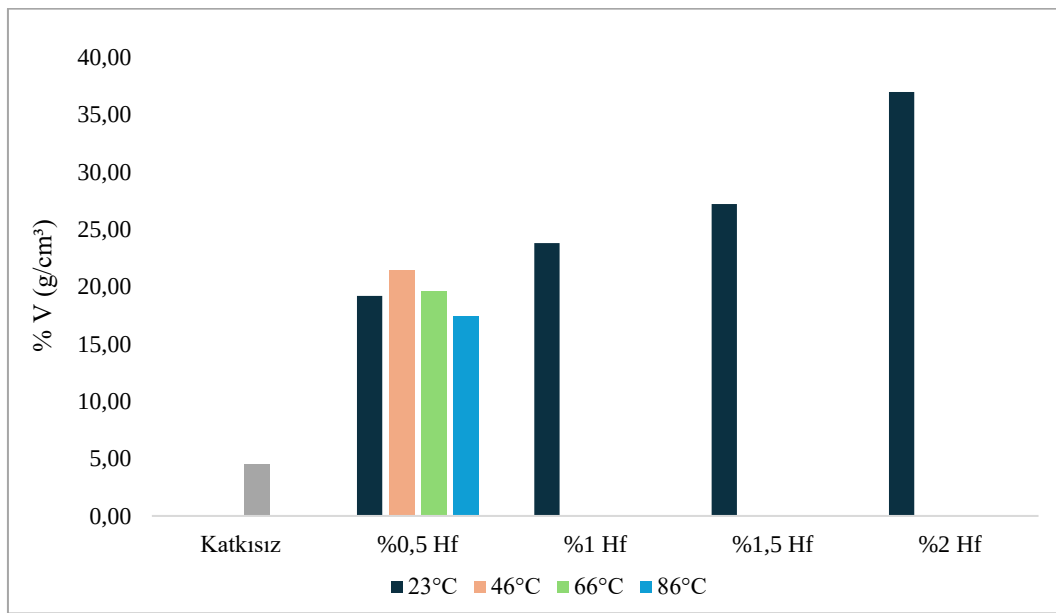
Şekil 5.2. Katkısız ve Hf katkılı numunelerin yoğunluk değerleri

Reçine içine Zr katkısı tüm numunelerde hacimsel artışa neden olduğu görülmüştür. %0.5'ten %2'ye kadar katkısız numuneye kıyasla sırasıyla %7.5, %9, %9.5 ve %16.4 oranında hacimsel artış görülmüştür. En yüksek hacimsel artış değerine %2 Zr katkılı numunede ulaşılmıştır. %0.5 Zr katkılı numuneler karşılaştırıldığında sıcaklığın 23°C'den 86°C'ye çıkması ile hacimsel artış değerlerinde %0.8 oranında bir düşme görülmüştür. Bunun nedeni, yüksek sıcaklıkta oluşan buharlaşma olarak yorumlanmıştır. Şekil 5.2'de zirkonyumun hacimsel hesaplama değerleri verilmiştir.



Şekil 5.3. Katkısız ve Zr katkılı numunelerin hacimsel hesaplama değerleri

Reçine içine Hf katkısı, katkısız numuneye göre tüm numunelerde hacimsel olarak artışa neden olmuştur. Hf katkı oranı arttıkça numuneler hacimsel olarak da artmıştır. %0.5'ten %2'ye kadar katkısız numuneye kıyasla sırasıyla %14.7, %19.3, %22.7 ve %32.5 hacimsel artış görülmüştür. En yüksek hacimsel artış değerine %2 Hf katkılı numunede ulaşılmıştır. %0.5 Hf katkılı numuneler karşılaştırıldığında kütleme sıcaklığının 23°C'den 86°C'ye çıkması ile %1.8 oranında bir azalma görülmüştür. Bunun sebebi yüksek sıcaklıkta oluşan buharlaşma olarak yorumlanmıştır. Şekil 5.3'de hafniyumun hacimsel hesaplama değerleri verilmiştir.



Şekil 5.4. Katkısız ve Hf katkılı numunelerin hacimsel hesaplama değerleri

Zirkonyum ve hafniyumun hacimsel hesaplama değerleri karşılaştırıldığında her ikisinde de en yüksek hacimsel artış değerine %2 partikül katkılanmış numunelerde ulaşılmıştır.

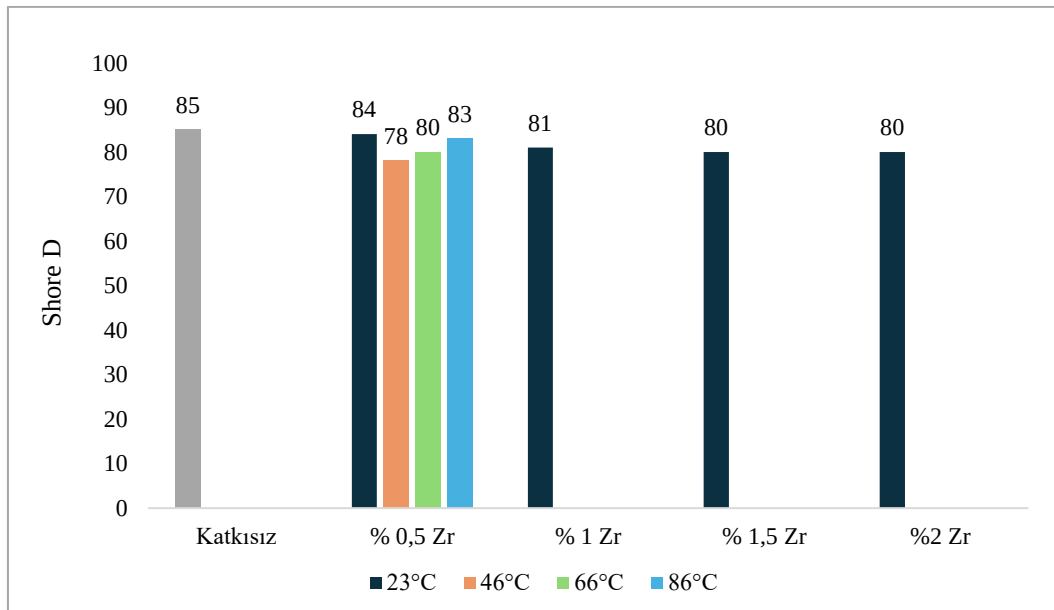
5.1.2. Shore D sertlik ölçümleri

Katkısız ve farklı oranlarda Zr ve Hf katkılı tüm numunelerdeki Shore D sertlik değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Değerler 75-85 Shore D arasında değişmektedir. En yüksek sertlik değerine 85 Shore D ile katkısız numunede ulaşılmıştır. 23°C'de %0.5, %1, %1.5 ve %2 Zr katkılı kompozitlerin Shore D sertlik değerleri 84, 81, 80 ve 80 Shore D olarak elde edilmiştir. %0.5 Zr katkılı kompozitlerde 46°C, 66°C ve 86°C'lerde Shore D sertlik değerleri sırasıyla 78, 80 ve 83 Shore D olarak elde edilmiştir. Bu sebeple Zr katkısının numunelerin sertlik değerlerinde düşmeye neden olduğu görülmüştür.

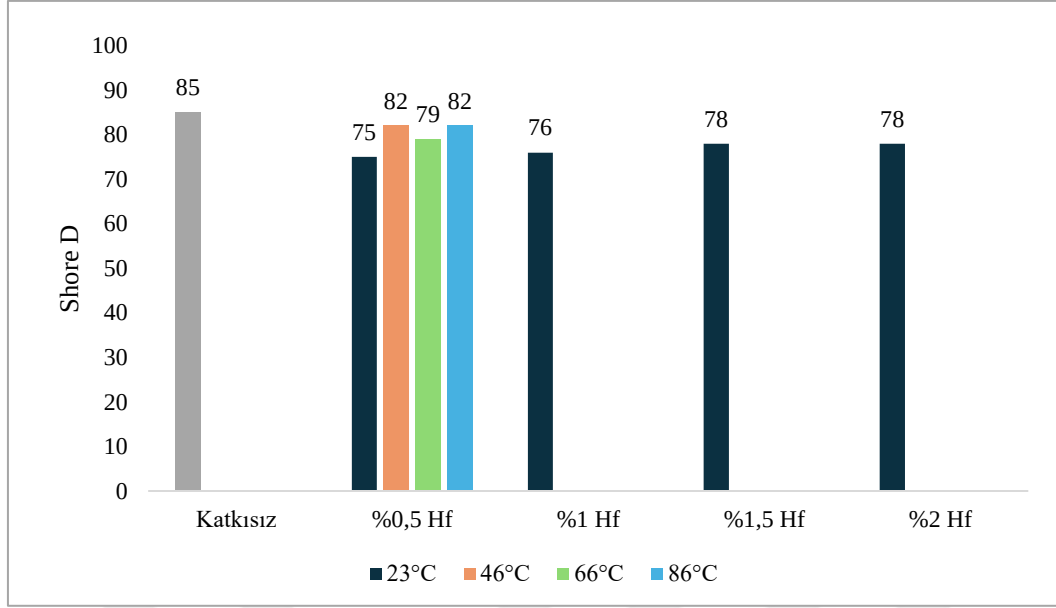
23°C’de %0.5, %1, %1.5 ve %2 Hf katkılı kompozitlerin Shore D sertlik değeri sırasıyla 75, 76, 78 ve 78 Shore D olarak elde edilmiştir. %0.5 Hf katkılı kompozitlerde 46°C, 66°C ve 86°C’lerde Shore D sertlik değeri sırasıyla 82, 79 ve 82 Shore D olarak elde edilmiştir. Bu sebeple Hf katkısının da zirkonyumda olduğu gibi numunelerin sertlik değerlerinde düşmeye neden olduğu görülmüştür.

Reçine içine katılan zirkonyum ve hafniyumun polimer yapı içinde oluşan bağ yoğunluğunun düşmesine neden olduğu şeklinde yorumlanmıştır. Polimer bir yapıya partikül eklendiğinde yapı içinde oluşan bağ yoğunluğu azalmaktadır. Polimerlerdeki bağ yoğunluğunun azalması sertliğin düşmesine neden olmaktadır. Bu çalışmada da sertlik değerlerindeki azalmanın nedeni bağ yoğunluğunun düşmesi olarak yorumlanmıştır.

Merad ve ark. yaptığı çalışmalarda, Zr ve Hf gibi 4B grubu olan titanyumun oksit formu reçine içine eklenmiştir. Nano boyuttaki TiO_2 parçacıklarının %0,5’ten %1’e kadar numunelerin sertliğini düşürdüğü, %5’ten sonra numunelerin sertlik değerini artırdığı gözlemlenmiştir [66]. Akıncı ve ark. yaptığı benzer bir çalışmada nano boyutta ZrO_2+HfO_2 katkılı numunelerin Shore D sertlik değeri katkısız numuneye göre artış göstermiştir [67]. Literatürdeki çalışmalarda sertlik değeri artarken, bu çalışmada düşmesinin nedeni, bu çalışmada kullanılan toz boyutunun mikron boyutunda olması olarak yorumlanmıştır. Şekil 5.4’te zirkonyumun ve Şekil 5.5’te hafniyumun Shore D sertlik değeri verilmiştir.



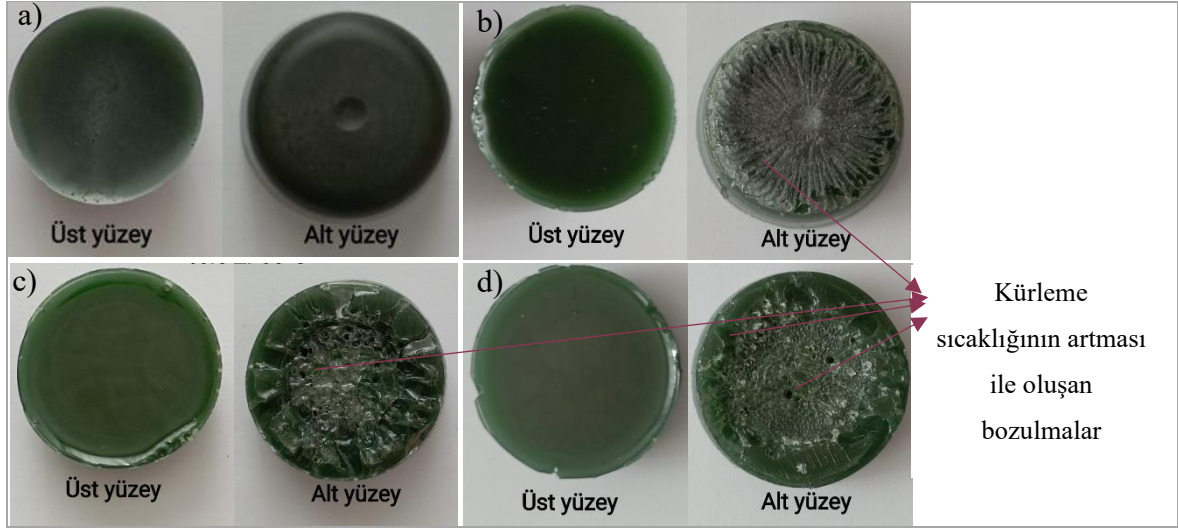
Şekil 5.5. Katkısız ve Zr katkılı numunelerin Shore D sertlik değeri



Şekil 5.6. Katkısız ve Hf katkılı numunelerin Shore D sertlik değerleri

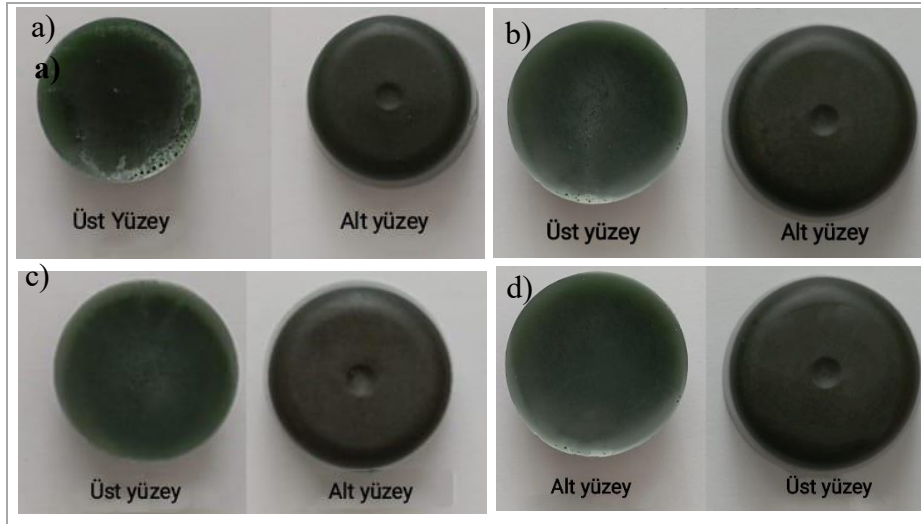
5.1.3. Farklı oranlarda partikül katkısı ve farklı kürleme sıcaklıklarının etkisi

Zr ve Hf katkılı numunelerde kürleme sıcaklığındaki artış numune yüzeylerinde bozulmalara neden olmuştur. Üretici firma reçine kürleme sıcaklıklarını 23°C veya 66°C olarak belirlemiştir [65]. 66°C’de kürlenen katkısız numune yüzeyinde hiçbir bozulma gözlenmemiştir. Ancak Zr katkılı numunelerin kürleme işlemi 23°C’den yüksek sıcaklıklarda yapıldığında numune yüzeylerinde bozulmalar görülmüştür. Bunun sebebi, sıcaklığın artmasıyla zirkonyumun epoksi reçineye zarar verdiği şeklinde yorumlanmıştır. %0.5 Zr katkılı numunelerde kürleme sıcaklığının artması ile oluşan bozulmalar Resim 5.1’de verilmiştir.



Resim 5.1. %0.5 Zr katkılı a) 23°C, b) 46°C, c) 66°C ve d) 86°C'de kürlenmiş numuneler

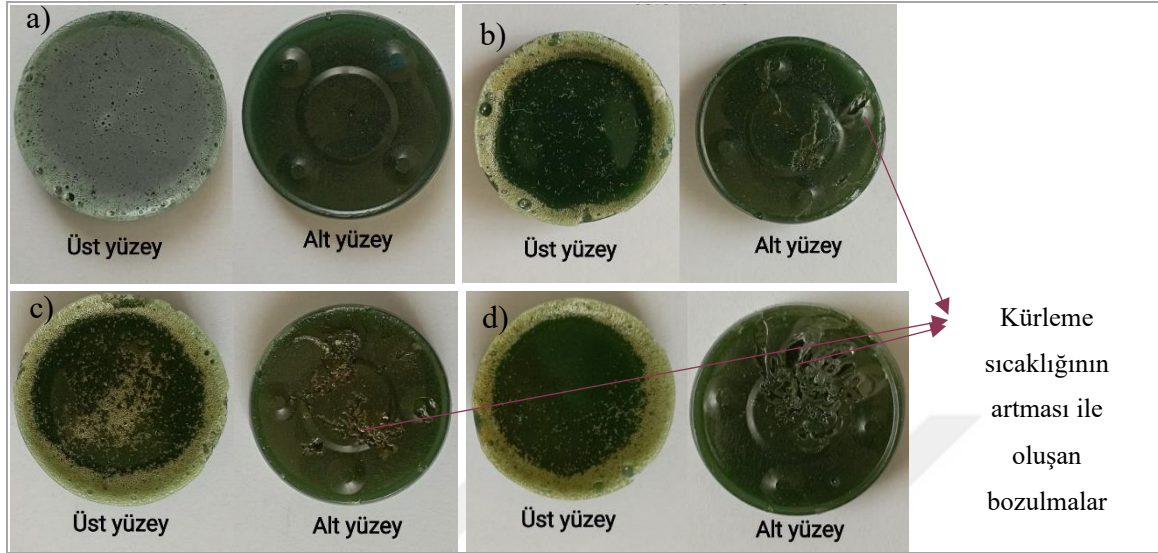
%0.5 oranında Zr katkılı numunelerde kürleme sıcaklığındaki artış numune yüzeylerinde bozulmaya neden olduğu için %1, %1.5 ve %2 Zr katkılı numuneler sadece 23°C'de kürlenmiş yüksek sıcaklıklara çıkılmamıştır. 23°C'de kürlenmiş numunelerde Zr oranındaki artışın, reçine yüzeylerine hiçbir zarar vermediği görülmüştür. Resim 5.2'de farklı oranlarda Zr katkılı numunelerin görüntüleri verilmiştir



Resim 5.2. 23°C'de kürlenmiş a) %0.5, b) %1, c) %1.5, d) %2 Zr katkılı numuneler

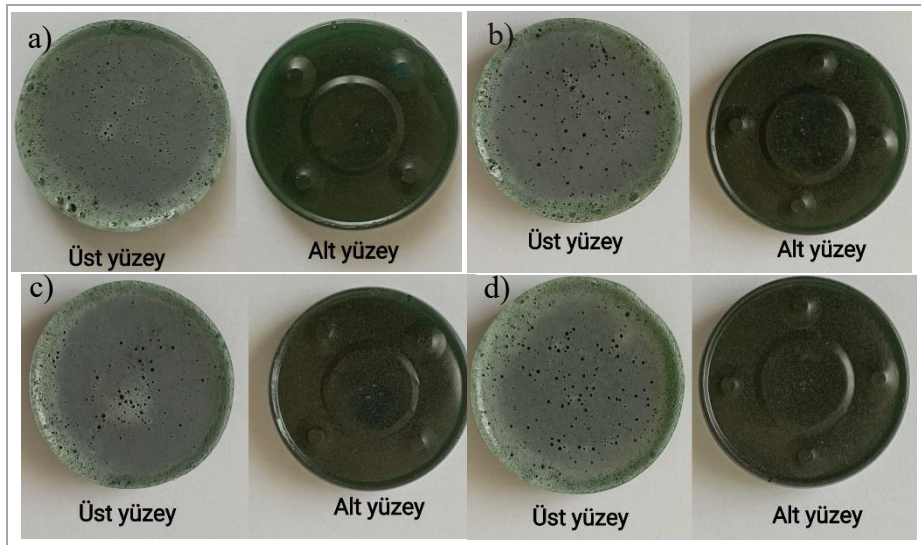
Zr katkılı numunelerde olduğu gibi Hf katkılı numunelerde de 23°C'de kürlenmiş numune yüzeylerinde bozulma görülmemiştir. Kürleme sıcaklığının artması ile numune yüzeylerinde bozulmalar başlamıştır. Ancak Hf katkılı numunelerdeki bozulmalar Zr katkılı

numunelerdeki kadar büyük değildir. Resim 5.3'te farklı sıcaklıklarda kürlenen %0.5 Hf katkılı numunelerin görüntüleri verilmiştir.



Resim 5.3. %0.5 Hf katkılı a) 23°C, b) 46°C, c) 66°C ve d) 86°C'de kürlenmiş numuneler

23°C' de kürlenen %0.5, %1, %1.5 ve %2 oranlarında Hf katkılı numunelerde hiçbir bozulma görülmemiştir. Epoksi reçine içine katkılanan Hf oranındaki artışın numune yüzeylerinde bozulmaya neden olmadığı görülmüştür. Resim 5.4'te farklı oranlarda Hf katkılı numunelerin görüntüleri verilmiştir.



Resim 5.4. 23°C'de kürlenmiş a) %0.5, b) %1, c) %1.5, d) %2 Hf katkılı numuneler

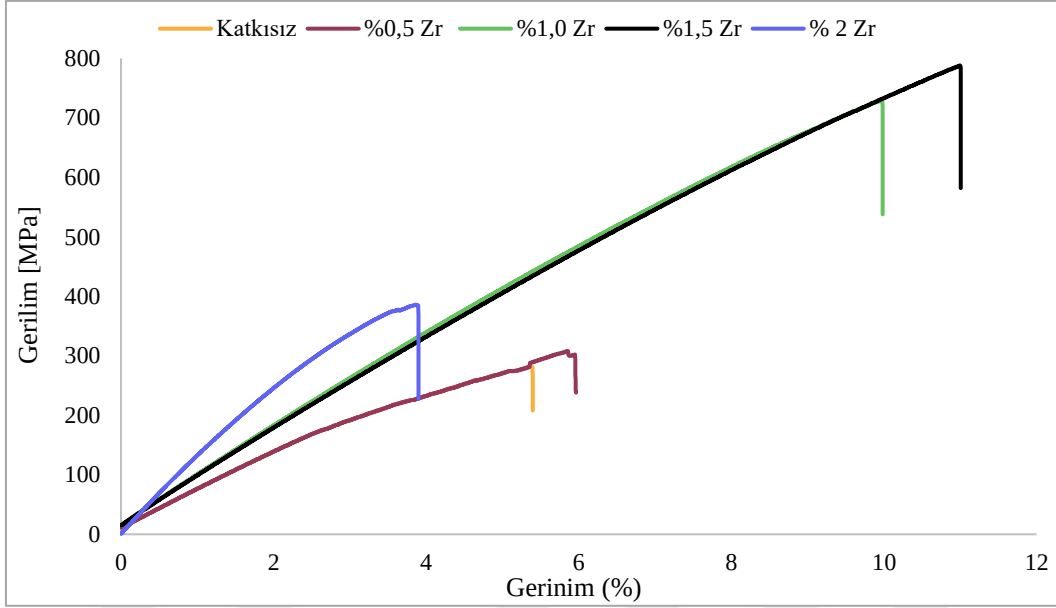
Zr ve Hf katkılı numuneler karşılaştırıldığında 23°C’de kürlenene numunelerde Zr ve Hf katkısının numune yüzeylerinde hiçbir hasara neden olmadığı görülmüştür. Ancak ikisinde de kürlenme sıcaklığındaki artışla numune yüzeylerinde bozulmalar görülmüştür. Kürlenme sıcaklığındaki artış ile Zr katkılı numunelerdeki bozulmaların Hf katkılı numunelerden daha fazla olduğu görülmüştür. 23°C’de kürlenmiş Zr ve Hf katkılı numunelerin ikisinde de katkı oranının artması numune yüzeylerine zarar vermediği gözlemlenmiştir.

5.2. Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Karakterizasyonu

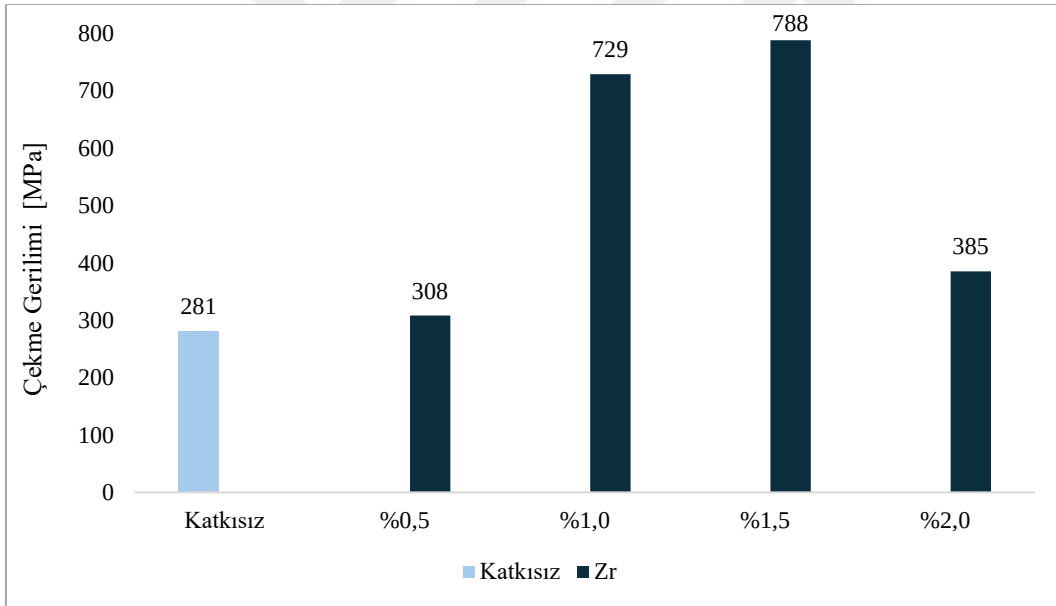
5.2.1. Çekme testi

Zr ve Hf katkılı ve katkısız karbon fiber takviyeli kompozitlerin çekme testleri yapılmış ve bu testle, çekme gerilim değerleri ve gerilim-gerinim grafikleri elde edilmiştir. Gerilim-gerinim grafiklerinde katkısız, Zr ve Hf katkılı tüm kompozitlerde plastik davranış göstermeden kopma meydana geldiği ve kırılğan bir davranış gösterdiği görülmüştür. Çekme testinde elyaflar ve termosetler kırılğan davranış gösteren malzemelerdir. Bu yüzden matris olarak termoset grubundan olan epoksi reçine ve takviyesi malzemesi olarak da karbon elyaflardan üretilen kompozit malzemenin kırılğan davranış gösterdiği görülmektedir.

Katkısız, %0.5, %1, %1.5 ve %2 Zr katkılı kompozitlerin çekme gerilim değerleri sırasıyla 281 MPa, 308 MPa, 729 MPa, 788 MPa, ve 385 MPa olarak elde edilmiştir. Zr katkılı tüm kompozitlerin çekme gerilim değerlerinin katkısız kompozite göre yüksek olduğu görülmüştür. Kompozitlere Zr katkısı elyaf matris arayüzey bağımlı kuvvetlendirdiği için matrinden elyafa yük transferini artırarak çekme gerilim değerlerinde artış sağladığı şeklinde yorumlanmıştır. En düşük çekme gerilimi katkısız kompozitte ve en yüksek çekme gerilimi %1.5 Zr katkılı kompozitte görülmüştür. Zirkonyumun % 0.5’ ten %1.5’a kadar katkılanmasıyla çekme gerilim değerleri artmış, %1.5’tan sonra düşmüştür. %2 katkı oranında düşme görülse bile çekme gerilim değeri katkısız kompozitten yüksek elde edilmiştir. Bu sebeple, %0.5’ten %2’ye kadar Zr katkısının karbon fiber takviyeli kompozitlerde çekme gerilimini artırdığı tespit edilmiştir. Zr katkılı ve katkısız kompozitlerin Şekil 5.6’te gerilim-gerinim grafikleri Şekil 5.7’de çekme gerilim değerleri verilmiştir.



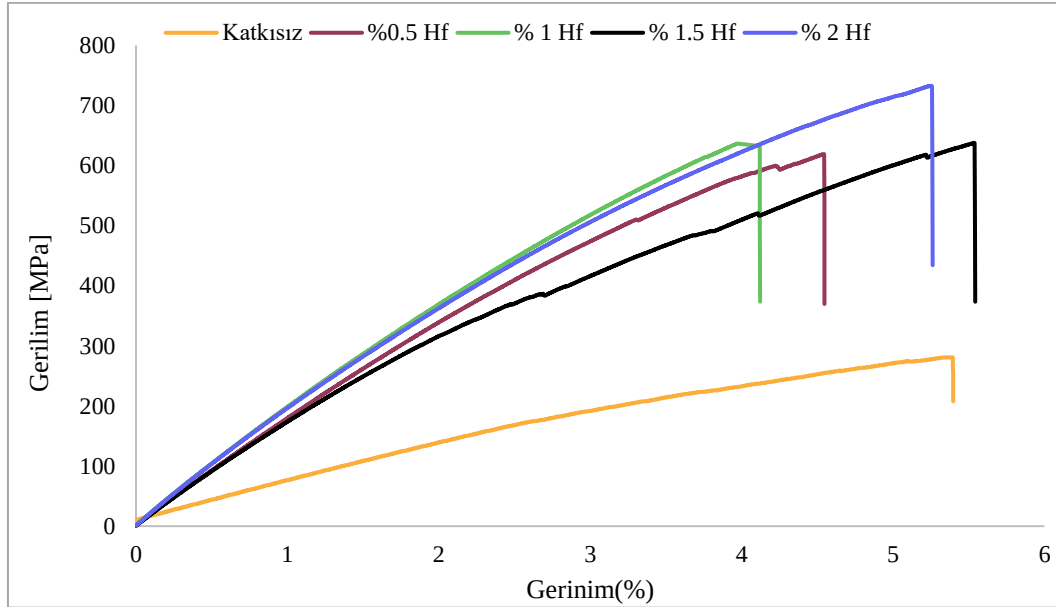
Şekil 5.7. Katkısız ve Zr katkılı kompozitlerin gerilim-gerinim grafiği



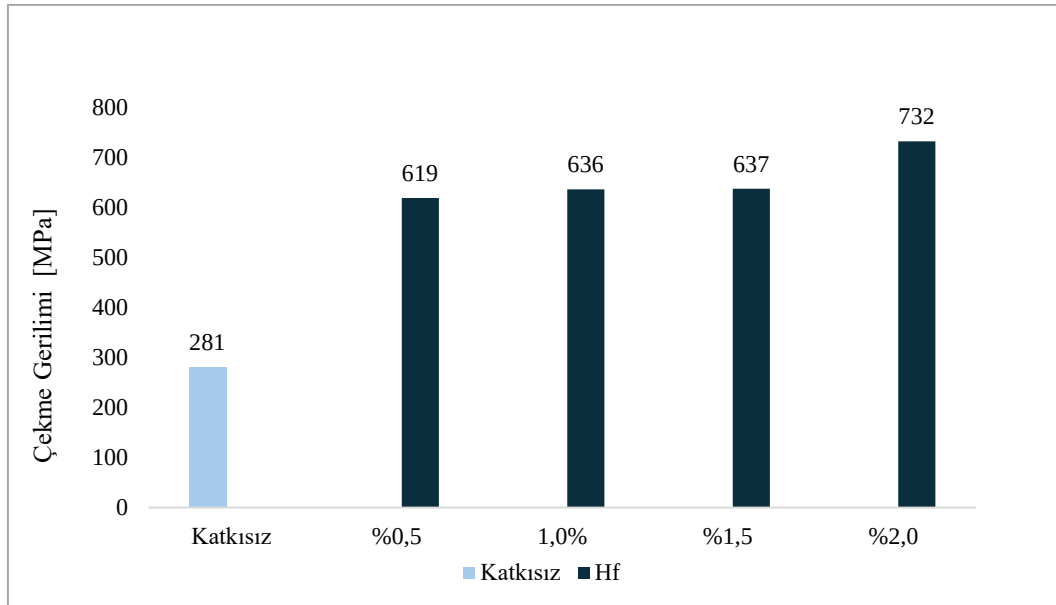
Şekil 5.8. Katkısız ve Zr katkılı kompozitlerin çekme gerilim değerleri

Hf katkılı tüm kompozitlerin çekme gerilim değerlerinin de katkısız kompozite göre yüksek olduğu görülmüştür. Kompozitlere hafniyum katkısının da zirkonyumda olduğu gibi elyaf matris arayüzey bağını kuvvetlendirdiği ve matristen elyafa yük transferini artırarak çekme gerilim değerlerinde artış sağladığı şeklinde yorumlanmıştır. %0,5, %1, %1,5 ve %2 Zr katkılı kompozitlerin çekme gerilim değerleri sırasıyla 619 MPa, 636 MPa, 637 MPa ve 732 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük çekme gerilimi 281 MPa ile katkısız kompozitte elde edilirken, en yüksek çekme gerilimi 732 MPa ile %2 Hf katkılı kompozitte elde edilmiştir.

Hafniyumun düşük oranda (%0.5) katkısı bile kompozitlerin çekme geriliminde büyük bir artış sağladığı gözlemlenmiştir. Hf oranı arttıkça çekme gerilim değerleri de arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 5.8' de kompozitlerin gerilim-gerinim grafikleri ve Şekil 5.9'de çekme gerilim değerleri verilmiştir.



Şekil 5.9. Katkısız ve Hf katkılı kompozitlerin gerilim-gerinim grafiği



Şekil 5.10. Katkısız ve Hf katkılı kompozitlerin çekme gerilim değerleri

Hf ve Zr katkılı kompozitlerin çekme gerilim sonuçları karşılaştırıldığında %0.5 Hf katkılı kompozitin çekme gerilim değerinin %0.5 Zr katkılı kompozitten 2 kat fazla olduğu

görülmektedir. Bu nedenle çekme geriliminde düşük oranda hafniyum katkısının zirkonyumdan daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Zr katkı oranı %1.5'u geçtikten sonra çekme geriliminde düşme gözlemlenirken, Hf katkısında oran arttıkça çekme gerilimi artmış ve düşme görülmemiştir.

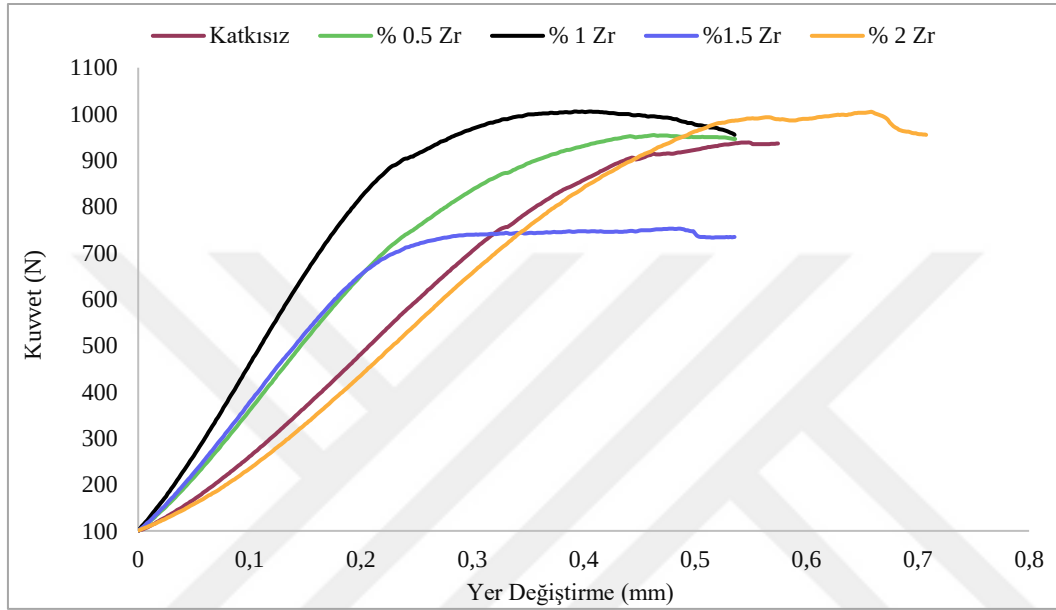
Li ve ark. yaptığı çalışmada, epoksi reçine içine %1-%5 arası ZrO_2 nanopartikülleri katkılanmıştır. En yüksek çekme gerilimini %3 ZrO_2 katkısında elde etmişlerdir. %3'ten sonraki katkı oranlarında, partikül oranının artması ile aglomerasyon da arttığı için çekme geriliminde düşme gözlemlenmiştir. Aglomerasyon ara yüzey yapışmasını olumsuz etkilediği için mekanik özelliklerde düşmeye neden olduğu gözlemlenmiştir [68]. Nayak ve ark. yaptığı bir çalışmada; %0.1, %0.3 ve %0.7 oranlarında nano TiO_2 katkılanan kompozitlerde en yüksek çekme gerilim değeri %0.1 katkılı kompozitte gözlemlenmiştir [69]. Toorchi ve ark. yaptığı bir çalışmada, epoksi reçine içine %4, %6 ve %8 oranlarında nano ZrO_2 katkılanarak üretilen kompozitlerde çekme mukavemeti %4'ten %8'e kadar aşamalı olarak arttığı gözlemlenmiştir [70].

Bu çalışmadaki çekme testi sonuçları literatürdeki çalışmalarla benzerlik göstermektedir. Bazı partiküllerde katkı oranı arttıkça çekme gerilimi artarken bazılarında belli bir katkı oranından sonraki artışta çekme gerilim değerlerinde düşme gözlemlenmiştir. Bu da katkılanan zirkonyum ve hafniyumun farklı katkı oranlarında elyaf-matris arayüzey bağını farklı şekilde etkilediğini göstermiştir. Zr katkı oranının %1.5'tan %2'ye çıkması ile yapı içerisindeki toz yoğunluğunun artması nedeniyle kompozitte aglomerasyon meydana gelmiştir. Aglomerasyon da matris-elyaf arayüzey bağını zayıflatarak matristen elyafa yük transferinin azalmasına neden olduğu için çekme gerilim değerlerinin düştüğü görülmüştür.

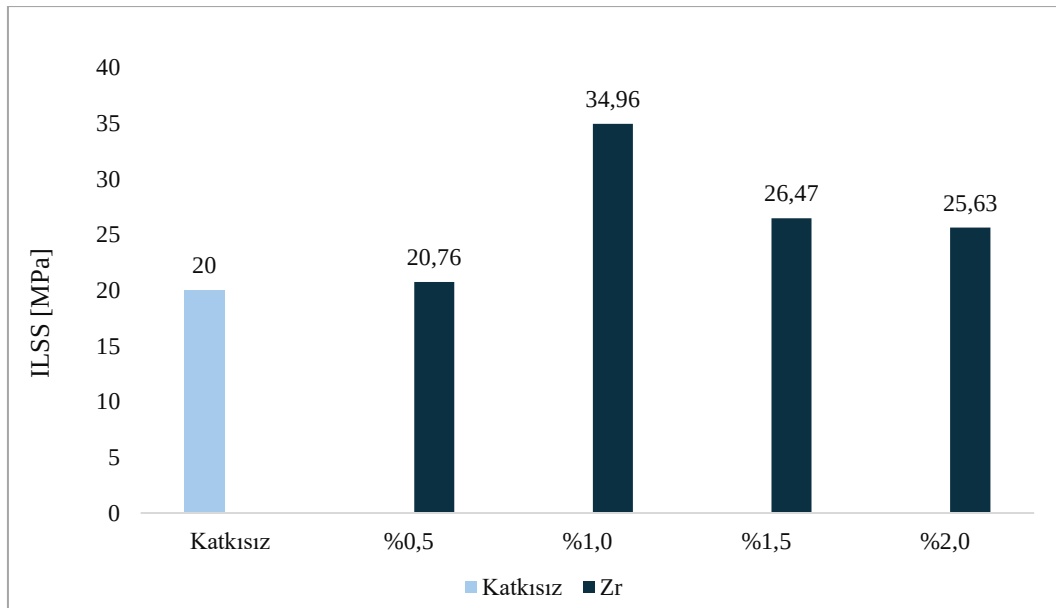
5.2.2. Eğme testi

Zr ve Hf katkılı ve katkısız karbon fiber takviyeli kompozitlerin eğme testleri yapılmış ve bu testle, tabakalar arası kayma mukavemeti (ILSS) değerleri ve kuvvet-yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir. En düşük ILSS değeri 20 MPa ile katkısız kompozitte elde edilirken, %0.5, %1, %1.5 ve %2 Zr katkılı kompozitlerin ILSS değerleri sırasıyla 20.76 MPa, 34.96 MPa, 25.47 MPa ve 25.63 MPa olarak elde edilmiştir. Zr katkılı tüm kompozit malzemelerdeki ILSS değerlerinin katkısız kompozite göre yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Maksimum ILSS değerine %1 Zr katkılı kompozitte ulaşılmıştır. %1'den sonra oranın

artmasıyla ILSS değerlerinde düşme gözlemlenmiştir. %0.5'ten %2' ye kadar Zr katkısının kompozitlerdeki elyaf-matris arayüzey bağını kuvvetlendirdiği için katkısız kompozite göre ILSS değerlerini yükselttiği şeklinde yorumlanmıştır. Şekil 5.10'da katkısız ve farklı oranlarda Zr katkılı kompozitlerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri ve Şekil 5.11'da ILSS değerleri verilmiştir.

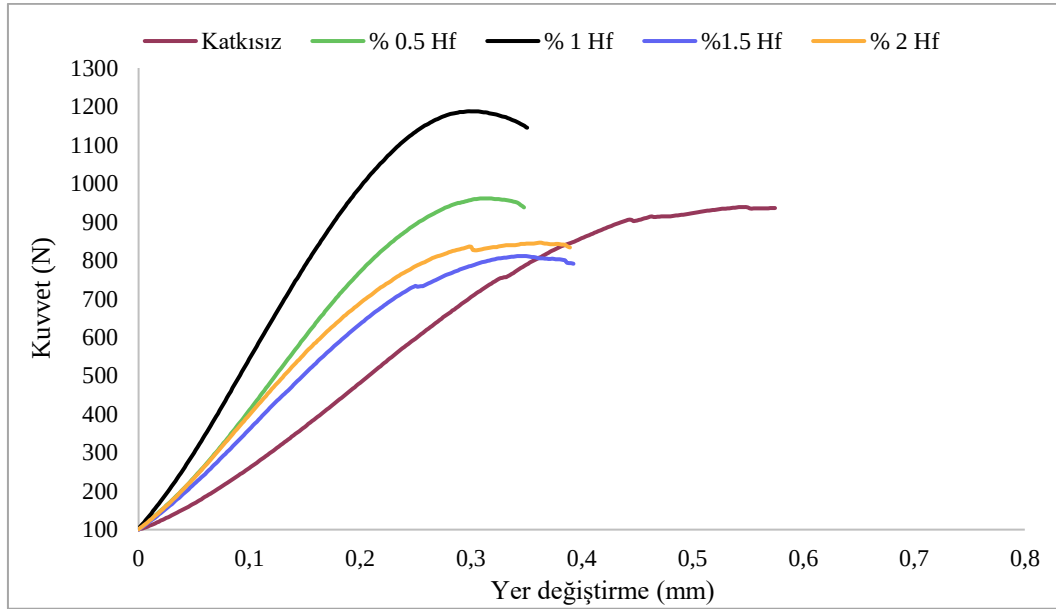


Şekil 5.11. Katkısız ve Zr katkılı kompozitlerin kuvvet-yer değiştirme grafiği

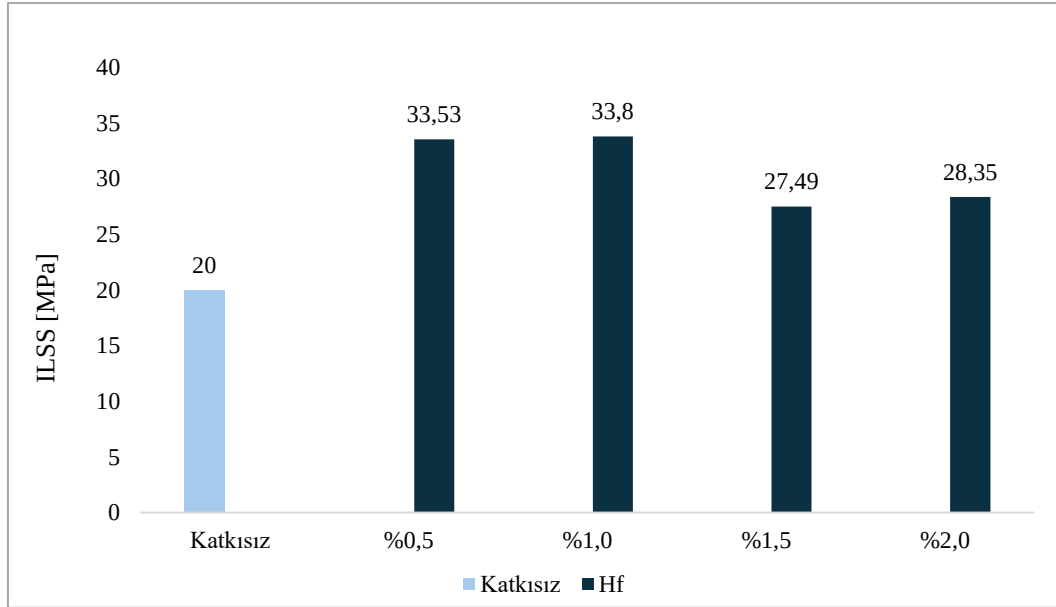


Şekil 5.12. Katkısız ve Zr katkılı kompozitlerin ILSS değerleri

Hf katkılı tüm kompozit malzemelerdeki ILSS değerlerinin katkısız kompozite göre yüksek olduğu gözlemlenmiştir. En düşük ILSS değeri 20 MPa ile katkısız kompozitte elde edilirken, %0.5, %1, %1.5 ve %2 Hf katkılı kompozitlerin ILSS değerleri sırasıyla 33.53 MPa, 33.8 MPa, 27.49 MPa ve 28.35 MPa olarak elde edilmiştir. Maksimum ILSS değerine %1 Hf katkılı kompozitte ulaşılmıştır. %0.5'ten %2'ye kadar Hf katkısı ile kompozitlerin ILSS değerini artması, Hf katkısının elyaf matris arayüzey bağını kuvvetlendirdiği için değerlerin artmasına sebep olduğu şeklinde yorumlanmıştır. Şekil 5.12'de katkısız ve farklı oranlarda Hf katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri ve Şekil 5.13'de ILSS değerleri verilmiştir.



Şekil 5.13. Katkısız ve Hf katkılı kompozitlerin kuvvet-yer değiştirme grafiği



Şekil 5.14. Katkısız ve Hf katkılı kompozitlerin ILSS değerleri

Zr ve Hf katkılı kompozitler karşılaştırıldığında her ikisinde de tüm katkı oranlarında katkısız kompozite göre ILSS değerlerinin yüksek olduğu görülmüştür. İkisinde de maksimum ILSS değeri %1 katkılı kompozitte görülmüş ve %1'den sonraki oranlarda ILSS değerinde düşme gözlemlenmiştir. %0.5 Zr katkısı, katkısız kompozite göre ILSS değerini 0.75 MPa artırırken, %0.5 Hf katkısı 13.53 MPa artırmıştır. Bu nedenle ILSS değeri için düşük oranda Hf katkısının zirkonyumdan daha etkili olduğu tespit edilmiştir.

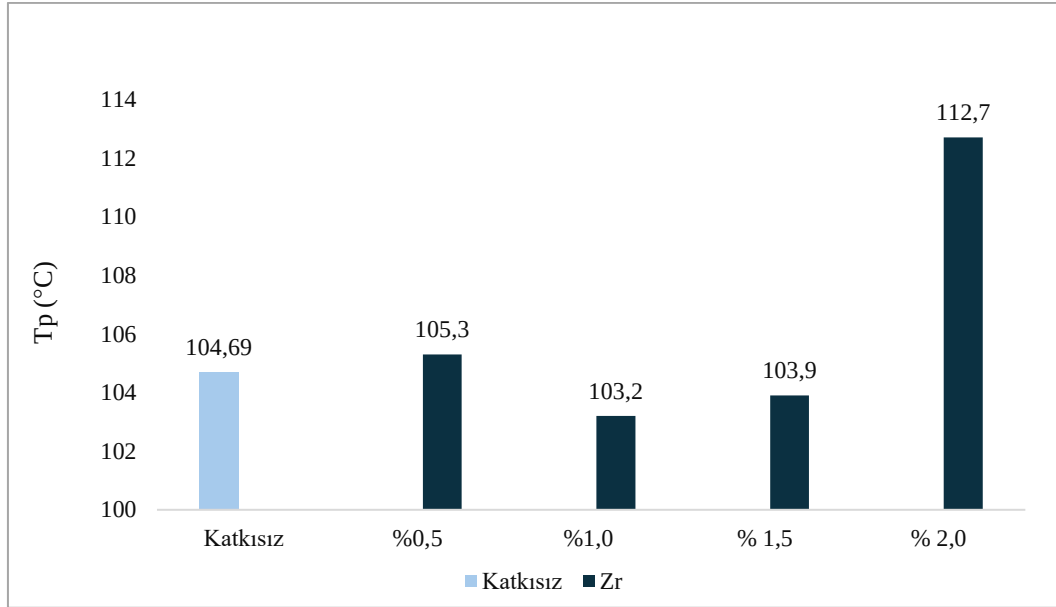
Nayak ve ark. yaptığı bir çalışmada, epoksi reçine içine TiO_2 nanopartikül katkısının belli bir orana kadar ILSS değerlerini artırdığı gözlemlenmiştir. %0.1, %0.3 ve %0.7 TiO_2 katkılanmış kompozitlerde en yüksek ILSS değerine %0.1 katkılı kompozitte ulaşmışlardır. %0.7 TiO_2 katkılı kompozitteki ILSS değerinin katkısız kompozitten daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ILSS değerlerinin elyaf ve matris arasındaki yapışkanlık derecesini göstermesinden kaynaklıdır. TiO_2 katkı oranındaki artışla beraber aglomerasyon da artmıştır. Aglomerasyon elyaf-matris arayüzey bağına zarar verdiği için ILSS değerlerinde düşme gözlemlenmiştir [69]. Toorchi ve ark. yaptığı çalışmada, epoksi reçine içine %1, %2 ve %3 nano ZrO_2 katkılanarak üretilmiş kompozitlerdeki ILSS değerlerinin katkısız kompozitten yüksek olduğu görülmüştür. En yüksek ILSS değerine %2 ZrO_2 katkılı kompozitte ulaşmışlardır. %2'den sonra ZrO_2 oranı arttığında ILSS değerinde düşme gözlemlenmiştir. Bunun nedeni artan ZrO_2 oranı ile aglomerasyonun artması ve elyaf-matris arayüzey bağını zayıflatmasıdır [70].

Bu çalışmadaki ILSS sonuçları literatürdeki çalışmalarla benzerlik göstermiştir. Hf ve Zr katkısı kompozitlerin arayüzey bağını kuvvetlendirerek ILSS değerlerinde artış sağlamıştır. Belli bir oranda maksimum değer elde edildikten sonraki artan katkı oranı ile kompozitlerin ILSS değerlerinde az miktarda düşmeye neden olduğu görülmüştür. Bu çalışmada katkılanan tozun mikron boyutunda olmasından dolayı elde edilen maksimum değerden sonraki katkı oranlarında ILSS değerlerinde az miktarda düşme görülürken, literatürdeki çalışmalarda nano boyutta toz kullanıldığı için katkı oranının artması ile ILSS değerlerinde yüksek oranda düşme görülmüştür. Bunun nedeni toz boyutu küçüldükçe aglomerasyonun artması ile arayüzey bağının daha fazla zayıflamasıdır.

5.2.3. DSC testi

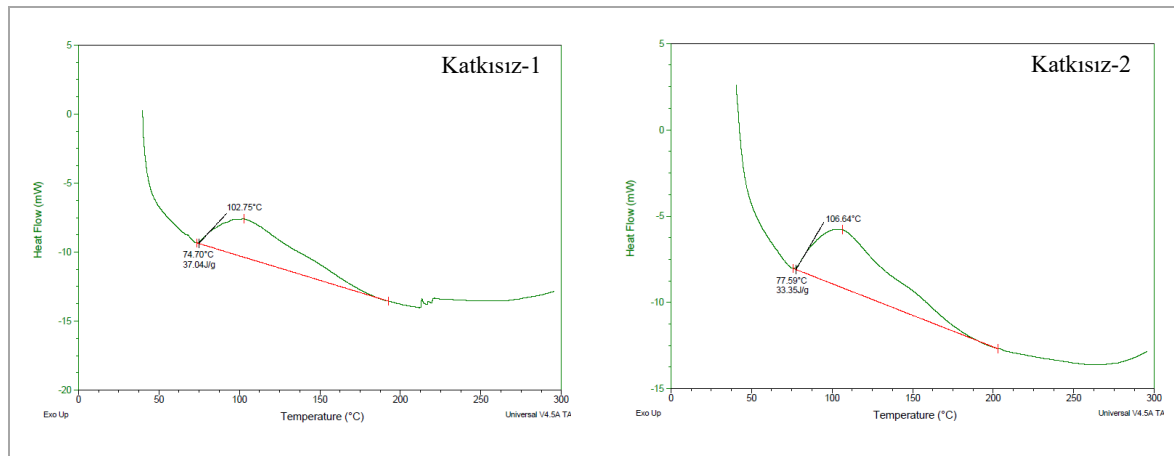
DSC testi ile kompozitlerin polimerleşme sıcaklığı (T_p) ve polimerleşme entalpi değişim (ΔH_p) değerleri elde edilmiştir. Polimerleşme işlemi ekzotermik bir tepkimedir. DSC grafiğinde belirtilmiş olan ekzotermik pik noktası polimerleşme sıcaklığını verirken, grafik altında kalan alan ise polimerleşme entalpi değişim değerini vermektedir. Alan hesabı DSC cihazı tarafından grafikteki belirtilen ekzotermik tepkimenin başlangıç ve bitiş sıcaklıkları esas alınarak hesaplanmıştır.

Zr katkılı ve katkısız tüm kompozitlerin polimerleşme sıcaklıkları birbirine yakın çıkmıştır. Polimerleşme sıcaklık değerleri 103-113.5°C arasında değişmektedir. Polimerleşme sıcaklığı, termoset polimerlerdeki çapraz bağların oluşum sıcaklığını vermektedir [71]. En yüksek polimerleşme sıcaklığına 112.7°C ile %2 Zr katkılı kompozitte ulaşılmıştır. %1 ve %1.5 Zr katkısında kompozitlerin polimerleşme sıcaklığı sırasıyla 103.2°C ve 103.9°C'lere düşerken %2 katkısında polimerleşme sıcaklığının arttığı görülmüştür. Katkısız ve Zr katkılı kompozitlerin polimerleşme sıcaklık değerleri Şekil 5.14'te verilmiştir.

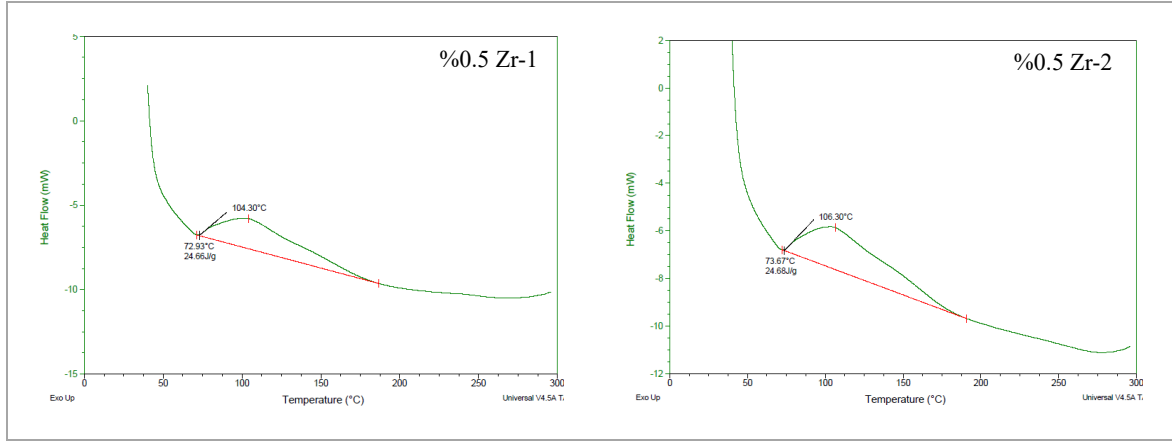


Şekil 5.15. Katkısız ve Zr katkılı kompozitlerin polimerleşme sıcaklık değerleri

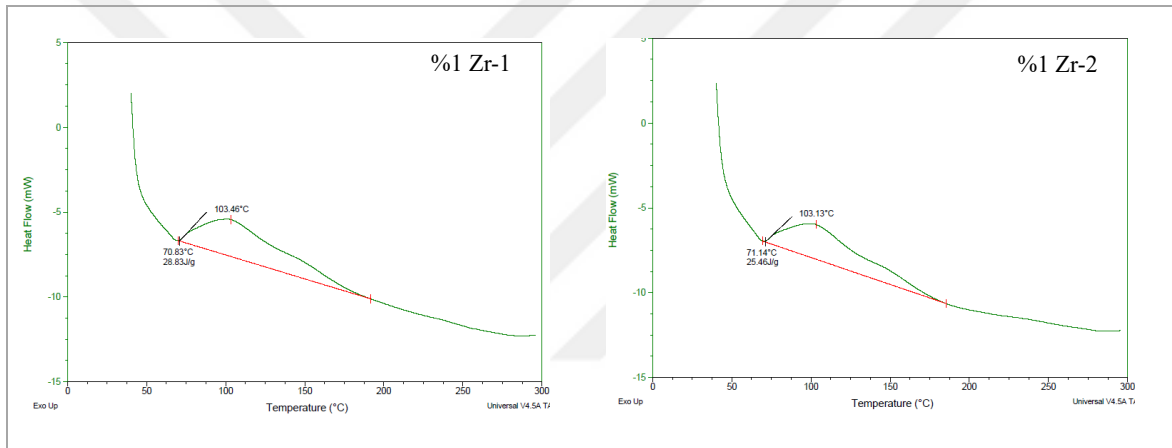
Polimerleşme entalpi değişimi (ΔH_p) polimerlerin bağ oluşumunda açığa çıkan toplam enerjidir [72]. Katkısız kompozitin ΔH_p 35.04 j/g iken, %0.5, %1, %1.5 ve %2 Zr katkısında kompozitlerdeki ΔH_p değerleri sırasıyla 24.6 j/g, 25.06 j/g, 23.9 j/g ve 16.56 j/g elde edilmiştir. Zr katkılı tüm kompozitlerin ΔH_p değerleri katkısız kompozitten düşük olduğu görülmüştür. En yüksek ΔH_p katkısız kompozitte elde edilirken, en düşük ΔH_p %2 Zr katkılı kompozitte elde edilmiştir. Farklı oranlarda Zr katkılı ve katkısız kompozitlerin polimerleşme entalpi değişim değerleri ve polimerleşme sıcaklık değerleri Şekil 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19’da DSC grafiklerinde görülmektedir. Şekil 5.20’da Zr katkılı ve katkısız kompozitlerin ortalaması alınmış olan polimerleşme entalpi değişim değerleri verilmiştir.



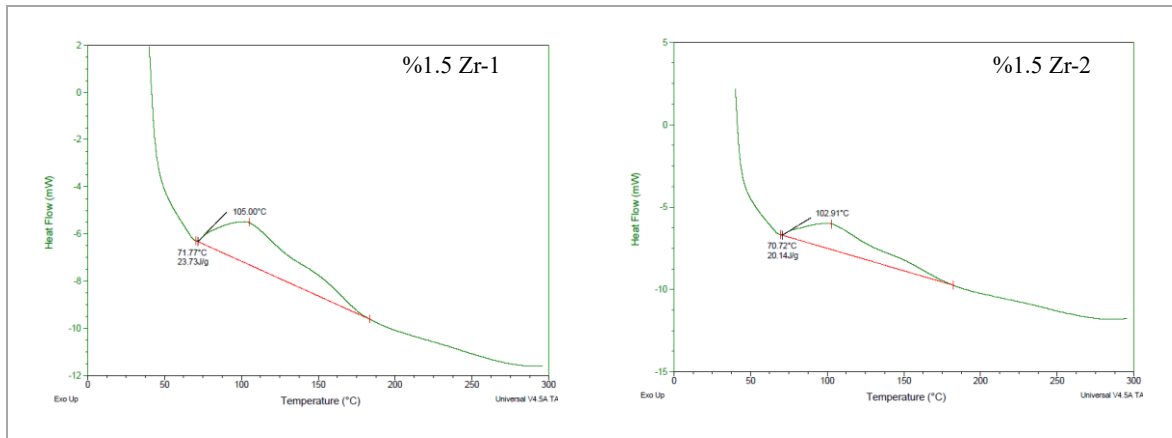
Şekil 5.16. Katkısız kompozitlerin DSC grafiği



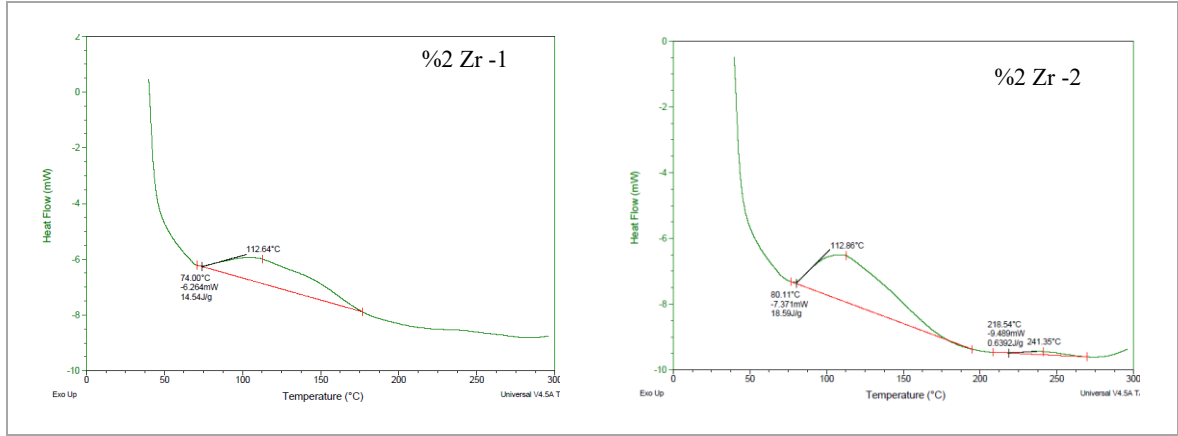
Şekil 5.17. %0.5 Zr katkılı kompozitin DSC grafiği



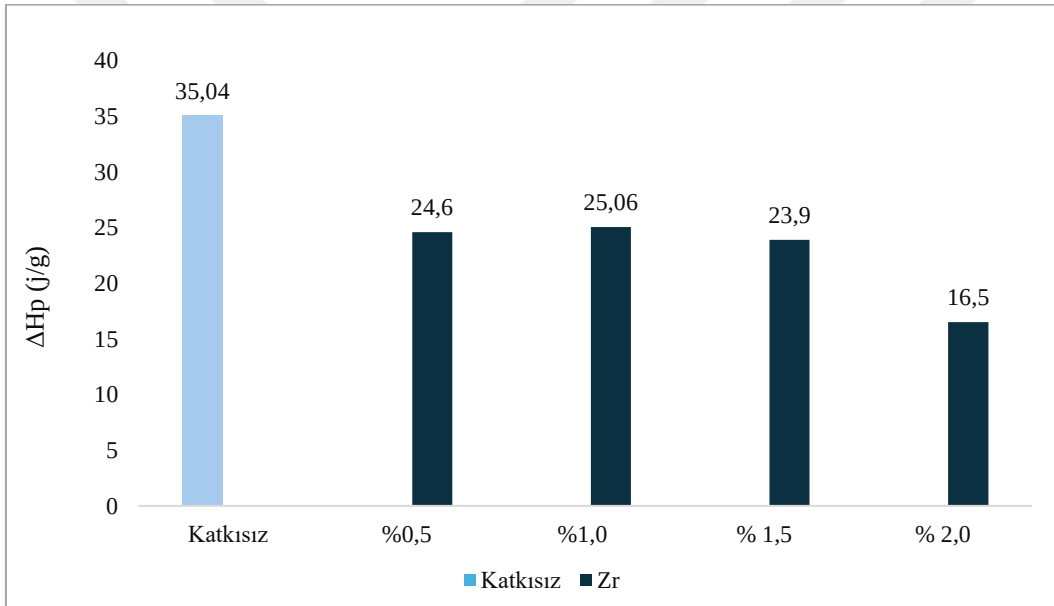
Şekil 5.18. %1 Zr katkılı kompozitin DSC grafiği



Şekil 5.19. %1.5 Zr katkılı kompozitin DSC grafiği

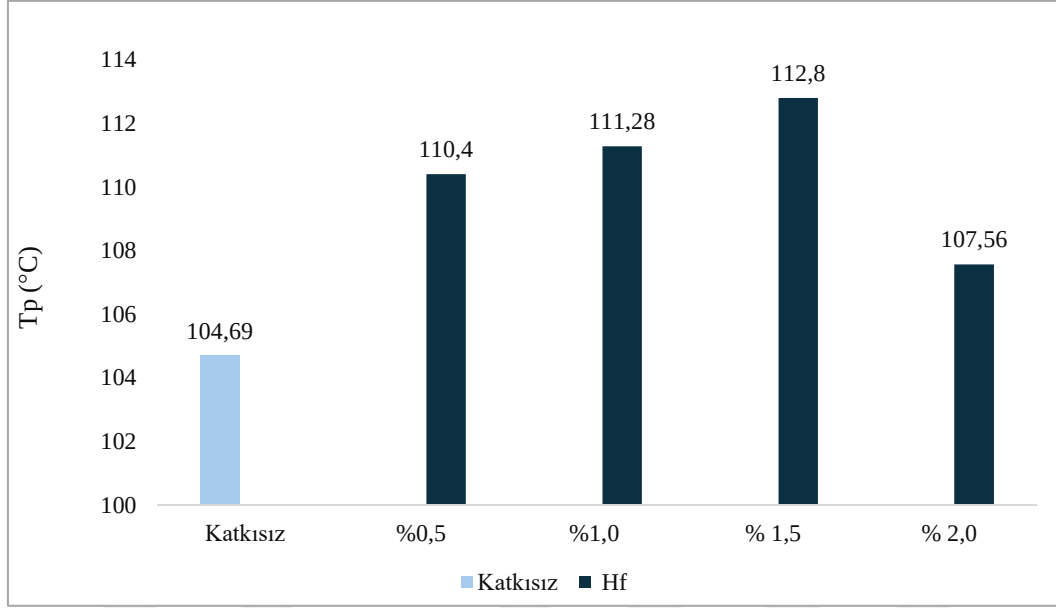


Şekil 5.20. %2 Zr katkılı kompozitin DSC grafiği



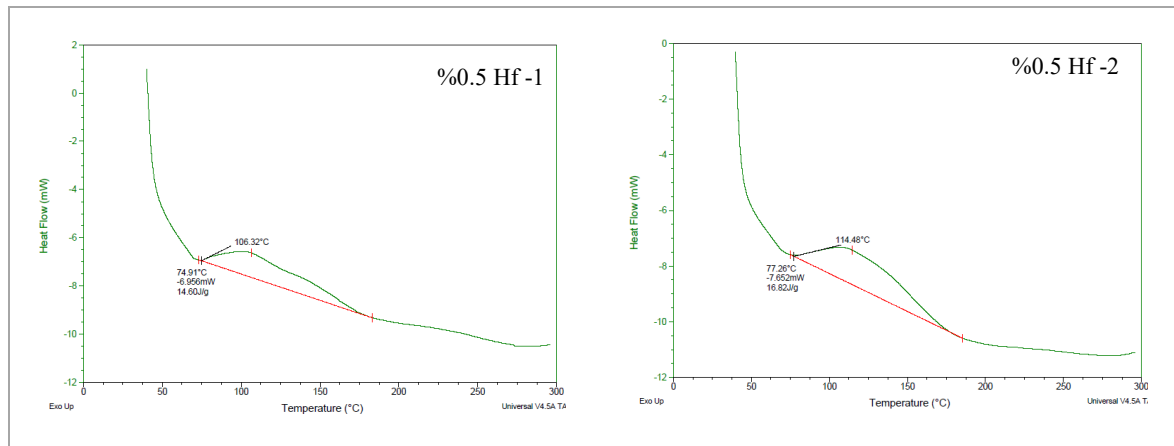
Şekil 5.21. Katkısız ve Zr katkılı kompozitlerin polimerleşme entalpi değişim değerleri

Hf katkılı ve katkısız tüm kompozitlerin polimerleşme sıcaklıkları birbirine yakın çıkmıştır. Polimerleşme sıcaklık değerleri 105-112.8°C arasında değişmektedir. En düşük polimerleşme sıcaklığına 104.69°C ile katkısız kompozitte ulaşılmıştır. %0.5, %1, %1.5 ve %2 Hf katkılı kompozitlerin polimerleşme sıcaklık değerleri sırasıyla 110.4°C, 111.28°C, 112.8°C, 107.56°C elde edilmiştir. Hf katkılı tüm kompozitlerin polimerleşme sıcaklık değerleri katkısız kompozite göre yüksek olduğu görülmüştür. %0.5'den %2'ye kadar Hf katkısının kompozitlerdeki çapraz bağların oluşum sıcaklığına etki ederek, polimerleşme sıcaklığını az miktarda artırdığı şeklinde yorumlanmıştır. Hf katkılı ve katkısız kompozitlerin polimerleşme sıcaklık değerleri Şekil 5.21'de verilmiştir.

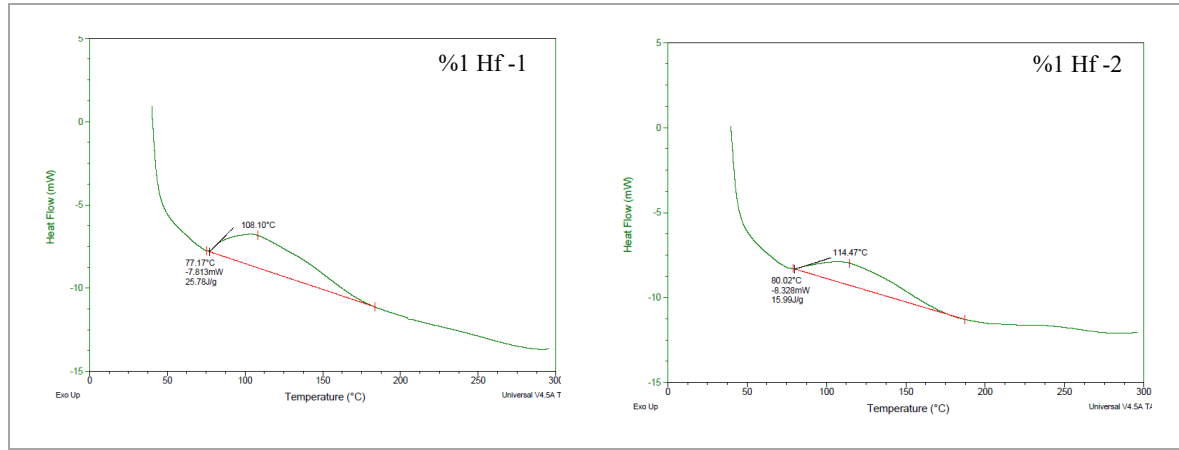


Şekil 5.22. Katkısız ve Hf katkılı kompozitlerin polimerleşme sıcaklık değerleri

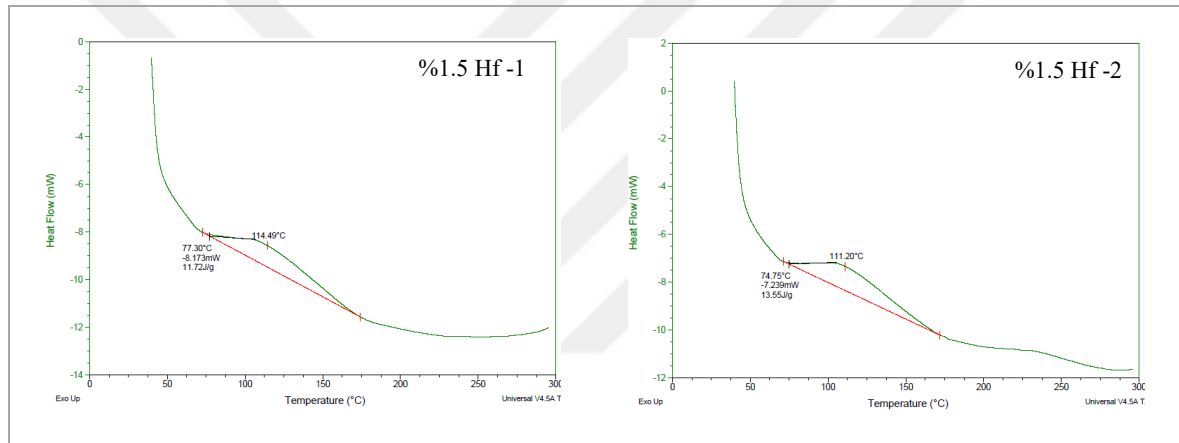
Hf katkılı tüm kompozitlerin ΔH_p değerleri katkısız kompozitten düşük olduğu görülmüştür. En yüksek ΔH_p değeri katkısız kompozitte 35.04 j/g ile elde edilirken, %0.5, %1, %1.5 ve %2 Hf katkılı kompozitlerin ΔH_p değerleri sırasıyla 15.71 j/g, 20.88 j/g, 12.63 j/g ve 20.76 j/g olarak elde edilmiştir. Epoksi reçine içine Hf katkısının kompozitlerdeki ΔH_p değerlerinde düşmeye neden olduğu görülmüştür. Farklı oranlarda Hf katkılı kompozitlerin polimerleşme entalpi değişim değerleri ve polimerleşme sıcaklık değerleri Şekil 5.22, 5.23, 5.24 ve 5.25'te DSC grafiklerinde görülmektedir. Şekil 5.26'da Hf katkılı kompozitlerin ortalaması alınmış olan polimerleşme entalpi değişim değerleri verilmiştir.



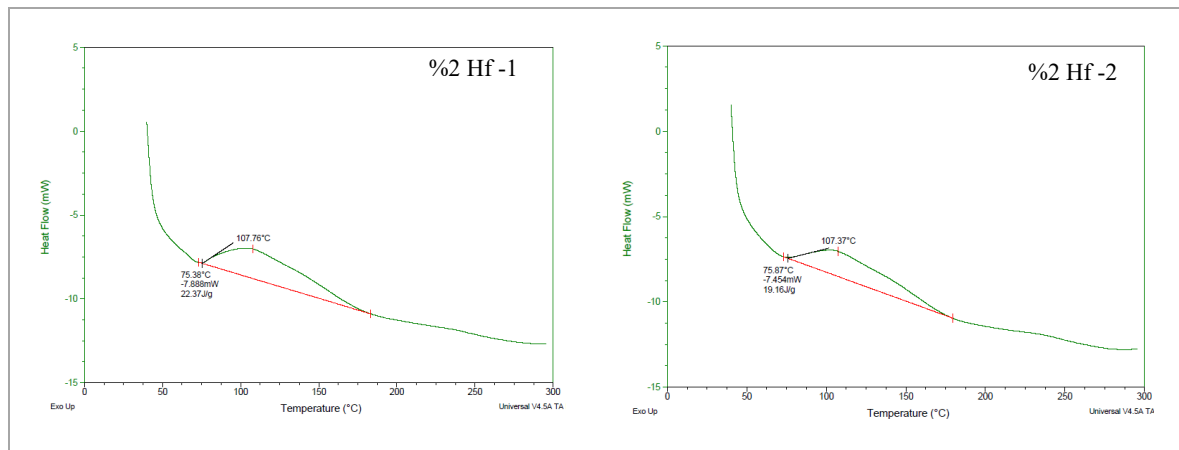
Şekil 5.23. %0.5 Hf katkılı kompozitin DSC grafiği



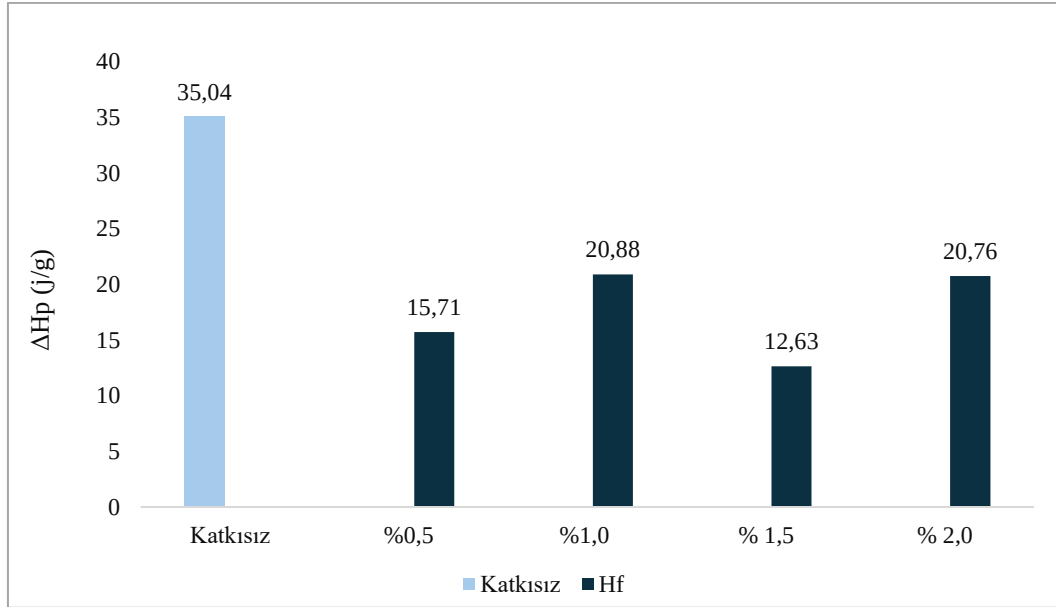
Şekil 5.24. %1 Hf katkılı kompozitin DSC grafiği



Şekil 5.25. %1.5 Hf katkılı kompozitin DSC grafiği



Şekil 5.26. %2 Hf katkılı kompozitin DSC grafiği



Şekil 5.27. Katkısız ve Hf katkılı kompozitlerin polimerleşme entalpi değişim değerleri

Hf ve Zr katkılı kompozitler karşılaştırıldığında polimerleşme sıcaklık değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Zr ve Hf katkısının polimerleşme sıcaklığına çok düşük oranda etki ettiği görülmüştür. Polimerleşme entalpi değişim değerleri karşılaştırıldığında, iki metal tozu katkısında da katkısız kompozite göre ΔH_p değerlerinin azaldığı görülmüştür.

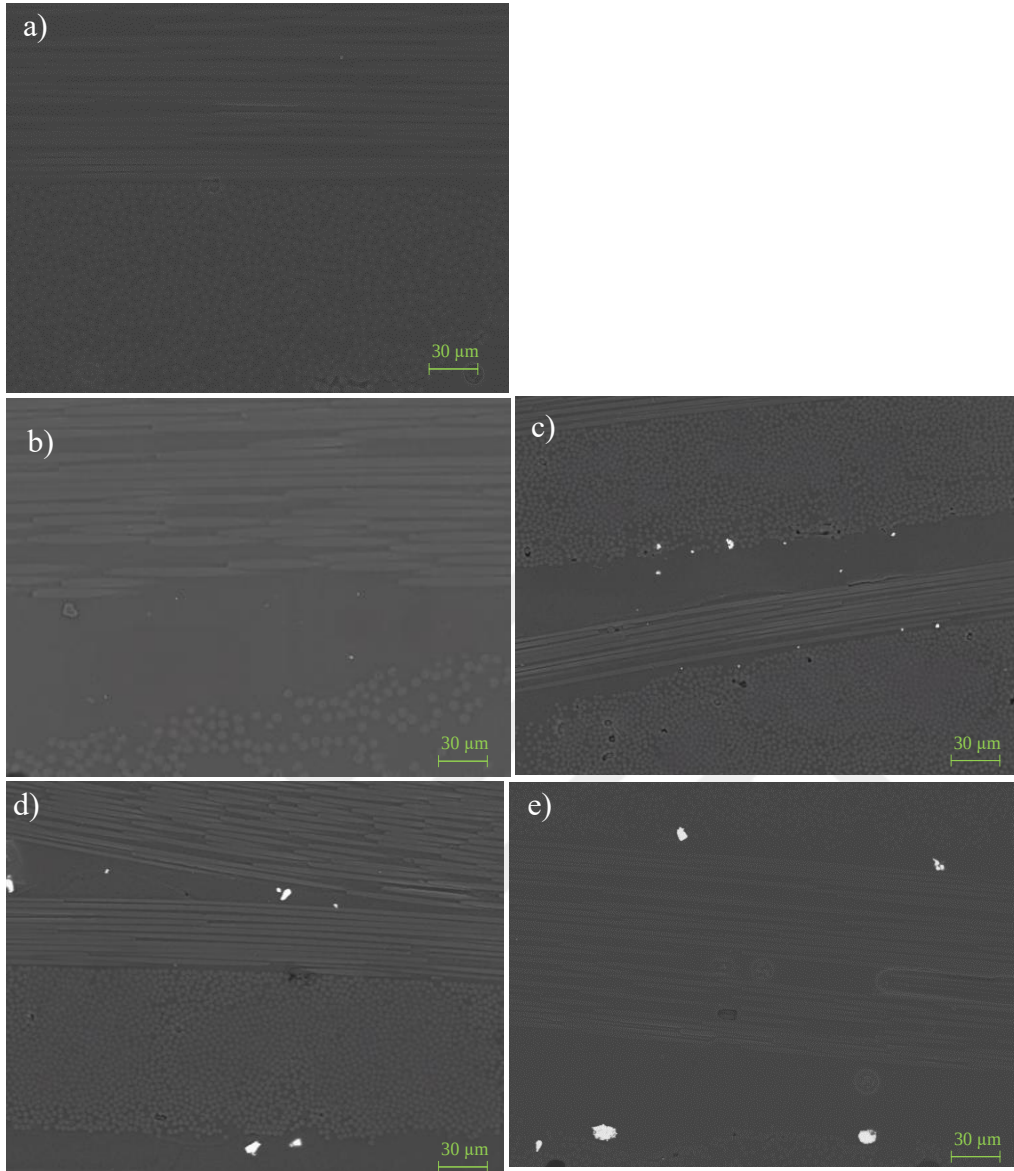
Rubab ve ark. yaptığı bir çalışmada, epoksi içine %2.5-%5 nano boyutta TiO_2 katkılanarak DSC testleri yapılmıştır. Artan TiO_2 katkı oranıyla camsı geçiş sıcaklığının (T_g) düştüğü görülmüştür. Bunun nedeni, katkılanan TiO_2 , polimer yapıdaki çapraz bağ yoğunluğunu azaltarak, serbest hareket hacminde artışa neden olmasıdır [73]. Dorigato ve ark. yaptığı çalışmada, epoksi reçine içine %0.5, %1 ve %1.5 nano boyutta ZrO_2 katkılanan kompozitlerde en yüksek T_g değerine %1 katkılı kompozitte ulaşılmıştır. %1'den sonra katkı oranının artması, bağ oluşumunda blokaja neden olduğu için çapraz bağ yoğunluğunun azalması ile T_g değerinin düşmesine neden olduğu gözlemlenmiştir [74]. Hou ve ark. yaptığı çalışmada, epoksi reçine içine %1, %3 ve %5 oranlarında mikro ve nano boyutlu TiO_2 katkılanmıştır. Katkılanan nano ve mikro boyuttaki TiO_2 epoksi içinde oluşan reaksiyonda A ve B molekülleri arasında oluşan çapraz bağ yoğunluğunu azalttığı için reaksiyon hızının düşmesine neden olduğu gözlemlenmiştir [75]. Al-Ajaj ve ark. yaptığı çalışmada, %3 ve %15 nano boyutta TiO_2 katkılı kompozitlerin DSC testleri yapılmıştır. %3 TiO_2 katkılı kompozitin T_g değerinin katkısız kompozitten yüksek olduğu gözlemlenirken, %15 TiO_2 katkılı kompozitin T_g değerinde katkısızza göre büyük oranda düşme gözlemlenmiştir. T_g

değeri çapraz bağ yoğunluğunun artması ile artmaktadır. %3 TiO_2 katkılı kompozitte T_g değerinin artmasının nedeni, nanopartiküllerin iyi dağılımı ile Van der Waals bağ oluşumunu ve arayüzey yapışmasını iyi yönde etkilemesidir. %15 TiO_2 katkısında, yüksek oranda TiO_2 katkısı çapraz bağlar arasındaki özgül serbest hareket hacminde artışa neden olduğu için T_g değerinde düşme gözlemlenmiştir [76].

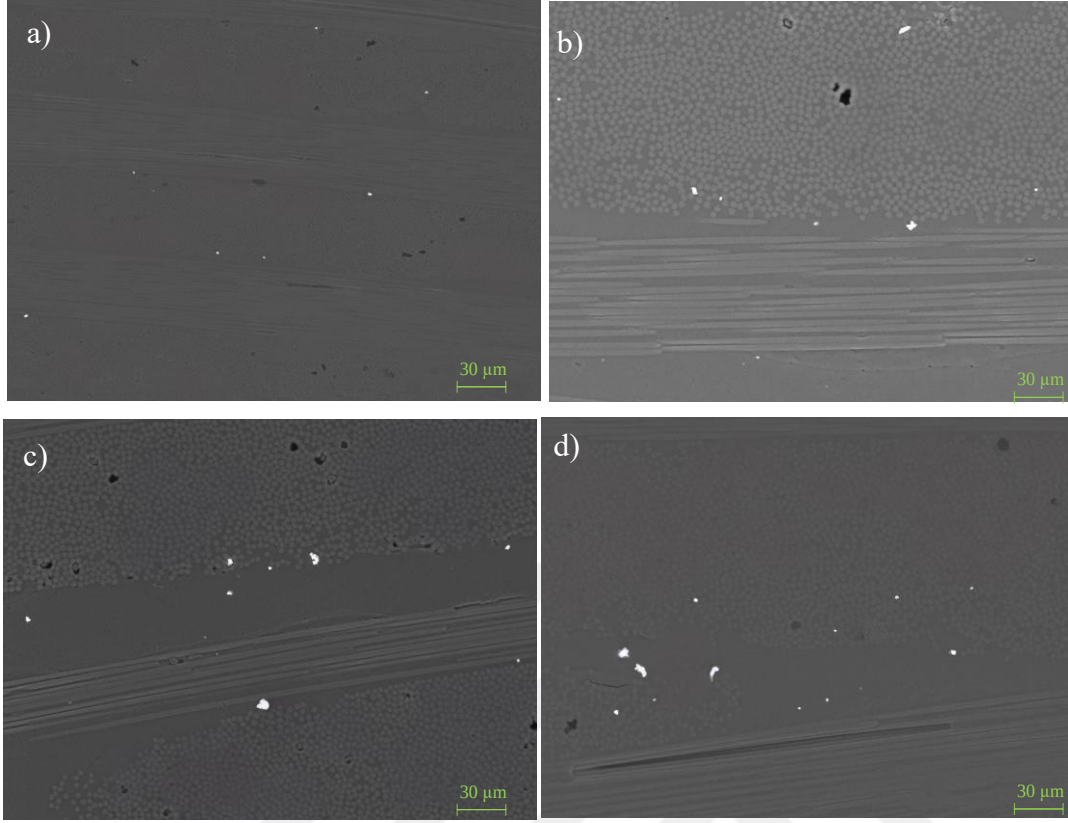
Bu çalışmada, Zr ve Hf katkılı tüm kompozitlerdeki ΔH_p değerlerinin katkısız kompozitten düşük elde edilmesinin nedeni Zr ve Hf katkısı polimer yapıdaki çapraz bağ yoğunluğunu azaltmasındandır. Literatürde yapılan çalışmalar da bunu desteklemektedir. Oluşan çapraz bağ ve açığa çıkan enerji doğru orantılı olduğu için çapraz bağ yoğunluğu azaldıkça ΔH_p değerleri de azalmıştır. Bu sebeple %0.5'ten %2'ye kadar epoksi reçine içine Hf ve Zr katkısı kompozitlerde çapraz bağ yoğunluğunu düşürmüş ve bu da kompozitlerdeki T_g değerlerinde düşmeye neden olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

5.2.4. SEM-EDS analizi

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile yapılan mikroyapı analizleri sonucunda, matris içinde yer alan Zr ve Hf tozları, karbon elyaflar ve oluşan boşluklar detaylı olarak görüntülenmiştir. SEM görüntülerinde, yüksek atom numarasına sahip Zr ve Hf tozları parlak beyaz bölgeler olarak tanımlanırken, reçine içinde yer alan koyu renkli düzensiz yapılar boşlukları tanımlar. SEM ile Zr ve Hf katkı oranı arttıkça aglomerasyonun arttığı gözlemlenmiştir. Metal tozları genellikle yüksek yüzey enerjisine sahip oldukları için parçacıkların birbirine yapışma eğilimleri ve Van der Waals kuvvetlerinin etkisi ile tozlar serbestçe dağılmak yerine birbirlerini çekerek aglomerasyonlar oluşturduğu şeklinde yorumlanmıştır. Yapı içindeki toz oranı arttıkça, metal tozları arasında artan çekimden dolayı aglomerasyonun da arttığı SEM görüntülerindeki parlak bölge alanındaki artışla belirlenmiştir. Resim 5.5'te zirkonyumun ve Resim 5.6'da hafniyumun SEM görüntülerinde; karbon fiberler, epoksi reçine içerisinde dağılmış tozlar (beyaz alanlar), boşluk yapıları (siyah alanlar) ve yüksek katkı oranlarında gözlemlenen aglomerasyon bölgeleri verilmektedir.

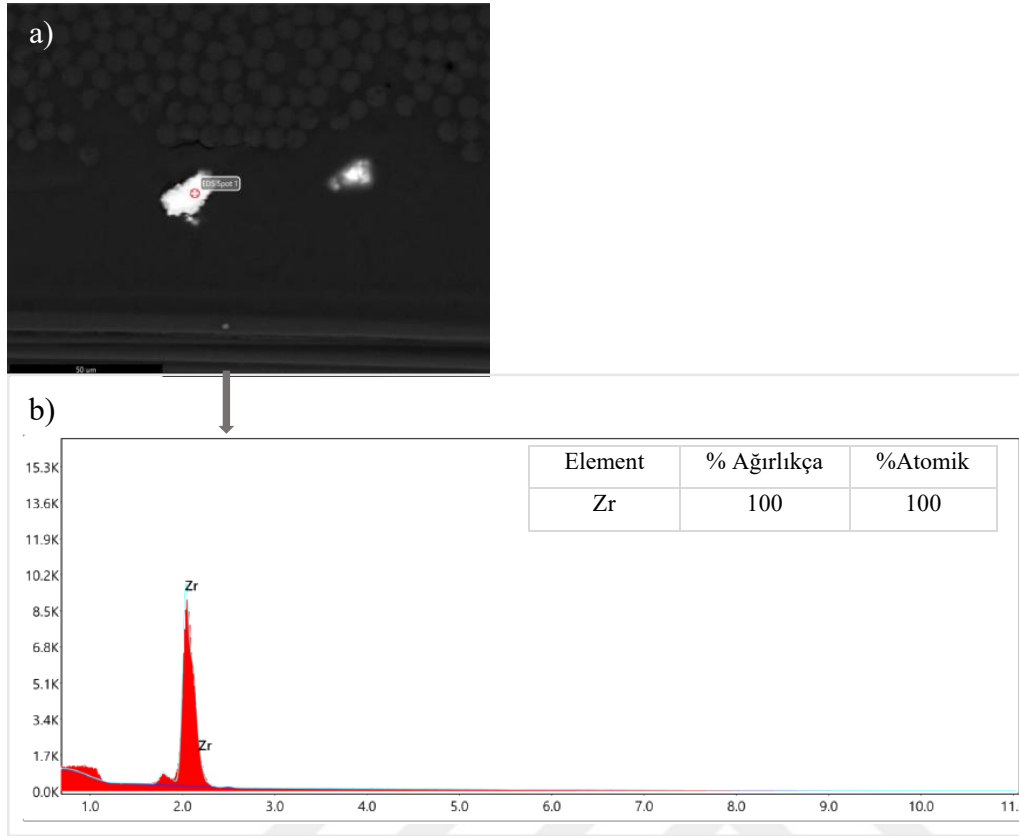


Resim 5.5. a) Katkısız b) %0.5 c) %1 d) %1.5 ve e)%2 Zr katkılı kompozitlerin SEM görüntüleri

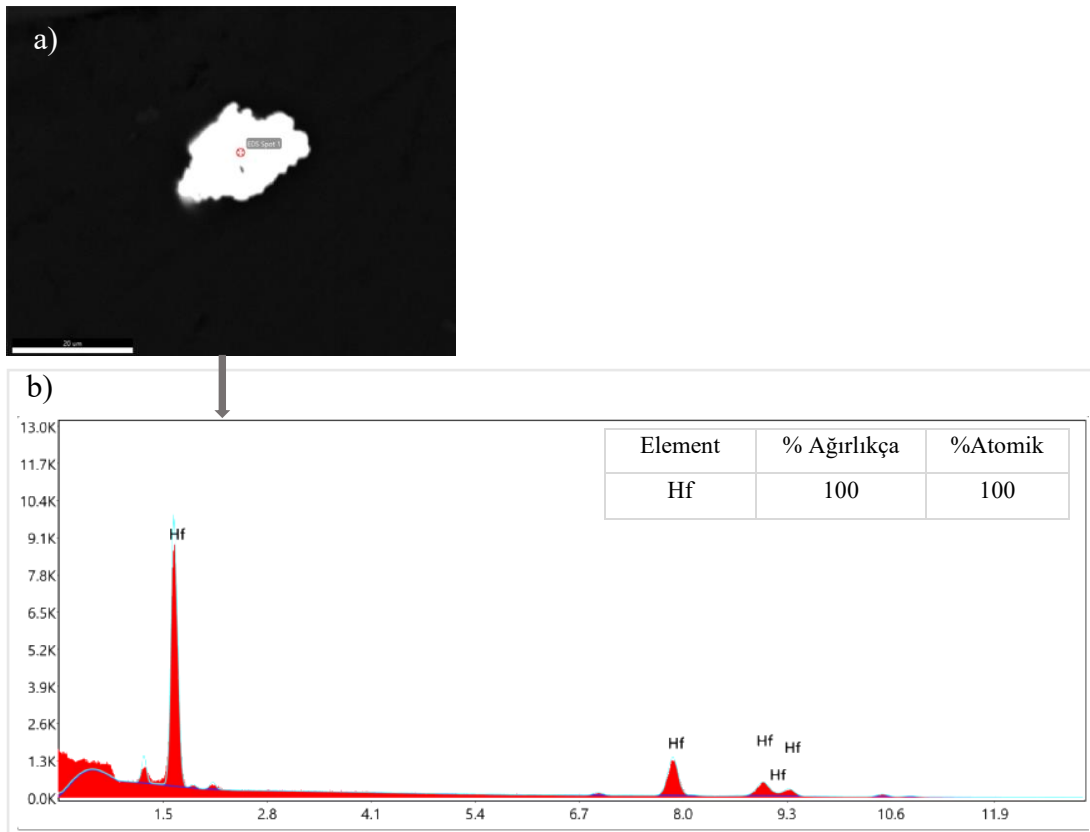


Resim 5.6. a) %0.5 b) %1 c) %1.5 ve d) %2 Hf katkılı kompozitlerin SEM görüntüleri

Reçine içine katılan Zr ve Hf tozlarının varlığını ve dağılımını belirlemek amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) analizi gerçekleştirilmiştir. EDS analizinde Zr ve Hf partiküllerinin reçine içerisindeki konumları elementel düzeyde incelenmiştir. Yapılan EDS analizleri, SEM ile görüntülenen alanlarda Zr ve Hf elementine ait karakteristik piklerin tespit edilmesiyle elementler açık bir şekilde gözlemlenmiştir. Epoksi reçinenin temel bileşenleri olan C ve O elementlerine ait düşük enerjili sinyallerin yanı sıra, yüksek atom numarasına sahip Zr ve Hf tozlarının verdiği güçlü sinyaller sayesinde zirkonyum ve hafniyumun reçine içinde mevcut olduğunu doğrulamıştır. Resim 5.7’de zirkonyumun ve Resim 5.8’de hafniyumun Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüsü, Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) ile elementlere ait karakteristik pikler ve EDS analizleri verilmektedir.



Resim 5.7. Zirkonyumun a) SEM görüntüsü, b) EDS analizi



Resim 5.8. Hafniyumun a) SEM görüntüsü, b) EDS analizi



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, epoksi reçine içine farklı oranlarda Zr ve Hf katkılanarak karbon fiber takviyeli polimer matrisli hibrit kompozitler üretilmiştir. Zr ve Hf katkısının kompozitlerin yapısal, termal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmanın amacı, katkı maddesi olarak literatürde kullanılmamış olan Zr ve Hf tozu ile polimer kompozitlerin termal ve mekanik özelliklerini iyileştirerek havacılık ve uzay sanayinde kullanılabilecek kompozit türü geliştirmek ve literatüre katkı sağlamaktır. Bu amaçla, öncelikle epoksi reçine içine % 0.5, %1, %1.5 ve %2 ağırlık oranlarında Zr ve Hf tozu ayrı ayrı katkılanarak farklı sıcaklıklarda kürlenmiş numunelerin, yoğunluk ölçümleri ve hacimsel hesaplamaları yapılmış, kütleme sıcaklık farkının numune üzerindeki etkisi incelenmiş ve Shore D sertlik ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra aynı oranlarda Zr ve Hf tozu reçine içine katkılanarak el yatırma yöntemi ile karbon fiberlere uygulanmış ve vakum torbalama işlemi ile 23°C'de kürlenerek karbon fiber takviyeli hibrit kompozitler üretilmiştir. Bu kompozitlerin DSC testi, çekme testi ve tabaklar arası kayma mukavemetinin (ILSS) belirlenmesi için eğme testi yapılmış, SEM-EDS ile mikroyapı analizleri yapılmıştır.

Yoğunluk sonuçlarında, Zr ve Hf katkısı tüm numunelerin yoğunluğunu artırdığı görülmüştür. 23°C'de %0.5, %1, %1.5 ve %2 Zr katkı oranlarının tamamında %17.7 artış görülmüştür. %0.5 Zr katkı oranında 23°C'de %17.17, 46°C'de %15.15, 66°C'de %11.11 ve 86°C'de %16.11 artış gözlemlenmiştir. 23°C'de %0.5, %1, %1.5 ve %2 Hf katkı oranlarının tamamında %15.15 artış görülmüştür. %0.5 Hf katkı oranında 23°C'de %15.15, 46°C'de %13.13, 66°C'de %11.1 ve 86°C'de %7.07 artış gözlemlenmiştir.

Hacimsel hesaplamalar sonucunda, katkısız kompozitte hacimsel artış %4.5 g/cm³ olarak elde edilmiştir. 23°C'de; %0.5, %1, %1.5 ve %2 Zr katkılı kompozitlerde hacimsel artış sırasıyla %12.80 g/cm³, %13.50 g/cm³, %13.80 g/cm³ ve %20.90 g/cm³ olarak elde edilmiştir. %0.5 Zr katkılı kompozitlerde 46°C, 66°C ve 86°C'lerde hacimsel artış sırasıyla %13.30 g/cm³, %12.50 g/cm³ ve %12.00 g/cm³ olarak elde edilmiştir. 23°C'de; %0.5, %1, %1.5 ve %2 Hf katkılı kompozitlerde hacimsel artış sırasıyla %19.20 g/cm³, %23.80 g/cm³, %27.20 g/cm³ ve %37 g/cm³ olarak elde edilmiştir. %0.5 Hf katkılı kompozitlerde 46°C, 66°C ve 86°C'lerde hacimsel artış sırasıyla %21.41 g/cm³, %19.56 g/cm³ ve %17.4 g/cm³ olarak elde

edilmiştir. Zr ve Hf katkısının tüm numunelerde hacimsel artışa neden olduğu görülmüştür. %0.5 katkılı numuneler karşılaştırıldığında kütleme sıcaklığının 23°C'den 86°C'ye çıkarılması ile Zr katkılı numunelerde hacimsel artış değerlerinde %0.8 ve Hf katkılı numunelerde %1.8 oranında bir azalma görülmüştür.

Sertlik ölçümü sonucunda, katkılanmış tüm numunelerin sertlik değerlerinin katkısız numuneden düşük olduğu görülmüştür. 23°C'de; %0.5'ten %2'ye kadar Zr katkılı kompozitlerin sertlik değerlerinde sırasıyla %1.17, %4.7, %6.25 ve %6.25 oranlarında azalma görülmüştür. %0.5 Zr katkılı kompozitlerin 46°C'de %8.23, 66°C'de %5.8 ve 86°C'de %2.35 oranında azalma görülmüştür. 23°C'de; %0.5'ten %2'ye kadar Hf katkılı kompozitlerin sertlik değerlerinde sırasıyla %11.7, %10.58, %8.23 ve %8.23 oranında azalma gözlemlenmiştir. %0.5 Hf katkılı kompozitlerde 46°C'de %3.52, 66°C'de %7.05 ve 86°C'de %3.52 oranında azalma gözlemlenmiştir.

Yüzey analizlerinde, 23°C'de kürlen numunelerde Zr ve Hf katkı oranındaki artışın numune yüzeylerinde hiçbir bozulmaya neden olmadığı görülürken, %0.5 partikül katkılı numunelerde kütleme sıcaklığındaki artışın numune yüzeylerinde bozulmaya neden olduğu görülmüştür.

Çekme testi sonucunda, Zr ve Hf katkılı kompozitlerin çekme gerilim değerlerinin katkısız kompozite göre arttığı gözlemlenmiştir. %0.5, %1, %1.5 ve %2 Zr katkılı kompozitlerin çekme gerilimlerinde sırasıyla %9.6, %159.4, %180 ve %37.1 oranlarında artış gözlemlenmiştir. %0.5, %1, %1.5 ve %2 Hf katkılı kompozitlerin çekme gerilimlerinde sırasıyla %120.2, %126.3, %126.33 ve %160.49 oranında artış gözlemlenmiştir. Zr katkılı kompozitlerin çekme gerilim değerindeki maksimum artış %1.5 katkılı kompozitte gözlemlenirken, Hf katkılı kompozitlerin çekme gerilim değerindeki maksimum artış %2 katkılı kompozitte gözlemlenmiştir.

Eğme testi sonucunda, Zr ve Hf katkılı kompozitlerin ILSS değerlerinin katkısız kompozite göre arttığı gözlemlenmiştir. %0.5, %1, %1.5 ve %2 Zr katkılı kompozitlerin çekme gerilimlerinde sırasıyla %3.8, %74.8, %32.35 ve %28.15 oranlarında artış gözlemlenmiştir. %0.5, %1, %1.5 ve %2 Hf katkılı kompozitlerin çekme gerilimlerinde sırasıyla %67.65, %69, %37.45 ve %41.75 oranında artış gözlemlenmiştir. Her iki partikül katkısında da ILSS değerlerindeki maksimum artış %1 katkılı kompozitte gözlemlenmiştir.

DSC testi sonucunda, %0.5, %1 ve %1.5 Zr katkılı kompozitlerin polimerleşme sıcaklık değerlerinde sırasıyla %1.53, %1.42 ve %1.42 oranında azalma gözlemlenirken, %2 katkısında %7.65 oranında artış gözlemlenmiştir. Hf katkı oranlarındaki artışla polimerleşme sıcaklık değerlerinde %0.5’de %5.45, %1’de %6.29, %1.5’da %7.74 ve %2’de %2.74 oranında artış gözlemlenmiştir. Zirkonyumun düşük oranlardaki katkısının, kompozitlerin polimerleşme sıcaklığını düşürdüğü gözlemlenirken, %2 Zr katkısında kompozitlerin polimerleşme sıcaklığının arttığı gözlemlenmiştir. Hafniyumun tüm katkı oranlarında kompozitlerin polimerleşme sıcaklığını artırdığı gözlemlenmiştir.

DSC testi sonucunda, Zr ve Hf katkılı kompozitlerin polimerleşme entalpi değişim değerlerinin katkısız kompozite göre azaldığı gözlemlenmiştir. %0.5, %1, %1.5 ve %2 Zr katkılı kompozitlerin polimerleşme entalpi değişim değerlerinde sırasıyla %29.79, %28.44, %31.79 ve %52.91 oranlarında azalma gözlemlenmiştir. %0.5, %1, %1.5 ve %2 Hf katkılı kompozitlerin polimerleşme entalpi değişim değerlerinde sırasıyla %55.16, %40.41, %63.95 ve %40.75 oranlarında azalma gözlemlenmiştir.

SEM görüntüsü ile Zr ve Hf katkı oranı arttıkça aglomerasyonun arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan EDS analizleri, SEM ile görüntülenen alanlarda Zr ve Hf elementine ait karakteristik piklerin tespit edilmesiyle zirkonyum ve hafniyumun reçine içinde mevcut olduğunu doğrulamıştır.

6.2. Öneriler

- Hf ve Zr katkı oranları değiştirilerek kompozitlerin termal ve mekanik özellikleri incelenebilir.
- Zr ve Hf katkılı reçineler 2500 rpm’de 10 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma süresi veya hızı değiştirilerek çapraz bağların oluşum yoğunluğu ve polimerleşme entalpisine etkisi incelenebilir.
- Aynı reçine içine farklı metal tozları da katkılanarak termal ve mekanik özellikleri incelenebilir.



KAYNAKLAR

1. Bulut, H. (2003). *Balistik Koruyucu Teçhizatın İmalatında Kompozit Malzeme Kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2-4.
2. Dokur, M. Mümtaz (2009). *Karbon Fiber Esaslı Polimerik Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 1-3.
3. Demirhan M. (2021). *Cam Elyaf Takviyeli PA66 Kompozit Malzemenin İşlenebilirliğinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, 10-14.
4. Baştosun Y. (2022). *Halloysit Nanotüp Katkısının Karbon-Aramid Elyaf Takviyeli Nanokompozitlerin Aşınma Davranışına Etkisinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 1-20.
5. Obalı, S. (2015). *Bazalt Lifi ve Dolgu Malzemesi Takviyeli Termoplastik Esaslı Kompozit Yapıların Isı ve Ses Yalıtım Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 7-9.
6. Yalçın, E. Bülent, (2012). *Farklı Kumaş ve Farklı Yöntemlerle Üretilmiş CTP Kompozitlerin Balistik Davranışlarının İncelenmesi*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-18.
7. Akgün, H. (2008). *Poliüretan-Karbon Fiber Kompozitlerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 7-15.
8. Çiçek Ö. F. (2019). *Aramid Elyaf ve Cam Elyaf ile Oluşturulan Kompozit Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı*. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 3-4.
9. Kılıçarslan Y. S. (2020). *Dolgu Malzemesi Türü ve Oranlarının Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Erozyon Aşınma Davranışına Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz, 11-17.
10. Özdemir, B. (2020). *Polimer Matrisli Kompozit Malzeme İmalatı için Vakum Destekli Mekanizmaların Geliştirilmesi ve Performanslarının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 3-9.
11. Ulus, S. (2018). *Balistik Koruyucu Kompozit Plakalarda Bazalt Fiber Kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, 7-17.
12. Arı, A. (2022). *Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 13-19.

13. Memiş Ö. (2009). *Balistik Amaçlı Fiber Takviyeli Polimer Matriksli Kompozitler*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 35-46.
14. Muslu M.F. (2022). *Cam elyaf profil Kompozitlerde Kesit Geometrisinin Eğilme Davranışına Etkisinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 5-7.
15. Yöney H. (2007). *El Yatırma Yöntemi ile Elyaf Takviyeli Kompozit Yapıların Üretilmesi ve Özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 8-15.
16. Yavaş M.O. (2009). *Hafif Silahlara Karşı Bireysel Savunma Amaçlı Kompozit Malzeme Tasarımı ve Balistik Dayanımı*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 49-50.
17. İnternet: Cam elyaf takviyeli kompozitlerde dolgu maddesi kullanımı. URL: <https://kompozit.org.tr/wp-content/uploads/2017/05/Bitirme-Tezi.pdf>, Son Erişim tarihi: 20.10.2024.
18. Aygün H.H. (2020). Lif Açma İşleminin Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozitlerin Mekanik ve Yalıtım Özellikleri Üzerindeki Etkisi. *Tekstil ve Mühendis*, 27, 75-83.
19. Huang Z.M., Guo W. J., Huang H.B. and Zhang C.C. (2021). Tensile Strength Prediction of Short Fiber Reinforced Composites. *Materials*, 14, 2708.
20. Huang Z. M., Zhang C.C. and Xue Y. D. (2019) Stiffness prediction of short fiber reinforced composites. *International Journal of Mechanical Sciences*, 21, 161–162.
21. Liu Y., Zwingmann B. And Schlaich M. (2015). Carbon Fiber Reinforced Polymer for Cable Structures. *Polymers*, 7, 2078–2099.
22. Sun H., Guo G., Memon S.A., Xu W., Zhang Q. and Zhu J-H. (2015). Recycling of Carbon Fibers From Carbon Fiber Reinforced Polymer Using Electrochemical Method. *Composites: Part A*, 78, 10–17.
23. Jia Z., Li T., Chiang F-P and Wang L. (2017). An Experimental Investigation of The Temperature Effect on The Mechanics of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites. *Composites Science and Technology*, 154, 53- 63.
24. Forintosa N and Cziganya T. (2019). Multifunctional application of carbon fiber reinforced polymer composites: Electrical properties of the reinforcing carbon fibers. *Composites Part B*, 162, 331–343.
25. Khayyama H., Jazara RN., Nunnab S., Golkarnarenjib G., Badiib H., Fakhrhoseinib S M., Kumarc S and Naebeb M. (2020). PAN precursor fabrication, applications and thermal stabilization process in carbon fiber production: Experimental and mathematical modelling. *Progress in Materials Science*, 107, 100575.
26. Newcomb B. A. (2016). Processing, structure and properties of carbon fibers. *Composites: Part A*, S1359-835X, 30345-1.

27. Gülcan E. (2019). *Karbon Dokuma Kumaş Takviyeli Kompozit Malzemelerin Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2-5.
28. İnternet: Çift Yönlü Karbon Fiber. URL: <https://afzir.com/tr/products/carbon-wrap-pcw/>. Son Erişim Tarihi: 08.11.2024.
29. Chohan J.S., Boparai K. S., Singh R. and Hashmi M.S.J. (2020). Manufacturing techniques and applications of polymer matrix composites: a brief review. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8, 1-11.
30. Esmer Ö. (2022). *Karbon Fiber Epoksi Matrisli Kompozit Malzemelerin Otoklav Prosesi Parametrelerinin Porozite ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 28-37.
31. Evirgen M.K. (2023). *Havacılık Sektörü için Otoklavda Üretilen Karbon Fiber Takviyeli Epoksi Kompozitlerin Termal ve Mekanik Özelliklerine Otoklav Basıncının Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 14-19.
32. Chen A.Y., Baehr S., Turner A., Zhang Z and Gu G.X. (2021). Carbon-fiber reinforced polymer composites: A comparison of manufacturing methods on mechanical properties. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 4, 468-479.
33. Sevinç E. (2019). *Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Esaslı Çok Katmanlı Piramit Kafes Çekirdekli Çok Hafif Sandviç Plakaların Statik ve Dinamik İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi. Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Bursa, 12.
34. Türk F. (2023). *Kompozit Üretim Prosesinde Karbon Fiber Takviyeli Polimer Yapının Termomekanik Davranışının Python'da Modellenmesi ile Proses Parametrelerinin Optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 21-24.
35. Rajak D. K., Pagar D. D., Menezes P. L and Linul E. (2019). Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications. *Polymers*, 11, 1667
36. İnternet: El yatırma yöntemi ile kompozit parça üretimi. URL: <https://www.researchgate.net/publication/280080526>, Son Erişim Tarihi: 23.11.2024.
37. Saganer M. B. (2023). *Karbon Fiber Takviyeli Havacılık Kompozitlerinin Delme Proseslerinde Nanografen Katkılı MMY Soğutma Metodunun Delik Kalitesine Etkilerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir, 10-15.
38. Okta C. (2021). *Polimer Matris Esaslı Kompozit Üretiminde Kullanılan Farklı Karbon Fiber Yapıların Mekanik Dayanımına Etkisinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 43-48.

39. Barut E. (2016). *Farklı Seramik Katkılı Polimer Matrisli Karbon Fiber Kompozit Yapıların Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 37-40.
40. Karol H. B. (2017). *Farklı Takviye Malzemelerinin İlave Edilmiş Karbon Fiber Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışlarının Analiz Edilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 35-39.
41. Sarıkaya E. (2019). *Doğal Fiber Takviyeli Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Tespiti*. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 45-53.
42. Alarçin S. (2014). *Savunma Sanayiinde Kullanılan Kompozit Malzemelerin Balistik Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 27-31.
43. Kayabaşı G. (2023). *Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Delinmesinin Toz Oluşumunun Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karaman, 14-16.
44. İbrahim M.H. (2022). *Karbon Fiber Takviyeli Kompozitlerde Epoksi Matrise Karbon Nanotüplerin Eklenmesinin Kompozitin Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Samsun, 37-41.
45. Yazan Özcan. S. (2024). *Fabsication and Characterization of a Carbon Fiber/Epoxy Composite Reflector Antenna*. M.Sc. Thesis, Istanbul Technical University Graduate School of Science Engineering and Technology, İstanbul, 30.
46. Esenkaya B. (2019). *Karbon Fiber Kompozitlerin Vakum İnfüzyon Yöntemi ile Üretimi ve Balistik Özelliklerinin Değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 20-22.
47. He H. Li K., Wang J., Sun G., Li Y. and Wang J. (2011). Study on thermal and mechanical properties of nano-calcium carbonate/epoxy composites. *Materials and Design*, 32, 4521–4527.
48. Kim M., Kim S., Kim T., Lee D. K., Seo B. and Lim C-S. (2017). Mechanical and Thermal Properties of Epoxy Composites Containing Zirconium Oxide Impregnated Halloysite Nanotubes. *Coatings*, 7, 231
49. Zhang J., Yao T., Shahsavarian T., Li C., Zhang Z., Jia R. and Diahm S. (2020). Improvement in Anti-static Property and Thermal Conductivity of Epoxy Resin by Doping Graphene. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 27, 2.
50. Li F., Hu K., Li J. and Zhao B. (2001). The friction and wear characteristics of nanometer ZnO filled polytetrafluoroethylene. *Wear*, 249, 877–882.
51. Aydın T. (2021). *Bor Parçacık Katkılı Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 33-49.

52. Medina R., Hauptert F. and Schlarb A K. (2008). Improvement of tensile properties and toughness of an epoxy resin by nanozirconium-dioxide reinforcement. *Journal of Materials Science*, 43, 3245-3252.
53. Diasa H. B., Bernardia M.I.B., Marangonia V.S., Bernardib A.C.A., Rastellic A.N.S. and Hernandesa a.c. (2019). Synthesis, characterization and application of Ag doped ZnO nanoparticles in a composite resin. *Materials Science & Engineering C*, 96, 391–401.
54. Elsafi M., Almousa N., Almasoud F., Almurayshid M., Alyahyaw A. R. and Sayyed M. I. (2022). A Novel Epoxy Resin-Based Composite with Zirconium and Boron Oxides: An Investigation of Photon Attenuation. *Crystals*, 12, 1370.
55. Gull N., Khan S. M., Munawar M. A., Shafiq M., Anjum F., Butt M. T. Z. and Jamil T. (2014). Synthesis and characterization of zinc oxide (ZnO) filled glass fiber reinforced polyester composites. *Materials and Design*, 67, 313–317.
56. Pinto D., Bernardo L., Amaro A. and Lopes S. (2015). Mechanical properties of epoxy nanocomposites using titanium dioxide as reinforcement. *Construction and Building Materials*, 95, 506–524.
57. Florek P., Król M., Jele 'n P. and Mozgawa W. (2021). Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites Doped with Graphene Oxide in Light of Spectroscopic Studies. *Materials*, 14, 1835.
58. Tsantzalis S., Karapappas P., Vavouliotis A., Tsotra P., Kostopoulos V., Tanimoto T. and Friedrich K. (2007). On the improvement of toughness of CFRPs with resin doped with CNF and PZT particles. *Composites: Part A*, 1159–1162.
59. Direk E. (2022). *Production of Composite With Additives By Hand Lay-Up Process*. Master's Thesis, Istanbul Commerce University Graduate School of Natural and Applied Science, Istanbul, 29-41.
60. Fan Y H., Yu S W., Wang H M., Yao Y H., Wang Y. and Wang C H. (2019). Study on preparation and properties of graphene reinforced epoxy resin composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 634, 012044.
61. Wang T-Y., Zhang B-Y., Li1 D-Y., Hou Y-C. and Zhang G-Z. (2020). Metal nanoparticle-doped epoxy resin to suppress surface charge accumulation on insulators under DC voltage. *Nanotechnology*, 31, 40-47.
62. Şen Ö. (2022) *Grafen ve Aramid Takviyeli Epoksi Matrisli Hibrit Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, 55-67.
63. Eletsii A V., Knizhnik A A., Potapkin B V. and Kenny J M. (2015). Electrical characteristics of carbon nanotube-doped composites. *Russian Academy of Sciences*, 58(3), 209-251.
64. Wua Z., Xua H., Xieb W., Wangc M., Wangc C., Gaod C., Gue F., Liua J. and Fua J. (2020). Study on a novel antibacterial light-cured resin composite containing nano MgO. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 188, 110774.

65. İnternet: Henkel-LOCTİTE-EA9396. URL: https://www.henkel-adhesives.com/vn/en/product/industrial-adhesives/loctite_ea_9396_6md.html, Son Erişim Tarihi: 11.12.2024.
66. Merad L., Benyoucef B., Abadie M.J.M. and Charles J.P. (2014). Characterization and Mechanical Properties of Epoxy Resin Reinforced with TiO₂ Nanoparticles. *Experimental Techniques*, 38, 59–66.
67. Akinci A., Sen S and Sen U. (2013). Friction and wear behavior of zirconium oxide reinforced PMMA composites. *Composites: Part B* 56, 42–47.
68. Li J., Peng C., Li Z., Wu Z. and Liac S. (2016). The improvement in cryogenic mechanical properties of nano-ZrO₂/epoxy composites via surface modification of nano-ZrO₂. *The Royal Society of Chemistry*, 6, 61393–61401.
69. Nayak R. K., Mahato K. K. and Ray B.C. (2016). Water absorption behavior, mechanical and thermal properties of nano TiO₂ enhanced glass fiber reinforced polymer composites. *Composites: Part A*, 90, 736–747.
70. Toorchi D., Khosravi H. and Tohidlou E. (2019). Synergistic effect of nano-ZrO₂/graphene oxide hybrid system on the high-velocity impact behavior and interlaminar shear strength of basalt fiber/epoxy composite. *Journal of Industrial Textiles*, 0(0) 1–20.
71. Speight J.G. (2011). Monomers, Polymers, and Plastics. *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes* (Second Edition). United States: Elsevier, 499-537.
72. İnternet: Thermochemistry and Enthalpy. URL: [https://ch301.cm.utexas.edu/section2.php?target=thermo/thermochemistry/enthalpybonds.html#:~:text=Note%3A%20In%20order%20to%20break,change%20\(%CE%94H%20%3C%200\)](https://ch301.cm.utexas.edu/section2.php?target=thermo/thermochemistry/enthalpybonds.html#:~:text=Note%3A%20In%20order%20to%20break,change%20(%CE%94H%20%3C%200).). Son Erişim Tarihi: 19.12.2024.
73. Rubab Z., Afzal A., Siddiqi H. and Saeed S. (2014). Augmenting thermal and mechanical properties of epoxy thermosets: The role of thermally-treated versus surface-modified TiO₂ nanoparticles. *Materials Express*, 4, 2158-5849.
74. Dorigato A., Pegoretti A., Bondioli F. and Messori M. (2010). Improving Epoxy Adhesives with Zirconia Nanoparticles. *Composite Interfaces*, 17, 873–892.
75. İnternet: Effect of Pigment on Thermal Reaction and Flexural Properties of an Epoxy Resin System. URL: yhou@downholetechnology.com. Son Erişim Tarihi: 12.12.2024.
76. Al-Ajaj I.A., Abd M. M. and Jaffer H.I. (2013). Mechanical Properties of Micro and Nano TiO₂/Epoxy Composites. *International Journal of Mining*, 1, 93-97.



Gazili olmak ayrıcalıktır