

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK SICAKLIK ENDÜSTRİYEL TEKERLEK UYGULAMALARI İÇİN POLİMER ESASLI
KOMPOZİT MALZEME GELİŞTİRİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mücahit KOCAMAN

**TEMMUZ 2022
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK SICAKLIK ENDÜSTRİYEL TEKERLEK UYGULAMALARI İÇİN POLİMER
ESASLI KOMPOZİT MALZEME GELİŞTİRİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Mücahit KOCAMAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"YÜKSEK LİSANS (METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 31 / 05 / 2022

Tezin Savunma Tarihi : 06 / 07 / 2022

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hamdullah ÇUVALCI

Trabzon 2022

ÖNSÖZ

Ülkemizde ve dünyada gelişen teknoloji ile endüstriyel alanlarda beklentiler değişmiştir. İstenilen özellikleri elde etmek için geleneksel kompozit malzemelerin yetersiz kalması hibrid kompozit malzemelerin kullanımını arttırmıştır. Bu artan ilgiyle birlikte yüksek sıcaklığa dayanıklı polimer esaslı kompozit malzemelerde sürekli iyileştirme ve geliştirme çalışmalarını ortaya çıkarmıştır. Yüksek sıcaklığa dayanıklı kompozit malzemelerde üretim sonrası uygulanması gereken yöntemlerin en önemlisi dayanıklılık, yüksek sıcaklık ve alev gibi durumlarındaki süreçlerdir. Bu süreçte kompozit malzemelerde takviye malzemelerinin katkı oranının farklılığından mekanik ve termal özelliklerin nasıl etkilendiği önem arz etmektedir. Bundan dolayı grafit partikülleri ve cam elyaf ilavesinin novalak reçine üzerine etkisi incelenmiştir.

Öncelikle yapmış olduğum çalışmaların her aşamasında sıkılmadan her zaman bana destek olan, kıymetli bilgi, birikim ve tecrübesi ile beni yönlendiren, bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük emeği olan değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Hamdullah ÇUVALCI'ya şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ndeki saygı değer Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI, Doç. Dr. Mustafa ASLAN ve Doç. Dr. Temel VAROL hocalarıma, Arş. Gör. Onur GÜLER ve Arş. Gör. Serhatcan Berk AKÇAY'a çalışmalarımda gösterdikleri ilgi ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: 'FYL-2020-8412'. Son olarak hayatımın her anında olduğu gibi lisansüstü eğitimim süresince de maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan, beni cesaretlendiren ve bu günlere gelmeme yardımcı olan sevgili aileme sonsuz teşekkür eder saygılarımı sunarım. Ayrıca çalışmalarım boyunca desteğini, bana olan güvenini benden esirgemeyen ve çalışmalarım sırasında sabır gösterdiği için sevgili eşime de sonsuz teşekkürler ederim.

Mücahit KOCAMAN

Trabzon-2022

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yüksek Sıcaklık Endüstriyel Tekerlek Uygulamaları İçin Polimer Esaslı Kompozit Malzeme Geliştirilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Hamdullah ÇUVALCI sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 06/07/2022

Mücahit KOCAMAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Çalışmanın Amacı	2
1.3. Kompozit Malzemeler	4
1.3.1. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları.....	6
1.3.2. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler ve Arayüz	8
1.4. Polimerlerin Yanması	12
1.5. Reçineler.....	16
1.6. Termoset Reçineler.....	17
1.7. Fenolik Reçinelere Genel Bakış	19
1.7.1. Fenolik Reçinelerin Tarihi.....	20
1.7.2. Fenolik Reçinenin Kimyası ve Novalak Reçineler.....	20
1.7.3. Fenolik Reçinelerin Alev Dayanımı	22
1.7.4. Fenolik Reçinelerin Uygulamaları	24
1.8. Takviye Malzemeleri.....	27
1.8.1. Cam Elyaf	27

1.8.2.	Grafit Tozu	30
1.9.	Üretim Yöntemleri.....	32
1.9.1.	Basınçlı Kalıplama Yöntemi (Sıcak Presleme)	32
2.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	34
2.1.	Deneylerde Kullanılan Matris ve Takviye Malzemeler	34
2.1.1.	Polimer Matris	34
2.1.1.1.	Novalak reçine.....	34
2.1.2.	Katkı Malzemeleri	35
2.1.2.1.	Cam Elyaf Tozu.....	35
2.1.2.2.	Grafit Tozu	36
2.2.	Numune Üretimi	37
2.3.	Deneyde Kullanılan Ekipmanlar Ve Deneysel Yöntemler.....	41
2.3.1.	Yoğunluk ve Porozite Tayini.....	41
2.3.2.	Mekanik Karakterizasyon.....	42
2.3.2.1.	Sertlik Testi	42
2.3.2.2.	Çekme Mukavemeti Testi.....	43
2.3.2.3.	Eğme Dayanamı Testi	45
2.3.3.	Yüzey Karakterizasyonu.....	46
2.3.3.1.	Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesi (SEM-EDS).....	47
2.3.4.	Termal Karakterizasyon	49
2.3.4.1.	Limit Oksijen İndisi (LOI) Test Metodu	49
2.3.4.2.	TGA Testi	51
3.	BULGULAR	52
3.1.	Deney Sonuçları	54
3.1.1.	Numunelerin Yoğunluklarının ve Porozitelerinin İncelenmesi.....	54
3.1.2.	Sertlik Testi Sonuçları	55
3.1.3.	Çekme Mukavemeti Testi Sonuçları	56

3.1.4.	Eğilme Dayanamı Testi Sonuçları	57
3.1.5.	TGA Analizi Sonuçları	58
3.1.6.	Limit Oksijen İndisi (LOI) Testi Sonuçları	62
3.1.7.	SEM-EDS Analizleri	64
4.	TARTIŞMA	70
4.1.	Yoğunluk ve Porozite	70
4.2.	Sertlik Testi	71
4.3.	Çekme Mukavemeti ve Elastisite Modülü	72
4.4.	Eğilme Mukavemeti	74
4.5.	TGA Testi	75
4.6.	LOI Testi	77
5.	SONUÇLAR	80
6.	ÖNERİLER	81
7.	KAYNAKLAR	82
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans

ÖZET

YÜKSEK SICAKLIK ENDÜSTRİYEL TEKERLEK UYGULAMALARI İÇİN POLİMER ESASLI KOMPOZİT MALZEME GELİŞTİRİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mücahit KOCAMAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Hamdullah ÇUVALCI
2022, 95 Sayfa

Bu çalışmada cam elyaf ve grafit katkı oranlarının novalak esaslı fenolik reçine ile birlikte olan etkileri incelendi. Üretilen malzemelerin termal bozunma ve yanma dirençlerinin yanı sıra fiziksel ve mekanik özellikleri de incelemeye alınmıştır. Ayrıca novalak matriste cam elyaf ve grafit partiküllerinin beraberce olan etkisi incelendi. Üretilen kompozit numunelerin karakterizasyonu sürecinde; fiziksel özelliklerin belirlenmesi için porozite ve yoğunluk (Arşimet yöntemi), mekanik özelliklerinin belirlenmesi için sertlik, çekme ve üç nokta eğilme testleri, termal özelliklerin belirlenmesi için termogravimetrik analiz (TGA), matris ve katkı parçacıklarının morfolojisi, hibrit kompozit tozların mikro yapısı ve kırılma yüzeylerinin karakterizasyonunda taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS), alev geciktiricilik özelliklerinin belirlenmesi için ise limit oksijen indisi (LOI) testleri uygulandı. Elde edilen termogravimetrik verilere göre novalak reçineye ilave edilen cam elyaf ve grafit partikülleri sayesinde bozunan kütle miktarı azalırken bozunma sıcaklıklarının arttığı gözlemlendi. Saf novalak malzemesinin sertlik, maksimum çekme ve eğilme mukavemeti sırasıyla 32 HRM, 12 MPa ve 20.3 MPa iken, optimum kompozit numunede (%30 cam elyaf, %40 grafit) 98 HRM, 33.8 MPa ve 77.4 MPa olarak tespit edildi. Saf novalak malzemesinin LOI değeri ise %37 iken, üretilen kompozit malzemeler arasında >%50'ye kadar bir artış ile yüksek alev geciktiricilik tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Novalak Esaslı Fenolik Reçine, Hibrit Kompozitler, Alev Geciktiricilik

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION AND DEVELOPMENT OF POLYMER-BASED COMPOSITE MATERIAL PROPERTIES FOR HIGH TEMPERATURE INDUSTRIAL WHEEL APPLICATIONS

Mücahit KOCAMAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Metallurgy and Materials Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Hamdullah ÇUVALCI
2022, 95 Pages

In this study, the effects of glass fiber and graphite additive rates on novolac based phenolic resin were investigated. The physical and mechanical properties of the produced materials, as well as their thermal decomposition and combustion resistance, were also examined. In addition, the effect of the combined effect of glass fiber and graphite particles in the novolac matrix was investigated. Samples containing glass fiber and graphite in different rates will be prepared. In the characterization process of the produced composite samples; porosity and density(Archimedes' method) to determine of physical properties, hardness, tensile and flexural tests to determine of mechanical properties, thermogravimetric analysis (TGA) to determine thermal properties, scanning electron microscopy (SEM-EDS) for morphology of matrix and additive particles, microstructure of hybrid composite powders characterization of fracture surfaces, and limit oxygen index (LOI) tests to determine flame retardance properties were applied. According to the obtained thermogravimetric datas, it was observed that the decomposition temperature increased while the amount of decomposed mass decreased thanks to the glass fiber and graphite particles added to the novolac resin. While the hardness, maximum tensile and flexural strengths of pure novolac material were 32 HRM, 12 Mpa and 20.3 Mpa, respectively, the optimum composite sample (30% glass fiber, 40% graphite) was determined as 98 HRM, 33.8 Mpa and 77.4 Mpa. While the LOI value of the pure novolac material was 37%, high flame retardancy was determined with an increase of up to >50% among the composite materials produced.

Key Words: Novolac-based Phenolic Resin, Hybrid Composites, Flame Retardancy

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Takviye elemanı tipine göre kompozitlerin şematik yapısı.....	5
Şekil 2. Kompozit malzemelerin oluşumu	6
Şekil 3. Farklı malzemelerin çeşitli özelliklerinin karşılaştırılması	7
Şekil 4. Monomerlerin bağlanma işlemi.....	9
Şekil 5. Kompozit malzemelerin fazları	10
Şekil 6. Yangın döngüsünün şematize gösterimi.	12
Şekil 7. Termoset polimer zincirlerin çapraz bağlanması	18
Şekil 8. Resol ve novalak reçinelerin hazırlanıldığı koşullar ve kimyasal tepkimeleri.....	21
Şekil 9. Novalak reçinenin sertleştirme işlemi	21
Şekil 10. Fenolik reçine kalıplama ürünleri.....	25
Şekil 11. Fenolik reçinelerin otomotiv uygulamaları	26
Şekil 12. Cam takviye örnekleri: öğütülmüş, kırılmış, fitil ve dokuma	29
Şekil 13. Grafit	30
Şekil 14. Grafitin kimyasal yapısı	31
Şekil 15. Tek eksenli sıcak presleme işleminin kesit olarak gösterilişi.....	32
Şekil 16. Kullanılan novalak reçine tozu.....	34
Şekil 17. Kullanılan cam elyaf tozu.....	35
Şekil 18. Kullanılan grafit tozu	36
Şekil 19. Kompozit üretimi işlem akış diyagramı	37
Şekil 20. Elektronik terazi	38
Şekil 21. (a) Kalıbın SolidWorks çizimi (b) Tek yönlü sıcak pres	38
Şekil 22. (a) Kalıptan çıkarılan kompozit levha (b) Deneyler için kompozit levhadan standartlara göre numune alınması	39
Şekil 23. Kompozit levhadan alınan test örnekleri.....	40
Şekil 24. Arşimet yöntemi deney düzeneği	41
Şekil 25. Sertlik ölçüm cihazı.....	42
Şekil 26. Çekme testi cihazı ve deney anı	43
Şekil 27. Çekme testi numunesi	44
Şekil 28. 3 nokta eğme deneyi düzeneği	45
Şekil 29. Eğme testi cihazı görüntüsü ve deney anı	46

Şekil 30. Tozların Morfolojisi ve Taramalı elektron mikroskobu ve EDS ünitesi.....	47
Şekil 31. (a) Pvd kaplama ünitesi (b) Au- Pt kaplanmış numuneler (c) Kullanılan malzemelerin Au-Pt kaplanmış hali	48
Şekil 32. LOI test düzeneği	49
Şekil 33. LOI cihazı.....	50
Şekil 34. TGA cihazı	51
Şekil 35. (a) Cam elyafın taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü(2000x) (b) Grafit partiküllerinin SEM görüntüsü (5000x) (c) Novalak reçine parçacık morfolojisinin SEM görüntüsü(1000x) (d) N4 kodlu kompozit tozlarının morfolojisi	52
Şekil 36. Porozite-bağıl yoğunluk grafiği.....	54
Şekil 37. Sertlik deneyi sonrası numune yüzeyi.....	55
Şekil 38. Rockwell sertlik değerleri	55
Şekil 39. Çekme mukavemeti ve elastite modülü değerleri.....	56
Şekil 40. Eğilme dayanımı değerleri	57
Şekil 41. Saf novalak reçinenin TGA diyagramı.....	58
Şekil 42. N1 kompozit numunesi için TGA diyagramı	59
Şekil 43. N2 kompozit numunesi için TGA diyagramı	59
Şekil 44. N3 kompozit numunesi için TGA diyagramı	60
Şekil 45. N4 kompozit numunesi için TGA diyagramı	61
Şekil 46. N5 kompozit numunesi için TGA diyagramı	61
Şekil 47. N6 kompozit numunesi için TGA diyagramı	62
Şekil 48. (a) N3 ve (b) N5 hibrit kompozit numunelerinin yanma davranışı.....	63
Şekil 49. N1 kodlu numunenin kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü(500x)	64
Şekil 50. N2 kodlu numunenin kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü(500x)	65
Şekil 51. N3 kodlu numunenin kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü(500x)	65
Şekil 52. N4 kodlu numunenin kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü(500x)	66
Şekil 53. N4 numunesinin EDS analizi (a) Karbon dağılımı (b) Silisyum dağılımı (c) Oksijen dağılımı (d) Elemental yüzdelik dağılımı.....	67
Şekil 54. N5 kodlu numunenin kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü(500x)	68
Şekil 55. N6 kodlu numunenin kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü(500x)	69

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Kompozit ve klasik malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması	7
Tablo 2. Bazı plastik matris malzemelerin özellikleri	18
Tablo 3. Cam elyaf çeşitlerinin mekanik özellikleri.....	28
Tablo 4. Cam elyafın genel özellikleri	35
Tablo 5. Grafitin genel özellikleri	36
Tablo 6. Belirlenen numuneler ve ağırlıkça oranları	40
Tablo 7. Bazı polimerlerin LOI değerleri	50
Tablo 8. Saf novalak reçinenin ve kompozit malzemelerin LOI değerleri	63

SEMBOLLER DİZİNİ

ρ	: Yoğunluk, gr/cm ³
m	: Kütle, gr
v	: Hacim, cm ³
dk	: Dakika
mm	: Milimetre
μ m	: Mikrometre
mg	: Miligram
g	: Gram
kg	: Kilogram
%	: Yüzde
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Birliği)
ATH	: Alüminyum trihidroksit
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
EDS	: Energy Dispersive Spectrometry
EGR	: Egzoz Gazı Devridaim Sistemi
F	: Fenol
GPa	: Gigapaskal
HMTA	: Hekzametilentetramin
HRM	: Rockwell M
ISO	: Uluslararası Standartlar Teşkilatı
LOI	: Limit Oksijen İndeksi
MPa	: Megapaskal
N0	: Ağırlıkça Novalak (%100)
N1	: Ağırlıkça Novalak (%60) + Cam elyaf tozu (%10) + Grafit tozu (%30)
N2	: Ağırlıkça Novalak (%50) + Cam elyaf tozu (%20) + Grafit tozu (%30)
N3	: Ağırlıkça Novalak (%40) + Cam elyaf tozu (%20) + Grafit tozu (%40)
N4	: Ağırlıkça Novalak (%30) + Cam elyaf tozu (%30) + Grafit tozu (%40)
N5	: Ağırlıkça Novalak (%20) + Cam elyaf tozu (%40) + Grafit tozu (%40)
N6	: Ağırlıkça Novalak (%10) + Cam elyaf tozu (%40) + Grafit tozu (%50)
P	: Formaldehit

PAH	: Polisiklik aromatik hidrokarbonlar
PAN	: Poliakrilonitril
PUR	: Poliüretan
PVD	: Physical vapor deposition
SLG	: İçi boş seramik küreler
SP	: Sıcak pres
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SiC	: Silisyum karbür
TGA	: Termogravimetrik Analiz
TPP	: Trifenil fosfat
TS	: Türk Standartları

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Yüksek sıcaklık performans tekerlek kullanımı günümüzde tıp alanında, otoklav uygulamalarında buhara dayanacak kadar, dökümhane, tavlama fırınlarında, endüstriyel mutfak ve gıda makineleri gibi yüksek sıcaklığa ve yüksek ağırlığa dayanacak bir şekilde kullanımı giderek artmış ve bu tür alanlarda hayati önem kazanmıştır. Yüksek performans tekerlek teknolojisi ihtiyaçları karşılayabilecek düzeye gelecek şekilde sürekli gelişim halindedir. Bu iyileştirmelerin büyük bir bölümünde mühendislik malzemelerinin gelişmesi çalışmaları yer almaktadır.

Sanayi alanında üretim yapan firmalar yedek parça, üretilen ürünlerini, üretimde gerekli malzemeler ve daha birçok eşyanın bir yerden bir yere taşınması için çeşitli arabaların kullanımı tercih etmektedir. Bu arabalar ile yüksek ağırlığa sahip olan malzemelerin problem yaşamadan yer değiştirmesi sağlanabilmektedir. Ayrıca sınırlı mekanik dayanıklılığından dolayı kenar veya eşiklere çarpma önlenmediği takdirde kırılması muhtemeldir. Yine sanayi alanında yüksek sıcaklık fırınlarında kullanılan tekerleklerin de yüksek sıcaklığa dayanamayıp özelliklerini kaybettiği gözlenmiştir.

Son yıllarda, endüstriyel alanda polimerler hızlı bir şekilde özellikle demir, çelik gibi metallerin önüne geçmeye başlamıştır. Tercih edilmesinin nedenleri olarak düşük maliyet, hafiflik, kolay işlenebilme gibi özellikler gösterebilir. Bu özelliklerinden dolayı polimerlere bazı katkı maddeleri katılarak istenilen mekanik, termal özellikler ve estetik görünüm kazandırılabilir. Bu avantajlı özelliklerinden dolayı sanayi tipi tekerleğin imalatında polimerler tercih edilmektedir.

Günümüzde sabit veya hareketli olan birçok malzeme polimer malzemelerden üretilmektedir. Özellikle hareketli malzemelerin üretiminde kullanılan polimer malzemelerin fiziksel, mekanik, alev geciktiricilik ve termal özelliklerin uygun olup olmadığı büyük önem taşımaktadır.

Bu nedenle polimer malzemelerin bu davranışlarını birçok yönden gözlemleyebilmek için bazı test yöntemleri yapılmıştır ve çok sayıda test cihazı üretilmiş ve geliştirilmiştir. Bu testler sonucu ortaya çıkan veriler yardımı ile polimerlerin sahip oldukları özelliklere göre hangi alana daha uygunsa o alanlarda kullanılması sağlanmaktadır. Malzemedan istenen performans ve özelliğe göre, üretilen malzeme, istenilen özellikleri içerisinde oluşturacak biçimde belli sınır çerçevesinde üretilip geliştirilebilmektedir. Tüm bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda, sanayi tip tekerlek de polimer malzemelerden üretilmektedir. Bu çalışmada da cam elyaf ve grafit takviyeli novalak tipi fenolik reçineden imal edilmiş malzemelerin aleve dayanıklılık ve termal performansı yönünden test edilmiştir. Bu çalışmada hem mukavemetli hem de yüksek sıcaklıktan dolayı bozunmayı en aza indirmek amacıyla bir hibrid kompozit malzeme üretilmiştir.

1.2. Çalışmanın Amacı

Endüstri ve sanayide nerede olursak olalım bu alanlarda kullanılan endüstriyel tekerleklerin güvenilirliği açısından istenilen en önemli özellik herhangi bir durumdan dolayı yüksek sıcaklık ile etkileşim halinde olduğunda tutuşmama özelliği göstermeleridir. Bu nedenle bu özellik, pek çok farklı endüstri kollarında son yıllarda artan bir önem arz etmektedir. Yüksek sıcaklığa maruz kalınması durumu için ısıya dayanıklı pek çok kompozit malzeme geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bu nedenle tüm sistemler bu ortamlarda bulunan malzemelerin alev dayanımı kazandırılmış kompozit malzemeler olması ile daha kullanışlı hale getirilebileceklerdir. Bu çalışmanın amacı;

- ❖ Titreşimi absorbe etme özelliği oldukça yüksek olan,
- ❖ Yanmazlık özelliğinin geliştirilmiş olan,
- ❖ Çalıştığı zemine zarar vermeyen,
- ❖ Yüksek taşıma kapasitesine sahip olan bir endüstri ve sanayi tip tekerlek malzemesi üretmeyi amaçlamaktadır.

Bu çalışmada polimer kompozit esaslı yeni bir malzemenin basınçlı kalıplama (sıcak presleme) yöntemi ile geliştirilmesi ve bu malzemenin özelliklerini fiziksel karakterizasyon olarak yoğunluk ve porozite değerleri, mekanik karakterizasyon yöntemleri olan çekme mukavemeti, sertlik deneyleri ve eğme testleri, yüzey karakterizasyon yöntemleri olarak TGA(Termogravimetrik analiz) testi, yanma deneyi olarak LOI(Limit Oksijen İndeksi) deneyi, kırılma yüzeylerinin incelenmesi ise Taramalı Elektron Mikroskobu(SEM) ile incelenmiştir. Bunun yanında, kompozitin optimum bileşim oranı da belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların sonucu olarak elde edilen optimum (ağırlıkça %40 grafit, %30 novalak reçine, %30 cam elyaf) bileşim oranı en uygun olanı seçildi. Deney sonuçlarında, üretilen kompozit malzemenin yeni özellikleri ortaya konuldu.

Yapılan geçmiş çalışmalarda üretilen polimer malzemelere alev geciktirici olarak birçok katkı malzemesi konulmaktadır. Ülkemizde yanmazlık ve alev geciktirici malzemeler üzerine geniş bir literatür taraması yapıldığında polimerlere yanmazlık özelliği kazandırmak ve artırmak amacıyla yapılan çok az sayıda çalışma mevcuttur (Kahraman, 2014). Ayrıca geçmiş çalışmalarda mekanik özellikleri geliştirmek amacı ile cam elyaf tozunun değişik ağırlık oranları ile güçlendirilmiş fenolik reçine örnekleri değerlendirilmeye alınmıştır. Yapılan değerlendirme sonucunda, fenolik reçine (matris) ve cam elyaf tozu (güçlendirici) arasındaki etkileşime, malzeme özelliğinin iyileştirilmesi için kompozite başka katkı maddelerin eklenmesinin tartışılması gerektiği önerilmiştir (Ku vd., 2010). Önceki yapılan çalışmalarda üretilen polimer matrisli kompozitlerde, matris malzemesi genellikle cam elyaf ile güçlendirilmiştir. Cam elyaflar, kolay bulunabilirlikleri ve düşük maliyetleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, takviyeler için hem fiber hem de partiküller kullanılırsa bu kompozitlerin mukavemeti ve sertliği artar (Bhattacharjee vd., 2020). İki veya daha fazla katkı malzemesinin tek bir matris halinde takviye edilmesi, malzeme özelliklerinde büyük bir çeşitliliğe sahip hibrit kompozitlerin geliştirilmesine yol açar (Samal vd., 2009). Mühendislik uygulamaları için yeni bir polimer kompozit geliştirildiğinde performans iyileştirme en önemli kriterlerden biridir. Geleneksel, iki fazlı kompozitler hala geliştiriliyor olsa da giderek daha fazla sayıda araştırmacı, ek bir üçüncü faz kullanmanın bir kompozitin mekanik performansını artırmanın veya ona işlevsel özellikler kazandırmanın etkili bir yolu olabileceğini düşünüyor. Bu üçüncü aşama, başka bir matris veya bir takviye malzemesi olabilir (Molnár vd., 2014; Mészáros vd., 2016).

Mevcut araştırma, grafit partiküllerini de ilave ederek kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmesine katkı vermesini önemsemektedir. Çünkü farklı katkı türlerini

tek bir matriste birleştirmenin potansiyel avantajı birçok araştırmacı tarafından açıklanmıştır (Bunsell ve Harris, 1974; Fischer ve Marom, 1987; Josepha vd., 2002; Pegoretti vd., 2004).

Novalak reçine, iyi alev geciktirmesi, elektrik yalıtımı, boyutsal kararlılığı, kimyasal direnci ve önemli karbon kömürleşme verimi nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır (Park ve Cho, 2000; He vd., 2013). Bu özelliklere sahip olan novalak fenolik reçine üzerine sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

Önceki yapılan çalışmalarda yanmazlık özelliğini sağlayan durum değişik oranlarda katılan alev geciktirici katkı malzemelerinden kaynaklanmaktadır. Yine bu doğrultuda literatürde novalak fenolik reçineyi kullanarak yüksek ısıya dayanıklı, endüstride kullanılan sanayi tipi teker malzeme üretimi azdır. Ancak, bu çalışma kapsamında yapılan çalışmalar, cam elyaftan başlayarak endüstriyel boyutlarda uygulanabilme özelliğini taşıyan yüksek ısıya dayanıklı novalak fenolik reçine ve katkı malzemesi olarak da grafitin eklenmesi ile üretilen malzemenin baştan sona optimizasyon ve karakterizasyon işlemlerini içermesi sebebiyle yenilikçi niteliğinde bir çalışmadır.

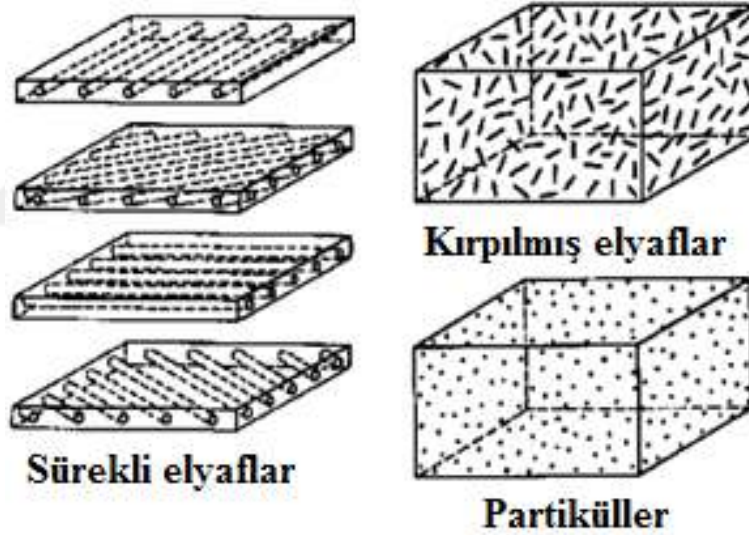
1.3. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler günümüzde birçok alanın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Birçok sektörde kullanılan bu malzeme grubu hala daha gelişimini sürdürmektedir. Günümüzde kompozit malzemeler, sağlık hizmetlerinden uzay ve havacılığa, otomotivden askeri teçhizata kadar çok geniş bir uygulama alanına sahip olup, teknolojinin ilerlemesi sayesinde gelişimini hızlandırmaya devam etmektedir (Saba ve Jawaaid, 2018). Bu malzemelerden beklentiler, kullanıldıkları sektörde yüksek performans ve beklenen uzun ömür özellikleri olarak kısaca sıralanabilir. Bu bakımdan kompozit malzemeler, içeriğinde bulunan her bir bileşenin özelliklerinden faydalanan ve geleneksel malzemelerden oldukça farklı üretim teknolojilerine sahip üstün malzemelerdir. Genel bir tanım yapmak istenirse, kompozit, makroskopik düzeyde bir araya getirilen iki veya daha fazla bileşenden oluşan bir malzemedir. Kompozit bir malzemenin içeriğinde bulunan bileşenleri makro düzeyde ayırt edilebilir ve bu da onları metal alaşımlarından farklı kılar. Malzeme içeriğinde bulunan bileşenlerden biri matristir, diğeri ise takviyedir.

Kompozit malzemeler genellikle, uygulama alanında tek başına kullanıldığında daha düşük özellikler gösterecek olan matris malzemesi içerisine takviye malzemesinin üstün özelliklerinin yerleştirilmesiyle oluşturulur. Burada iç kısma yerleştirilen elyaf, yükü

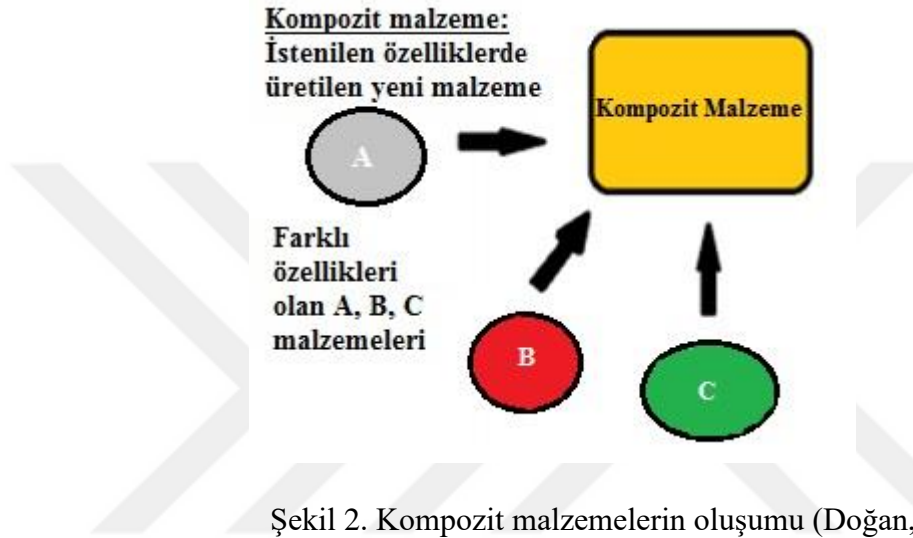
mekanik olarak büyük ölçüde destekleyen bölümdür, matris ise dışarıdan gelen etkiyi absorbe ederek elyafa iletir ve takviye malzemesinin konumunu korur. Bu malzeme sisteminin parçaları fiziksel ve kimyasal özelliklerini korurken yüksek performans sergiler (Yıldızhan vd., 2018).

Matris olarak belirtilen faz takviye elemanlarını bir arada ve düzende, sıkı bir şekilde tutar. Takviye elemanları ise matris fazını özellikle mukavemet yönü ile desteklemekle birlikte ısı ve elektriksel iletkenlik özellikleri yönünden de destekler. Ayrıca kompozitler matris ve takviye elemanları haricinde yapışma yüzeyini oluşturan bir fazı da barındırabilir. Kompozitler bu fazın oluşumunda bazı katkıları da içerebilirler (Ulcay vd., 2002). Kompozitler takviye bakımından partikül takviyeli, elyaf takviyeli ve yapısal takviyeli olarak üç ana gruba ayrılırlar. Şekil 1'de kompozitlerde farklı elyaf gruplarında olan kompozit yapıları şema olarak verilmiştir.



Şekil 1. Takviye elemanı tipine göre kompozitlerin şematik yapısı (Yılmaz, 2008).

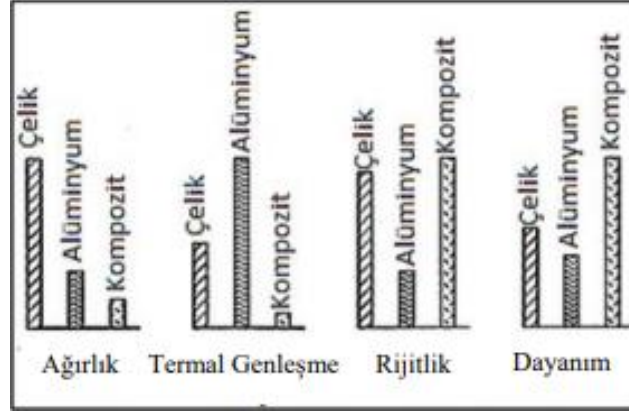
Kompozit malzemelerin oluşum prensibi şekil 2'de özetlenmiştir. Takviye tipi, matris özellikleri, geometri ve faz dağılımı dahil olmak üzere kompozit malzemelerin özelliklerini çok sayıda faktör kontrol eder. Malzeme sisteminin homojenliği, donatıların matristeki dağılımına bağlıdır. Takviye dağılımının yüksek düzensizliği, kompozit malzemeyi daha heterojen hale getirir, böylece daha zayıf alanlarda arıza olasılığını arttırır. Takviye, kompozit sistemdeki ana yük taşıyıcı bileşendir (Wang vd., 2011).



1.3.1. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozit malzemelerin diğer malzemelere göre geliştirilmiş özellikler genellikle kendi başlarına elde edilemezler. Farklı özelliklere sahip malzemelerin yeni bir malzeme üretilmesi için bir araya getirilmesi sonucunda aşağıdaki bazı özellikler elde edilebilmektedir. Kompozit malzemeler, aşağıdakiler gibi bir dizi fayda sağlar:

- Yüksek dayanım,
- İyi termal ve elektrik yalıtkanlık
- Mkemmел aşınma direnci,
- Yüksek sıcaklık kapasitesi,
- Hafiflik
- Uzun vadeli dayanıklılık (Powell ve Green, 2021).



Şekil 3. Farklı malzemelerin çeşitli özelliklerinin karşılaştırılması (Türkmen, 2012).

Bu faydaları ve çok yönlülüğü olan kompozitler, olağanüstü yeteneklere sahip olağanüstü ürünlerin üretimini mümkün kılarak bu kadar yaygın olacak şekilde ortam oluşturmıştır. Otomotiv, havacılık, savunma, elektronik ve inşaat sektörlerinden rüzgâr enerjisine, spor ve tüketim mallarına ve denizcilik endüstrisine kadar değişik birçok endüstride kullanılır. Bu yüzden kompozit malzeme pazarı, benzeri görülmemiş bir yükseliş kaydetti (Powell and Green, 2021).

Tablo 1. Kompozit ve klasik malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması (Özer, 2015).

Malzeme Cinsi	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastik Modülü (GPa)	Özgül Çekme Dayanımı (G/p)	Özgül Modülü (E/ p)	Uzama Miktarı (%)
Alüminyum	2,8	84	71	30	25	-
Al-2024	2,8	247	89	88	25	8-20
Al Alaşımı	2,8	600	71	210	25	-
Titanyum	4,51	700	117	192	21,1	20
Ni Alaşımı	8,18	450-1200	204	147	24,9	26-45
Ahşap	0,7	110	13	157	19	-
Alaşımsız Çelik	7,86	460	210	60	27	20
Düşük Alaşımlı Çelik	7,8	600	207	80-250	26,5	20-30
Dökme Demir	-	275	138	-	-	0,6
Pirinç (%30 Zn)	8,5	550	100	60	12	-
Karbon/Epoksi (%60)	1,62	1400	220	865	135	0,8
Kevlar/Epoksi	1,38	1310	83	950	60	-
Cam/Epoksi (%60)	1,66	1510	165	910	99	-
Cam/Polyester (%50)	1,9	750	38	390	19,8	1,8
Karbon/Epoksi (Y:D)	1,5	1650	140	1100	93	-
Cam/Polyester	1,55	110	9	72	5,7	2
Al/50%B	2,7	1130	207	420	77	-
Cu/50%T	14,13	1207	262	90	18	-

Plastikler ve yapısal kompozitler, daha fazla tasarım özgür ortamı sağlar ve bir ürünün estetiğini ve çevreye karşı olan direncini geliştirebilir, ayrıca mukavemet/ağırlık oranını artırabilir ve genellikle daha düşük üretim maliyetleri ile sonuçlanabilir. Otomotiv ve havacılık endüstrilerinde oluşan emisyonların azaltılmasına yönelik özellikle hafif ağırlığın hedeflendiği yerlerde kompozit bileşenlerin yapımı giderek artmaya devam etmektedir (Powell ve Green, 2021).

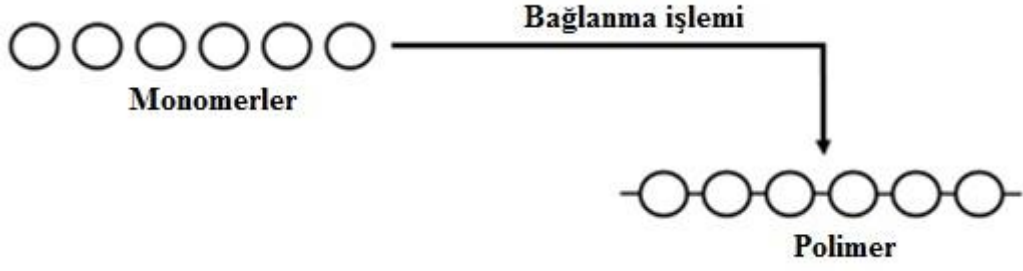
Kompozit malzemelerde matris ve katkı elamanı, üretimin tekniği, uygulanan optimizasyon tekniği, bileşenlerin mekanik özellikleri ve diğer etmenler (sıcaklık gibi) etraflıca düşünülmesi gerekmektedir. Ayrıca, matris ile elyaf arasında oluşan ara yüzey bağ kuvvetinin yüksek olması nedeniyle bileşenlerin birbirine uyumu ve matris fazının elyafı ıslatılabilirliği iyi olması gerekmektedir. Bu yüzden kompozit malzemelerin avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da vardır. Bunlar,

- Üretimin güçlüğü,
- Maliyetinin fazla oluşu,
- Yüzey kalitesinin gerekli şekilde elde edilemeyişi,
- Diğer malzemelerde olduğu gibi geri dönüşümün eksikliği, gibi faktörler sayılabilir (Özer, 2015).

1.3.2. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler ve Ara yüz

Çok sayıda aynı veya farklı molekülün kimyasal bağlarla düzenli bir şekilde birbirine bağlanarak meydana getirdikleri yüksek molekül kütleli bileşiklerdir (Akçay, 2006). Polimer sözcüğü Latince dilinde çok anlamında kullanılan “poli” ve parça anlamında olan “meros” sözcüklerinden türetilmiş olup “çok parça” anlamını karşılayan bir kelimedir (Tekin, 2007).

Polimerler *monomer* adı verilen, birbirini tekrarlayan küçük moleküllü birimlerin çok sayıda bir araya gelerek kimyasal bağlarla birbirine bağlandığı ve uzun zincirler oluşturduğu büyük moleküllü bileşikler olarak tanımlanır. Şekil 4’te monomerlerin, polimeri oluşturmak için gerçekleştirdiği bağlanma mekanizması verilmiştir. Polimerler zincirlerinde milyonlarca atom içerdiğinden dolayı makromoleküller olarak da tanımlanırlar.



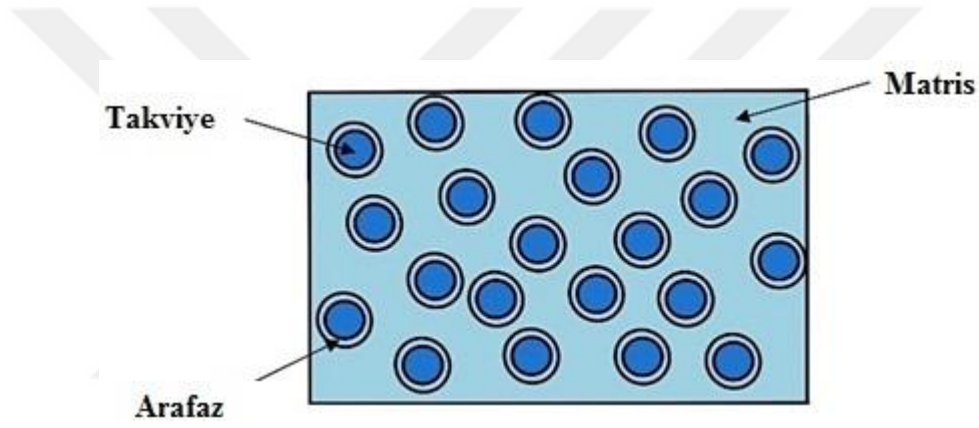
Şekil 4. Monomerlerin bağlanma işlemi (Çelen, 2020).

Polimerler fiziksel, ısı ve mekanik özelliklere sahip olduğundan dolayı diğer malzemelerden ayrılırlar. Hafif oluşları, mükemmel derecede optik özellikleri, termal ve elektriksel yalıtkanlıkları, maliyeti düşük ve geri dönüştürülebilir olmaları ve kolay işlenebilir olduklarından polimerler endüstriyel ortamda ve uygulamalarda en önemli malzeme kategorisinde yer almıştır. Polimer esaslı malzemelerin en önemli özelliklerinden biri olarak hafif olması, metal ve seramik malzemelere göre kıyaslandığında daha düşük sıcaklıklarda işlenmesi ve kalıplanabilmesi sebebiyle de mühendislik uygulamalarında kendilerine büyük önem verilmiştir. Polimerlerin kendine özgü bu benzersiz özellikleri ve işleme tekniklerinin farklı yönleri moleküler yapılarından kaynaklanmaktadır (Çelen, 2020).

Polimer matrisli kompozitler, matris olarak termoset veya termoplastik polimerlerin kullanıldığı güçlendirilmiş polimerlerden oluşur. Termoplastikler, ikincil (van der Waals) bağlar ve mekanik dolaşmalarla bir araya gelecek hidrokarbon moleküllerinden oluşur. Termoplastik malzemenin yapısında bulunan ikincil bağların birincil kovalent bağlardan çok daha zayıf olmasından dolayı sıcaklığı artırılarak kolayca eritilebilir. Yüksek sıcaklıklara çıkıldığında polimerlerin mekanik dolaşmasını serbest kalacak ve böylece hareketliliğini artıracaktır. Termoplastikler, sıcaklıkla yumuşar ve o sıcaklığa ısıtılarak tekrar tekrar kullanılabilir. Termoset polimerlerin yapısında ise atomları bir arada tutan birincil bağlara sahip uzun hidrokarbon molekülleri bulunur. Ayrıca, polimer molekülleri, termoplastiklerin yapısında bulunan ikincil bağlar yerine, kovalent bağlarla birbirine tutunan çapraz bağlardan oluşur. Bu, termoplastiklerden daha az hareketli, daha sert, daha güçlü ve daha az sünek olan devasa üç boyutlu katı yapılarla sonuçlanır (Sheikh Ahmad, 2009). Cam elyaflar, aramid elyaflar ve karbon elyaflar genellikle termoset ve termoplastik kompozitler için takviye olarak kullanılır (Campbell, 2006).

Kompozit malzemeler, belirli bir uygulama için arzu edilen özellikleri elde etmek için iki veya daha fazla bileşenin yapay kombinasyonunun bir sonucu olarak elde edilen çok

fazdan oluşan malzemelerdir. Genel olarak bakıldığında, kompozit malzemeler iki farklı aşamadan oluşur. Biri sürekli, daha az sert ve zayıftır matris olarak ad verilir; diğeri ise süreksiz, daha serttir ve daha sağlamdır, buna da takviye denir. En yaygın olarak kullanılan modern kompozit malzemeler, bir polimer matris içinde yüksek mukavemetli ve yüksek modüllü lifler içeren fiber takviyeli kompozitlerdir. Bazı durumlarda, Şekil 5’te gösterildiği gibi, birbirleriyle çeşitli kimyasal etkileşimlerde bulunan veya üretim etkileri nedeniyle takviye ve matris arasında farklı bir faz olarak ara faz mevcuttur. Ara faz, boyut olarak küçük olmasına rağmen, kırılma yayılımını, kırılma tokluğunu ve malzemenin kırılmasına karşı genel gerilme-gerilme davranışını kontrol etmede önemli bir rol oynar (Daniel ve Ishai, 2006).



Şekil 5. Kompozit malzemelerin fazları (Gül, 2019).

Fiberler malzemenin dayanıklılığını sağlarken, matris fazı parçanın şeklini korumaya yardımcı olur; Kompozitin temel bir unsuru olarak arayüz, yükü matristen liflere aktarma görevini görür ve bu nedenle 'takviye' etkisinden sorumludur (Zhanderov & Mäder, 2005). Kompozitlerde bulunan arayüzler, fiber yüzeylerin yakınında oluşur ve dökme reçine özelliklerinden dikkate değer farklı malzeme özellikleri sergileyebilir. Ara faz bölgesindeki malzemenin kimyasal bileşimi ve mikro yapısı, esas olarak ara fazın özelliklerini kontrol eder. Ara fazın kalınlığı, malzemeye, boyuta ve boyuta bağlı olarak 1 ila 1000 nanometre arasında değişir.

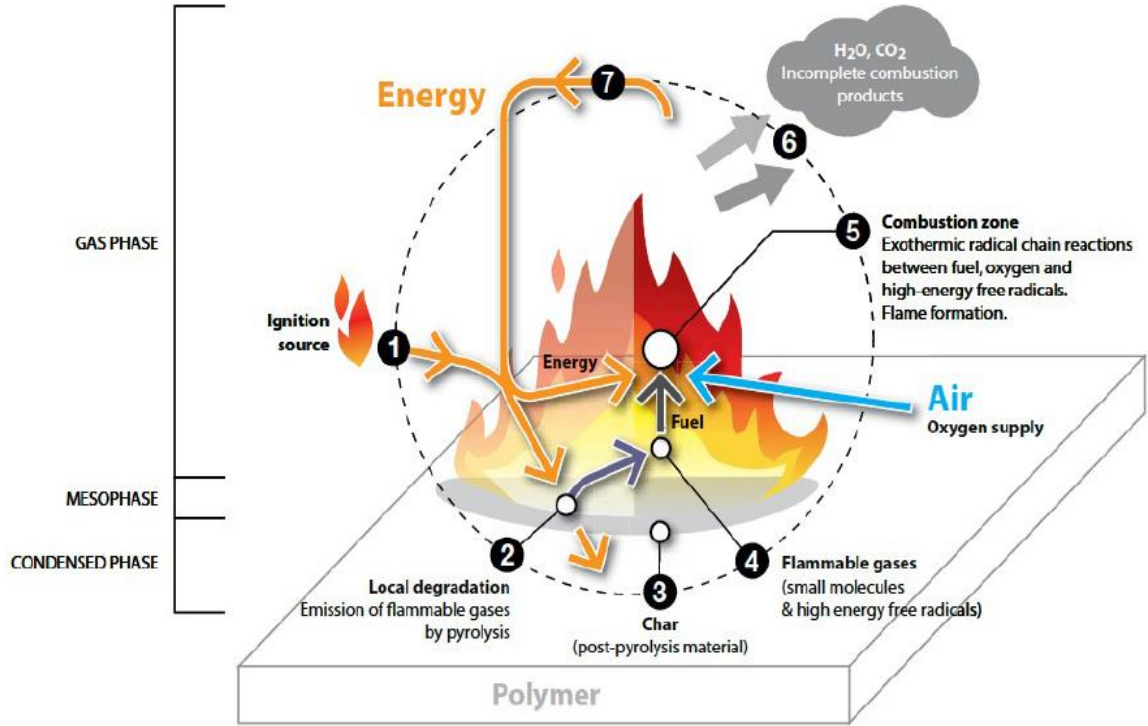
Kompozit bileşenleri arasındaki yük transferini, fiber ve matris arasında bulunan ara fazın özellikleri ve yapışma derecesi yönetir (Tanoglu vd., 2001). Ara faz, elyaf ve matris arasında bulunan bir ara bölgedir ve ara katmanı ve kaplanmış elyafın varlığından etkilenen matrisin bir bölümünü içerir. (Prikryl vd., 2003). Ara fazın özellikleri, güç, dayanıklılık ve darbe/balistik direnç gibi küresel kompozit performansı için kritik öneme sahiptir (Tanoglu vd., 2001).

Polimerler birçok alanda günlük hayatımızın vazgeçilmez bir parçası haline geldi. Bu malzemelerin kolay işlenmesi ve düşük maliyeti en önemli avantajları arasındadır. Bu nedenle, polimer malzeme bilgisi üzerine araştırmalar büyük bir hızla devam ediyor. Polimer matris kompozit araştırmalarında ortaya çıkan alanlardan biri, yüksek alev geciktirme kabiliyetine sahip kompozitler geliştirmektir (Ahmed vd., 2018).

Polimer kompozitler, fazlarından en az biri polimer olan ayrı fazlar olarak iki veya daha fazla malzemeyi içeren kombinasyonlardan veya kompozisyonlardan herhangi biridir. Bir polimer malzemeyi karbon, cam veya başka bir polimeri de başka bir malzeme ile birleştirme sonucunda genellikle eşsiz kombinasyonlar veya yüksek performans seviyeleri elde etmek mümkündür. Sentetik polimerik kompozitlerin en yaygın örnekleri arasında karbon, cam veya polimer elyaf takviyeli, termoplastik veya ısıyla birlikte sertleşen reçineler, karbonla takviye edilmiş kauçuk, polimer karışımlar, silika veya mika ile takviye edilmiş reçineler ve polimer ile modifiye edilmiş veya emprenye edilmiş beton veya odun bulunur. Kaplamalar (pigment-bağlayıcı kombinasyonları) ve kristalin polimerler (bir polimer matris içindeki kristalitler) gibi malzemeler kompozitler grubuna dahildir. Ancak, bir plastikleştirici veya çok düşük oranlarda pigmentler veya işlem yardımcıları ile birleştirilmiş polimerik bileşimler genellikle kompozitler olarak kabul edilmez (Masuelli, 2013).

1.4. Polimerlerin Yanması

Yanma süreci, genelde 'yangın üçgeni' olarak tanımlanan yakıt, enerji ve oksijenden oluşan üç bileşenin bir araya gelerek oluşur (Morgan ve Worku, 2015). Oluşan ısı ve duman yanan gazları besler ve alevlenmeyi giderek artırır böylelikle yanma hızı artar ve durum patlama oluşuncaya kadar ilerleyebilir. Şekil 6'da yangın döngüsü şematize olarak sunulmuştur.



Şekil 6. Yangın döngüsünün şematize gösterimi (Küçükşenlik, 2019).

- Kor haldeki malzeme, ısı veya küçük bir alev gibi herhangi bir enerji kaynağı yanmanın başlamasını sağlar.
- Polimere alev kaynağı tarafından enerji iletilir ve pirolizin gerçekleştiği yerde bir bozunma reaksiyonu meydana getirir.
- Gaz fazına yayılan yanıcı gazlar yoğunlaşmış fazda inert karbonize bir tabaka oluşturur.
- Piroliz işlemi polimerin yapısında bulunan uzun zincirli moleküllerini daha küçük hidrokarbon moleküllerine indirgeyen bir süreçtir.

- Yanıcı gazlar havada bulunan oksijen gazı ile karışırlar ve uygun karışıma, yüksek enerjili serbest radikaller, yakıt ve oksijen içeriğine sahip, yüzlerce ekzotermik kimyasal reaksiyonun meydana geldiği yanma bölgesinde ulaşılır.
- Teorik olarak yüksek performanslı yanma H_2O ve CO_2 üretir. Buna ek olarak yanma sonucunda tamamlanmamış ürünler olarak CO, PAHs, HCN gibi gazlar da ortama yayılır.
- Polimere iletilen ekzotermik reaksiyonlar sırasında oluşan enerji pirolizi güçlendirir. Bu durumun sonucunda oluşan reaksiyon kendisini sürdürür (Küçükşenlik, 2019).

Termoset malzemelerin farklı katkı/dolgu maddelerinin ilave edilmesi sonucunda mekanik ve termal özelliklerine etkilerini inceleyen çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu kapsamda, termoset reçinelerde (polyester veya epoksi) fosfor alev geciktirici katkıları incelenmiştir. Bu çalışmada halojen olmayan fosfor içerikli alev geciktiricilerin termoset reçinelere katılması sonucu çok etkili olduğu gösterilmiştir. Etkili olmalarındaki avantajı, düşük konsantrasyonlarda kullanılmış olması kolaylık sağlamıştır. Halojen olmayan amonyum polifosfat ve kırmızı fosforun tüm termoset reçine çeşitlerinde mükemmel bir alev geciktirici özelliğe sahip oldukları belirtilmiştir (Hörold, 1999). Polibutilen teraftalat/poliakrilonitril-bütül-akrilat-stiren (PBT/ABAS) karışımına hacimsel olarak %0 ile %14 arasında değişen katkı oranlarında mika ilave edilmesi ile üretilen kompozit malzemenin mekanik ve termal özellikleri incelenmeye alınmıştır. Bu çalışmada aynı zamanda modellemeye de yer verilmiştir. Mika katkısı arttıkça çekme mukavemetinin ve elastiklik modülü artmasına rağmen darbe mukavemetinin azaldığı görülmüştür. DSC sonuçlarından elde edilen verilere göre mika katkılı kompozitlerin ergime sıcaklıklarında belirli bir değişiklik gözlenmemiştir. Ancak katkı oranının artması sonucu polimer zincirlerinin hareketinin zorlaştığını belirtmişlerdir (Tomar ve Maiti, 2010).

Fenolik reçineler ticari olarak kullanılan ilk termoset reçinelerdir. Bu reçinelerin, fenol-formaldehit reçinesi ve resorsinol-formaldehit reçinelerinin doğal olarak kömür oluşturmalarından dolayı yangın performansı için bazı benzersiz özellikler sergilemektedirler. Reçinenin bu kömürleşme özelliği, onlara bazı doğal yangın direnci verir. Ayrıca yandıklarında düşük seviyede duman üretme eğilimine sahiptirler. Yüksek seviyede yangın performansının gerekli olduğu alanlarda, bu özelliklerinden dolayı bu fenolik reçineler kullanılması önerilir. Yangın performansının çoğu, kompozitin reçine kısmından gelir. Yüksek oranlardaki elyaf içeriği, sistemdeki toplam organik malzeme miktarını azaltacak ve tipik olarak parçada biraz daha iyi yangın performansı sağlayacaktır.

Kompozit kullanan uygulamaların çoğunda yalnızca yüzey yanma testi veya ateş testi için reaksiyon gerektirir. Bu testlerden bazıları malzeme yüzeyinde bir yangın koruma kaplamasıyla (şişen veya diğer tip yangın bariyeri) geçilebilmesine rağmen, tüm kompozitin alev geciktirici reçine sistemine sahip olması tavsiye edilir. Bu, yüzey kaplaması hasar görmüşse, malzemenin hala yangına karşı korumaya sahip olmasını sağlamak içindir (Wilkie ve Morgan, 2010). Farklı bir çalışma olarak bazalt ve cam dokuma elyafının fındık kabukları ile homojen olarak karıştırılarak termoset polyester reçinesi takviye edilmiş ve elde edilen kompozit malzemelerin eğilme dayanımı ve ısıl geçirgenlik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada ağırlıkça farklı boyutlarda fındık kabukları kullanılmıştır. Üretilen kompozitin tanecik boyutunun eğilme ve ısıl geçirgenlik özelliklerini etkilediği ve bazalt elyaf takviyeli kompozit numunenin diğer numunelere göre eğilme dayanımının ve ısı yalıtım özelliklerinin daha iyi olduğu görülmüştür (Mıstık ve Merdan 2012). Alüminyum trihidroksit (ATH) ve trifenil fosfat (TPP) karıştırılarak yangın geciktirici ve suyu ise kabartma ajanı olarak kullanıp rijit PUR malzemeler üzerine çalışma yapılmıştır. Termal kararlılık olarak ATH eklenerek oluşturulan malzemede herhangi bir kayda değer farklılık görülmemiştir. ATH ile birlikte TPP ilave edilmesi ile önemli ölçüde alevin yayılma oranı düşürüldüğü gözlenmiştir. TPP eklenmesinden dolayı poliüretan malzemelerde alev geciktirme özelliğinin iyileştiği belirlenmiştir (Thirumal vd., 2010).

Bir polimerin tutuşması öncelikle bozunma başlangıç sıcaklığı ile doğrudan ilişkilidir. Çünkü kararlı yanma polimerin yanıcı uçucu parçacıklar üretmesi karbon tabakası üretme eğilimiyle ilgilidir. Oluşan karbon tabakası, alevi polimer yüzeyine olan ısı akışının ve yanıcı gazlarının transferini önleyerek bir bariyer görevi görür ve bu nedenle alevi fiziksel olarak engeller. Genellikle, ana yapı zincirinde aromatik veya heterosiklik yapılar bulunduran polimer malzemeler, alifatik yapılılara göre daha az yanıcı olmaktadır. Aromatik halkaları arasında kısa esnek bağlar bulunan polimerler, çapraz bağlanma ve karbonize tabaka oluşturma eğilimindedirler. Bu türden polimerler termal olarak daha kararlı ve nispeten iyi alev geciktiricidir. Örnek vermek gerekirse bisfenol-A bazlı polikarbonatlar, fenol formaldehit reçineler, poliimidler kendi kendini söndürme özelliğine sahiptirler (Morgan ve Wilkie, 2007). Termoplastik malzemelerin termal bozunma özelliklerinin yanında konik kalorimetre ve UL 94 deneyleri ile alev geciktiricilik özelliklerinin test edildiği farklı araştırmalar da bulunmaktadır.

Bu açıdan bakıldığında termoplastik malzeme içerisine ilave edilen düşük oranlarda katkı/dolgu maddelerinin kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etki etmediği rapor edilmiştir (Ran vd., 2008; Romero-Iberra vd., 2012; Dongya vd., 2012). Özellikle tanecik boyutunun artması durumunda artan ilave oranları ile mekanik özelliklerde iyileşme tespit edilememiştir (Betingytė vd., 2012).

Esnek PU malzemeler otomotiv, tren ve uçak koltuklarında üretiminde yaygın olarak kullanılır ve düşük yoğunluk, yüksek hava geçirgenliği ve açık hücre yapısı gibi olumsuz özelliklerinden dolayı alev maruz kaldığında kolayca tutuşabilir ve yüksek yanma hızına ulaşır. Bundan dolayı yapılan çalışmalarda alev geciktiriciler olarak halojen içeriğini giderek azaltmaya çalışılmıştır. Bu alev geciktiriciler arasında en iyi bilinen iki adet halojen içermeyen, katı alev geciktiriciler grubunda bulunan genişleyebilir grafit ve melamin kullanılmıştır. Kullanılan yanmayı geciktirici genişleyebilir grafit ve melamin, esnek PU malzemelerde elastisitede, fiziksel ve mekanik özelliklerinde de iyileşme sağlamıştır. Ayrıca PUF (esnek poliüretan) malzemenin alev geciktirici özelliğini de etkili bir şekilde arttırdığı kaydedilmiştir (Bashirzadeh ve Gharehbaghi, 2010).

Çok etkili bir alev geciktirici malzemenin diğer özelliklerinde kötüleşmeye sebebiyet veriyorsa, bu olumsuz etkileri azaltacak yöntemlere yönelmek gerekmektedir. Örneğin, iyi bir alev geciktiricide mekanik özelliklerde düşüş gözlemleniyorsa, mekanik özelliklerdeki düşüş miktarı belirlenmeli ve ona göre kullanılmalı ya da ilaveten daha başka katkı maddesi veya mekanik destek ekipmanları kullanılmalıdır. Farklı uygulama alanlarında poliüretan malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için cam ve karbon elyaflar, takviye malzemeleri olarak kullanılmaktadır (Wang vd., 2010; Han vd., 2010; Zhao vd., 2011). Alev geciktirici olarak katılan kimyasal maddeler malzemeyi tamamen yanmaz bir duruma getiremez. Bu maddelerin etkisi yanma esnasında tutuşmayı güçleştirmek ve yanma başladıktan sonra ateşin başka bölgelere yayılmasını geciktirmektir. Isı iletimi, ısıl bozunma ve yanma özelliklerinin incelenmesi yapılırken mekanik özellikleri de önem vermek gerekmektedir. Kullanılan katkı/dolgu maddeleriyle malzemelerin ısıl veya yanma özellikleri iyileştirilirken, mekanik özelliklerin kullanımını önleyecek derecede olumsuz etkilenmemesi gerekmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda düşük katkı/dolgu maddesi ilave oranları için mekanik özelliklerde belirgin bir olumsuzluk tespit edilmemiştir (Widya ve Macosko 2005; Saha vd., 2008).

Ayrıca poliüretan malzeme içerisinde katkı/dolgu madde ilave oranının artmasıyla birlikte kompozit malzemenin hücre yapılarının bozulmaya uğradığı ve mekanik özelliklerde önemli derecede olumsuzlukların varlığı tespit edilmiştir (Nikje ve Garmarudi, 2006; Ali vd., 2007).

Alevlenmenin tanımı olarak polimer malzemelerin bozunması ile ortama verdiği yanıcı gazların havadaki oksijene maruz kaldığı anda oluşan bir olaydır. Polimer yapısında bulunan zincirlerin yanması sonucu yanıcı özelliği daha fazla olan küçük zincirlere veya moleküllere ayrışırlar. Bu yüzden ortamda oluşan yanıcılık giderek artar. Polimer kompozit malzemeler yandığı zaman ortama birçok gaz salınır. Bu gazların türü, polimer malzemenin ve ilave edilen katkı maddelerinin kimyasal yapısı ile sıkı bir ilişkiye sahiptir. Yapılarında halojen atomları bulunan Poli(vinil klorür), politetrafloretilen gibi polimerler aleve maruz kaldığında C, H atomları salınır. Ayrıca diğer atomlar ile halojenler de ortama salınır. Salınan halojen atomlar hidrojenle birleştiklerinde ortaya HCl, HF, HI, HBr türünde ağır gazlar verirler. Oluşan bu ağır gaz tabakası bariyer görevi görerek alev bölgesinin hemen üstünü kapatarak oksijeni alevin olduğu yanma bölgesinden uzak tutarak yanmayı önler. Termoset matrisli polimerler yanarken malzemenin yüzeyinde küle benzer katı yanma atıkları oluşur. Bu atıklar yanmanın çevresine giderek yayılmasını önler (Ayar, 2007).

1.5. Reçineler

Reçine, belirli bir şekilde tanımı olmayan çok yönlü bir terimdir. Başlangıçta, reçine terimi sarımsı kahverengi renkli, saydamdan opaklığa, yumuşaktan kırılgana, yapışkan ve kristalleşemeyen düşük moleküler kütleli doğal malzemeler olarak tanımlanmıştı, en yaygın organik çözücülerde çözünür ve suda hemen hemen hiç çözünmezdi. Kimya endüstrisi ilerledikçe, bu terim, benzer özelliklere sahip doğal reçinelerin yerine kullanılması ile sentetik malzemeleri karşılayacak şekilde genişletildi. Uluslararası standartlarda, ISO 472 ve ISO 4618/3 reçineleri benzer şekilde tanımlanmaktadır, örneğin bilinmeyen ve genellikle yüksek moleküler kütleye sahip katı, yarı katı veya sözde katı organik malzemeler olarak ve genellikle ısıtınca belli bir sıcaklık aralığında yumuşayan veya eriyen malzemeler olarak tanımlanmaktadır.

Reçineler iki gruba ayrılabilir.

- Doğal Reçineler: ISO 4618 / 3 standartında bulunan doğal reçineler grubu, bitkisel veya hayvansal kaynaklı reçineler olarak belirlenmiştir. Doğal reçineler arasında reçineler (ağaç ve bitki sızıntılarından elde edilen sakız, odun veya yüksek yağ reçineleri; odun özleri), kehribar gibi fosil reçineleri; asfaltit gibi mayınlı reçineler, bir böcekten salgı ürünü olarak gomalak ve bunların ana türevleri bulunur.
- Sentetik Reçineler: ISO 4618 / 3 standardında bulunan sentetik reçineler, kendileri reçine özelliklerine sahip olmayan iyi tanımlanmış reaktanlar arasında çoklu ilaveli veya polikondansasyon gibi kontrollü kimyasal tepkimelerden kaynaklanan reçineler olarak tanımlanır. Ayrıca, doymamış monomerlerin polimerizasyonu (ISO 472) ile sentetik reçineler üretilir. Fenol-formaldehit, fenol-üre ve fenol-melamin reçineleri en önemli sentetik reçinelerdir (Parker, 1999; Collin vd., 2005).

1.6. Termoset Reçineler

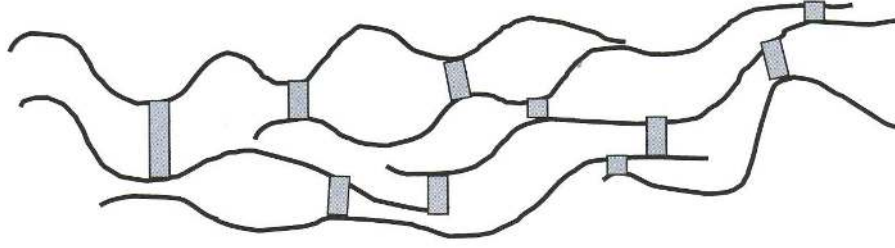
Polimer zincirlerinin kovalent bağlarla değişik pozisyonlarda birbirine bağlandığı ve çapraz bağlı bir polimerik yapıya sahip olduğu polimerler, termosetler olarak adlandırılır. Yüksek gerilim, aşırı yük veya değişen sıcaklık gibi çeşitli etkilere karşı direnç göstermede sonuç olarak yüksek performansa sahiptirler. Isıyla sertleşen bu malzemelerin yapısı muhteşem derecede çapraz bağlıdır ve aralarında sentetik bağlar mevcuttur. Bu oluşan yapı, termoplastik veya elastomer tipi malzemelerin aksine yapıda olması amaçlanan yüksek mekanik ve fiziksel kaliteden sorumludur. Öte yandan, bu çapraz bağlanmış yapı, termoset polimerlerin zayıf esneklik göstermesine veya makul derecede uzamasına neden olur. Aşağıda bazı ısıyla sertleşen polimer bazlı termoset malzemeler ve kullanım alanları listelenmiştir (Gülyuva, 2018);

- Epoksi reçineler- yalıtım malzemesi üretimi veya sızdırmazlık çözücüleri, spor malzemelerinde (golf, tenis racketleri vb.), imalat sanayinde ve devre kartları gibi iletken olmayan malzemelerde
- Fenolik reçineler- roketler, yalıtım, vernik, baskı teknolojisi vb.
- Doymamış polyester reçineler- cam elyaf takviyeli plastik üretimi, özellikle denizcilik sektöründe.

Tablo 2. Bazı plastik matris malzemelerin özellikleri (Mağdala, 2009).

Özellikler	Epoksi	Polyester	Fenolik
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	1,1-1,4	1,2	1,2-1,3
Elastik Modül (GPa)	2-3,5	2-3	5-11
Çekme Mukavemeti (MPa)	50-90	50-60	20-50
Kopma Uzaması (%)	2-6	2-3	1-2

Termoset reçineler, sertleştirilebilir, sabitlenebilir veya kalıcı bir şekle getirilebilir. Kürleme, çapraz bağlama olarak da bilinen geri dönüşü mümkün olmayan bir kimyasal reaksiyondur. Genellikle ısı, basınç ve/veya katalizör etkisi altında kürleme meydana gelir ve üç boyutlu sertleştirilmiş bir kimyasal yapı ortaya çıkar. Bazı ısıyla sertleşen malzemelere bakıldığında kürleme sıcaklıkla başlatılır veya oda sıcaklığında bile tamamlanır.



Şekil 7. Termoset polimer zincirlerin çapraz bağlanması (Ersoy, 2005).

Kürlenmiş kısım ısı ile birlikte yumuşatılmış olsa da tekrar eritilemez veya kürlenmeden önce var olan akıcı duruma geri getirilemez. Uzun süre ısıtmaya devam edilirse, bozulmaya veya ayrışmaya neden olur. En önemli ticari termoset reçineler arasında fenolik reçineler, aminoplastlar, epoksi reçineler, polyester reçineler, vinil ester reçineler, poliüretanlar ve silikonlar bulunur. Termoset reçineler aşağıda listelenen bazı avantajları;

- Çözücülere ve aşındırıcılara karşı mükemmel direnç
- Isıya ve yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılık
- Üretim kolaylığı
- Düşük hammadde maliyeti
- Mükemmel yapışma (Alkan, 2015).

1.7. Fenolik Reçinelere Genel Bakış

Tarihte yüksek performanslı polimerlerin geliştiği yüzyıl boyunca birçok yeni termoset sınıfı ortaya çıkmış olsa da fenolik reçineler ilk piyasaya sürülmelerinden bu yana 100 yıldan fazla bir zamandır endüstriye sürekli hizmet etmektedir. Bu reçineler, termal stabilite, mekanik performans, çeşitli kimyasallara, asitlere ve bazlara karşı dayanıklılık gibi öne çıkan özelliklerinden dolayı, yararlı üretim ve konstrüksiyonu için yüksek teknolojiye malzemeler üretimi için yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca, nispeten düşük miktarlarda duman açığa çıkarırlar ve aleve maruz kaldıklarında yangına karşı direnç gösterirler. Fenoliklerin diğer önemli yanları, oldukça düşük maliyetleri ve mükemmel ablatif özellikleri ile ilgilidir. Buna göre, bu reçineler bu önemli özelliklerinden dolayı epoksi ve/veya poliimid bazlı sistemlerle yarışabilir ve sıkı paket düzenlemelerin olduğu havacılık endüstrisindeki termo yapısal uygulamalarda bir pazar bulabilir. Yüksek performanslı malzemelerin yüksek cam geçiş sıcaklığı, gerilme mukavemeti ve termal stabilite gibi temel özellikleri göz önüne alındığında, toplam patent sayısı, araştırma verileri ve üretim hacimleri dikkate alındığında epoksi reçinelerden sonra fenolik reçineler önemli polimer sınıfıdır (Iredale vd., 2017).

Diğer bir uygulama, ısıya dayanıklı malzemeler için bir matris olarak katı karbon malzemelerin öncüsü olarak kullanılmasıdır (Park vd., 1999). Fenoliklerin bir diğer önemli uygulaması, diğer polimerlerle polimerik bir karışım olup, gerilme mukavemeti ve modülü gibi üstün fiziksel özelliklere sahip malzemeler üretir (Okoroafor vd., 1992).

Diğer organik malzemelerle karşılaştırıldığında, fenolik reçine'nin yakılması daha zordur. Yandıktan sonra bile fenolik reçine, en az duman ve zehirli gazlar üretir (Brown, 1994). Fenolik reçine ayrıca alev geciktirici ve yalıtım malzemesi olarak kullanılmıştır. Liu vd., (2009) kapalı bir yapıya sahip fenolik reçine mikroküreler hazırladı ve yüksek termal performans gösterdi. Zhang vd., (2010) sözdizimsel köpükler hazırlamak için içi boş karbon küreleri fenolik reçine ile birleştirdi ve fenolik reçine içeriğinin azalmasıyla basınç ve eğilme mukavemetinin azaldığını buldu, bu da fenolik reçinenin tozları birbirine bağlayabileceğini ve köpükler için daha yüksek bir mukavemet sağlayabileceğini gösterdi.

1.7.1. Fenolik Reçinelerin Tarihi

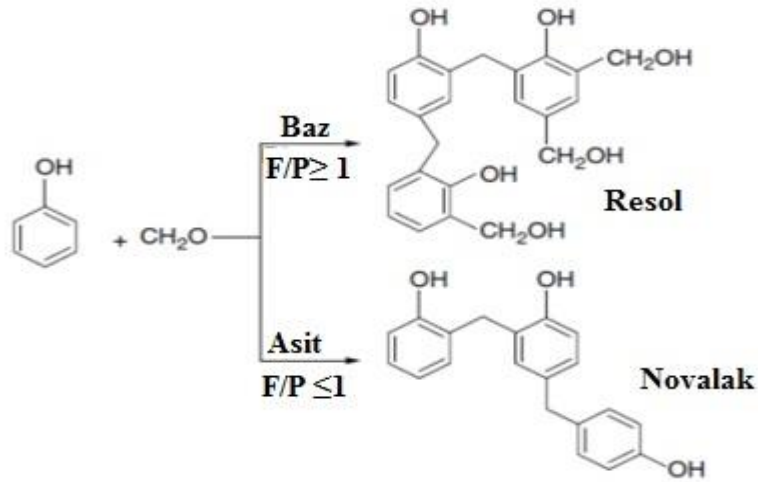
İlk sentetik reçine fenol ve aldehidin çoklu kondensasyonu ile 1872 yılında Von Bayer tarafından sentezlenmiştir. 30 yıl sonra Blumer “novolak” reçinelerin yüzey cilası olarak kullanılabileceğini göstermesine rağmen fenolik reçineler rağbet görmemiştir. Hatta 1909 yılında Beakeland fenolik reçinelerin malzeme olarak değerlendirilebileceğini keşfetmiştir, ama o dönemlerde revaçta olan doğal reçinelerden daha değerli kabul edilmemiştir. Fenol formaldehit ve rosinin polikondensasyonu ile üretilen ve yağda çözünebilen modifiye fenolik reçineler 1920 yılında Behrends tarafından sunulmasıyla yağlı cila olarak ticari ürün olarak kabul edilmiştir. Günümüzde çalışmaların önemli bir kısmı, kompozit malzemelerde fenolik reçinelerin matris olarak kullanılmasına yöneliktir.

Reçinelerin kürlenme sonrası termal dayanıklılığı, mekanik olarak bütünlüğünü koruması, yapışma özelliğine sahip olması, kimyasallara karşı korozyif ortamlarda bile yapısını muhafaza etmesi ve son olarak düşük maliyetli tercih sebebidir.

Fenolik reçineler fenoller ile aldehitlerin asidik veya bazik bir katalizör kullanılarak kondenzasyon reaksiyonundan elde edilen, geniş çapta kullanım alanına sahip en eski polimer maddelerdendir. Termoset reçineler olan fenolikler, fenolün bir aldehit (genellikle formaldehit) reaksiyona girer ve katalizör yardımı ile üretilirler. Fenolik reçine esaslı kompozitler, alev dayanımı yüksek, uzun ömürlü kullanım dayanıklılığına sahip, yüksek sıcaklık ortamlarında mükemmel dayanım gösteren ve hidrokarbon ve klorlu çözücülere karşı dayanım gösterirler (Gardziella, 2000).

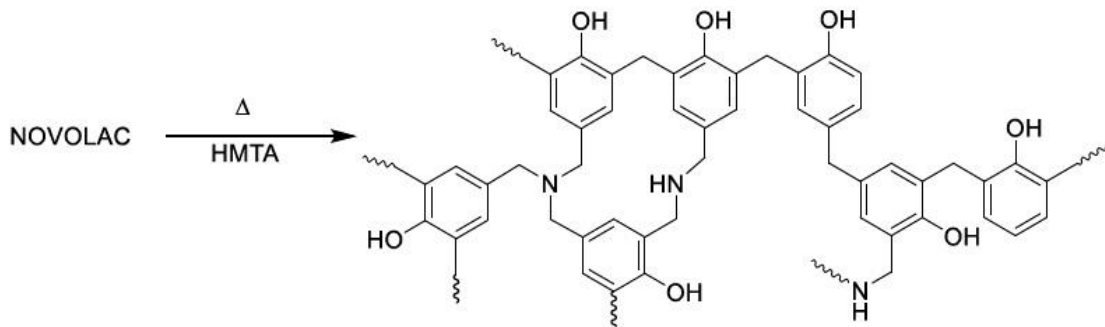
1.7.2. Fenolik Reçinenin Kimyası ve Novalak Reçineler

Fenolik reçinenin tasarımı, fenol ve formaldehit sentezinde kullanılan mol oranlarına göre değişiklik göstermektedir (Şekil 8). Novolak reçine, pH 4 ile 5 arasında olan asit katalizöründe fenole karşı daha az miktarda (formaldehit/ fenol<1) formaldehit ile reaksiyon sonucunda oluşan fenolformaldehit reçinesidir (Fink, 2018). Resol reçinesi üretiminde ise daha çok NaOH tercih edilirken, katalizör olarak Trimetilamin ve Amonyak gibi organik bazlar kullanılabilir. Ek olarak, amonyak katalizör solüsyonları ile üretilen çözelti, diğer baz katalizli ürünlere göre daha yüksek moleküler ağırlıklı sentez sağlar (Gabilondo vd., 2006).



Şekil 8. Resol ve novolak reçinelerin hazırlandığı koşullar ve kimyasal tepkimeleri (Doğan, 2018).

Fenolik reçineler çok çeşitli uygulamalarda ve endüstrilerde kullanılır. Ancak en büyük pazar segmentleri ahşap ürünler, ısı yalıtımı ve kalıplama bileşikleri ile ilgili olanlardır. Ağırlıklı olarak HMTA ile kürlenmiş novolak reçinelerle yapılan kalıplama bileşikleri, yüksek sıcaklık, alev ve kimyasallara karşı dirençleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Kaplamalarda, fenolik reçineler tek başına veya yapışma arttırıcı, çapraz bağlayıcı veya sertleştirici olarak modifiye edilmiş bir reçine olarak kullanılabilir. Bazen paraformaldehit veya trioksan kullanılsa da çapraz bağlayıcı bileşik hemen hemen her zaman heksametilentetramindir (HMTA). HMTA, çapraz bağlama reaksiyonunu tamamlamak için gerekli olan formaldehiti ve ayrıca bir amonyak yan ürününü serbest bırakmak için ayrışır. Novolak ara ürünleri neredeyse sonsuz raf ömrüne sahiptir ve tipik olarak pullanmaktadır. Novolak reçineler %8±15 HMTA ile karıştırılır, daha sonra işlenmeden önce toz haline getirilir (Allen ve Ishida, 2001; De Bruyn vd., 1997).



Şekil 9. Novolak reçinenin sertleştirme işlemi (Bayram, 2020).

Uygun reaksiyon parametresinin seçimi, bireysel uygulamalarda kullanmak için ve optimum moleküler ağırlık dağılımı ile özel olarak tasarlanmış reçine çeşitlerinin üretilmesine izin verir. Novolak reçineleri amorf (kristalin değil) termosetlerdir ve oda sıcaklığında katıdırlar ve 65°C – 105°C arasında yumuşar ve akar. Alkol, aseton gibi birçok polar organik çözücüde çözünürler, ancak suda çözünmezler. Kürlenmiş fenolik reçineler, daha özel uygulamalar için geliştirilmekte olan bu kategorideki reçinelerdir. Bunlar, ısıнын etkisi altında eriyebilir ve çözünür bir malzemeden, kovalent olarak çapraz bağlı, termal olarak kararlı bir ağ oluşumu yoluyla erimeyen ve çözünmeyen bir malzemeye dönüşen ısıyla sertleşen reçinelerdir (Puzari, 2010).

1.7.3. Fenolik Reçinelerin Alev Dayanımı

Fenolik reçine, esasen alev geciktirici davranışı ve piroliz sonucu yüksek verimi elde etmesi nedeniyle kompozitler için matris olarak uzun süredir kullanılmaktadır. Fenolik reçineye dolgu maddeleri olarak SiC (Silisyum karbür) ve B₄C (Bor karbür) gibi seramik tozlarının ilave edilmesi ile reçinenin daha iyi termo-oksidatif stabilitesi oluşur, ancak dezavantajlar olarak, kompozitlerin kalıplanma yapılması sırasında zayıf homojenliğe, yapışma ve işleme zorluklarına sahiptir. Yüksek performans matris malzemesi olan fenolik reçinenin bor ile modifiye edilmesi sonucu gerçekleştirilen deneylerde 500°C' ye kadar polimer ağı etkilenmeden kalırken 500°C' nin üzerinde değişiklikler gözlemlendi, bu da ağıın çökmesine ve poliaromatik alanların oluştuğunu belirlemişlerdir. Sonuç olarak roket programında termal koruma sağlamak için borla modifiye edilmiş fenolik reçinenin, enstitüde halihazırda kullanımda olan ticari fenolik reçine ile karşılaştırıldığında üstün termal özelliklerini kanıtlamışlardır (Kawamoto vd., 2010). Fenolik reçine, endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılan en önemli çapraz bağlı polimerlerden biridir. Yüksek oranda çapraz bağlı ve üç boyutlu ağ, fenolik reçinenin kürleme işlemi sırasında oluşturulabilir. Çapraz bağlı yapı fenolik reçineye iyi mekanik özellikler ve ısı direnci gibi birçok mükemmel performans katar. Havacılık alanında fenolik reçine genellikle ablasyona dirençli kompozitlerin matrisi veya yüksek kömürleşme verimi için C/C (karbon kompozit) kompozitlerinin öncüsü olarak kullanılır (Wang vd., 2014).

Fenolik kompozitlerle karşılaştırıldığında, epoksi kompozitler daha yüksek alev yayılma uzunluklarına ve daha yüksek ortalama alev yayılma oranlarına sahiptir. Bu sonuçlar fenolik kompozitlerin epoksi kompozitlere göre daha yüksek alev direncine sahip olduğunu göstermektedir. Muhtemel bir açıklama olarak, genel olarak epoksi reçinesinin fenolik reçineden daha yavaş olmasıdır (Hsieh ve Beeson, 1997).

Çekme mukavemeti, kırılma dayanıklılığı ve eğilme mukavemetini arttırmak için fenol formaldehite çeşitli takviyeler katılmıştır. Bu katılardan biri seramik içi boş kürelerdir. İlgili mekanik testlere tabi tutulan kompozitlerdeki küresel seramik tozları'nın ağırlık yüzdeleri değiştirilir. Sonuçlar, ağırlıkça %7,5 SLG içeren kompozitin, makul bir akışkanlıkla optimum gerilme özellikleri, eğilme özellikleri, kırılma tokluğu ve maliyet kombinasyonlarını ürettiğini göstermektedir (Ku, 2011). Fenolik reçineler yüksek mekanik mukavemet yanında uzun süreli termal ve mekanik kararlılık, mükemmel yangın, duman, toksisite özelliği ve mükemmel ısı yalıtımı gibi özellikler de göstermektedirler.

Fenolik reçineler 180-200°C'lik sıcaklıklarda kimyasallara ve neme karşı mükemmel direnç gösterdikleri için alev geciktiriciliğin gerekli olduğu uygulamalarda kullanılan elyaf takviyeli kompozitlerde matris bileşenini oluştururlar. Fenolik reçine ile oluşturulan kompozitlerin dezavantajları arasında ışık ve oksijene maruz kaldıklarında renk kaybı olmasıdır (İlhan, 2018).

Fenolik reçinelerin değişik yönleri ve yaygın kullanım alanlarına sahip olduğundan dolayı novolak ve resol termoset reçineler farklı durumlarda piyasaya sunulur. Ayrıca toz, sıcak eriyik, çözücü bazlı ve sulu çözelti gibi birçok formda pazarda pay sahibidir. Fenolik reçinelerin uygulamaları, ısı direnci ve boyutsal stabilitesinin yanı sıra organik çözücüler, asitlere ve suya karşı yüksek direnci nedeniyle inşaat malzemelerinden ileri teknoloji havacılık endüstrisine kadar geniş bir alanı kapsar. Doğaları gereği aleve dayanıklıdır ve aleve maruz kaldıklarında düşük duman oluştururlar (Yang ve Nie, 2011). Bu yüzden fenolik reçinelerin ısı kalkanı yapımında, cam ve karbon fiberli kompozitlerde kullanılması kaçınılmaz bir şekilde giderek artmaktadır. Bunun asıl nedeni ise diğer termoset reçinelerle kıyaslandığında fenolik reçinenin yanma ortamında, duman miktarının az olması ve oluşan dumanın toksik özelliğinin düşük olmasıdır. Ayrıca diğer reçinelerle karşılaştırıldığında fenoliklerin maliyetleri düşüktür. 1980'li yıllarda, hava ulaşım araçları için malzemelerin yanma sırasında zehirli duman yayma ve alev yayılma araştırmalarını arttırdı.

Yapılan araştırmaların en önemli amacı uçak yangını sırasında yangının ileri derecede yayılmasını yavaşlatıp yolcular için tahliye edilmesi gereken süreyi uzatmaktır. Cam veya karbon fiber ile takviye edilmiş fenolik esaslı kompozitler bu özellikleri sağlayabilen ve bu duruma en uygun kompozit türü olmuştur. Uçaklarda tavan ve yer kaplamaları, iç yapılar için fenolik kompozitler günümüzde yaygın olarak kullanılmakta ve diğer termoset reçineler olan epoksi, polyester ve vinil ester reçine esaslı kompozitlerin yerine tercih edilmektedir (Mağdala, 2009).

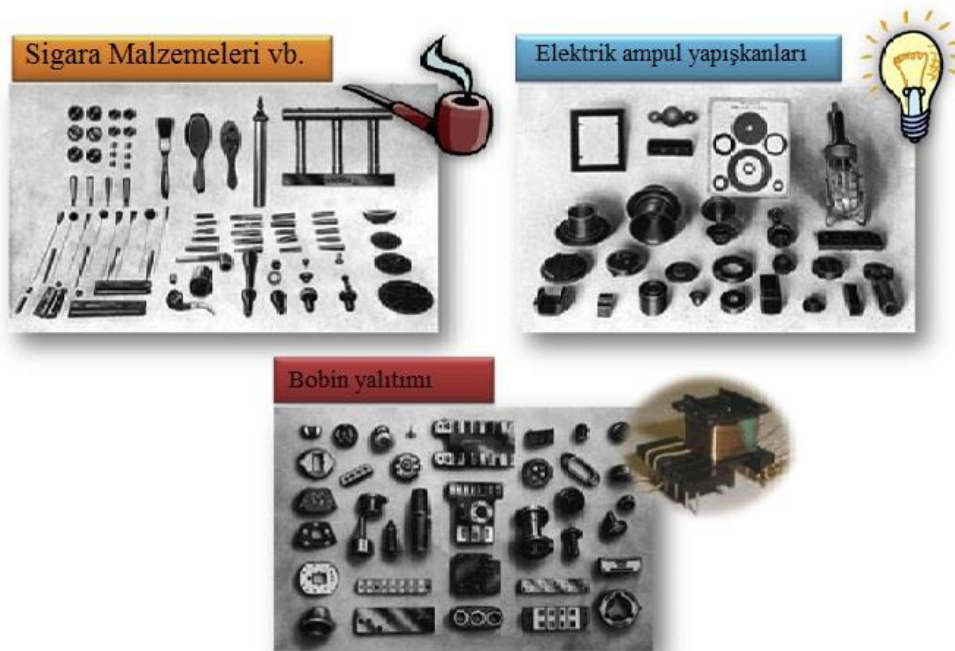
Fenolik reçinenin yanmaz özelliği sayesinde geniş uygulama alanlarında kullanılmasını sağlar. Fenolik reçineye kullanılan çeşitli katkı maddeleri ağırlıkça %50 ile %80 arasında değişebilir. Katkılar, kalıplama sırasında büzülmeyi azaltır, maliyeti düşürür ve mukavemeti artırır. Fenol formaldehit reçinesi bir aleve maruz kaldığında, eriyip yanmak yerine kömürleşir. Bu nedenle, yangınlardan ve dumandan kaçınmanın önemli olduğu alanlarda yaygın olarak kullanılırlar. Çünkü kömürün çok düşük bir termal iletkenliği vardır, böylece çevrelediği malzemeleri korur. Fenolik reçinenin düşük ısı iletkenliği özelliğinden dolayı, reçinenin ekmek kızartma makinelerinde bulunan düğmelerin yapımında da matris malzemesi olarak kullanılmasını teşvik etmektedir. Reçine, yoğunlaşma polimerizasyonu ile kürlenir, bu da kürlenme işleminin bir yan ürünü olarak suyun oluşması ile matris içinde yoğun mikro boşluklara neden olur. Mikro boşlukların kompozit özellikler üzerinde çok fazla etkisi yoktur, ancak önemli ölçüde yüksek su absorpsiyonu gözlemlenir. Yapıda yüksek su bulunduğundan dolayı ısıya maruz kaldıklarında tabakaların birbirlerinden ayrılmasına neden olabilir (Clarke., 1996).

1.7.4. Fenolik Reçinelerin Uygulamaları

Fenolik reçineler esas olarak güçlendirilmiş termoset kalıplama malzemelerinde kullanılır. Genellikle organik veya inorganik lifler ve dolgu maddeleri ile birlikte kullanılır. Bu kombine malzemelerin yüksek sıcaklıklarda kürlenmesi, genellikle mükemmel kalıplanabilirliğe sahip boyutsal olarak kararlı bileşikler sağlar. Ayrıca, bu bileşikler dikkate değer termal kararlılık, alev geciktirme ve ısı direnci özelliklerine sahiptir. Fenolik reçine uygulamalarının hızlı büyümesi, termal özelliklerini iyileştirmek için kapsamlı araştırmalar geliştirilmiştir. Ahşap kompozitlerde bağlayıcı olarak birincil kullanımlarından askeri ve havacılık endüstrilerinde kritik uygulamalara kadar birçok uygulama alanında kullanılmıştır (Abdalla vd., 2003).

Fenolik reçine 1907 yılında keşfedildikten sonra 1911’de endüstriyel alanda ilk kez üretimi başlamıştır. Şeffaf olarak üretilen ilk reçineler optik ürünler, elektriksel yalıtım malzemeleri, süsleme ve aksesuar alanlarında, boya ve yapıştırıcılarda, ilaç kaplarında kullanılmaya başlanmıştır (Lopez vd., 2008). Fenolik reçinelerden yapılan ilk lamine ürünler 1927 yılında üretildi. Sigara ve pipo aksesuarları, mürekkep kalem sapı, ilaç kapları ve çeşitli optik ürünlerde fenolik reçineler 1910-1930 yılları arasında matris malzemesi olarak kullanıldı (Zhang vd., 2008).

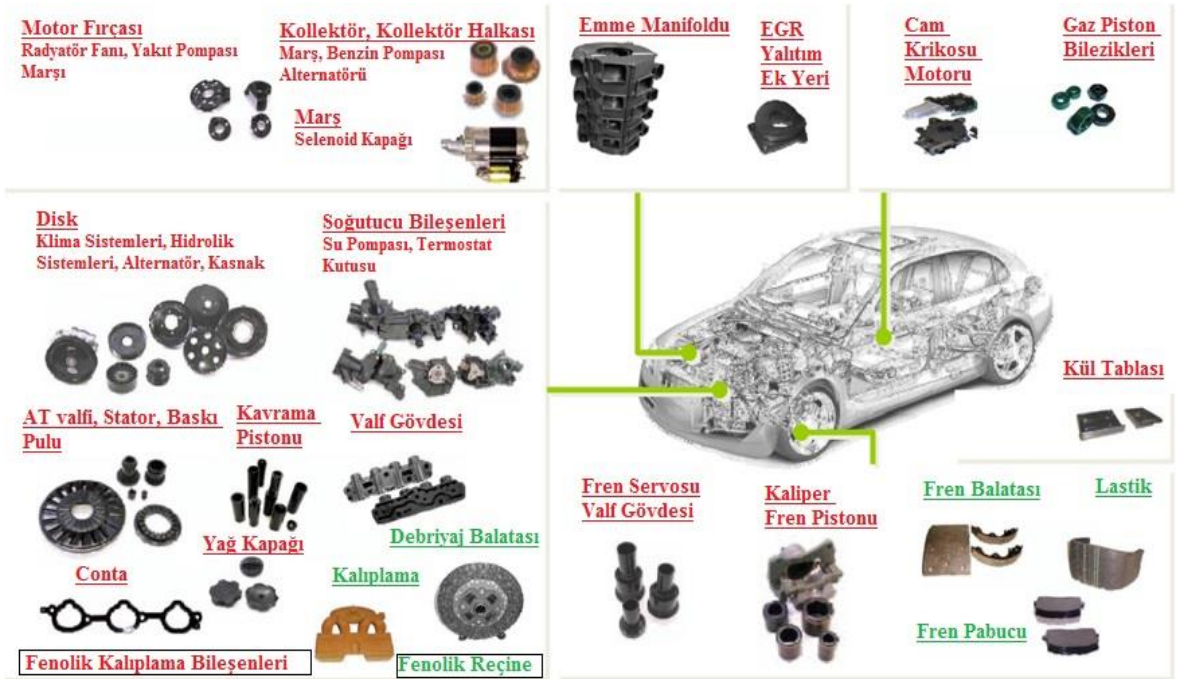
Fenolik reçine ve minerallerin karıştırılması ile yapılan yapıştırıcılar metal, cam ve seramik yapılarda özellikle ampullerde bulunan cam ve metal kapakların birbirine yapıştırılması için kullanıldığı için yaygın bir satış pazarı vardır. Bobinler için kullanılması gereken elektriksel yalıtım malzemeleri gibi ürünlerde ise bugün hala yaygın şekilde tercih edilmektedir. 1932 yılında elektronik haberleşme sistemlerinde kullanılmasının yanında telefon ahizelerinin yapımında da fenolik reçineler kullanılmaya başlanmıştır. 1949 yılında ise kalıplama makineleri kurulduktan sonra tüm telefon araçlarında üretimde büyük yer edinmiştir. Günümüzde endüstri alanında fenolik reçineler çok geniş bir endüstriyel uygulama alanına sahip olmuşlardır ve geliştirilme çabaları hızla devam etmektedir. Sayısız ev aletlerinde, iş ekipmanlarında ve kablolarda termal yalıtım malzemesi olarak yaygın bir şekilde tercih edilmektedir (Huang vd., 2005; Zhou vd., 2008).



Şekil 10. Fenolik reçine kalıplama ürünleri (Hirano ve Asami, 2012).

Fenolik reçinelerin dikkat çeken diğer bir yönü ise metal yerine kullanımlarıdır. Metallere göre düşük maliyeti ve hafif özellikleri sayesinde elektronik, çeşitli enstrüman korumaları, motor ve pompa parçaları gibi malzemelerde kullanımı her yıl giderek artmaktadır. Bağlayıcı olarak uzun yıllardır kullanılması fenolik reçinelerin diğer en önemli yönlerinden biridir (Wang vd., 2005).

Fenolik reçinelerin özellikle otomotiv piyasasında sorunlara cevap verecek şekilde kullanılarak üretilen ve piyasada mevcut bulunan ürünler oldukça fazladır (Polijansek ve Krajnc, 2005). Otomobillerde bulunan disk balataları, fren balataları ve debriyaj parçaları gibi sürtünme kuvvetinin yüksek olduğu yerlerde yaygın kullanılmaktadırlar. Asbest bu parçalarda kullanıldığında çevreye ve insanlara verdiği zararlardan dolayı gelişmiş ülkeler tarafından yasaklandı. Onun yerine sürtünmeye karşı dayanıklı, yüksek mekanik dayanıma sahip, yanmaya karşı direnci yüksek olan, esnek, suda çözünmeyen, titreşim sönümleme gibi mükemmel özellikleriyle, son yıllarda geliştirilerek modifiye edilerek geliştirilmiş silikon-fenolik reçineler, aromatik-modifiyeli fenolik reçineler ve kauçuk modifiyeli fenolik reçinelerin kullanımı giderek artmaya başlamıştır. Otomobil parçalarında kullanılmak üzere daha gelişmiş özelliklere sahip malzemeler üretilmek istendiğinde uzun lifli malzeme teknolojisi, kompozit döküm tekniği (Choi vd., 2002), termal teknoloji gibi üstün yenilikler ortaya çıkmıştır.



Şekil 11. Fenolik reçinelerin otomotiv uygulamaları (Hirano ve Asami, 2012).

Otomobil sektöründe yüksek basınç gerektiren yerlerde, pompa, yakıt enjektörü, EGR (Egzoz Gazı Devridaim Sistemi) ve yağ pompası parçalarının üretiminde kullanılan, yarı kompozit, yüksek mukavemete sahip, yüksek sıcaklığa dayanabilen malzemeler ve plastikler üzerine yapılan araştırmaların sayısı giderek artmaktadır. Ancak fenolik reçinenin doğal katı yapısı ve esnemez özelliğinden dolayı şok direnci düşüktür. Bu özellikten dolayı otomobilde bulunan parçalarda fenolik reçinelerin kullanımı sınırlanmaktadır. Şok direncini artırmak için lifli yapıyı uzatarak yeni bir yöntem (üç boyutlu kalıplama) geliştirilmiştir. Bu sistem sayesinde uzun lif kompozit yapının mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ile otomotiv parçaları, hava ulaşım parçaları ve endüstriyel makine parçalarında da fenolik reçinelerin kullanımı artmıştır (Aierbe vd., 2000). Yapılan çalışmalarda yüksek dayanım, aşınma dayanımı yüksek, ısıl direnci iyi olan ve düşük sürünme direnci gibi yüksek performan özelliklerinden dolayı karbon fiber takviyeli fenolik reçineler de daha fazla ilgi çekmeyi başarmışlardır (Hirano ve Asami, 2012).

1.8. Takviye Malzemeleri

1.8.1. Cam Elyaf

Cam elyafların mukavemet ve modül değerleri artan sıcaklık değerleriyle dayanabilmektedirler. Devamlı yük altında sürünme etkisine maruz kalsalar bile iyi performans özellikleri gösterebilecek şekilde tasarım esnekliğine sahiplerdir. Farklı tiplerde cam elyafı bileşimleri üretilmektedir ancak kompozit uygulamalarda E cam, S cam (ve bunun S2 varyasyonu) ve C cam olmak üzere üç tipi yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapılan uygulama için yüksek mukavemet ve elektrik direnci önemli olduğunda, E cam elyafları kalsiyum alümino borosilikat bileşimine sahiptir ve kalsiyum oksit kullanılır. Bu cam elyaf genellikle mühendislik termoplastik kompozit takviye uygulamalarının kısa elyaf takviyesi için kullanılır; tekneler, koltuklar veya tepsiler. S cam daha yüksek mukavemete sahiptir ve gelişmiş kompozit uygulamalarda kullanılır. Kimyasal direnç gerektiren uygulamalar için korozif ortamlara dayanıklı C sınıfı kullanılmaktadır (Hoa, 2009).

Çeşitli cam elyaflara ait özellikler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Cam elyafı çeşitlerinin mekanik özellikleri (Türkmen, 2018).

Özellikler	S-CAMI	C-CAMI	E-CAMI
Özgül Ağırlığı (g/cm ³)	2.48	2.49	2.54
Elastisite Modülü (GPa)	85.5	69	72.4
Çekme Mukavemeti (MPa)	4585	3033	3048
Isıl Genleşme Katsayısı (mm/°Cx10 ⁶)	5.6	7.2	5
Yumuşama Sıcaklığı (°C)	970	749	841

Novalak fenolik reçineye ilave edilen katkılardan cam elyaf, en yaygın kullanılan ve maliyeti düşük katkı türüdür. Cam elyaf genel olarak mekanik, tribolojik, elektriksel iletkenlik, kimyasal direnç ve korozyon dayanımı gibi özellikleri geliştirmek için kullanılır. Üretimde en çok kullanılan cam elyaf türü E-camıdır. Malzeme mukavemetini ve elektrik direncini arttırmak için kullanılır. E-camının mukavemeti değeri üretim sırasında yapılan işlemlere ve testin yapıldığı çevre koşullarına göre farklılıklar göstermektedir. Önemli farklılıkların en başında ortamdaki nem gelmektedir. Nem, mukavemeti düşüren etmenlerdendir. Cam elyafın asitlere maruz kaldığında da mukavemetin düşmesi diğer bir nedendir. Ayrıca üretim sırasında cam elyafların birbirlerine sürtünmesi de dayanımı azaltmaktadır. Elyaf içerisinde oluşan ve ortadan kaldırılamayan bazı süreksizliklerin meydana gelmesinden dolayı mukavemet değerlerinin her ölçüm yapıldığında aynı çıkmamasına neden olmaktadır (Erbay, 2009).

Cam elyafı, eritilmiş camın spinneret adı verilen sistemlerden geçirilmesi sonucu oluşan ince liflerin silan bazlı kimyasallarla kaplanıp soğutulur ve makaralara sarılır. Bu işlemlerden sonra nakliye edilmesiyle piyasaya sürülmektedir. Kırpılmış cam elyafın ya da cam elyafının öğütülmesi ile cam elyaf tozu ortaya çıkmaktadır (Solak, 2012).

Cam elyafın yapısında yaklaşık olarak %50'si silika (SiO₂)'dan oluşmaktadır, geri kalanı ise bor, kireçtaşı, kolemanit, alüminyum oksit, boraks, soda vb. gibi hammaddelerin harman şekline getirilip eritilmesi sonucu elde edilir. Bu hammaddelerin her birinin değişik özelliklerinden dolayı cam elyaf takviyeli polimer malzemeye kattığı özellik farklıdır.

Örnek vermek gerekirse kireçtaşı, (kalker) ergime sıcaklığının düşmesini sağlar. Boraks vb. hammaddeler üretilen malzemenin kimyasal direnç özelliklerine katkı sağlar. Plastik malzemelerin takviyesi için cam elyafı kullanılır. Kırılgan yapıya sahip ve düşük sıcaklıkta bozulma özelliklere sahip plastik malzemelerin hızlı erime, eğilme dayanımları, çekme mukavemetleri, fiziksel vb. özelliklerini geliştirmek amacıyla kullanılmaktadır (Türkmen, 2018).



Şekil 12. Cam takviye örnekleri: öğütülmüş, kırılmış, fitil ve dokuma (Sönmez, 2009).

Cam elyafların neme karşı direnç özelliği yoktur. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerde nemin etkisi sonucunda matris ile cam elyaf arasında çözünme meydana olabilmektedir. Bu çözünme durumunu ortadan kaldırmak için uygulanan özel elyaf kaplama işlemleri vardır. Cam elyafların yapısı kimyasal malzemelere karşı direnç gösterir. Elektrik direnç özellikleri vardır. Elektrik yalıtımının önemli olduğu uygulamalarda bu özelliği sayesinde cam elyaflı kompozit malzemelerin önemi büyük ölçüde artmaktadır. Cam elyafların çekme mukavemetleri ve birim ağırlık başına düşen dayanımları çelikten daha yüksek olmasının yanında, ısı dayanımları çelik malzemelerinden daha düşüktür. Düşük yoğunluk ve yüksek dayanıma sahip olmaları, maliyetlerinin düşük oluşu, üretim parametrelerinden; sıcaklık, viskozite ve çekme hızının değiştirilmesi ile farklı çaplarda üretilibilmelerinden dolayı cam elyafların plastik esaslı kompozitler de yaygın olarak kullanılmasına yol açmıştır (Türkmen, 2018).

1.8.2. Grafit Tozu

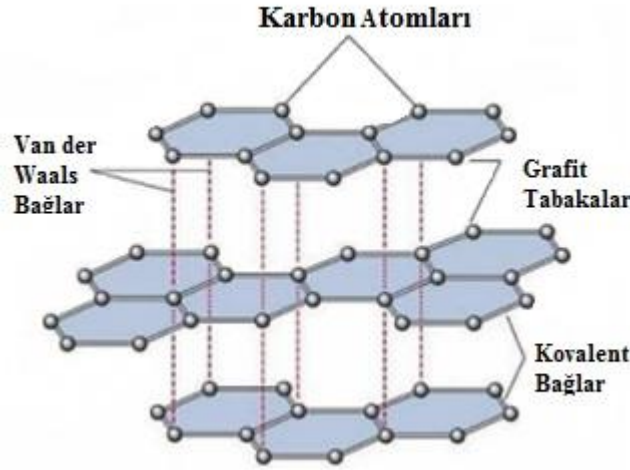
Karbon doğada farklı kristal yapısına sahip olabilir. Bu yapıların en önemlileri arasında hegzagonal kristal yapıda olan grafit ve kovalent bağlı elmadır. Kimyasal yapıları aynı olan grafit ve elmanın, kristal yapıları ve özellikleri tamamen birbirinden farklıdır. Grafit, elmasa göre oldukça yumuşıktır. Grafit üretiminde hammadde olarak Poliakrilonitril (PAN), rayon ve zift kullanılır. Üretim sıcaklığına göre veya uygulanan ısı işlemin farkına göre karbon bileşimleri farklılık göstermektedir. Grafitin yapısında %99 un üzerinde karbon içermesine karşı Poliakrilonitril %93-95 karbon içermektedir (Suzin, 2011). Konak polimerlerin iyi bilinen özellikleri ile eklenen dolgu maddelerinden kaynaklanan farklı potansiyeller arasındaki sinerjiyi başarmak, yeni gelişmiş polimer matris malzemeleri geliştirmek için heyecan verici bir yoldur (Bellucci vd., 2015). Günümüzde grafit, doğal veya sentetik olarak elde edilebilir, ancak ikincisi, üstün tutarlılığı ve saflığı nedeniyle özel uygulamalar için kullanılmıştır. Ayrıca grafit, sertliği nedeniyle yollarda ve ince seramik plakalarda kullanılabilir (Gao ve Shao, 2012).



Şekil 13. Grafit (Arslan, 2019).

Karbon malzemeler (grafit, karbon nanotüpler ve grafen dahil) gelişmiş mekanik özellikler ve güvenilirliği sayesinde ön plana çıkmaktadır. Bu özelliklerin yanında daha düşük sürtünmeyi, iyileştirilmiş aşınma davranışını, yüksek elektriksel ve termal iletkenlik özelliklerini birleştiren çok işlevli mühendislik kompozitlerini üretmek için kullanılan güçlendirilmiş malzemelerdir. Bu özellikleri ilginç bir ölçüde bir araya getiren grafit, karbon allotropları arasında diğerlerine göre daha iyi bir fiyat sunarak üretim maliyetini düşürür (Yasmin ve Daniel, 2004; Özerol vd., 2015).

Karbon elementinin iki doğal allotropu kristal olan elmas ve grafitir. Grafitin yapı özellikleri elmastan çok farklıdır. Grafitin kristal yapısı hekzagonal kristal yapısına sahiptir ve birbirlerinin üstüne yığılmış olan karbon atomları geniş ve yassı levhalar oluşturması ile birbirlerine iki boyutlu düzlemde bağlanmıştır. Karbon atomlarından oluşan bu levhalar birbirlerinin üzerinden rahatlıkla kayarak grafitin iyi bir katı yağlayıcı özelliğine sahip olmasını sağlamıştır. Grafitin yapısında bulunan karbon atomlarının bir araya gelerek oluşturdukları düzlem içerisindeki bağlar kuvvetli olmasına rağmen düzlemler arasındaki bağları zayıftır. Grafitin bu özelliği sayesinde yapıda kaygan bir davranış sergiler (Arslan, 2019).



Şekil 14. Grafitin kimyasal yapısı (Arslan, 2019).

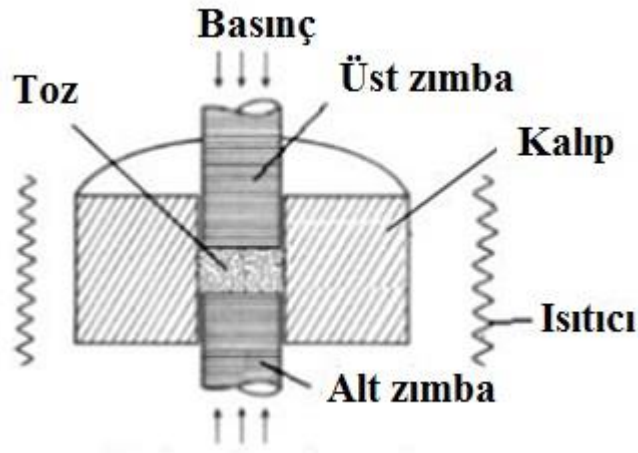
Grafit ne metal ne de seramik malzeme olarak kabul edilmese bile, bu iki mükemmel malzemenin en iyi özelliklerini bir araya toplamaktadır. Grafit ayrıca olağanüstü bir yüksek sıcaklığa da dayanabilir; yüksek saflığa ve düşük gaz emisyon özelliklerine sahiptir. Grafit, diğer özelliklerinin yanı sıra yüksek ısı direnci, kimyasallara karşı güçlü direnci, düşük genleşme katsayısı, hafiflik, yağlama kabiliyeti gibi mükemmel özellikler sunar. Grafit, silikon yarı iletken alanlarındaki grafit parçalar, elektrik deşarjlı işleme için grafit elektrotlar veya enerji ile ilgili parçalar üzerine farklı ekipmanların parçaları olarak birçok endüstriyel alanda ve özel kullanımlarda uygulanmıştır (Medina vd., 2016).

1.9. Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemeyi üretirken kullanılan yöntemlerde, reçineler, elyaflar, hasırlar, ön gömülmüş tabakalar, kalıp bileşenleri gibi farklı kompozit hammaddelerinden, kompozit parça üretiminde yararlanılır. Üretim yöntemlerinin her biri, farklı tipte malzeme sistemi, işlem şartları ve farklı donanımsal süreç gerektirir (Güleşen, 2005). Bu çalışma için, sadece çalışmada kullanılan üretim yönteminden bahsedilmiştir.

1.9.1. Basınçlı Kalıplama Yöntemi (Sıcak Presleme)

Kullanılan yöntemlerin birbirlerine kıyaslandığında kendine özgü bazı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Belli oranlarda karıştırılan matris ve takviye fazı tozları belirlenmiş şekilde olan bir kalıba aktarılır. Kalıplanmak istenilen tozların birbirine bağlanması için gerekli olan basınç(kuvvet) uygulanır. Homojen şekilde birbirine karıştırılan bu tozların birbirine düzgün bir şekilde bağlanmasını sağlamak için, preste sıkıştırılan tozlara erime sıcaklıklarının altında olmak üzere katı-faz difüzyonunun oluşması için yeterli düzeyde yüksek sıcaklık verilir (Torralba vd., 2003; Tekmen 2006). Genellikle performansı yüksek olan malzemelerin ve sinterleme davranışı düşük olan malzemelerin ürün haline getirilebilmesi için SP (sıcak presleme) tekniğinin kullanılması uygun görülen bir yöntemdir (Nas vd., 2013).



Şekil 15. Tek eksenli sıcak presleme işleminin kesit olarak gösterilişi (German, 2007).

Üretim tekniği olarak kullanılan sıcak presleme tekniğinde tek veya çift hareketli zımba kullanılarak malzeme üretilebilir (Köksal, 2004). Bu üretim tekniğinde alt destek parçası sabit tutulabilir. Hidrolik bir sistem tarafından uygulanan basınç genellikle genellikle üst zımba tarafından sağlanmaktadır. Zımba tarafından uygulanan kuvvet eşeksenel olmasına rağmen kalıp yüzeylerinde sürtünme meydana gelir. Bu nedenle merkez bölgesinden yanlara doğru değişken bir dağılım sergilemektedir. Bundan dolayı oluşan eksenel ve radyal yönler arasında meydana gelir. Bu gerilim farkı tozların dış yüzeylerinde bozulmaya neden olabilecek bir kayma bölgesi oluşturur (Öğünç, 2006). Numunenin preslenmesi için gereken kuvvet üst zımba ile verilir. Araştırmada bu yöntemin kullanılmasının temel sebepleri;

- Maliyetinin düşük olmasından
- Presleme ve sinterleme işlemlerinin tek seferde ve aynı anda yapılabilmesi
- Ortaya çıkan parçanın yapısının düzgün olması
- Üretim için düşük sıcaklıklarda olabilmesi
- Üretim süresinin kısa sürede gerçekleşmesidir.

Sıcak pres tekniğinin avantajlarından biri ise basınç ve sinterleme işleminin birlikte yapılmasından dolayı ayrıca sinterleme işlemine gerek duyulmamasıdır. Üstelik iç yapısı düzgün olan malzemeler, yüksek yoğunluğa sahip, düşük maliyetli, oksitlenmeyen seramik malzemelerin yapılması sıcak pres yönteminin avantajlarından (Somunkıran vd., 2011; Kaya, 1999). İşlem süresinin yavaş olması ve tasarlanılan kalıp yapısından dolayı sıcaklığın zor kontrol edilmesi sıcak presleme tekniğinin dezavantajıdır.

Sıcak pres tekniğinin kullanıldığı başlıca endüstriyel uygulama alanları ise;

- Hafif kompozitler
- Manyetik kayıt başları
- Aşınmaya karşı dayanıklı malzemeler
- Titanyum kullanılan hava ulaşım sistemleri
- Yüksek performans manyetikleri
- Yarı iletken kaplama malzemeleri
- Yapay implantlar
- Zırh debilecek sistemlerin üretilmesinde kullanılması gibi sıralanabilir (Ergün 2006).

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Deneylerde Kullanılan Matris ve Takviye Malzemeler

Endüstrinin birçok alanında termoset matrisli, cam elyaf tozu ve grafit tozu ile takviye edilen kompozit yapılar önemli bir konu haline gelmiştir. Özgül mukavemetin yüksek oluşu, form verilebilme yeteneği ve geri dönüşüm kabiliyeti bunun nedeni olarak örnek olarak verilebilir. Cam elyaf tozunun diğer elyaf çeşitlerine oranla düşük maliyete sahip olmasından dolayı bu çalışmada tercih edilen takviye malzemesidir.

2.1.1. Polimer Matris

2.1.1.1. Novalak reçine

Bu çalışmada üretilen polimer matrisli kompozit malzemelerin fiziksel, mekanik ve termal özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada matris malzemesi termoset reçine olan novalak reçine tozu kullanılmıştır (Şekil 16). Novalak reçine, Çukurova Kimya A.Ş' den temin edilmiştir. Novalak reçine olarak piyasaya sürülen bu termoset reçine toz halinde kullanılmıştır.



Şekil 16. Kullanılan novalak reçine tozu

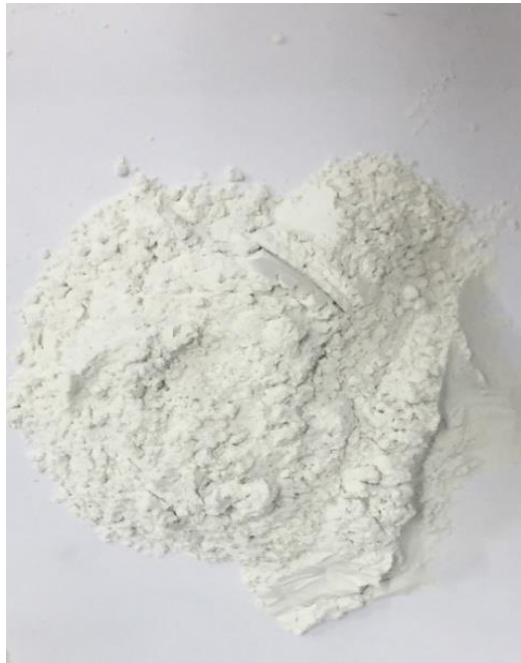
2.1.2. Katkı Malzemeleri

2.1.2.1. Cam Elyaf

Katkı (Takviye) malzemelerinden biri olan ve deneyde kullanılan cam elyaf partikül ve lif formunda olup 25 μm çapındadır. Takviye malzemesi olarak kullanılan E tipi cam elyaf, Poltek Polyester ve Boya Sanayi Ticaret Ltd. Şti'den temin edilmiştir. E tipi cam elyaf, kolay akma gösteren, mekanik dayanımı iyi olan ve iyi işlenebilirlik özelliklerine sahiptir. Deneylerde kullanılan E tipi cam elyafın özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Cam elyafın genel özellikleri

Cam Tipi	E
Elyaf Çapı (μm)	10-25
Yoğunluk (g/cm^3)	2,54
Çekme Dayanımı (MPa)	3445
Elastiklik modülü (GPa)	73



Şekil 17. Kullanılan cam elyaf tozu

2.1.2.2. Grafit Tozu

Grafit mükemmel derecede termal yalıtım özelliği ve iyi elektriksel iletkenlik gösteren, yüksek ısıya ve kimyasallara karşı dayanım, aleve karşı dayanım gösteren ve düşük aşınma oranına sahip olması ile ön plana çıkmaktadır. Kompozit takviye elemanı olarak Ege Nanotek Kimya Sanayi Ltd 'den temin edilen grafit tozunun özellikleri Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Grafitin özellikleri

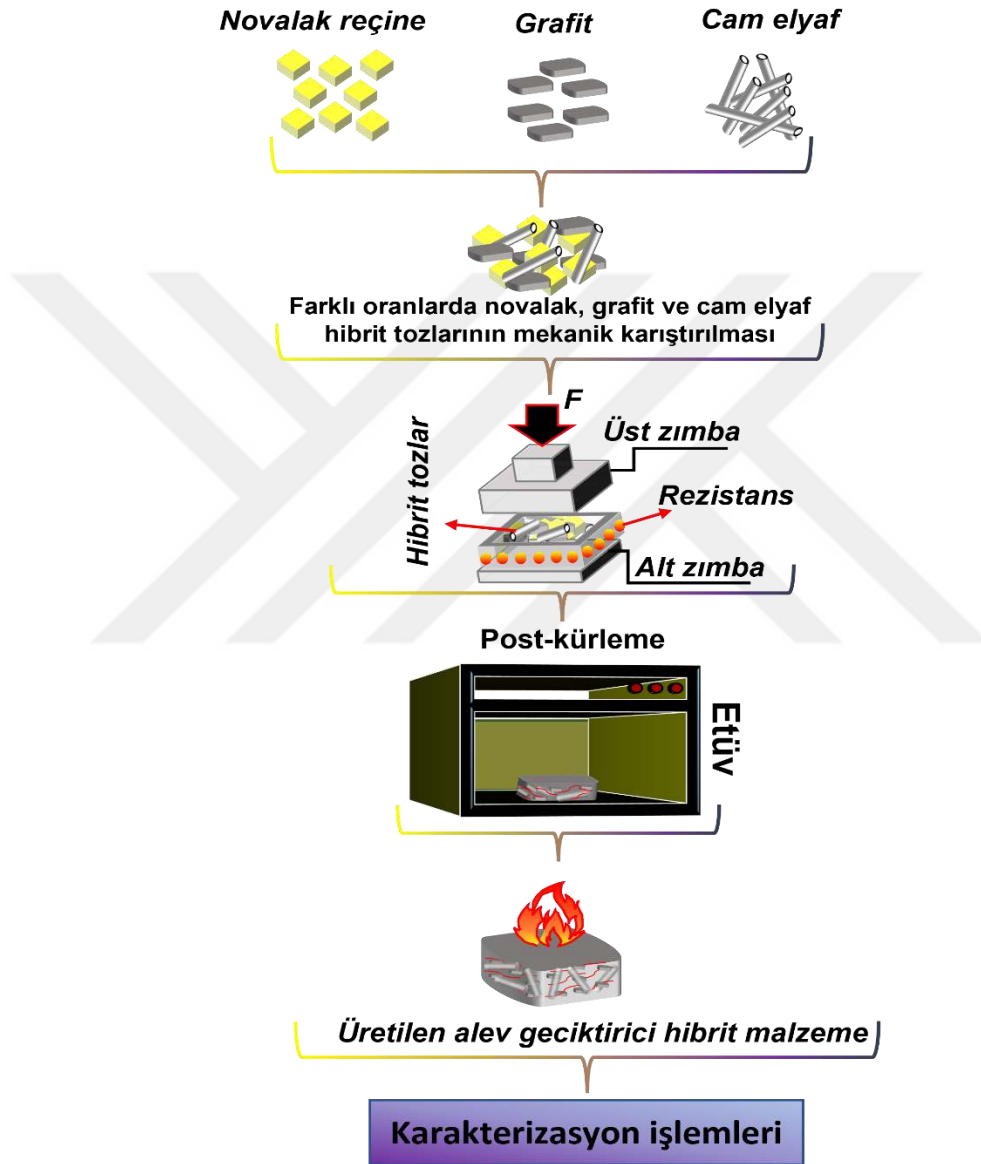
Takviye Elemanı	Grafit
Karbon Oranı	%85-90
Tanecik Çapı (μm)	25-40
Spesifik yüzey alanı (m^2/g)	10
Yoğunluk(g/cm^3)	2,26



Şekil 18. Kullanılan grafit tozu

2.2. Numune Üretimi

Ağırlıkça farklı oranlar kullanılarak üretilecek polimer kompozit numuneler için çalışma programı Şekil 19'da işlem akış şeması olarak verilmiştir.



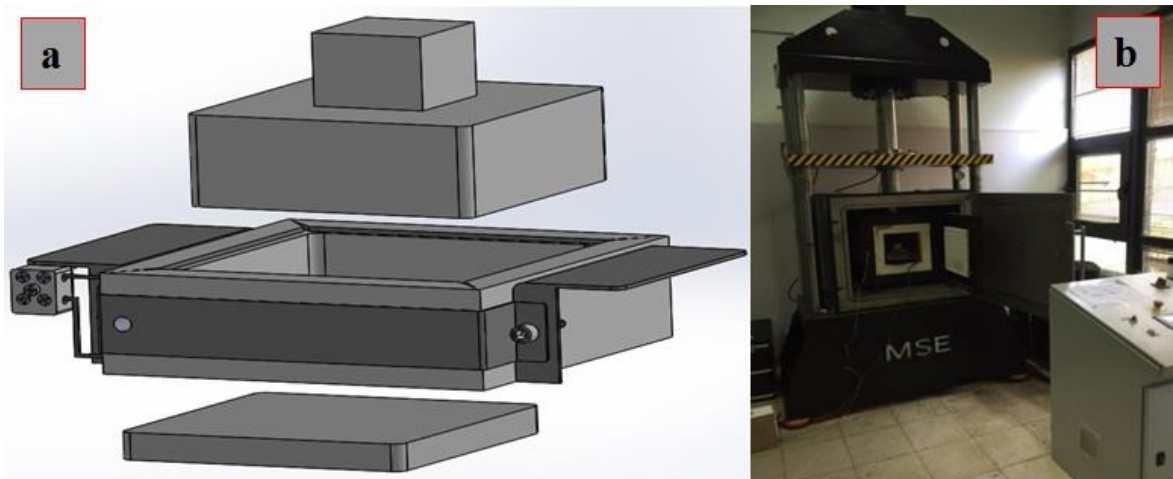
Şekil 19. Kompozit üretimi işlem akış diyagramı

Kompozit üretim sürecinde birçok deneme karışımlar yapıldı ve referans karışımı bulabilmek için en optimum karışım oranı belirlenilmiştir. Numunelerin bileşim oranları belirlenirken ağırlıkça oran esas olarak alınmış olup kullanılan tozlar 0,0001 gr hassasiyete sahip elektronik terazide tartılarak kalıba dökülmüştür.



Şekil 20. Elektronik terazi

Farklı ağırlık oranlarında hazırlanan cam elyaf tozu, grafit tozu ve novalak reçinenin birbiri içerisinde homojen bir dağılım sağlanabilmesi amacıyla karışım, 12- 15 dakika süreyle karıştırılarak hazırlanmıştır. Sırasıyla tartılıp karıştırılan tozlar kalıbın içine dökülerek presleme işlemine geçilmiştir. Numune üretimi işlem akışında üretimde kullanılan parametrelerin kullanılmak istenen malzeme özellikleri kadar numune performansına etki gösterdiği bilinmektedir. Karışım kalıplanırken uygulanan basıncın, uygulanan basıncın süresinin, sıcaklığın ve uygulanması gereken sıcaklığın süresinin üretilen malzemenin performansına etkisi çok önemlidir. Numune üretimi için tasarlanan kalıbın çizimi ve tek yönlü hidrolik pres şekil 21'de verilmiştir.

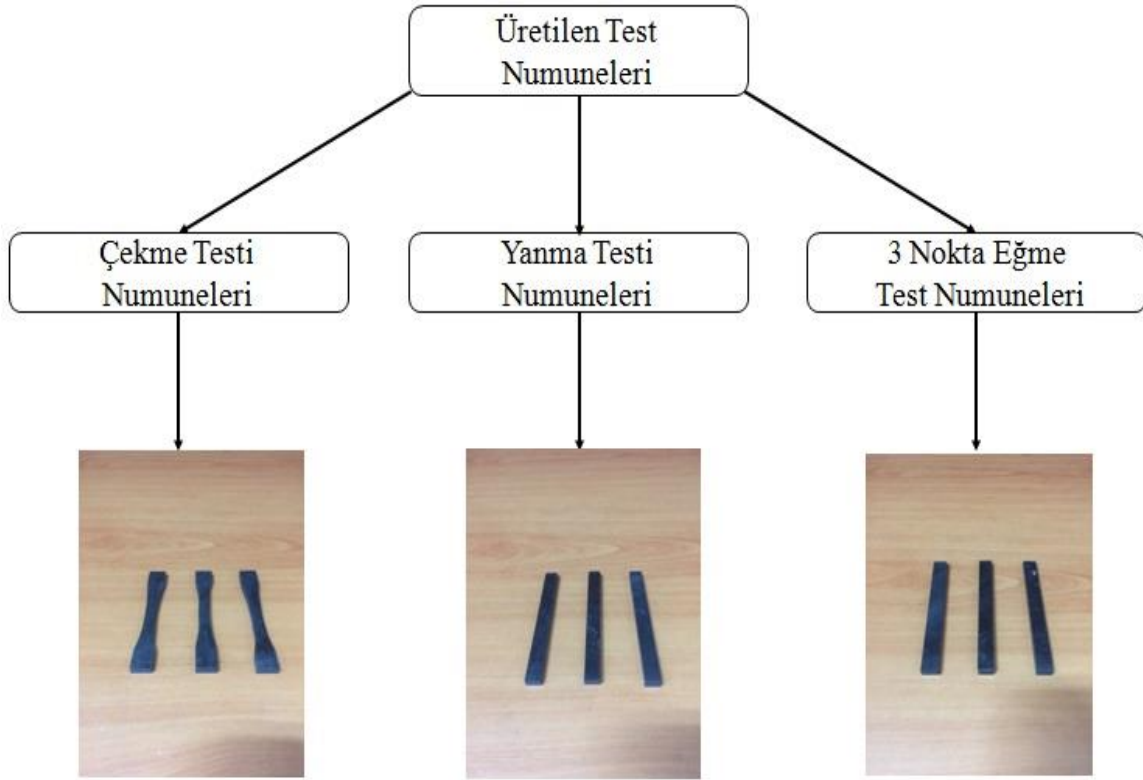


Şekil 21. (a) Kalıbın SolidWorks çizimi (b) Tek yönlü sıcak pres

Homojen bir şekilde karıştırılan bileşenler kalıbın içerisine aktarılır ve etrafı rezistans sarılı kalıbın son kontrolleri yapıldıktan sonra $210\pm5^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa ulaştırılıp zımba yardımı ile 20 MPa basınçta 1 saat şekillendirilip sertleştirilmiştir. Yüksek performans gösteren termoset malzemelerin kürlenme sıcaklığı 150°C - 220°C aralığında değiştiği literatürde yer almaktadır (Liyanage ve Pieris, 2015). Bu yüzden preslenen numunelere fırında 165°C sıcaklığında 1 saat post-kürleme işlemi uygulanmıştır. Daha sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı. Yapışmayı önlemek amacıyla zımba, gövde ve kalıp yüzeylerine kalıp ayırıcı sprej sıkıldı. Şekil 22'de görüldüğü gibi kalıptan çıkarılan kompozit levha ASTM (American Society for Testing and Materials) standartlarına uygun hale getirilerek, yoğunluk, çekme, eğme, sertlik ve yanma deneyleri için gerekli numuneler alındı.



Şekil 22. (a) Kalıptan çıkarılan kompozit levha (b) Deneyler için kompozit levhadan standartlara göre numune alınması



Şekil 23. Kompozit levhadan alınan test örnekleri

Üretilen kompozit numunelerin bileşimi literatür araştırılarak oluşturulmuştur ve kompozit bileşenleri oluşturan toz malzemeler ağırlıkça belirlenmiştir. Numune üretiminde bağlayıcı ve yanmayı geciktirici matris malzemesi olan termoset reçine olarak novalak toz reçine, takviye malzemesi olarak cam elyaf, ilave takviye malzeme olarak ise grafit kullanılarak bir bileşim oluşturulmuştur. Bileşimler saf novalak reçine ve 6 farklı kompozit numune şeklinde belirlenmiştir.

Tablo 6. Belirlenen numuneler ve ağırlıkça oranları

Numune Kodu	Novalak Reçine Ağırlık Oranı (%)	Cam Elyaf Ağırlık Oranı (%)	Grafit Tozu Ağırlık Oranı (%)
N0	100	-	-
N1	60	20	20
N2	50	20	30
N3	40	20	40
N4	30	30	40
N5	20	40	40
N6	10	40	50

2.3. Deneyde Kullanılan Ekipmanlar ve DeneySEL Yöntemler

2.3.1. Yoğunluk ve Porozite Tayini

Yoğunluk tayini için kompozit numunelerin deneySEL yoğunluğu Arşimet yöntemi ASTM (American Society for Testing and Materials) D792 kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 24 Arşimet yöntemi deney düzeneği

Kompozit numunelerin teorik yoğunluğu, Tablo 6'da bulunan novalak reçinesi, cam elyaf ve grafit katkıları için teorik değerler kullanılarak karışımlar kuralından hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçların güvenilirliği açısından, değerlerin ortalaması alınarak porozite ve yoğunluk deneyleri kaydedilmiştir.

$$\delta_t = [(\%W)_1 \cdot \delta_1] + [(\%W)_2 \cdot \delta_2] + \dots + [(\%W)_n \cdot \delta_n] \quad (2.1)$$

Burada;

δ_t : Teorik yoğunluk

$(\%W)_n$: Takviyelerin her birinin karışımdaki ağırlıklı olarak yüzdesi

δ_n : Takviyelerin her birinin yoğunluğu

$$\% \text{ Gözenek miktarı} = 1 - \frac{\text{DeneySEL yoğunluk}}{\text{Teorik yoğunluk}} \times 100 \quad (2.2)$$

formülü ile hesaplanmıştır.

2.3.2. Mekanik Karakterizasyon

Polimerlerin mekanik özellikleri, malzemelerin çekme, darbe gibi dış etmenlerle karşılaştığında ortaya çıkan tepkilerin bütün hepsini kapsamaktadır. Polimer malzemelerin mekanik özellikleri, kimyasal ve fiziksel özelliklerine, üretim yöntemlerine, kullanım koşullarına ve işlem sürelerine direk olarak bağlıdır. Polimerler kullanılarak üretilen malzemelerin çekme mukavemeti, eğme dayanımı, mekanik özellikleri, standart koşullarda veya malzemenin nerde kullanılıyorsa o koşullara göre laboratuarlarda kullanılan testlerle belirlenir. Bu yapılan test sonuçlarından iki temel bilgiye ulaşırız; polimerin test yapılan koşullara benzer laboratuvar ortamlarında, test edilen mekanik özellik açısından kullanılıp kullanılamayacağı belirlenir ve farklı malzemelerin benzer mekanik özellikleri ile mukayese edilebilir.

2.3.2.1. Sertlik Testi

Sertlik, malzemelerin plastik deformasyon karşısında gösterdiği direnç kabiliyetidir. Bir malzemenin kalite kontrolünü belirlemek için kullanılan yöntemlerinden biri olan sertlik ölçümü yapılan en genel testtir. Bunun en önemli sebebi deneyin yapılışının basit oluşu ve diğer testlerle kıyaslandığında numuneye daha az tahrip vermesidir. Bu deneyde kullanılan sertlik ölçüm cihazı şekil 25’te verilmiştir.

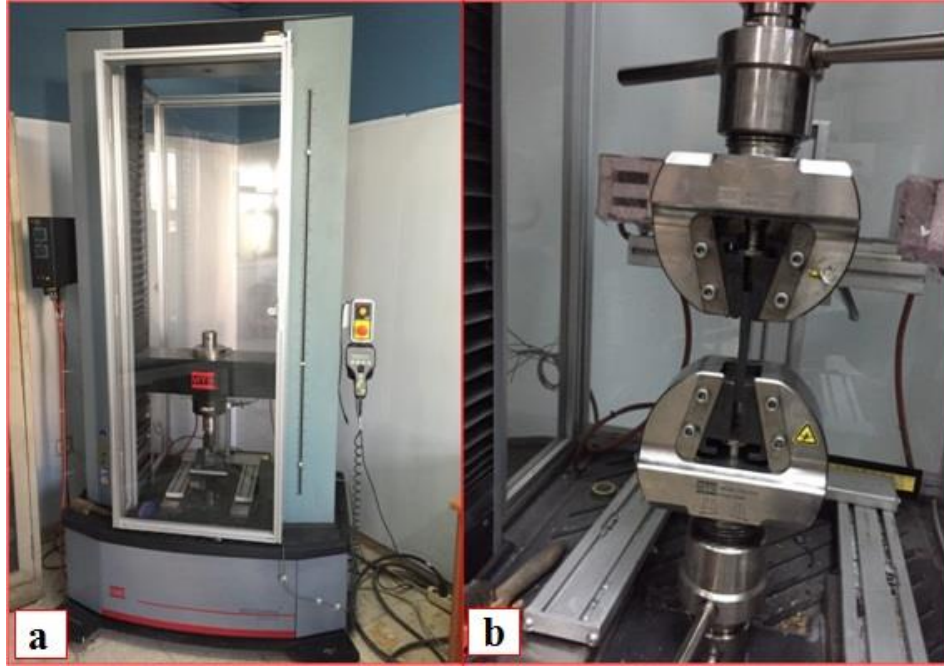


Şekil 25. Sertlik ölçüm cihazı

Oda sıcaklığında gerçekleştirilen sertlik ölçümlerinde 40x40x7 mm boyutlarında numuneler kullanıldı. Her numunenin yüzeylerinden sertlik ölçümleri yapılarak, en az 6 ölçüm alındıktan sonra bu ölçümlerin ortalaması alınıp sertlik değerleri tespit edildi. Sertlik ölçümlerinde HRM (Rockwell M) sertlik skalası kullanıldı. Bu deneyde 1/8" çapındaki sertleştirilmiş çelik bilye 10 kg'lık ön yük uygulandıktan sonra 100 kg'lık ana yük altında numune yüzeyine bastırıldı.

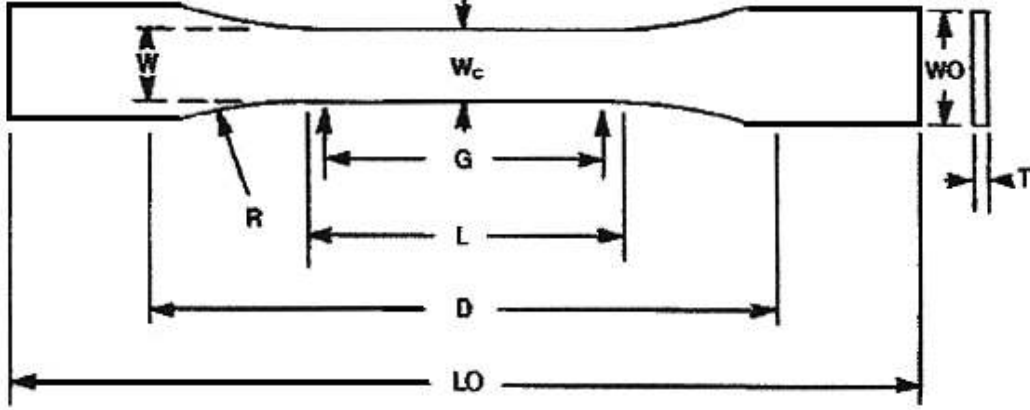
2.3.2.2. Çekme Mukavemeti Testi

Test, numunenin her iki ucunun test cihazının çeneleri arasına sıkıştırılıp diğerinin sabit olarak hareket etmesiyle gerçekleştirilir. Çekme deneyleri, ASTM D638 standardına göre numune cihazın çeneleri arasına dikey olarak yerleştirildi. Test numunesinin kaymasını engellemek için tutucular gergin ve sıkı olmalıdır. Hız ayarlanarak makine çalıştırıldı. Numunenin boyundaki uzama ve numunenin gösterdiği dirence karşılık gelen yük değeri makine tarafından kaydedildi. Parça kopana kadar işleme devam edilip kopma anındaki gözlenen uzama, numunenin kopmada uzama değeri olacaktır. Kopma anında uygulanan yük değeri de makine tarafından kaydedildi. Bu çalışmada kullanılan çekme cihazına ait görüntü şekil 26'da verilmiştir.



Şekil 26. Çekme testi cihazı ve deney anı

Çekme deneyleri, ASTM D638 standardına göre 90 mm uzunluğunda 15 mm genişliğinde ve 7 mm yüksekliğinde numuneler üzerinde, MTS marka çekme deney makinesinde yapıldı. Numuneler çeneler arasına bağlanıp gerekli veriler (numune genişliği ve kalınlığı) girildikten sonra 2 mm/dk'lık sabit çekme hızında deneyler gerçekleştirildi. Söz konusu deneyler sonucunda malzemeye ait çekme dayanımı ve elastisite modülü belirlendi.



Şekil 27. Çekme testi numunesi (ASTM D638).

Çekme testi numunesinin boyutları ise aşağıdaki gibidir;

W; dar olan kısmın genişliği, 8 mm

L; dar olan kısmın uzunluğu, 38 mm

WO; tüm genişlik, 15 mm

LO; tüm uzunluk, 90 mm

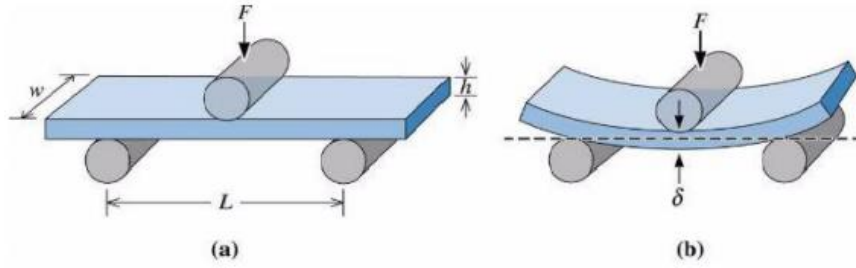
G; ölçüm uzunluğu, 30 mm

D; Çeneler arası uzunluk, 55 mm

R; eğrilik yarıçapı, 76 mm

T; kalınlığı, 7 mm

2.3.2.3. Eğme Dayanımı Testi



Şekil 28. 3 nokta eğme deneyi düzeneği (Askeland vd., 2010).

Eğilme dayanımı: numuneye basma kuvveti uygulandığında elde edilen maksimum gerilme değeridir. Aşağıda eşitlikteki gibi hesaplanır:

$$\sigma_f = 3PL/2bh^2 \quad (2.4)$$

Burada;

σ_f = eğilme gerilmesi, MPa[psi]

P = yük, N [lbf]

L = mesnetler arası mesafe, mm [in]

b = numunenin eni, mm [in]

h = numunenin derinliği, mm [in]

Kırılmada eğilme uzaması: kırılma noktasında oluşan boyutsal değişim uzama olarak tarif edilir.

Kırılmada eğilme uzaması aşağıda gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\epsilon_f = 6 Dd/L^2 \quad (2.5)$$

Burada;

ϵ_f = maksimum uzama, mm/mm [in/in]

D = numunenin ortasındaki maksimum bel verme, mm [in]

L = mesnetler arası uzaklık, mm[in]

d = numunenin derinliği, mm [in]

ASTM D790 standardına göre hazırlanan numuneler uzunluğu 127 mm genişliği 13 mm olarak kesildi ve kalınlığı 4 mm olan numunenin, destek noktaları arası mesafe numune kalınlığının 32 katı olarak 128 mm alınır. Numunelerin her biri için yapılan testler 3 tekrarlı olacak şekilde yapılmıştır. Şekil 29'daki gibi numuneler iki destek üzerine yerleştirilir ve üzerine sabit 1 mm/dakika hızda ve orta noktasından örnek kırılana kadar kuvvet uygulandı. Çubuğun kırılmasına neden olan güç, örneğin en yüksek eğilme gücü olarak kaydedildi.



Şekil 29. Eğme testi cihazı görüntüsü ve deney anı

2.3.3. Yüzey Karakterizasyonu

Üretilcek olan kompozit yapının dayanıklılığında dikkat edilecek en önemli durum elyaf ile matris arasında bulunan ara yüzey bağın yapısıdır. Üretilen kompozit malzemelerin kırılma yüzeylerinin incelenmesi ile; takviye fazı ile matris fazı ara yüzeyi, matris içinde bulunan partiküllerin dağılımı ve matris sisteminin takviye sistemini ıslatabilirliği hakkında bilgi SEM cihazı kullanarak elde edildi.

SEM, yüzey analizi için en eski ve yaygın olarak kullanılan araçlardan biridir. Kalitatif analiz nispeten kolaydır çünkü SEM, numune boyunca odaklanmış bir elektron ışını sondasının taranmasıyla oluşturulan üç boyutlu görüntü sağlar (Sperling, 2015).

2.3.3.1. Tozların Morfolojisi ve Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesi (SEM-EDS)

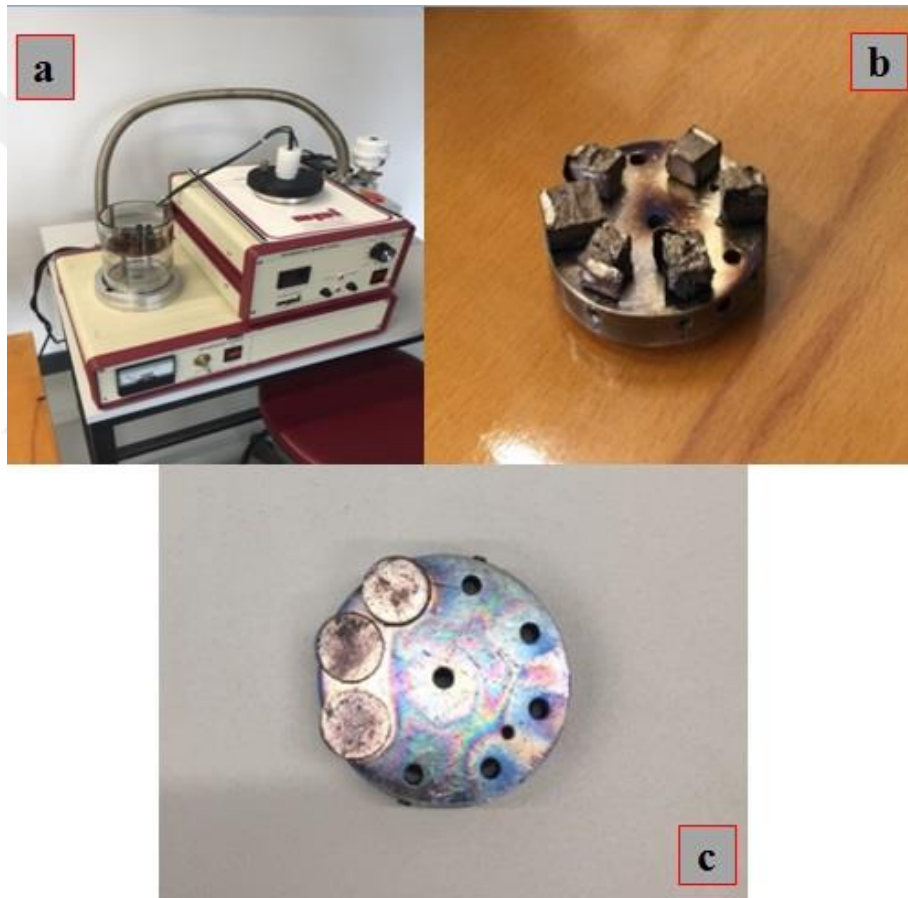
Işık kullanan optik mikroskoplardan farklı olarak SEM, görüntü oluşturmak için elektronları kullanır. Mikroskoptaki elektron tabancasında bir elektron ışını oluşturulur. Elektron ışını numuneye çarptığında, geri saçılmış ve ikincil elektronlar yayar. Dedektör tarafından toplanan bu elektronlar sinyale dönüştürülür. Bu sinyaller televizyon benzeri bir cihaz kullanılarak izlenir ve sonunda görüntü monitörde görülebilir (Sperling, 2015). Katkı malzemelerin değişik oranlardaki dağılımını incelemek için çekme testi sonucu elde edilen kırık yüzeyleri, matris ve katkı parçacıklarının morfolojileri ve hibrit kompozit tozların mikroyapıları Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazı kullanarak analizler yapıldı. Çekme deneyi sonucunda numunelerin kırılma yüzeyleri Carl Zeiss Evo 10 marka elektron mikroskobunda incelendi (Şekil 30).

Sıcaklığa duyarlı polimerler de SEM kullanılarak incelenebilir. Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) sayesinde SEM analizi sırasında kalitatif analiz yapmak mümkündür. Yüzeylerdeki inorganik dolgu maddelerinin veya inorganik safsızlıkların tanımlanması ve dağılımı SEM kullanılarak belirlenebilir (Cengiz, 2008).



Şekil 30. Taramalı elektron mikroskobu ve EDS ünitesi

Numuneler iletken olmayacağı için SEM'e yerleştirilmeden önce Spi marka PVD kaplama ünitesi ile 10^{-6} mbar vakum altında, 15-18 mA gerilim ve 90 sn. süreyle Au-Pt kaplanmıştır. Numuneler iletken olmamasından dolayı mikroskopta çalışırken bazı problemler ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden numunelerin Au-Pt kaplanması yapılmıştır. İncelemelerle beraber, cam elyafın, grafitin ve novalak reçine içeren numunelerin ara yüzeyi ve aralarındaki etkileşim, novalak takviye sisteminin ıslatabilirliği ve novalak içindeki cam elyafın ve grafit tozunun dağılımları hakkında bilgi edinildi. Analiz edilecek toz numuneler ise gözle görülebilecek şekilde olması yeterlidir.



Şekil 31. (a) Pvd kaplama ünitesi (b) Au- Pt kaplanmış numuneler (c) Kullanılan toz malzemelerin Au-Pt kaplanmış hali

2.3.4. Termal Karakterizasyon

2.3.4.1. Limit Oksijen İndisi (LOI) Test Metodu

Polimer malzemelerin uygulama alanında kullanılabilir durumda olup olmadığının belirlenmesinden dolayı bu malzemelere endüstriyel alanda birçok alev geciktiricilik testi uygulanır. Bu testlerden en yaygın olarak kullanılan biri LOI testidir. Oksijen indeksi yöntemi, genel olarak bir malzemedeki alevlenme eğiliminin devamlılığı prensibiyle açıklanır. Bu yöntemin en önemli özelliği, malzemenin kontrollü bir atmosferde yakılmasıdır. Yöntem, polimerlerin yanma davranışlarını oksijen-azot karışımı içerisindeki minimum oksijen konsantrasyonu içerisinde değerlendirir. Bu yöntem Şekil 32'de gösterilmiştir (Çelen, 2020).



Şekil 32. LOI test düzeneği (Çelen, 2020).

Testin yapılacağı numune, bor silikat camdan yapılmış bir test kolonuna dikey vaziyette konulur ve kolondan yukarıya doğru oksijen-azot karışımı verilir. Numune üst kısmından yanmaya başlar. Eğer yanma süresi üç dakika olursa ve alev yüksekliği numune boyundan fazla olursa, test daha düşük oksijen konsantrasyonlarında tekrarlanır. Alevin kendi kendine sönmesi durumunda ise oksijen konsantrasyonu artırılır. Oksijen konsantrasyonu bu şekilde numunenin alevlenmeyi teşvik edeceği şekilde ayarlanır. LOI testi sadece yanmanın sürekliliğini sağlayacak en düşük oksijen konsantrasyonunu belirler. (Çelen, 2020).

Piyasada yaygın olarak kullanılan bazı polimer malzemelerin LOI değerleri tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Bazı polimerlerin LOI değerleri (Çelen, 2020).

Polimer	LOI (%)
PP	18
PE	18
LDPE	17
HDPE	19
PC	26
ABS	19
PVC	42
PS	18
PMMA	18
PET	21
PBT	20
PA 66	24
PA 6	21

Oksijen indeksi, diğer bir deyişle limit oksijen indeksi (LOI) testi, polimer malzemelerin yanabilirlik karakteristiklerinin belirlenmesinde en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Üretilen numunelerin yanmaya karşı dayanıklılık testleri şekil 33’teki Dynisco marka LOI cihazı ile ASTM D 2863 standardına göre 10*10*100 mm numune boyutlarında gerçekleştirilmiştir.



şekil 33. LOI cihazı

2.3.4.2. TGA Testi

Polimer kompozit numunelerin termal ayrışması ile ilgili analizi Perkin Elmer Diamond marka Termogravimetrik Analiz (TGA) cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Deney numunesi cihaza yerleştirildikten sonra sabit ısıtma hızı ile ısıtılır ve kütledeki değişim sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçülüp kaydedilmiştir. Analiz esnasında ve sonrasında yazılım kullanılarak sıcaklık veya zamana bağlı kütlece bozunma (TG) verileri ve grafiği elde edilebilmektedir. Üretilen polimer kompozit malzemelerin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kütlede görülen değişim ve bu değişim sürecinde yayıldığı aralık malzemenin ısı kararlılığını temsil etmektedir.

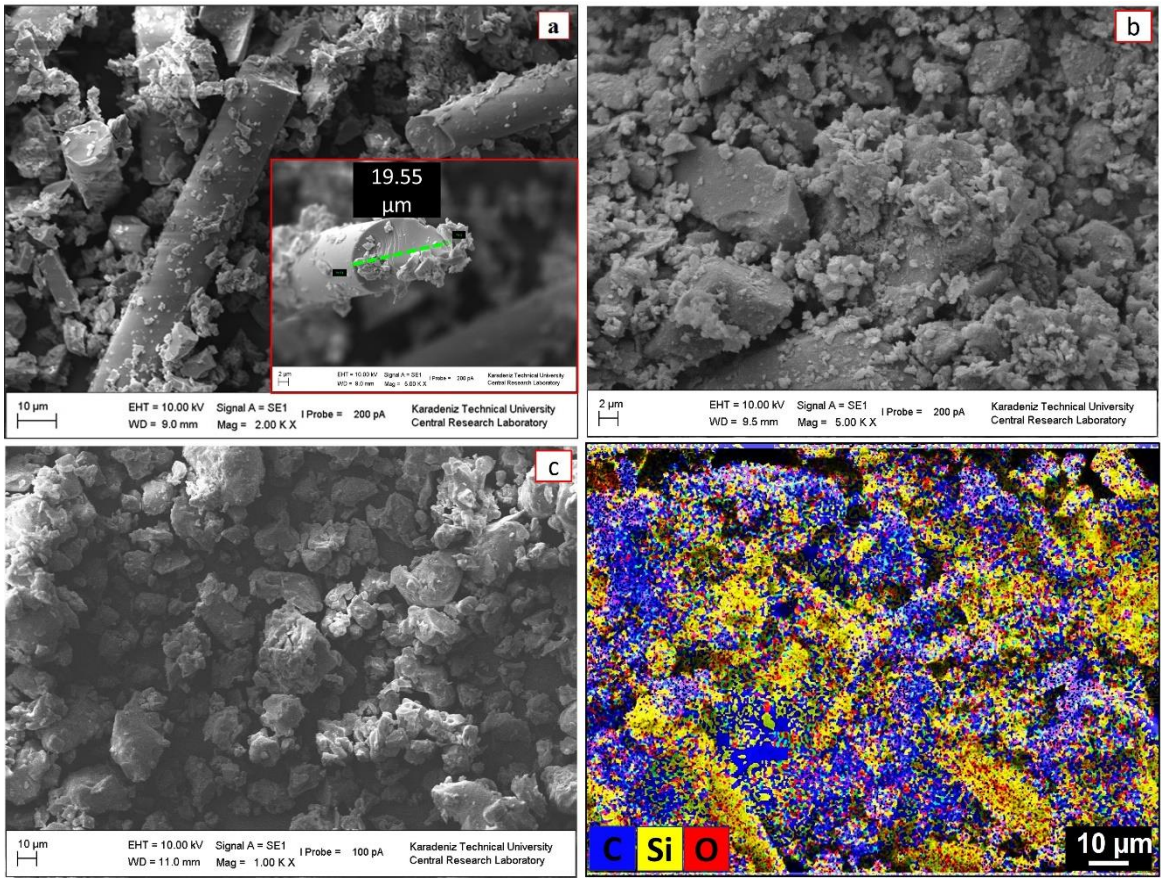


Şekil 34. TGA cihazı

Cihazın analiz hücresinde, malzemelerin ısı bozunma sürecinde yanmaya neden olacak gazları içermemesi için azot gazının kullanıldığı bir kontrollü atmosfer kullanılmaktadır. Numuneler, şekil 34'teki cihazda 30° C ila 800 ° C arasında alümina tavalarında azot akışı altında 10 ° C / dakikalık bir ısıtma oranı ile ısıtılmıştır. Ayrıca, her test için ısıtma hızında alümina referans olarak kullanılarak platin kapsül içinde 5-10 mg arasında numune alınmıştır. Analiz deneyi TS ISO EN 11357-2 standardına göre yapılmıştır.

3. BULGULAR

Üretilen novalak matrisli polimer kompozitlerin üretiminde kullanılan matris ve takviye parçacıklarının SEM görüntüleri şekil 35'te verilmiştir. Elyafin 15- 20 μm çapında olduğu Tablo 2.2.' de verilmiştir. Burada ise SEM' de alınan elyaf çapının 19,55 μm ölçüde olduğu belirlendi.



Şekil 35. (a) Cam elyafın taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü(2000x)
(b) Grafit partiküllerinin SEM görüntüsü (5000x)
(c) Novalak reçine parçacık morfolojisinin SEM görüntüsü(1000x)
(d) N4 kodlu kompozit tozlarının morfolojisi

Üretimde matris elemanı olarak kullanılan ortalama parçacık boyutu 40 mikron olan novalak parçacıklarının SEM görüntüsü Şekil 35(c)'de verilmiştir. Novalak parçacıklarının düzensiz şekilli ve gözenekli bir yapıya sahip oldukları görülmektedir. Gözenekli ve çapraz bağlı polimer matris malzemesi, matris ve takviye partiküllerinin karıştırılması işlemi sırasında katkı partiküllerinin matrise bağlanmasında homojen karıştırma için bir avantaj sağlar (Shahzamani vd., 2016). Şekil 35(b), kompozitlerin üretiminde katkı maddesi olarak kullanılan grafitin SEM görüntüsünü gösterir. Grafitlerin morfolojisi, keskin kenarlı düzensiz yapılardan oluşur. Çok küçük grafit pul tabakalarının bir araya gelmesiyle oluşan bu yapı ile karıştırma ve presleme-şekillendirme sırasında dolgu malzemesi olarak gözenekli novolak matrisin içine kolaylıkla yerleşebilecekleri açıktır. Bu şekilde polimer matrisi ile grafit parçacıkları arasındaki ara yüzeyde güçlü bir bağ oluşumu meydana gelir. Kompozitlerin mekanik özelliklerinin, Polimer matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan grafit partiküllerinin güçlü arayüzey oluşumu ve polimer matris içinde homojen dağılımı ile iyileştirildiği bildirilmiştir (Braga vd., 2019; Pandey vd., 2016). Bu çalışmada, novalak matrise eklenen diğer bir katkı maddesi olan cam elyafı ve parçacıklarının SEM analizi Şekil 34(a)'da gösterilmiştir. Anlaşılabileceği üzere morfoloji hem lifler hem de düzensiz parçacıklar şeklinde gözlenmektedir. Cam elyafların lif morfolojisine ek olarak, düzensiz morfolojiye sahip küçük partiküllerin matrisin gözeneklerine yerleşimleri açısından önemi literatürde belirtilmiştir (Letelier vd., 2019). Şekil 35(d), N4 (%30 novalak- %30 cam elyaf- %40 grafit) hibrit kompozit tozlardan elde edilen haritalama analizini sunmaktadır. Görülebileceği gibi, cam elyafların ve grafitlerin katkısı sırasıyla Si-O ve C dağılımı ile belirgindir. Cam elyaf partiküllerinin bazı bölgelerde lif şeklinde varlığı belirlenirken, bazı bölgelerde mikron partikülleri şeklinde gözlenmiştir. Literatürde, partiküllerin bir kısmının fiber, bir kısmının ise mikron partikül şeklinde olduğu ve farklı boyutlarda olduğu, matris ile arayüzey uyumluluğunu artırarak kompozitlerin performans özelliklerine katkı sağladığı bildirilmiştir (Pedrazzoli vd., 2014). Ek olarak, haritalama analizinden, katkı maddesi partikül bölgelerinin karbon bölgeleriyle iç içe olduğu açıktır. Bu, matris-cam elyaf-grafit arayüzlerinde iyi bir bağlanma olduğunu gösterir.

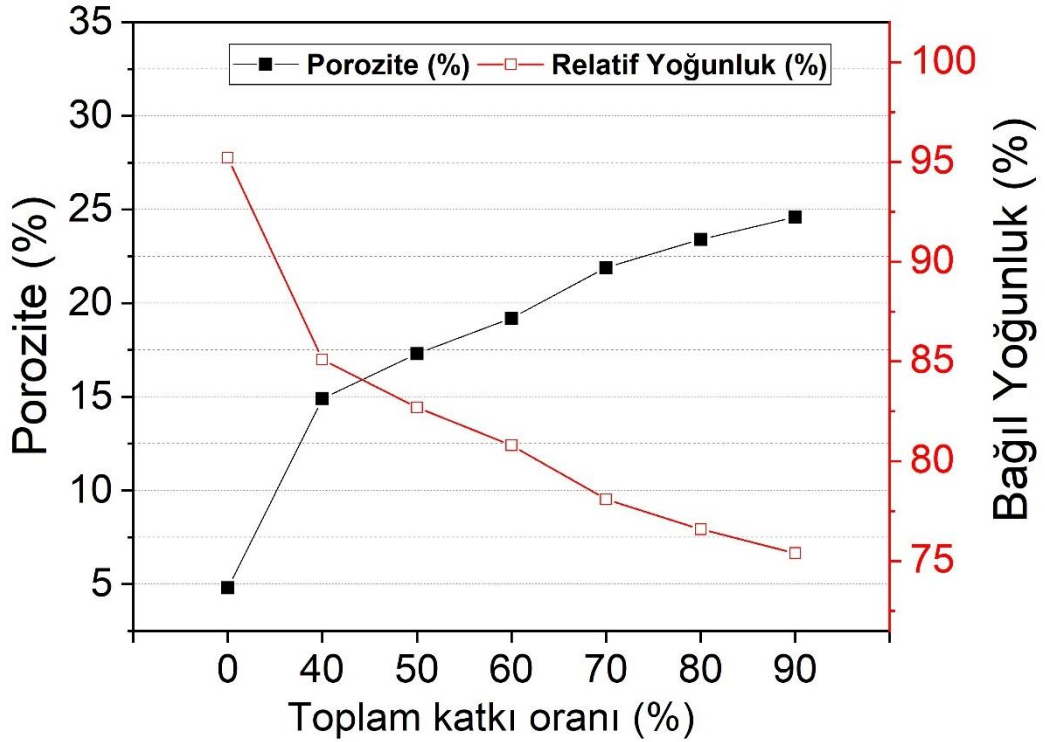
3.1. Deney Sonuçları

Üretilen numunelerin termal analiz, çekme ve eğme mukavemeti, elastisite modülü, porozite ve sertlik değerlerinin çubuk diyagramlarında gösterimi Şekil 36, 38-40'ta verilmiştir.

3.1.1. Numunelerin Yoğunluklarının ve Porozitelerinin İncelenmesi

Hazırlanan numunelerin teorik ve gerçek yoğunluk değerleri hesap edildikten sonra porozite değerleri bulunmuştur. Şekil 36' da numunelerin % porozite ve bağıl yoğunluk değerlerinin değişimini gösteren grafik verilmiştir.

Saf novalak reçinenin porozite oranı %4,8 olarak bulunmuştur. Grafiğe bakıldığı zaman katkı oranı arttıkça porozite değerlerinin arttığı görülmektedir. Bunun yanında %60 novalak reçine tozu içeren N1 numunesinde % porozite değeri 14,9 olarak hesaplanırken %10 novalak reçine tozu içeren N6 numunesinde bu değer %24,6 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 36. Porozite-bağıl yoğunluk grafiği

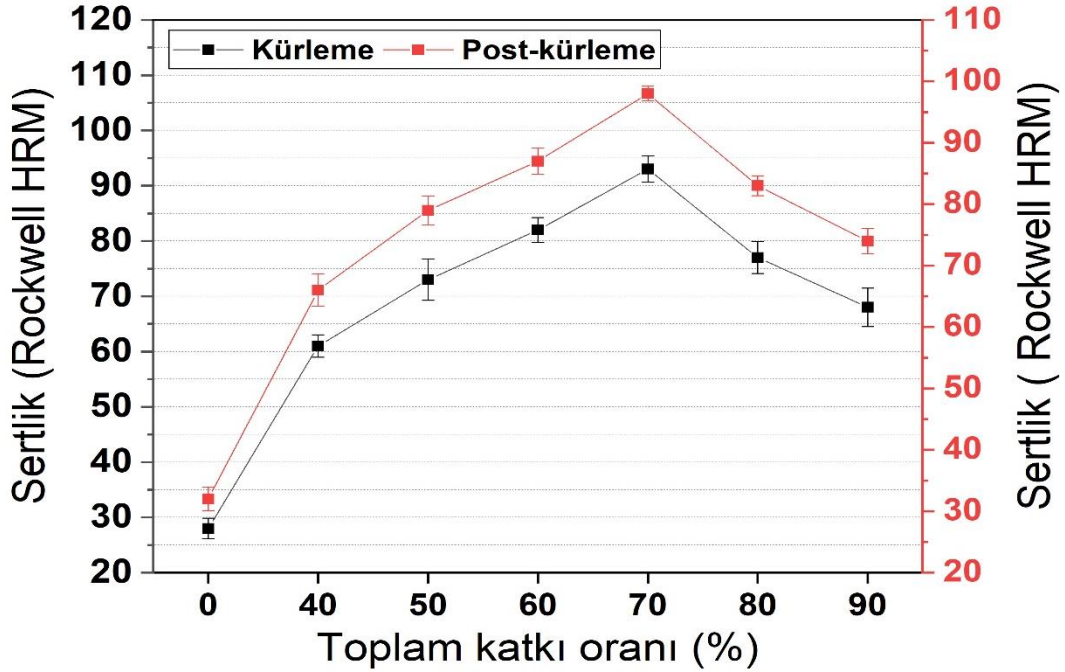
3.1.2. Sertlik Testi Sonuçları

Üretilen malzemelerin sertlik sonuçları ile diğer mekanik özellikleri arasında yakın bir ilişki saptanması gerekir. Örnek vermek gerekirse çeliklerde, çekme dayanımı sertlik sonuçları ile doğru orantılıdır. Bu yüzden yapılan sertlik ölçümünde malzemenin dayanımı ile ilgili bilgi sahibi olmak mümkündür. Ayrıca sertlik değerleri, malzemelerin iç yapıları ile ilişkilidir. Rockwell sertlik deneyi yapılan bir numunenin görünümü şekil 37'de verilmiştir.



Şekil 37. Sertlik deneyi sonrası numune yüzeyi

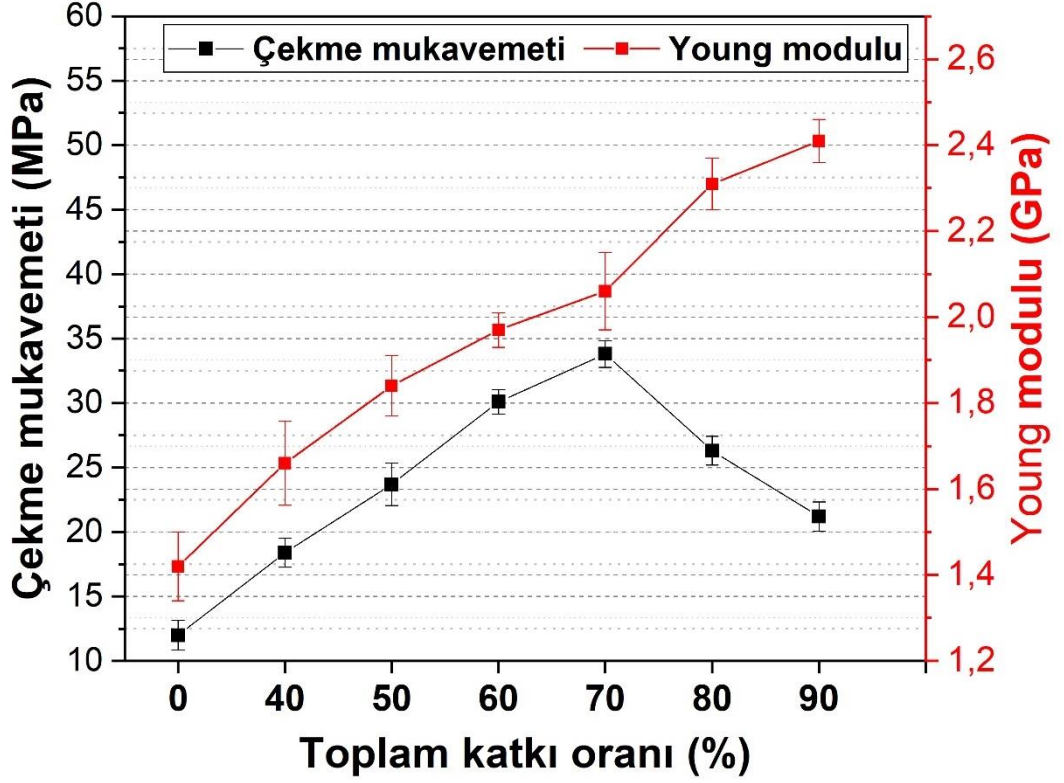
Numune sertlik deneyi Rockwell sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır. Elde edilen veriler Şekil 38’de verilmiştir.



Şekil 38. Rockwell sertlik değerleri

3.1.3. Çekme Mukavemeti Testi Sonuçları

Çekme testi sonucu elde edilen veriler, her kompozit malzeme grubu için 3 ölçümün ortalama değerleri olarak şekil 39' da verilmiştir.

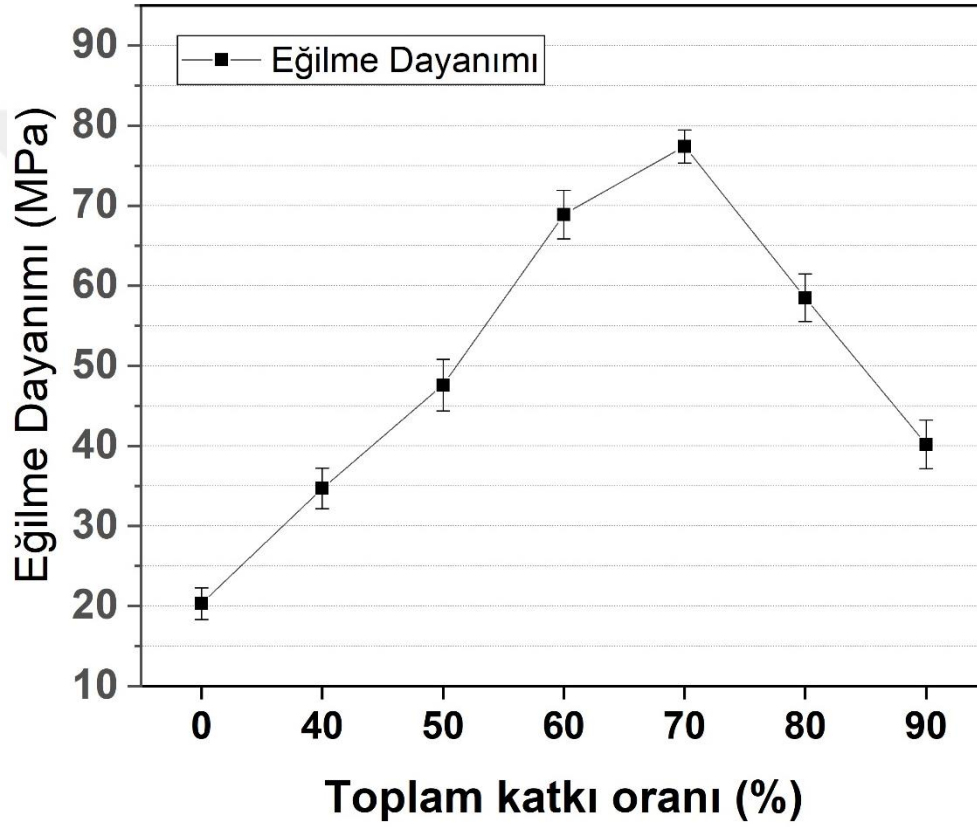


Şekil 39. Çekme mukavemeti ve elastite modülü değerleri

Şekil 39'dan, novalak fenolik reçinenin grafit ve cam partiküllerle doldurulmasının, geliştirilmiş çekme dayanımlarına sahip novalak reçine hibrit kompozitleri ürettiği gözlemlenmiştir. Kompozit numunelerin arasında çekme mukavemeti değeri en düşük N1 numunesinde görülürken en yüksek çekme mukavemeti N4 numunesinde ölçülmüştür. Ağırlıkça %20 cam lif tozu takviyesi ve %20 grafit tozu takviyesi ile oluşturulan N1 kompozit numunesinin çekme mukavemeti katkısız novalak malzeme ile kıyaslandığında %84,6 oranında artırıldığı tespit edilmiştir. Ayrıca grafiğe bakıldığında en düşük elastik modülü değeri N1 numunesinde görülürken en yüksek elastik modülü değeri N6 numunesinde ölçülmüştür. Şekilden, katkı içeriğinin artmasıyla çekme mukavemetinin 33,8 MPa kadar arttığı ve bu değer belli bir katkı oranından sonra düştüğü görülmektedir.

3.1.4. Eğilme Dayanımı Testi Sonuçları

Eğilme dayanımı testi sonucunda her grup için 3 adet ölçüm yapılması ile elde edilen ortalama değerler şekil 40'ta verilmiştir. Şekilden anlaşıldığı üzere cam elyafın ağırlık yüzdesi %20'den %30'a arttırıldığında eğilme mukavemetinde istikrarlı bir artış ancak daha fazla cam elyaf yüklemesi ile hazırlanan N5 kompozitinde yeni bir düşük seviyeye düştüğü görülmektedir. N4 kompozit numunesi ise en iyi eğilme performansını verdi.

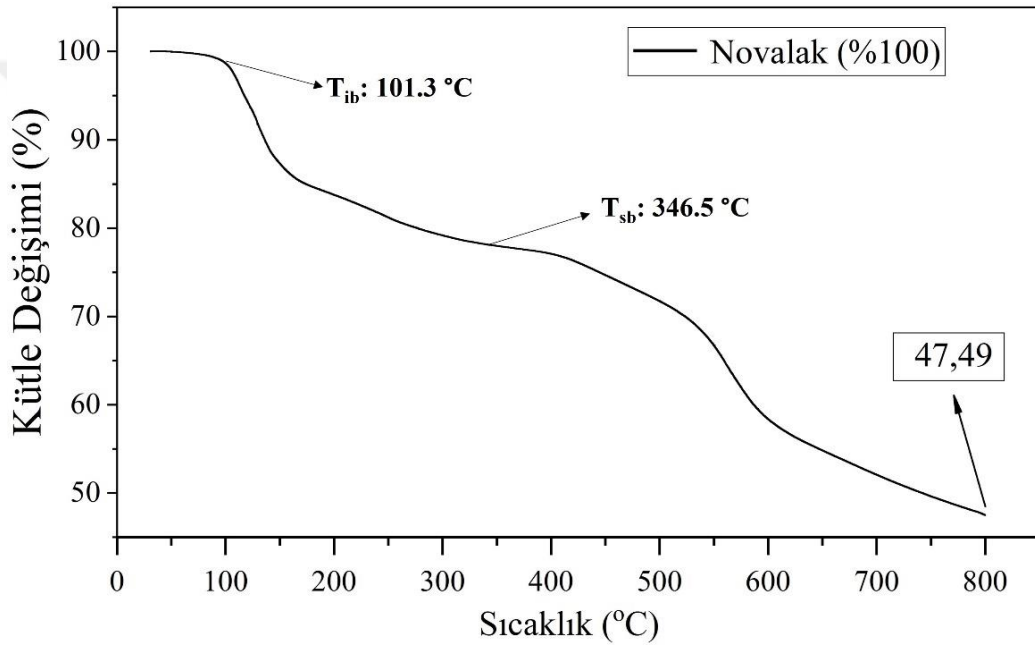


Şekil 40. Eğilme dayanımı değerleri

Cam elyaf ve grafit ile üretilen kompozitlerin üç noktadan eğme test sonuçları incelendiğinde; saf novalak reçinenin 20,3 MPa bulunmuştur ve katkı oranları ile saf novalak reçinenin eğilme dayanımı değerleri iyileştirilmiştir. N1 kompozit numunesinin eğilme dayanımının 34,7 MPa ve N4 kompozit numunesinin ise 77,4 MPa değerinde olduğu görülmektedir. Eğilme dayanımları incelendiğinde N4 numunesinin N1 numunesine göre mekanik açıdan daha iyi sonuç verdiği görülmektedir.

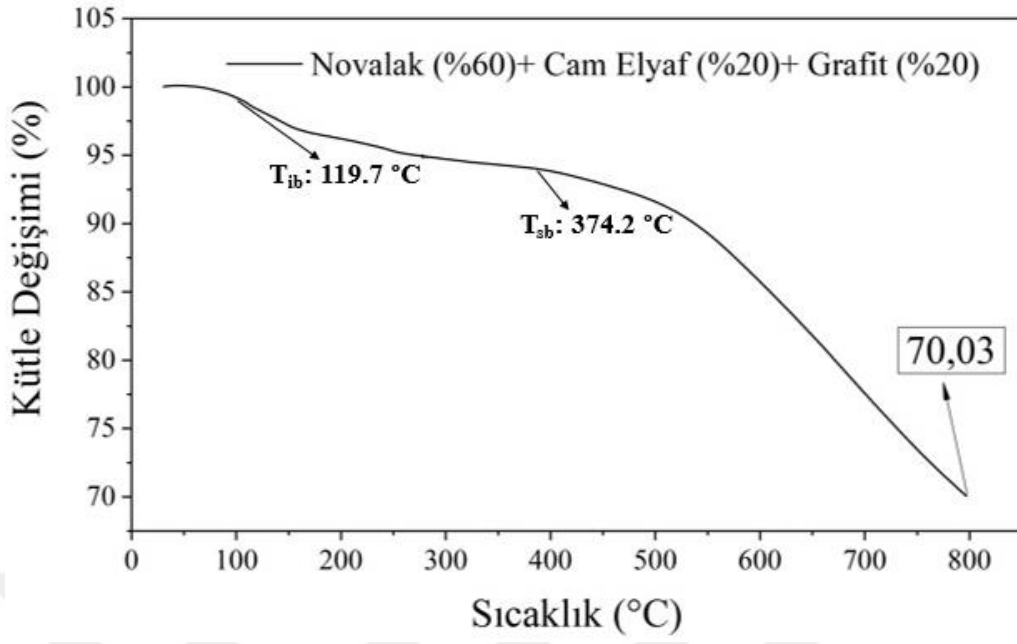
3.1.5. TGA Analizi Sonuçları

Saf reçinenin ve kompozit numunelerin termal ayrışması, inert (azot) bir atmosferde termogravimetrik analiz (TGA) ile araştırıldı. Üretilen kompozit gruplarından alınan deney numuneleri ile bölüm 2.4.3.2’de verildiği gibi ısı karakterizasyon testi yapılmıştır. Farklı ağırlık oranlarında polimer kompozit malzemelerin TGA analiz sonuçlarını karşılaştırmak için Şekil 41 – 47 arasında diyagramlar verilmiştir. Diyagramlarda T_{ib} : İlk bozunma sıcaklığı ve T_{sb} : İkincil bozunma sıcaklığı olarak verilmiştir.

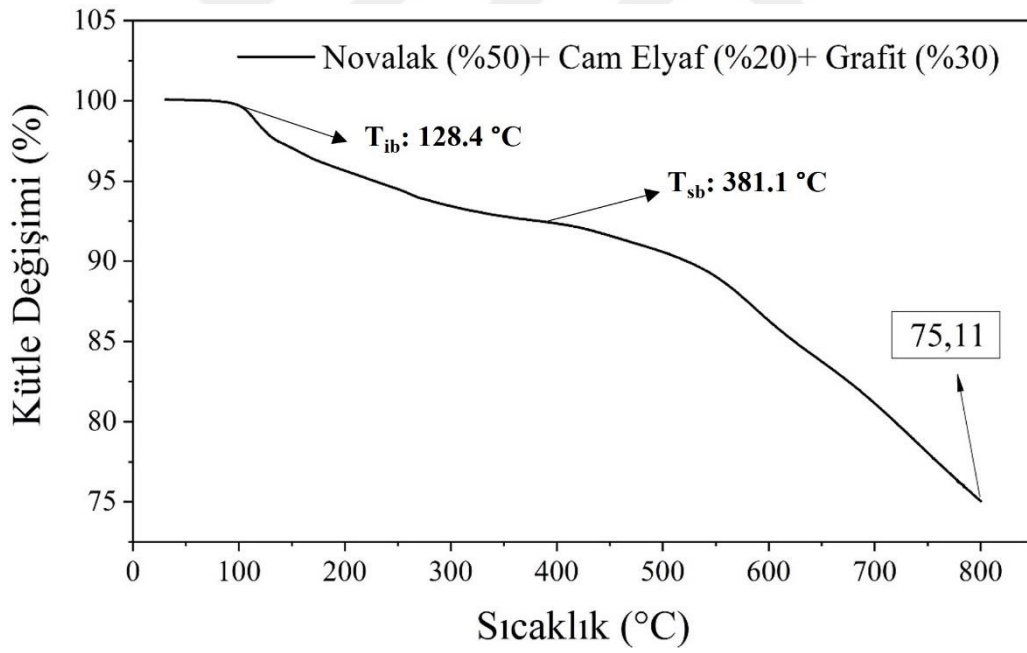


Şekil 41. Saf novalak reçinenin TGA diyagramı

Yapılan çalışmada incelenen numunelerin üretiminde kullanılan matris malzemesi olarak novalak tipi fenolik reçinenin termogravimetrik analizi Şekil 41’de verilmiştir. Saf novalak reçinenin ayrışması, çok aşamalı reaksiyonlarla karakterize edilir. Novalak reçinenin ilk ayrışması 80-120°C’de küçük bir ayrışma olarak meydana gelmiştir. Daha sonra ana bozunma reaksiyonu, büyük miktarda kalıntı (orijinal ağırlığın yaklaşık %25’i) veren 400°C’ye kadar gözlemlenir. Nihai olarak 800°C sonunda ise kalıntı miktarı olarak %47,49 olarak tespit edilmiştir.

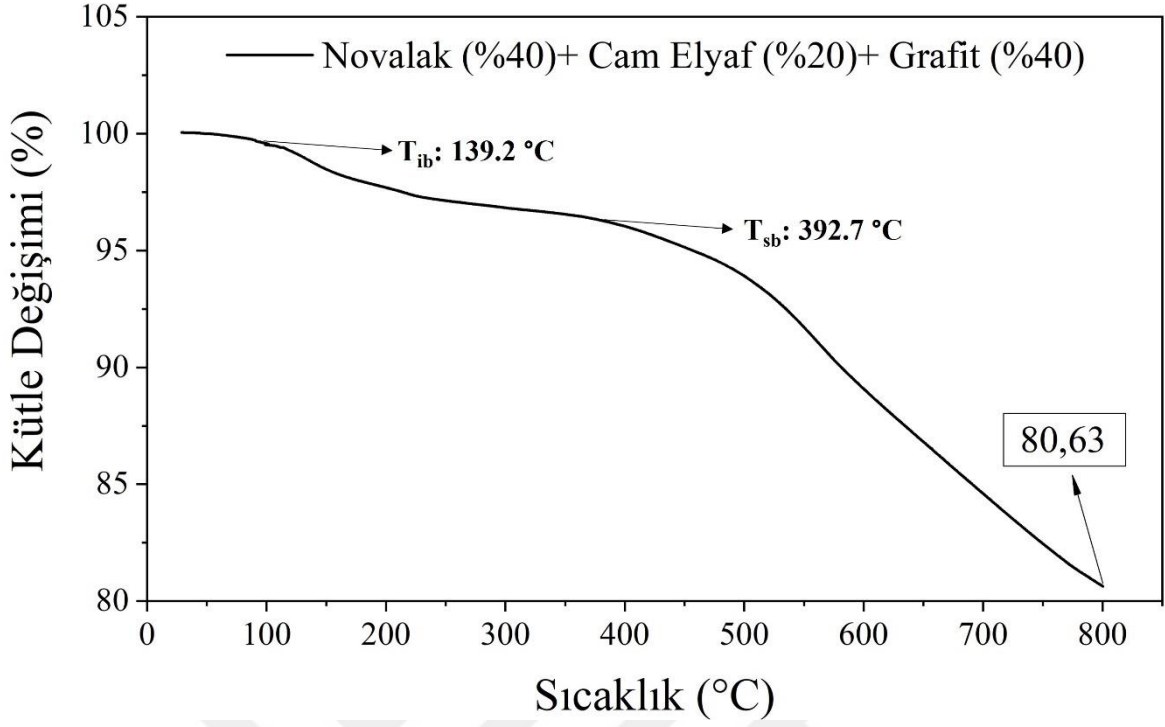


Şekil 42. N1 kompozit numunesi için TGA diyagramı



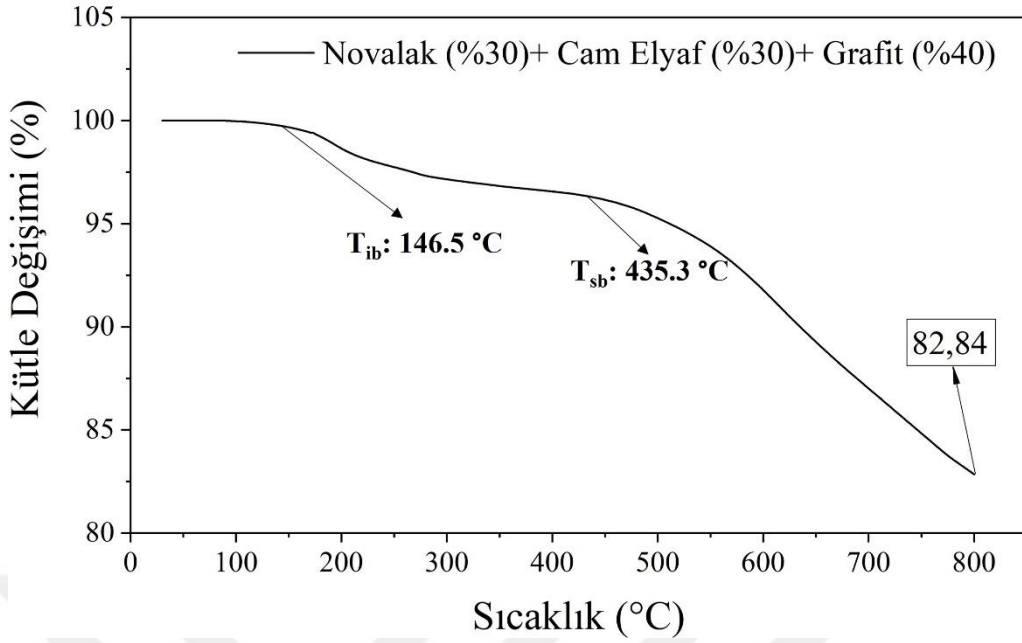
Şekil 43. N2 kompozit numunesi için TGA diyagramı

TGA sonuçları incelendiğinde yüksek termal kararlılıkta kompozit numunelerinden en yüksek degradasyon sıcaklığına sahip olan numune N6 olarak görülmüştür.

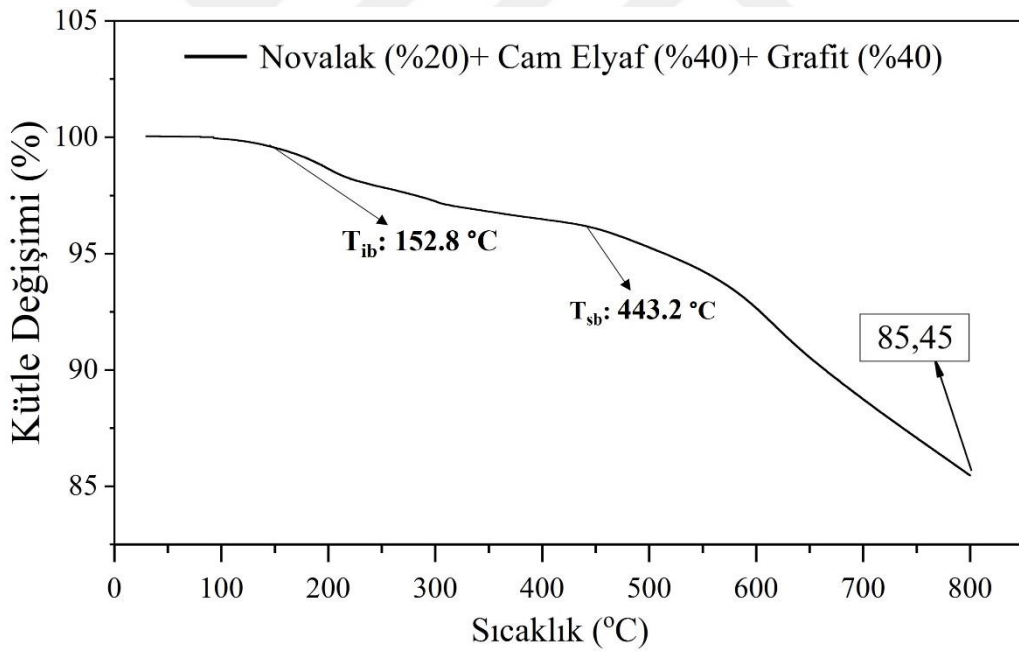


Şekil 44. N3 kompozit numunesi için TGA diyagramı

TGA'da atmosferik gaz olarak hava veya oksijen yerine nitrojen kullanıldı, çünkü (yüzeye yakın bölge hariç) organik bileşenlerin endotermik bozunma reaksiyonları çok az oksijen varken veya hiç oksijen yokken meydana gelir. Üretilen kompozit numunelerin kullanım amacına uygun olarak ısıl kararlılıkları önem arz etmektedir. Yapılan deneylerde ısıyı $10^{\circ}\text{C}/\text{dk.}$ hız ile artırılarak ortamda bulunan kompozit numunelerin ağırlıkları sürekli takip edilerek yapının bozunma sıcaklığına ulaşılmaya çalışılmıştır. Kompozit malzemelerin gösterdikleri bu eğilimlerin ısıl kararlılıkları anlamında pozitif olarak değerlendirilmektedir. En iyi sonucu elde etmek için sağlanan bir üretim prosesinde $130\text{-}150^{\circ}\text{C}$ sıcaklığındaki kütle kaybı minimuma indirilecek şekilde malzeme üretilebilir.

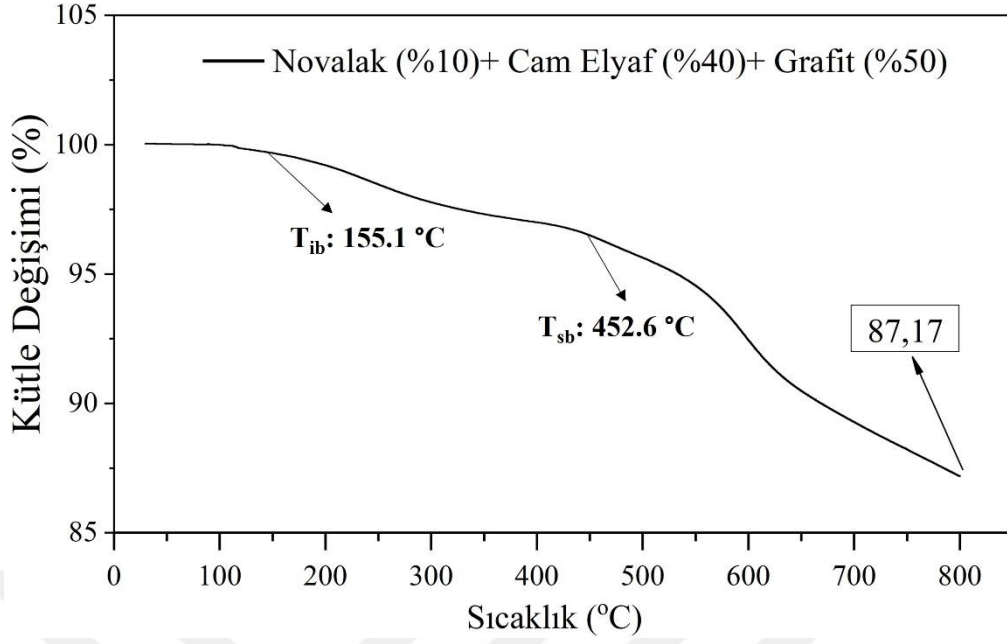


Şekil 45. N4 kompozit numunesi için TGA diyagramı



Şekil 46. N5 kompozit numunesi için TGA diyagramı

Farklı ağırlık oranlarında novalak fenolik reçine, cam elyaf tozu ve grafit tozu kullanılan N6 numunesinde nemin yapıdan uzaklaştırma açısından ilk bozunma 155°C ' den 290°C ' e kadar devam ederken N1 numunesinde 120°C ' den 250°C ' e kadar devam ettiği görülmektedir.



Şekil 47. N6 kompozit numunesi için TGA diyagramı

Grafiklerde görülen ilk bozunmada kütle kayıpları nemin uzaklaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak kompozit malzeme yapısına bağlı olarak ilk kütle kaybı tüm numuneler için aslında 380°C civarında gözlenmektedir. Üretilen polimer matrisli malzemelerin bu kilit sıcaklığı, yüksek sıcaklık fırınları içlerinde kullanılması planlanan teker malzemesi için fazlasıyla uygundur. Ayrıca grafiklerde görüldüğü gibi tüm kompozit malzemelerde belli oranlarda katkı oranı ile ölçüm sonunda kalan kütle miktarında artma görülmektedir. Bu nedenle saf novalak reçine tozunun termal özellikleri iyileştirildiği belirlenmiştir.

3.1.6. Limit Oksijen İndisi (LOI) Testi Sonuçları

Novalak matrise, grafit ve cam elyaf ilave edilerek üretilmesi hafif ve yanmaz hibrit kompozit malzeme geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu nedenle üretilen hibrit kompozitlerin yanma davranışı ilginç bir performansa sahiptir. Şekil 48'deki gösterildiği gibi cam hazne içerisinde N3 ve N5 hibrit kompozitlerin yanma davranışını test etmek için LOI cihazı kullanıldı ve numunelerin farklı yanma sürelerindeki yanma durumu dijital görüntüler kullanılarak kaydedildi. Şekil 48'den 3 dakikalık yanma sonrası numunelerin yanan kısımları brolürün alev alanı çevresinde görünür, numunelerin kendisinde alevli yanma

yoktur ve alev yayılımı görülmemiştir. Bu nedenle üretilen hibrit kompozit numunelerin mükemmel yanma özelliklerine sahip olduğunu gösterir. Ayrıca numunelerin alev geciktirici özelliği yangının yayılmasını etkili bir şekilde önlemesi ile neredeyse hiç duman oluşturmaz.



Şekil 48. (a) N3 ve (b) N5 hibrit kompozit numunelerinin yanma davranışı

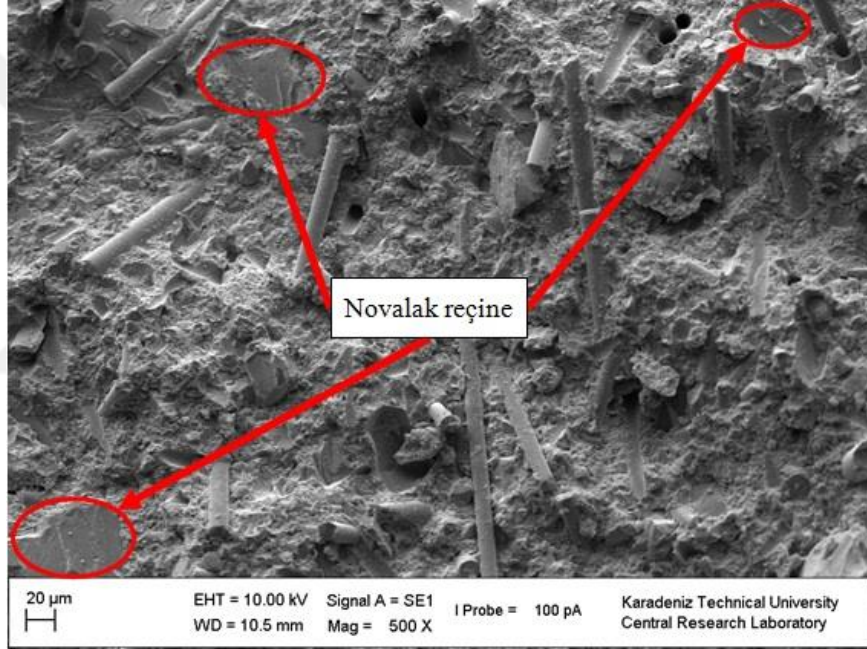
Tablo 8’de görüldüğü gibi saf novalak reçinenin LOI değeri 37’dir. Üretilen hibrit kompozitlerin N5 ve N6 kodlu numunelerde LOI değerleri %50 üzerinde olurken yanma fazla görülmemiştir. N1, N2, N3 ve N4 kodlu numunelerde ise yaklaşık olarak sırasıyla %41, %43, %45 ve %48 olarak tespit edilmiştir.

Tablo 8. Saf novalak reçinenin ve kompozit malzemelerin LOI değerleri

Numune Kodu	LOI (%)
N0	37.1± 1.2
N1	41.2± 1.3
N2	43.4± 1.1
N3	45.3±1.4
N4	48.2± 1.3
N5	>50
N6	>50

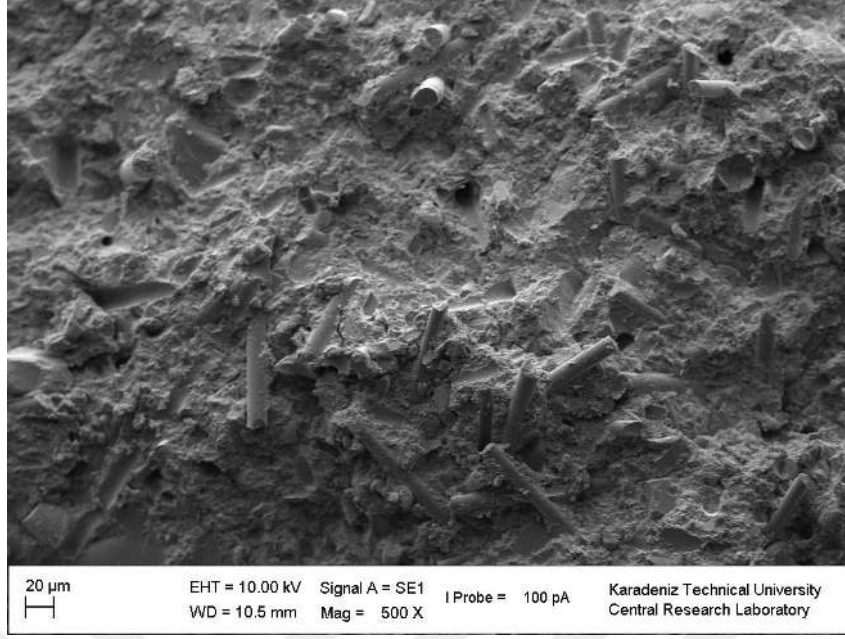
3.1.7. SEM-EDS Analizleri

Kompozit malzemelerin çekme işlemi sonunda oluşan kırık yüzeylerinden alınan örnekler de SEM ile gözlenmiş ve fotoğrafları çekilmiştir. Üretilen kompozitlerin kesit morfolojileri ve Şekil 49-54'te gösterilmiştir. Ayrıca şekil 53'te N4 numunesinin EDS analizi verilmiştir. N1 ve N2 kodlu numune yapılarında gözlemlenebilir gözenekler görülmektedir. Bu gözenekler novalak reçinenin katkı malzemelerini tam olarak ıslatamadığından iç yapıda görünmektedir. Burada novalak fenolik matrisin tabakalı halde yapıda bulunduğu belirgin bir şekilde görülmektedir.



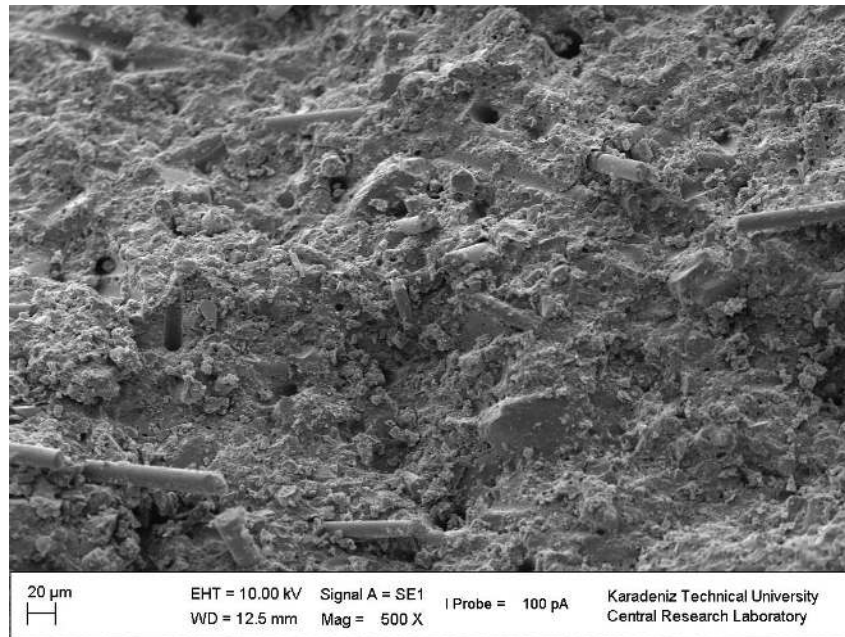
Şekil 49. N1 kodlu numunenin kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü(500x)

Düşük katkı ağırlık oranına sahip kompozit numunelerin kırılma yüzeylerine bakıldığında elyafın matrise yeterince güçlü tutunamayıp boşluklar yaparak yapıdan ayrıldıkları görülmüştür. Bu numunelerde novalak reçine matrisinin grafit ve cam elyaf partiküllerini tam doyuma ulaşacağı derecede ıslatamamıştır. Bu nedenle mekanik testler sonucunda düşük takviye oranına sahip numunelerin daha düşük dayanım göstermeleri bu durum ile desteklenmektedir.

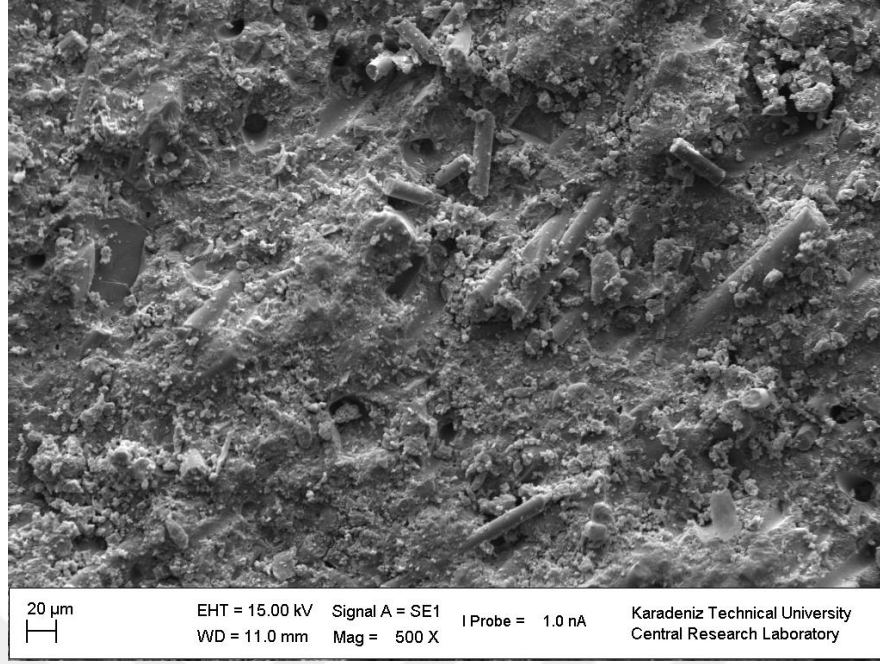


Şekil 50. N2 kodlu numunenin kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü(500x)

Ayrıca cam elyafın bazı bölgelerde sıyrılma sonucu yapıdan çıkarak boşluklar oluşturduğu, bazı bölgelerde ise cam elyafın kırıldığı görülmektedir. Bu koşullar altında, sistem mekanik yüke maruz kaldığında numune yüzeyinde kırılma sonrası oluşan eğim, matris malzemesinin katkı malzemeleri ile yüzeyden ayrıldığını göstermektedir.

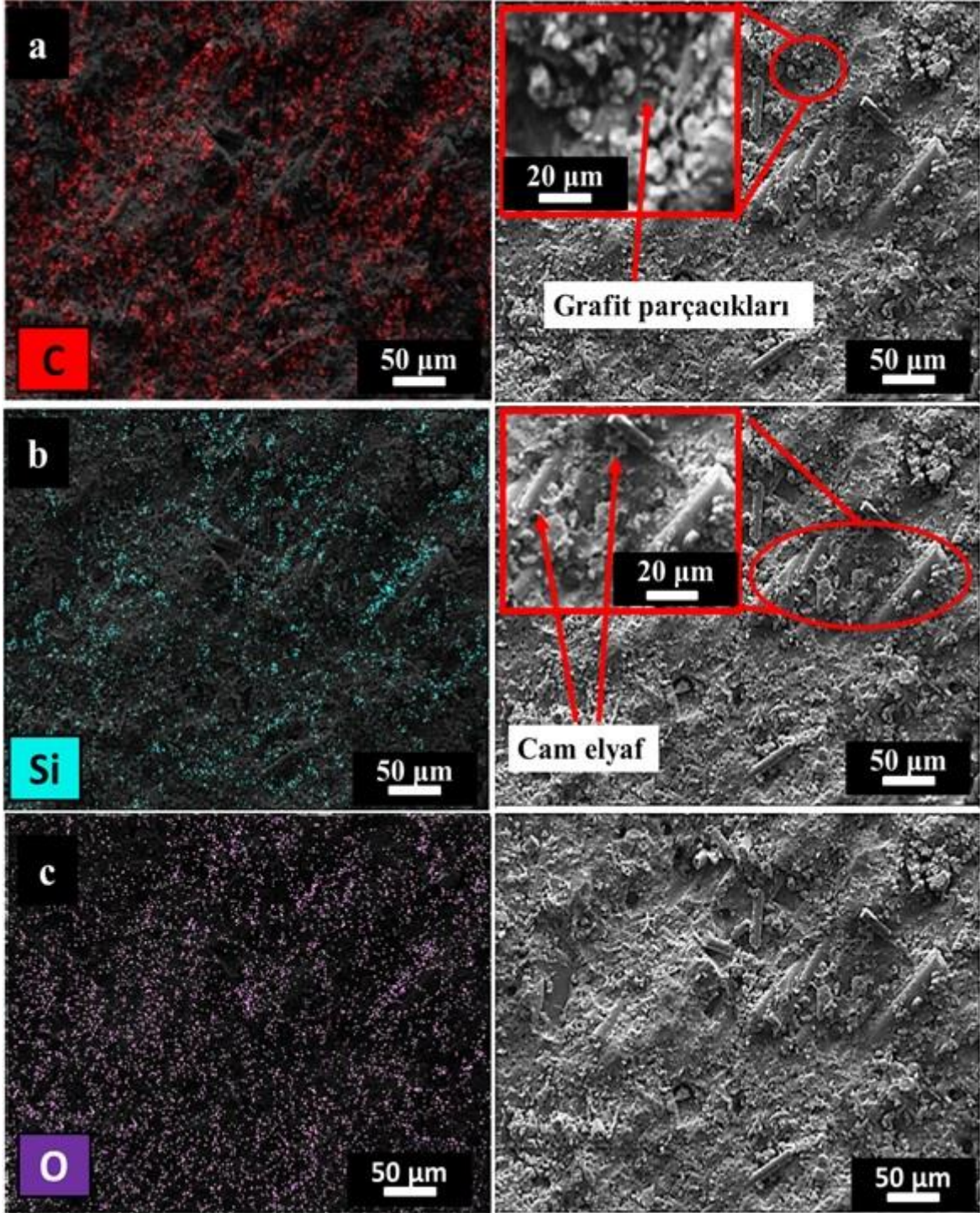


Şekil 51. N3 kodlu numunenin kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü(500x)



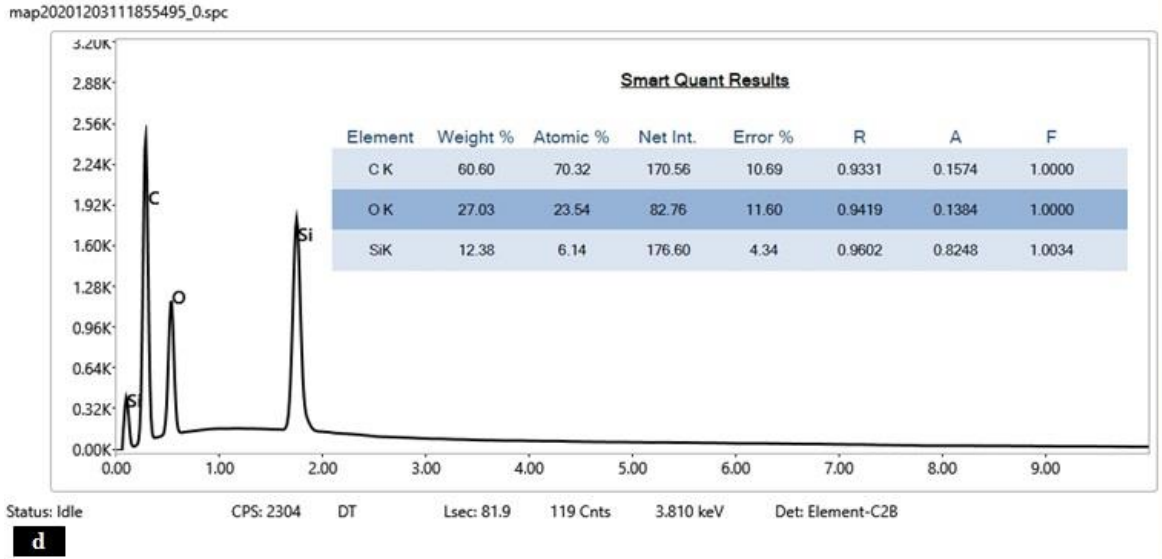
Şekil 52. N4 kodlu numunenin kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü(500x)

Şekil 51 ve Şekil 52’de görüldüğü üzere cam elyaf-grafit polimer kompozitlerinde, cam elyafın ve grafitin yapı içerisinde diğer numunelere göre daha homojen olarak dağıldığı ve ara yüzey yapışmasının iyileştirildiği görülmektedir. Bununla birlikte, iyi bir ıslanma elde edildiğinden, reçine ile katkı maddelerinin arasında güçlü ara yüz bağlanması beklenir, çünkü geniş temas alanı ve yüksek yüzey pürüzlülüğü, matrisle temaslı alanlarının sayısını ve alanını artırır. Bu, matris ile takviye elemanlarının mekanik destek ile birbirine yapışmasını sağlar.

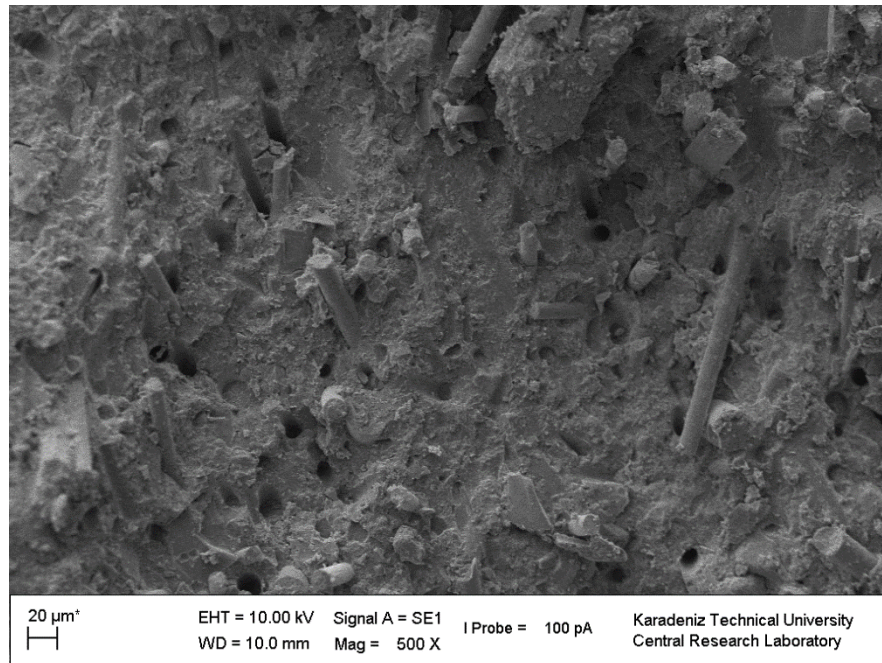


Şekil 53. N4 numunesinin EDS analizi (a) Karbon dağılımı (b) Silisyum dağılımı (c) Oksijen dağılımı (d) Elemental yüzdelik dağılımı

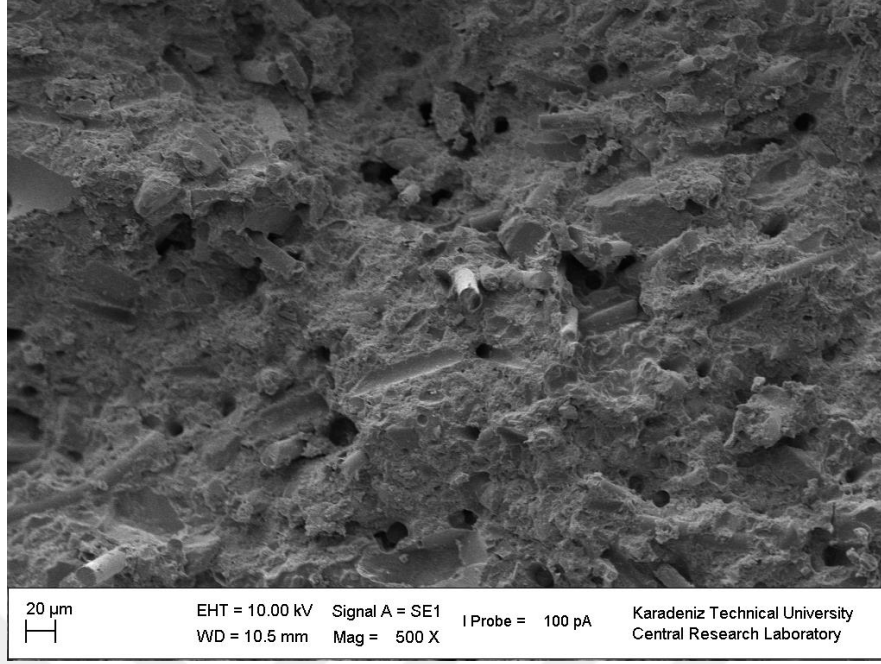
Şekil 53' ün devamı;



Mekanik test sonuçlarında cam elyaf tozunun ve grafit tozunun belli bir katkı oranına kadar etkisi sonucu mukavemeti artırması da SEM görüntülerini destekler niteliktedir.



Şekil 54. N5 kodlu numunenin kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü(500x)



Şekil 55. N6 kodlu numunenin kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü(500x)

Şekil 54 ve Şekil 55’ de ise cam elyaf-grafit fenolik kompozitlerinde, cam elyaf ve grafitin yapı içerisinde homojen olarak dağılamadığı ve cam elyafın bazı bölgelerde yapıdan kayarak ayrıldığı görülmektedir. Söz konusu bu durum, yüksek elyaf oranlarında malzemede elyafın etkin bir takviye elemanı olarak görev yapamamasından kaynaklanır. Ayrıca genel olarak bakıldığında grafitin yapıya eklenmesi ile üretilen malzemelerde grafit partiküllerinin dağılımı kompozitin mekanik özelliklerini etkilemiştir. Şekil 55’ deki SEM görüntüsünde novalak reçinenin grafit ve cam elyaf tozları arasına yeterince giremediği ve kompozit malzemede mikro gözenekler oluşturduğu ve reçine tarafından ıslatılamayan aglomere grafitler arasında boşluklar yaptığı görülebilmektedir. Boşluk oluşumunun net bir şekilde artışı ve düzgün olmayan kırılma yüzeyleri numunelerin çekme dayanımı değerlerinin düşmesini destekler niteliktedir.

4. TARTIŞMA

4.1. Yoğunluk ve Porozite

Elde edilen verilere göre en düşük porozite oranı N1 numunesinde görülmektedir. Numuneler arasında en yüksek porozite mikro yapısal analiz sonucunda görüldüğü gibi N6 numunesinde tespit edilmiştir.

Bir kompozit malzemenin yoğunluğu, matris ve takviye malzemelerinin birbirlerine göre farklı oranlarına bağlıdır ve bu, malzemelerin özelliklerini belirlemek için kullanılan çok önemli bir faktördür. Oluşan boşluklar, bazı mekanik özellikleri ve hatta kullanım yerindeki kompozitlerin performansını önemli ölçüde etkiler. Katkı oranlarının artmasıyla birlikte bağıl yoğunluk azalırken gözenekliliğin artması literatürde yer almaktadır (Teh vd., 2008; Vijay ve Srikantappa, 2019). Takviye elemanlarının eklenmesi ile kompozitlerin deneysel yoğunluklarında katkı oranının artması ile artış görülmektedir (Kim vd., 2010). Ancak gözenekliliğin varlığı nedeniyle kompozitlerin deneysel yoğunlukları teorik yoğunluklarından daha düşük çıktı. Katkı malzemelerinin tamamen ıslatılmasının başarılammamasından dolayı kompozitte düzensizlik ortaya çıkar. Bu durum, reçine tarafından elyafların yetersiz ıslatılmasına ya da kürleştirme aşaması sırasında ortaya çıkan uçucu ürünlere atfedilmiştir (Zarate vd., 2003).

Tartışmasız, fenolik reçineler ailesinden klasik reçineler ve novolaklar ana bileşenlerdir. Bununla birlikte, evrensel malzemeler olarak bu basit fenolikler üretilen kompozit malzeme yapısında bazı dezavantajlara sahip olduğu görülmektedir. Üretilen kompozit malzemelerde ortaya çıkan porozitenin sebeplerinden biri de novalak reçine olduğu düşünülmektedir. Çünkü kürleme sırasındaki yoğunlaşma reaksiyonu sonucunda uçucu maddeler oluşur, bu nedenle nihai ürünlerde boşluklar vardır (Wolfrum ve Ehrenstein, 1999; Nair, 2004).

Hibrit kompozitlerin yoğunlukları 1,444–1,712 g/cm³ aralığında bulundu ve N6 numunesinde en yüksekti. Buna sebep olarak içlerinde yoğun grafit partiküllerinin varlığından dolayı yoğunluk yükselmiştir (Shivamurthy, 2013). Gözeneklilikte olan artışın, esas olarak grafit varlığında sistemin daha zor paketlenmesinden ve artan viskozitesinden kaynaklanması beklenmektedir.

Malzemede grafit bulunmasından dolayı viskozite adımı artar ve karıştırma çok daha zor hale gelir. Sonuç olarak, grafit içeren malzemelerde mikro gözenekler oluşur ve ek olarak makro gözenekler sunar. Reçine tarafından ıslatılmayan grafit aglomeratlarının, stres konsantrasyonu konumu olarak davranması beklenir: reçinenin yokluğunda, grafit levhaları Van der Waals (zayıf) çekimiyle birbirine bağlanır (Baptista vd., 2016).

4.2. Sertlik Testi

Yapılan ölçümlerde en düşük sertlik N1 numunesinde görülmüştür. Numunelerde en yüksek sertlik N4 numunesinde ölçülmüştür. Post-kürleme sonrası numune sertliklerinin arttığı görülmektedir. Post-kürleme ile fenolik malzemelerin yapısında mevcut aktif bölgeler çapraz bağlanmaya devam eder. Bu yüzden takviye malzemeleri ve matris arasında daha güçlü arayüzey bağlarının oluşmasına neden olur (Aktaş, 2017; Da-Peng ve Hong, 2008). Bu, sertleşme süresi ve sertleşme sıcaklığından etkilenen polimer matris içindeki grafit dispersiyonu ile ilgilidir (Dweiri ve Sahari, 2007). Polimer matris içerisine grafit ilavesi sonucunda sertlik değerlerinde artış gözlenmiştir. Üretilen polimer kompozitlerin sertlik değerleri takviye/dolgu malzemelerin sertliği, yapıda bulunan ara yüzey bağının karakteristiği tarafından kontrol edilir. Grafit oranı artması ile sertlik değerlerinde artış gözlenmiştir (Yaman vd., 2019).

En yüksek sertlik, novalak reçineden daha yüksek sertliğe sahip grafit nedeniyle yüksek grafit içeriklerinde elde edilmiştir; bu nedenle grafit içeriğinin artırılması, kompozitin sertliğini artırır. Eşit olarak dağılmış grafit, kompozitin sertliğini artırır (Suherman vd., 2019). Ayrıca sertlikteki bu iyileşme, matristeki dolgu maddelerinin artan yüzey alanından kaynaklanıyor olabilir (Kumar ve Kanagaraj, 2016). Grafit dolgu ilavesi mekanik özellikler üzerinde faydalı bir etkiye sahiptir. Öte yandan katkı oranındaki artışla gözeneklilik oranı artmasına rağmen toplam katkı oranı %70'e kadar sertlik değerlerinin arttığı anlaşılmıştır. Bu, üretilen kompozitlerde ağırlıkça %70'e varan katkı oranına sahip üstün sertliğe sahip cam elyaf ve grafit katkı maddelerinin matristeki aglomerasyonun etkisini tolere etmesine bağlanabilir. Sertlik ölçümü sırasında, mikroyapıda tamamen dağılan ve matris ile bağlanan katkı malzemelerine nüfuz eden ucun etkisi bu tolerans özelliğini güçlendirir. Ayrıca, cam elyaf ve grafit takviye partikülleri, novalak matris ile sıkıştırılabilir ve ucun yükü, birbirleriyle sıkı bir şekilde temas etmelerini sağlar. Bu nedenle, arayüz, basıncı daha baskın bir şekilde taşıyabilir (Rout ve Satapathy, 2012).

4.3. Çekme Mukavemeti ve Elastisite Modülü

Literatürde yapılan bir çalışmada cam elyafın artmasıyla mukavemetin arttığı belirtilmiştir. Kompozit numunelerinin mekanik olarak güçlendirilmesinde cam elyafın polimer matris içinde yeterli ara yüz yapışması ile iyi dağıldığını gösterir. Bu da cam elyafların polimer matrisine uygun şekilde dahil edildiğini göstermektedir (Kim vd., 2010). İncelenmek üzere hazırlanan polimer kompozit deney numunelerinin çekme test sonuçlarına bakıldığında genellikle takviye oranının artması ile doğru orantılı olarak çekme mukavemetinin arttığı görülmüştür. Aynı matrislerde cam elyaf partikül kullanım miktarının ağırlıkça %20'den %30'a çıktığında çekme dayanımının arttığı görülmektedir. Bunun sebebi de artan katkı oranı ile matris malzemesi üzerine gelen kuvveti daha kolay bir şekilde ve daha fazla oranda bulunan takviye malzemesine iletmektedir (Ulusoy, 2016). Daha yüksek elyaf yüklemesindeki bu gelişme, kompozitlerdeki yük taşıyıcı elemanlar olarak hareket eden daha fazla elyafın varlığına bağlanabilir (Yadav vd., 2016). Ancak üretilen kompozit malzemelerin çekme mukavemeti, katkı takviyesiyle birlikte belli bir orana kadar artmaktadır. Ağırlıkça olarak %20 oranında cam elyaf içeren N1 kompozit malzemesinde çekme mukavemeti 18,3 MPa olarak bulunurken %30 ağırlık oranında cam elyaf tozu içeren N4 numunesinde bu değer 33,8 MPa olarak ölçülmüştür. %40 oranında cam elyaf tozu içeren N6 numunesinde ise çekme mukavemeti 21,2 MPa değerine kadar düşmektedir. Ağırlıkça toplam katkı oranının %70' den daha fazla yapıya katılmasıyla birlikte çekme dayanımında gittikçe azalma görülmektedir. Cam elyafın çekme dayanımının 3500 MPa olduğu göz önüne alındığında mikro yapıdaki küçük porozitelerin mekanik özellikler üzerindeki etkisinin ihmal edilebileceği açıktır. Bu yüzden toplam katkı oranının çekme dayanımı üzerindeki olumlu etkisi, gözenekliliğin olumsuz etkisini bastırmaktadır. Literatürde de benzer durumlar bildirilmiştir (Mysiukiewicz vd., 2020; Černý vd., 2020).

Elastik modülünü tek başına cam elyaf etkilemediği tespit edilmiştir. Artan cam elyaf yanında grafit katkı oranının artması sonucunda da elastikiyet modülünün arttığı gözlemlenmiştir. N1, N2 ve N3 kompozit numunelerine bakılınca cam elyaf katkı oranları aynı olmasına rağmen grafit katkı oranı artmasından dolayı elastik modülünün de artmasına sebep olmuştur. Literatürde de benzer sonuçları görmek mümkündür. Karadurmuş yaptığı çalışmada, grafitin çekme testinin elastik modül değerinde iyileştirme sağladığını belirlemiştir (Karadurmuş, 2017).

Genel olarak partikülat dolgulu polimer kompozitlerin polimer matris içindeki takviye partiküllerinin belli bir orandan sonra malzemenin mukavemetini düşürmesi, oluşturulan karışımın homojen şekilde dağılamaması, takviye elemanları ile matris arasında daha iyi bir karışım olmaması ve ara yüzeylerde yeterli birleşmenin olmaması olarak açıklanabilir (Güllü vd., 2006; Maiti ve Lopez, 1992). Üretilen numunelerin çekme mukavemeti artan grafit içeriği ile arttığı belirlenmiştir. Çekme mukavemeti testlerinde, uygulanan çekme yükü arttıkça kompozitteki lifler farklı gerilme seviyelerinde başarısız olur. Bu çalışmada, grafit oranı düşük numuneler için düşük gerilme mukavemeti değerlerini göstermiştir ve ana başarısızlık olarak ise dolgu-matris bağının açılması olarak açıklanabilir. Bu durumda, numunenin farklı çapraz kesitlerindeki çatlaklar, bağlarının açılmasına veya kayma bozulmasına neden olmaktadır. Bu tür matris kesme hataları ve lif-matris ayrılma, bağımsız olarak veya kombinasyon halinde meydana gelmiştir. Literatürde grafit dolgu ile üretilen kompozitler için benzer mekanizmalar gözlemlendi (Suresha vd., 2007).

Üretilen kompozit numunelerin elastik modülü, cam elyaf ve grafit oranı arttıkça arttığı görülmektedir. Yapılan çalışmalara bakıldığında genellikle kompozitlerin modülündeki artışın nedeni malzeme içerisindeki partiküllerin homojen dağılım göstermesine ve partiküller ile matris arasındaki etkileşimin güçlü olmasına bağlı olduğunu bildirmişlerdir (Biswas vd., 2011; Adekomaya ve Adama, 2017). Ancak matristeki toplam katkı oranı ağırlıkça %80'e ulaştığında, çekme mukavemetindeki azalmaya bakılmaksızın %70 takviyeli numuneye göre elastisite modülünde artış bulunmuştur. Bu olay N5 ve N6 numunelerinde çekme mukavemeti değerlerindeki azalma hızının N4 numunesine göre gerinim değerindeki azalma oranından çok daha az olduğunu göstermektedir. Üretilen kompozit numunelerin modülünün arayüzey bağlanmasının güçlü olmasından daha ziyade kompoziti meydana getiren matris ve katkı bileşenlerinin modüllerine ve kompozit içerisindeki takviye oranına bağlı olduğunu açıklamışlardır (Li vd., 2005). Bu nedenle novalak fenolik reçineye göre daha yüksek modüle sahip olan cam elyaf ve grafit katkısının kompozit içeriğindeki oranının artması ile kompozitin elastisite modülünün arttığı görülmüştür.

4.4. Eğilme Mukavemeti

Eğilme dayanımı test değerleri yorumlandığında, çalışmada kullanılan takviye oranının belli bir orandan sonra üretilen kompozit malzemenin eğilme dayanımını ciddi oranda azalttığı ispatlanmıştır. Deney numunelerinin eğilme mukavemeti test sonuçları analiz edildiğinde takviye miktarının artması ile mukavemet değerlerinin de doğru orantılı olarak arttığı ancak çekme mukavemetinde olduğu gibi; yapıya belli bir orandan daha fazla katkı elemanı karıştırıldığında eğilme dayanımı düşmektedir.

Cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özellikleri incelendiğinde; elyaf takviyeli kompozitlerin eğilme özelliklerinin, bu kompozitlere cam elyafın dahil edilmesiyle iyileştirildiği sonucuna varmışlardır (Mishra vd., 2003).

Matris ve fiberin ara yüzünde başlayan çatlaklar gerilme kuvvetine dik olarak ara yüz boyunca yayılır. Çatlak bir cam parçacığıyla karşılaştığında, çatlak yavaşlar veya durur. Parçacık etrafındaki büyük bir gerilim konsantrasyonu, parçacığın matristen ayrılmasına neden olur, bu da parçacık çevresindeki matriste çatlakların başlamasına neden olur. Bu çatlaklar büyüyerek önceki çatlakla bağlantılı hale gelirler. Cam parçacıkları, çatlak yayılma yönünü değiştirerek çatlak ilerlemesini geciktirme görevi görmüştür. Bu nedenle, mukavemeti yüksek kompozit numunelerindeki çatlaklar partikül ve matris arasındaki sınır boyunca gelişmiştir. Bu, cam tozu ilavesinin üretilen kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirmesinin nedenlerinden biri olduğu düşünülmektedir (Wang vd., 1997). Ancak elde edilen sonuçlara göre artan cam elyaf tozu ile daha sıkı bir form elde edilemediğinden dolayı mukavemet değerlerinin azaldığı düşünülmektedir. Bunun sebebi olarak, kuvvet, büyük ölçüde parçacıklar ve matris arasındaki gerilim aktarımına bağlıdır. Cam elyaf yüklemesi ile eğilme mukavemetindeki ilk artış, cam elyafın reçine matrisi ile daha iyi füzyonundan kaynaklanıyor olabilir; çok fazla cam tozu yüklemesi ile daha iyi katkı / reçine füzyonu bozulmuş ve eğilme mukavemeti düşmüştür (Ku vd., 2010). Ağırlıkça %30 cam elyaf tozu üstünde katkı maddesinin ağırlıkça yüzdesi ne kadar yüksekse, eğilme mukavemetinin o kadar düşük olduğu gözlemlenmiştir.

İyi bağlanmış parçacıklar için, uygulanan gerilim polimer matris reçinesinden parçacıklara etkili bir şekilde aktarılabilir (Hsueh, 1989). Bu da açıkça mukavemeti artırır (Young ve Beaumont, 1977; Zhu vd., 1993; Nakamura vd., 1993). İyi bir ara yüzey bağlantısı, matrinden fibere verimli yük aktarımı sağlar, bu da stres konsantrasyonlarının azaltılmasına ve genel mekanik özelliklerin iyileştirilmesine yardımcı olur.

Elyaf yüzeyine yakın matristeki fazlar arası bölgenin özellikleri matrisin özelliklerinden farklı olduğundan, kompozitin yapısal bütünlüğünün artmasına ve matris ile elyaf arasında daha iyi gerilim aktarımına yol açmasına neden olur (Ma vd., 2014; Vautard vd., 2014). Bununla birlikte, zayıf bağlanmış mikro partiküller için mukavemette azalma meydana gelir (Danusso ve Tieghi, 1986). Ayrıca ısıyla sertleşen reçinelerin dezavantajı çatlak büyümesine karşı zayıf dirençleridir (Moloney vd., 1987; Shimbo vd., 1981).

Eğilme dayanımı değerlerinin geliştirilmesinde, cam elyaf takviyesinin yanında grafit tozu takviyesinin de etkili olduğu tespit edilmiştir. Grafit tozunun artması ile presleme işlemi sırasında daha yoğun kompakt ve daha sıkı bir kompozit yapı yapılar oluşturmamasından dolayı eğilme dayanımının arttığı düşünülmektedir. (Magampa, 2013).

4.5. TGA Testi

Fenolik kompozit numunelerin yanması sırasında oluşan kömürleşmeden dolayı yapıda kütle kaybı oluşmaktadır (Brown ve Mathys, 1997). Sonuçlarda görüldüğü gibi, bu çalışmada kullanılan novalak reçinenin erken bozunarak malzeme üstünde bir katman oluşturduğu düşünülmektedir. Bu katman polimer ile ısı kaynağı arasında ısı ve kütle transferini azaltarak altta kalan malzemeyi korumaktadır (Ma vd., 2007; Schartel ve Hull, 2007). Yapılan deneylerde saf novalak reçine 100-120°C'ye ısıtıldığında ilk aşamada kütlede küçük bir kayıp meydana gelir ve bu, kür reaksiyonunun bir yan ürünü olarak oluşan su ile atmosferden emilen nemin kaybından kaynaklanmaktadır. Ana bozunma reaksiyonu, büyük miktarda kalıntı (orijinal kütlenin yaklaşık %40'ı) veren 400-500 °C'lik bir sıcaklık aralığında gerçekleşene kadar TGA eğrisi nispeten düz kalmıştır (Mouritz vd., 2006). Sıcaklık arttıkça bozunma mekanizması yaklaşık olarak 400–800°C'de gerçekleşmekte ve novalak reçinenin çapraz bağının kırılmasıyla ilişkilendirilmektedir. Bununla birlikte bozunma mekanizması yaklaşık 560–800°C sıcaklıklarda devam etmekte olup, fenol içindeki C-H grubun arasındaki bağın kopup ortaya hidrojen gaz ürünü çıkarmasıdır (Wang vd., 2001; Lee vd., 2003; Aan vd., 2011).

Herhangi bir katkı maddesi içermeyen novalak reçine kontrol grubunun 800°C'de yaklaşık olarak %52 kütle kaybına uğradığı belirlenmiştir. Bu yüzden üretilen kompozit numunelerde, yapıda bulunan novalak reçinenin sıcaklıkla oluşan madde kayıplarını engelleme konusunda tek başına olmadığı görülmektedir. Üretilen tüm numunelerin termogramlarından da görüldüğü üzere yapıya eklenen grafit tozu takviyesi sonucunda

yapıda kütlece kaybın azaldığı görülmektedir. Bu çalışmada grafit tozu katkısı ile kompozit malzemenin termal dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Örnek vermek gerekirse; N1, N2 ve N3 kodlu kompozit numunelerine bakıldığında cam elyaf tozu oranları aynı olduğundan dolayı iki numuneyi grafit tozu katkısı açısından kıyaslanırsa grafit tozu oranının artmasıyla birlikte kütlece yüzde kayıp değeri azaldığı tespit edilmiştir. Polimer kompozit malzemelerde kullanılan grafit oranı arttıkça kompozitin ısıl bozunma sıcaklıkları artar ve daha küçük kütle kayıpları olması literatür ile uyusmaktadır (Subaşı vd., 2017).

TGA grafiklerinde görüldüğü üzere üretilen kompozit malzemelerin 380°C'den önceki termal bozunma davranışları neredeyse birbirine yakındır. Bundan sonra artan sıcaklıklar nedeni ile saf polimer (novalak reçine) malzeme için bozularak devam eder ve ağırlıkça yaklaşık %48 kalıntı elde edilir. Ağırlıkça cam elyaf tozu katkı oranı arttıkça 380°C'de novalak reçine ile kömür oluşumuna katılarak 460°C'den sonra kömürleşme tabakasının etkisi iyice gözükmeye başlar. Bu nedenle cam elyaf oranının artması ile de kalıntı miktarını büyük ölçüde arttırdığı ve oluşan kömürleşme tabakasının kalitesini iyileştirerek iyi alev geciktirici özellik sergilemesine yol açar (Chen ve Wang, 2006). Üretilen numuneler termoset reçine esaslı olmasından dolayı ve su haricinde yapıdan ilk uzaklaşan moleküllerin karboksilik asit fonksiyonların 200°C civarında CO gazı halinde olması (Grzegorz vd., 2002), 130-150°C sıcaklıklarındaki kütle kaybı oluşmasının nedeni kütleme sonrası yapı içinde tutsak kalmış su moleküllerinden kaynaklandığını göstermektedir.

Örneğin; termal özelliği diğerlerine göre daha zayıf olan N1 kompozit numunesinin eğilme dayanımı 34,7 MPa bulunurken TGA diyagramında kütlece %29,97 kayıp olmaktadır. Fakat novalak reçinenin matrisinde cam elyaf oranının arttırılması ile hazırlanan ve karşılaştırma açısından N1 numune grubu esas alınarak hazırlanan kompozit numunesine uygulanan mekanik testler sonuçlarında N4 numunesinin özellikleri daha iyidir. N4 numunesinin TGA sonuçlarına göre ise kütlece %17,16 kayıp olmaktadır. Yani N4 numunesinin, N1 numunesine göre artan katkı oranları ile mekanik özelliklerinin iyileşmesinin yanında 800°C sıcaklık sonunda madde kaybı da gözle görülebilir şekilde azalmaktadır.

4.6. LOI Testi

Literatürde bulunan tablo 7'ye bakıldığında bu çalışmada kullanılan polimer matrisin piyasada kullanılan polimer matris malzemelere göre alev dayanımının daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla üretilen kompozit numunelerin tümünde hem piyasadaki polimer malzemelere göre hem de ticari olarak satılan novalak reçineye göre alev geciktirici etkinliğinin arttığı ve kompozitlerin alev dayanımının iyileştiği tespit edilmiştir.

Elde edilen EDS verilerine göre üretilen kompozit yapıda hem polimer matris olan novalak reçineden hem de katkı maddesi olarak grafit tozundan gelen yüksek karbondan dolayı LOI değerlerinin yükseldiği gözlenmiştir. Bu yüzden polimerik malzemelerin kimyasal yapıları LOI değerlerini önemli derecede etkiler. LOI değerlerini belirlemek için polimer malzemelerin oksitlenebilecek atom veya molekül grupları sayısının bilinmesi gerekebilmektedir. Alev geciktirici özelliği olan karbonun miktarı ne kadar yüksekse malzemelerin yanmaya karşı dayanımı o kadar çok gelişmektedir (Özdemir vd., 2013).

Bilindiği üzere hava 21 % oksijen içermektedir, bu durum baz alınarak LOI değeri %21'in altında olan malzemeler yanıcı, üzerinde olanlar ise kendi kendini söndüren malzeme sınıfına girmektedir (Laoutid vd., 2009). İlave edilen alev geciktiriciler tek başına kullanıldıkları zaman gösterdikleri yanmazlık özelliklerinin daha fazlasını bir başka katkı ile bir arada kullanıldıkları zaman gösterirler. Bunun sonucunda sistemin termal kararlılığını iyileştirir (Ahmed vd., 2018; Boryniec ve Przygocki, 2001). Buna dayanarak yapılan bu çalışmada yapıya eklenen grafit ile üretilen kompozit örneklerin termal dayanımı ve alev geciktiriciliğini arttırıcı yönde etki yaptığı düşünülmektedir. Numunelerin ısıtılması sırasında ısıyı daha verimli bir şekilde ileten ve ateşleme sürecini yavaşlatması grafitin daha yüksek termal iletkenliğinden kaynaklanmaktadır (Hshieh ve Beeson, 1997). Yapılan çalışmada grafitin LOI değerlerini olumlu etkilediği ve kompozit numunelerin yanmazlık özelliğini arttırdığı literatürle uyumaktadır (Kuan vd., 2008). Yapılan başka bir çalışmada eklenen grafit içeriğin artmasıyla kompozitlerin LOI değerlerini arttırdığı ve alev geciktirici özelliklerinin iyileştirdiği tespit edilmiştir. Grafit oranının varlığı yanmazlık özelliklerini geliştirdiği bu çalışmayla da desteklenmiş ve literatürde yer almıştır (Shen vd., 2017). Üretilen kompozit malzemelerin yanma deneyi sonuçları incelendiğinde grafit katkı oranının artması ile TGA grafiklerindeki verilerin değişimi, LOI sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Ayrıca uygulanan LOI testlerinde, cam elyaf katkı oranının yapılan termogravimetrik analiz sonuçlarında olduğu gibi kompozit numunelerin alev geciktirici özelliğine katkısı bulunmaktadır. Bu yüzden cam elyaf tozunun etkisi üretilen kompozit malzemelerin TGA sonuçlarının LOI sonuçlarını destekler nitelikte olduğunu göstermektedir. Nitekim cam elyaf katkı oranı daha fazla olan kompozitlere yapılan LOI testi sonuçlarının cam elyaf oranı az olan malzemeye göre daha yüksek sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Ağırlıkça %40 grafit oranının sabit olduğu N3, N4 ve N5 kodlu numuneler birbirleri ile kıyaslandığında %20 cam elyaf oranında yaklaşık %45 LOI değeri belirlenirken katkı oranının %30'a artırılması ile %48 ve %40 cam elyaf oranında LOI değeri %50'nin üzerinde elde edilmiştir ve yanma pek görülmemiştir. Bu sonuç aynı zamanda cam elyafın alev geciktirici etkisi olduğunu kanıtlamıştır. Yapılan bir çalışmada cam elyaf takviyeli kompozitlerde elyafın malzeme üzerinde alev geciktirici etkilerini incelemiştir. Kompozit yapıya katılan alev geciktiricilerin çok fazla etki göstermediği görülmüştür ve gözlenen bu değişikliğin cam elyafın uçucu faza karşı bir bariyer görevi görerek yanmayı fiziksel olarak engelleyen bir katkı görevi gördüklerini belirtmişlerdir (Kandola vd., 2002). Bu çalışmada cam elyaf bileşeni arttıkça üretilen kompozit malzemelerin alev dayanımının artmasına dair bilgilerin literatüre benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Novalak matris içerisinde cam elyaf malzemesinin yanmaya başladığında elyaf, katı ve yoğun bir kömürleşmiş tabaka oluşturmak için anında oluşan kömür parçacıklarını birbirine bağlayabilir. Bu katman malzemenin alev geciktiriciliğini etkin bir şekilde iyileştirmek için yanma bölgesinde ısı yalıtımı, oksijen yalıtımı yaparak matris polimerin bozunmasının önlenmesinde rol oynar (Chen ve Wang, 2006).

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada novalak reçine tozu, cam elyaf tozu ve grafit tozunu belirli ağırlıkça oranlarda karıştırma yaparak üretilen polimer kompozit yapıların mekanik, termal ve yanma özelliklerinin nasıl değiştiği gözlenmiştir. Genel olarak novalak reçineye grafit tozu ve cam elyaf tozunun katkısı ile fiziksel ve mekanik özellikler açısından optimum bileşim belirlenmeye çalışıldı. Ayrıca yüksek sıcaklık alanında yaygın olarak kullanılan novalak reçine tozunun alev dayanımı davranışını da geliştirmek açısından polimer kompozit malzemeler üretilmeye çalışılmıştır. Farklı içeriklere sahip polimer kompozit yapıların fiziksel, mekanik, termal ve yanma dayanımlarını test edilmesi ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Mekanik testler sonucu artan cam elyaf takviyesi ile elastisite modülü değerlerinde artış olurken çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve sertlik değerlerinde ise ağırlıkça %30 elyaf oranına kadar artış gözlemlenmiştir. Yapıya katkı oranı ilave etmeye devam edildiğinde, elastisite modülü değerleri artmaya devam ederken sertlik, çekme dayanımı ve eğilme dayanımı değerlerinde azalmaya sebep olmuştur. Ayrıca grafit tozu ilavesi polimer kompozit yapılar üzerinde cam elyaf tozunun gösterdiği etkiye benzer bir etki oluşturmuştur.

2. Saf novalak reçinenin TGA analizi sonucunda piyasadaki diğer polimer malzemelere göre termal dayanımının iyi olduğu görülmektedir. TGA analizi sonuçlarına göre novalak reçineye katkı maddeleri ilave edildiğinde ise hazırlanan kompozit numunelerin bozunmadan kalan kalıntı kütle miktarlarında ve bozunma sıcaklıklarında ciddi oranda artış görülmüştür. Grafit tozu ilavesi ile gerçekleşen kompozit numunelerde kalıntı kütle miktarlarında iyileşme görülmüş bu iyileşmeler novalak reçine ile daha iyi bir değişim göstermiştir. Polimer kompozit numunelerden %30 novalak reçine ve %30 cam elyaf tozu oranlarına sahip N4 kodlu numune istenilen ısı özellikler göstermiştir. Ayrıca cam elyaf tozu takviyesi ile kompozit numunelerin ısı özellikleri önemli derecede geliştirilmiştir.

3. N0 kodlu numune olarak üretilen saf novalak reçine tozunun LOI değeri 37 olarak belirlenmiştir. Ayrıca genel olarak üretilen N5 ve N6 kodlu numunelerin LOI değerleri %50 üzerindedir. N1, N2, N3 ve N4 kodlu numunelerin LOI değerleri ise sırasıyla %41, %43, %45 ve %48'dir. LOI testi sonuçlarına göre novalak reçineye grafit tozu ilave edilmesiyle kompozit numunelerin LOI değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu sonuç TGA sonuçlarıyla uyushmaktadır. LOI değerlerinin %50 üzerinde olmasının sebeplerden birinin yüksek oranda karbon içeren grafit tozundan kaynaklanmasıdır. Ayrıca cam elyaf katkı oranı arttıkça üretilen kompozit numunelerin yangın dayanımının arttığını ve termal ayrışma oranının azaldığı görülmektedir.

4. SEM analizine göre, novalak matris içerisindeki belli bir orandan sonra artan katkı oranı miktarı homojen dağılımı olumsuz yönde etkilemiştir. Bu durum novalak reçine, cam elyaf tozu ve grafit tozu arasındaki etkileşimlerin zayıflamasına yol açmıştır. %30 novalak reçine tozu, %30 cam elyaf tozu ve %40 grafit tozu katkısı içeren kompozit yapının yüksek büyütmelede iyi ara yüzey uyumunun ve etkileşimlerinin güçlendiğini ortaya koymuştur. Uygulanan mekanik testler sonucu elde edilen çekme dayanım değerleri de bu sonuçları desteklemiştir. EDS sonuçlarında da yüksek karbon oranından dolayı yanma dirençlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak; yapılan TGA, SEM, mekanik testler ve LOI yanma testinden yola çıkarak sıcak presleme yöntemi ile üretilen %30 novalak reçine tozu, %30 cam elyaf tozu ve %40 grafit tozu olacak şekilde katkılı N4 kodlu kompozit numunenin yüksek sıcaklık endüstriyel teker sektörü de dahil olmak üzere birçok endüstriyel alanda kullanılabilme potansiyelinin olduğu söylenebilir. Bu kompozit numunenin diğer hazırlanan kompozit numuneler içerisinde arzu edilen fiziksel, ısı, mekanik ve yanmazlık özelliklerini bir arada bulundurarak daha üstün özellikler sergilediği görülmüştür. Novalak reçine literatürde belirtildiği üzere alev dayanımı iyi olan bir polimer matristir. Novalak reçine polimer matrisine ilave edilen katkı maddeleri sonucu üretilen kompozit malzemelerin alev geciktiricilik özellikleri geliştirilmiştir.

6. ÖNERİLER

1. Fenolik novalak reçine işlenmesi sırasında ortaya çıkan yan ürün çoğunlukla sudur. Ortaya çıkan yan ürünler numunede boşluklara neden olabilir. Bu boşluklar aşağıdaki seçeneklerle engellenebilir:

a. Malzemenin işlenmesi sırasında yan ürünü buharlaştırmak için kalıp açılarak etkisi araştırılabilir.

b. Hazırlama yöntemi daha uygun halde iyileştirilebilir veya daha iyi karıştırma süreci izlenerek azaltılabilir.

2. Aynı değişkenler kullanılarak farklı ebatlardaki cam elyaflar ile kompozit numuneler üretilebilir ve bu cam elyafların kompozit yapıya olan etkileri incelenebilir.

3. Pres tekniğini optimizasyon etmek amacıyla, özellikle presleme basıncını değiştirerek oluşan süreç incelenebilir.

4. Üretilen numuneler için kürleme ve post-kürlemenin test sonuçlarına olan etkisi detaylı olarak incelenebilir.

7. KAYNAKLAR

- Aan, S., P., M., Krishna, M., Murthy, N., N., H. ve Rai, K., S., 2011. Thermal, Mechanical, Morphological and Flame Retardance Properties of DABA Modified Novalac/CFRP Composites, Asian Journal of Materials Science, 3, 1, 20-30.
- Abdalla, O., M., Ludwick, A. ve Mitchell, T., 2003. Boron-modified Phenolic Resins for High Performance Applications, Polymer, 44, 7353-7359.
- Adekomaya, O. ve Adama, K., 2017. Glass-fibre Reinforced Composites: The Effect of Fibre Loading and Orientation on Tensile and Impact Strength, Nigerian Journal of Technology, 36, 3, 782-787.
- Ahmed, L., Zhang, B., Hatanaka, C., L. ve Mannan, S., M., 2018. Application of PolymerNanocomposites in the Flame Retardancy Study, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 55, 381-391.
- Aierbe, A., Echeverrı, J. M., Martin, M., D., Etxeberria, A., M. ve Mondragon I., 2000. Influence of The Initial Formaldehyde to Phenol Molar Ratio (F/P) On The Formation of a Phenolic Resol Resin Catalyzed with Amine, Polymer, 41, 6797– 6802.
- Akçay, D., 2006. Poli (Metil Metakrilat) /Bentonit Nanokompozitin Kütle Polimerizasyonu Yöntemiyle Sentezlenmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aktaş, M., H., 2017. Yüksek Performanslı Para Aramid Elyaf Takviyeli Fren Balatalarının Performansının DeneySEL Olarak Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Ali, V., Neelkamal, Haque, F., Z., Zulfequar, M. ve Husain, M., 2007. Preparation and Characterization of Polyether-Based Polyurethane Dolomite Composite, Journal of Applied Polymer Science, 103, 2337-2342.
- Alkan, B.,  ., 2015. Synthesis of Composite Resol Resins and Application for Glass Wool Production, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Allen, DJ. ve Ishida, H., 2001. Thermosets: Phenolics, Novolacs, and Benzoxazine, In: Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Elsevier, 9226–9229.
- Arslan, G., C., 2019. Grafit Oranının Döküm Polyamid-Grafit Kompozitlerin Mekanik  zelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- ASTM D638, 2003. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International, United States.
- ASTM D790-03, 2003. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM International, United States.
- ASTM D 2863, 2000. Standard Test Method for Measuring the Minimum Oxygen Concentration to Support Candle-Like Combustion of Plastics (Oxygen Index), ASTM International, United States.
- Ayar, B., 2007. Çinko Borat Sentezi ve Yüksek Sıcaklıkta Pigment Olarak Kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Baptista, R., Mendão, A., Rodrigues, F., Figueiredo-Pina, G., C., Guedes, M. ve Marat-Mendes, R., 2016. Effect of High Graphite Filler Contents on the Mechanical and Tribological Failure Behavior of Epoxy Matrix Composites, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 85, 113-124.
- Bashirzadeh, R. ve Gharehbaghi, A., 2010. An Investigation on Reactivity, Mechanical and Fire Properties of PU Flexible Foam, Journal of Cellular Plastics, 46, 126-158.
- Bellucci, S., Micciulla, F., Levin, V., M., Petronyuk, S., Y., Chernozatonskii, L., A., Kuzhir, P., P., Paddubskaya, A., G., Macutkevici, J., Pletnev, M. A., Fierro, V. ve Celzard, A., 2015. Microstructure, Elastic and Electromagnetic Properties of Epoxy-graphite Composites, AIP Advances, 5, 6, 067137.
- Betingytė, V., Žukienė, K., Jankauskaitė, V., Milašienė, D., Mickus, K. V., and Gulbinienė, A., 2012. Influence of Calcium Carbonate Fillers on the Properties of Recycled Poly(ε-caprolactone) Based Thermoplastic Polyurethane, Materials Science (Medžiagotyra), 18, 3, 243-249.
- Bhattacharjee, A., Roy, K. ve Nanda, K., B., 2020. Effect of Graphite Particulate on Mechanical Properties of Glass Fibre Reinforced Composite, International Journal of Aerospace System Engineering, 7, 1, 16-20.
- Biswas, S., Deo, B., Patnaik, A. ve Satapathy, A., 2011. Effect of Fiber Loading and Orientation on Mechanical and Erosion Wear Behaviors of Glass–epoxy Composites. Polymer Composites, 32, 665-674.
- Boryniec, S. ve Przygocki, W., 2001. Polymer Combustion Processes. 3. Flame Retardants for Polymeric Materials, Progress in Rubber and Plastics Technology, 17, 2, 27-148.
- Braga, F., N., Passador, R., F., Saito, E. ve Cristovan, H., F., 2019. Effect of Graphite Content on The Mechanical Properties of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS), Macromolecular Symposia, 383, 1800018.

- Brown, R., J. ve Mathys, Z., 1997. Reinforcement and Matrix Effects on the Combustion Properties of Glass Reinforced Polymer Composites, Composites Part A, 28A, 7, 675-681.
- Brown, J., R., Fawell, P., D. ve Mathys, Z., 1994. Fire-hazard Assessment of Extended-chain Polyethylene and Aramid Composites by Cone Calorimetry, Fire and Materials, 18, 167-172.
- Bunsell, R., A. ve Harris, B., 1974. Hybrid Carbon and Glass Fibre Composites, Composites, 5, 4, 157-164.
- Campbell, F., C., 2006. Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials, 1. Baskı, Elsevier, Oxford, U.K.
- Cengiz, F., 2008. Preparation and Characterization of Recycled Polypropylene Based Nanocomposites, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Černý, M., Petrus, J., Kučera, F., Pavlišáková, V., Kupka, V., Poláček, P. ve Chamradová, I., 2020. A New Approach to the Structure-properties Relationship Evaluation for Porous Polymer Composites, SN Applied Sciences, 2, 640.
- Chen, Y. ve Wang, Q., 2006. Preparation, Properties and Characterizations of Halogen-free nitrogen-phosphorous Flame-retarded Glass Fiber Reinforced Polyamide 6 Composite, Polimer Degradation and Stability, 91, 2003-2013.
- Choi, M., H., Byun, H., Y. ve Chung I., J., 2002. The Effect of Chain Length of Flexible Diacid on Morphology and Mechanical Property of Modified Phenolic Resin, Polymer, 43, 4437-4444.
- Clarke, J., L., 1996. Structural Design of Polymer Composites, 1. Baskı, E & FN Spon, Londra, U.K., 59-62s
- Collin, G., Mildenberg, R., Zander, M., Höke, H., McKillip, W., Freitag, W. ve Imöhl, W., 2005. Resins-Synthetic, In Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 7. Baskı, John Wiley and Sons Inc., 499-524s.
- Çelen, U., 2020. Otomotiv Sektörü için Polimer Kompozit Malzemelerin Hazırlanması ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Daniel, M., I. ve Ishai, O., 2006. 'Introduction,' in Engineering Mechanics of Composite Materials, 2. Baskı, Oxford University Press Inc., New York, 1-2s.
- Danusso, F. ve Tieghi, G., 1986. Strength versus Composition of Rigid Matrix Particulate Composites, Polymer, 27, 1385-1390.

- Da-Peng, Z. ve Hong, F., 2008. Mechanical and High-Temperature Properties of Glass Fibers Reinforced Phenolic Composites, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 27, 1449-1460.
- De Bruyn, P., J., Foo, L., M., Lim, A., S., Looney, M., G. ve Solomon, D., 1997. The Chemistry of Novolac Resins. Part 4. The Strategic Synthesis of Model Compounds, Tetrahedron, 53, 40, 13915-13932.
- Doğan, K., 2018. Karbon Nano Tüp ve Grafen Nano Partikül Katkılı Fenolik Reçine Matrisli Nanokompozitlerin Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Dongya, Y., Hanqing, Z., Fengxian, Q. ve Li, H., 2012. Investigation of Polyurethane (Urea)/Modified Nano-Calcium Carbonate Hybrid Aqueous Dispersions and Their Films, Journal of Applied Polymer Science, 125, 2896-2901.
- Dweiri, R. ve Sahari, J., 2007. Electrical Properties of Carbon-based Polypropylene Composites For Bipolar Plates in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC), J Power Sources 171, 424–432.
- Erbay, K., 2009. Silah Gövdeleri için Polimer Esaslı Kompozit Malzeme Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Ergün, N., 2006. Bor Karbür-Silisyum Karbür Kompozitlerinin Reaktif Sıcak Presleme ile Üretilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Fink, J., K., 2018. Reactive Polymers Fundamentals and Applications, 3. Baskı, Elsevier, Oxford U.K., 227-228s.
- Fischer, S. ve Marom, G., 1987. The Flexural Behaviour of Aramid Fiber Hybrid Composite Materials, Composites and Science Technologies, 28, 4, 291–314.
- Gabilondo, N., Larranaga, M., Pena, C., Corcuera, M., Echeverria, J. ve Mondragon, I., 2006. Polymerization of Resole Resins with Several Formaldehyde/phenol Molar Ratios: Amine Catalysts Against Sodium Hydroxide Catalysts, Journal of Applied Polymer Science, 102, 3, 2623-2631.
- Gardziella, A., Pilato, L., A. ve Knop, A., 2000. Phenolic Resins Chemistry, Applications, Standardization, Safety and Ecology, 2. Baskı, Springer-Verlag, New York, U.S.A., 117, 125- 127s.
- Gao, L. ve Shao, Z., C., 2012. The Effects of Graphite on Ceramic Coatings on LY12 Aluminium Alloys by Micro-arc Oxidation, Advanced Materials Resistance, 454, 126-129.
- German, R., M., 2007. Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing, Çeviri Editörleri: Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., MPIF, 4, Princeton, New Jersey, 272s.

- Güleşen, M., 2005. Fiber Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Bulunması, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Güllü, A., Özdemir, A. ve Özdemir, E., 2006. Experimental Investigation of the Effect of Glass Fibres on the Mechanical Properties of Polypropylene (PP) and Polyamide 6 (PA6) Plastics, Materials & Design, 27,4, 316-323.
- Gülyuva, Ş., 2018. New Thermosetting Resins From Cashew Nutshell Liquid (CNSL) with Fire Retardant Properties, Yüksek Lisans Tezi, Yeditepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Grzegorz, S., S., Karpiński, Z., Biniak, S. ve Świątkowski, A., 2002. The Effect of the Gradual Thermal Decomposition of Surface Oxygen Species on the Chemical and Catalytic Properties of Oxidized Activated Carbon, Carbon, 40, 14, 2627-2639.
- Han, D., S., Park, I., B., Kim, M., H., Noh, B., J., Kim, W., S. ve Lee, J., M., 2010. The Effects of Glass Fiber Reinforcement On The Mechanical Behavior of Polyurethane Foam, Journal of Mechanical Science and Technology, 24, 263-266.
- He, W., H., Wang, L., J. ve Li, X., K., 2013. Thermal Properties of Carbon Fibre/epoxy Composites Modified by Novolac Resin, Materials Research Innovations, 17, 6, 425–429.
- Hirano, K. ve Asami, M., 2012. Phenolic Resins-100 Years of Progress and Their Future, Reactive & Functional Polymers, 73, 2, 256-269.
- Hoa, S., V., 2009. Principles of the Manufacturing of Composite Materials, DEStech Publications Inc., Pennsylvania, U.S.A., 101-141s.
- Hörold, S., 1999. Phosphorus Flame Retardants in Thermoset Resins, Polimer Degradation and Stability, 64, 427-431.
- Hsieh, F. ve Beeson D., H., 1997. Flammability Testing of Flame-retarded Epoxy Composites and Phenolic Composites, Fire and Materials, 21, 41-49.
- Hsueh, C.H., 1989. Effects of Aspect Ratios of Ellipsoidal Inclusions on Elastic Stress Transfer of Ceramic Composites, Journal of American Ceramic Society, 72, 344-347.
- Huang, J., Xu, M., Ge, Q., Lin, M., Lin, Q., Chen, Y., Chu, J., Dai, L. ve Zou, Y., 2005. Controlled Synthesis of High-Ortho-Substitution Phenol-Formaldehyde Resins, Journal of Applied Polymer Science, 97, 652–658.
- İlhan, R., 2018. Cam Elyaf Takviyeli Polyester Kompozit Malzemelerin Tribolojik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

- İredale, J., R., Ward, C. ve Hamerton, I., 2017. Modern Advances in Bismaleimide Resin Technology: A 21st Century Perspective On The Chemistry of Addition Polyimides, Progress in Polymer Science, 69, 1–21.
- Josepha, S., Sreekala, M., S., Oommena, Z., Koshyc, P. ve Thomas, S., 2002. A Comparison of the Mechanical Properties of Phenol Formaldehyde Composites Reinforced with Banana Fibres and Glass fibres, Composites and Science Techonology, 62, 4, 1857-1868.
- Kahraman, H., 2014. Alev Geciktirici Nanokompozit Kaplamaların Sentezi ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Kandola, B., K., Horrocks, A., R., Myler, P. ve Blair, D., 2002. The Effect of Intumescent on the Burning Behaviour of Polyester-resin-containing Composites, Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing, 33, 805-817.
- Karadurmuş, M., 2017. Epoksi Reçine ile Hazırlanan Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Kawamoto, M., A., Pardini, C., L., Diniz, F., M., Lourenço, L., V. ve Takahashi, F., M., 2010. Synthesis of a Boron Modified Phenolic Resin, Journal of Aerospace Technology and Management, 2, 2, 169-182.
- Kaya, G., 1999. Mechanical Properties of PM Al-SiC Composites Produced By Conventional Hot Pressing Method, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Kim, M., G., Wu, Y. ve Amos, L., W., 1997. Polymer Structure of Cured Alkaline Phenol-formaldehyde Resol Resins with Respect to Resin Synthesis Mole Ratio and Oxidative Side Reactions, Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 35, 15, 3275-3285.
- Kim, S., H., Park, H., C., Jeong, H., M. ve Kim, B., K., 2010. Glass Fiber Reinforced Rigid Polyurethane Foams, Journal of Materials Science, 45, 2675-2680.
- Köksal, F., 2004. Al-Cu-SiC ve Al-Cu-B₄C Kompozitlerin Sıcak Presleme Yöntemi ile Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta.
- Ku, H., Trade, M., Nixon, R. ve Wong, P., 2010. Flexural Properties of Phenolic Resin Reinforced With Glass Powder: Preliminary Results, Journal of Applied Polymer Science, 116, 347-354.
- Ku, H., Trada, M., Cecil, T. ve Wong, P., 2010. Tensile Tests of Phenolic Formaldehyde Glass-Powder-Reinforced Composites: Plot Study, Journal of Applied Polymer Science, 116, 10-17.

- Ku, H., S., 2011. Relationship Between Different Mechanical Properties of Phenol Formaldehyde SLG-reinforced Composites, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 30, 15, 1281–1292.
- Kuan, C., Yen, W., Chen, C., Yuen, S., Kuan, H. ve Chiang C., 2008. Synthesis, Characterization, Flame Retardance and Thermal Properties of Halogen-free Expandable Graphite/PMMA Composites Prepared from Sol–gel Method, Polymer Degradation and Stability, 93, 1357-1363.
- Kumar, S., S. ve Kanagaraj, G., 2016. Investigation on Mechanical and Tribological Behaviors of PA6 and Graphite-Reinforced PA6 Polymer Composites, Arabian Journal Science Engineering, 41, 4347–4357.
- Küçükşenlik, Z., N., 2019. Alev Geciktirici Katkıların Poliüretan Köpüğün Termal ve Mekanik Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Laoutid, F., Bonnaud L., Alexandre, M., Lopez-Cuesta, J., M. ve Dubois, P., 2009. New Prospects in Flame Retardant Polymer Materials: from Fundamentals to Nanocomposites, Materials Science and Engineering: R: Reports, 63, 3, 100- 125.
- Lee, Y., Kim, D., Kim, H., Hwang, T., Rafailovich, M. ve Sokolov, J., 2003. Activation Energy and Curing Behavior of Resol- and Novalac-Type Phenolic Resins by Differential Scanning Calorimetry and Thermogravimetric Analysis, Journal of Applied Polymer Science, 89, 2589- 2596.
- Letelier V., Henríquez-Jara B., I., Manosalva M. ve Moriconi G., 2019. Combined use of waste concrete and glass as a replacement for mortar raw materials, Waste Management, 94, 107-119.
- Li, J., Kim, J. ve Sham, L., M., 2005. Conductive Graphite Nanoplatelet/epoxy Nanocomposites: Effects of Exfoliation and UV/ozone Treatment of Graphite, Scripta Materialia, 53 2, 235-240.
- Liyanage, C., D. ve Pieris, M., 2015. A Physico-chemical Analysis of Coconut Shell Powder, Procedia Chemistry, 16, 222-228.
- Liu, X., Z., Li, H., J. ve Ma, T., M., 2009. Preparation of Phenolic Hollow Microspheres via in Situ Polymerization, Polymer International, 58, 465–468.
- Lopez, M., Blanco, M., Vazquez, A., Gabilondo, N., Arbelaiz, A., Echeverria, J., M. ve Mondragona, I., 2008. Curing Characteristics of Resol-layered Silicate Nanocomposites, Thermochimica Acta, 467, 73–79.
- Ma, L., C., Meng, L., H., Wang, Y., W., Wu, G., S., Fan, D., P., Yu, J., L., Qi, M., W. ve Huang, Y., D., 2014. Interfacial Properties and Impact Toughness of Dendritic Hexamethylenetetramine Functionalized Carbon Fiber with Varying Chain Lengths, RSC Adv. 4, 39156–39166.

- Ma, H., Y., Tong, L., F., Xu, Z., B., Fang, Z., P., Jin, Y., M. ve Lu, F., Z., 2007. A Novel Intumescent Flame Retardant: Synthesis and Application in ABS Copolymer, Polymer Degradation and Stability, 92, 720-726.
- Magampa, P., P., Manyala, N. ve Focke, W., W., 2013. Properties of Graphite Composites Based On Natural and Synthetic Graphite Powders and a Phenolic Novolac Binder, Journal of Nuclear Materials, 436, 76-83.
- Mészáros, L. ve Szakács, J., 2016. Properties Low-cycle Fatigue Properties of Basalt Fiber and Graphene Reinforced Polyamide 6 Hybrid Composites, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 35, 22, 1671-1681.
- Mağdala, Ö., M., 2009. Isı Kalkanları İçin Kalıplanabilir Karbon Fenolik Kompozit Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İstanbul.
- Maiti, S., N. ve Lopez, B., H., 1992, Tensile Properties of Polypropylene/ Kaolin Composites, Journal Applied Polymer Science, 44, 2, 353-360.
- Medina, F., N., Barbero-Barrera, M., M. ve Bustamante, R., 2016. Improvement of the Properties of Gypsum-based Composites with Recycled Isostatic Graphite Powder from the Milling Production of Molds for Electrical Discharge Machining (EDM) Used as a New Filler, Construction and Building Materials, 107, 17-27.
- Moloney, A., C., Kausch, H., H. ve Kaiser, T., 1987. Parameters Determining the Strength and Toughness of Particulate Filled Epoxide Resins, Journal of Materials Science, 22, 381-393.
- Molnár, K., Košťáková, E. ve Mészáros, L., 2014. The Effect of Needleless Electrospun Nanofibrous Interleaves on Mechanical Properties of Carbon Fabrics/epoxy Laminates, Express Polymer Letters, 8, 62–72.
- Masuelli, M., A., 2013. Introduction of Fibre-Reinforced Polymers – Polymers and Composites: Concepts, Properties and Processes, in Fiber Reinforced Polymers, The Technology Applied for Concrete Repair, 3-40.
- Mıstık, İ. ve Merdan, N., 2012. Dokuma Bazalt-cam ve Fındık Kabuğu Takviyeli Polimer Kompozitlerinin Eğilme Dayanımı ve Isı Geçirgenliklerinin İncelenmesi, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 10, 119-126.
- Mishra, A. K., Mohanty, L. ve Drzal, T., 2003. Studies on Mechanical Performance of Biofibre/Glass Reinforced Polyester Hybrid Composites, Composites Science and Technology, 63, 1377-1385.
- Mouritz, P., A., Mathys, Z. ve Gibson, G., A., 2006. Heat Release of Polymer Composites in Fire, Composites: Part A, 37, 1040–1054.
- Morgan, A., B. ve Worku A., Z., 2015. Flame Retardants: Overview, KirkOthmer Encyclopedia Of Chemical Technology, 1-28s.

- Morgan, A., B. ve Wilkie C. A., 2007. Flame Retardant Polymer Nanocomposites, 1st Edition, Wiley & Sons Inc., New Jersey, U.S.A., 5s.
- Mysiukiewicz, O., Kosmela, P., Barczewski, M. ve Hejna, A., 2020. Mechanical, Thermal and Rheological Properties of Polyethylene-Based Composites Filled with Micrometric Aluminum Powder, Materials, 13, 5, 1242.
- Nair, R., P., C., 2004. Advances In Addition-cure Phenolic Resins, Progress In Polymer Science, 29, 401-498.
- Nakamura, Y., Yamaguchi, M. ve Matsumoto, O., M., 1993. Effects of Particle Size on Mechanical and Impact Properties of Epoxy Resin Filled with Spherical Silica, Journal of Applied Polymer Science, 45, 1281-1289.
- Nas, E., Gökkaya, H. ve Sur, G., 2013. Sıcak Presleme Yöntemi Kullanılarak Kompozit Malzemelerin Üretilebilirliği Üzerine Bir Değerlendirme, Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 3, 2, 56-65.
- Nikje, M., M., A., ve Garmarudi, 2006. A. B., Effect of Talc Filler on Physical Properties of Polyurethane Rigid Foams, Polymer-Plastics Technology and Engineering, 45, 1213-1217.
- Okoroafor, E., U., Villemaire, J., P. ve Agassant, J., F., 1992. The Viscosity of Immiscible Polymer Blends: Influences of The Interphase and Deformability, Polymer, 33, 24, 5264-5271.
- Öğünç, H., 2006. Sıcak Presleme ile Sinterlenmiş α -SiC Matriksli B₄C Kompozitlerinin Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özdemir, F., Tutuş, A. ve Bal, C., B., 2013. Yüksek Yoğunluklu Lif Levhanın Isı İletkenliği ve Limit Oksijen İndeksi Üzerine Yanmayı Geciktiricilerin Etkisi, SDÜ Orman Fakültesi Dergisi, 14, 121-126.
- Özer, H., 2015. Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Bursa.
- Özerol, E., Şenkal, B. ve Okutan, M., 2015. Preparation and Characterization of Graphite Composites of Polyaniline, Microelectronic Engineering, 146, 76–80.
- Pandey, K., A., Kumar, R., Kachhava, S., V. ve Kar, K., K., 2016. Mechanical and Thermal Behaviours of Graphite Flake-reinforced Acrylonitrile–butadiene–styrene Composites and Their Correlation with Entanglement Density, Adhesion, Reinforcement and C factor, RSC Advances, 6, 50559.

- Park, B., D., Riedl, B., Hsu, E., ve Shields, J., 1999. Differential Scanning Calorimetry of Phenol–formaldehyde Resins Cure-accelerated by Carbonates, Polymer, 40, 7, 1689-1699.
- Park, S. ve Cho, M., 2000. Thermal Stability of Carbon-MoSi₂-carbon Composites by Thermogravimetric Analysis, Journal of Materials Science, 35, 3525-3527.
- Parker, H., E., 1999. Mc Graw Hill Concise Encyclopedia of Science & Technology, 4. Baskı, Mc-Graw Hill.
- Pedrazzoli, D., Pegoretti, A. ve Kalaitzidou, K., 2014. Synergistic Effect of Exfoliated Graphite Nanoplatelets and Short Glass Fiber on the Mechanical and Interfacial Properties of Epoxy Composites, Composites Science and Technology, 98, 15-21.
- Pegoretti, A., Fabbri, E., Migliaresi, C. ve Pilati, F., 2004. Intraply and Interply Hybrid Composites Based on E-glass and Poly (vinyl alcohol) Woven Fabrics: Tensile and impact properties, Polymer International, 53, 1290 – 1297.
- Polijansek, I. ve Krajnc M., 2005. Characterization of Phenol Formaldehyde Prepolymer Resins by In FT-IR Spectroscopy, Acta Chimimica Slovenica, 52, 238-244.
- Powell, J. ve Green, S., 2021. The Challenges of Bonding Composite Materials and Some Innovative Solutions, Reinforced Plastics, 65, 36 – 39.
- Prikryl, R., Cech, V., Balkova, R. ve Vanek, J., 2003. Functional Interlayers in Multiphase Materials, Surface and Coatings Technology, 174 –175, 858–862.
- Puzari, A., 2010. Novolac Resin: Novel Functional Materials, Baruah, B., J., In Chemistry of Phenolic Compounds: State of the Art; Nova Science Publishers, New York. U.S.A., 105–129s.
- Ran, Q., Zou, H., Wu, S., ve Shen, J., 2008. Study on Thermoplastic Polyurethane/Montmorillonite Nanocomposites, Polymer Composites, 119-124.
- Romero-Ibarra, I., C., Bonilla-Blancas, E., Sanchez-Solis, A. ve Manero, O., 2012. Influence of The Morphology of Barium Sulfate Nanofibers and Nanospheres on The Physical Properties of Polyurethane Nanocomposites, European Polymer Journal, 48, 670-676.
- Rout, K., A. ve Satapathy, A., 2012. Study on Mechanical and Tribo-performance of Rice-husk Filled Glass–epoxy Hybrid Composites, Materials & Design, 41, 131-141.
- Saha, M., C., Kabir, M., E. ve Jeelani, S., 2008. Enhancement in Thermal and Mechanical Properties of Polyurethane Foam Infused with Nanoparticles, Materials Science and Engineering: A, 479, 213-222.
- Samal, K. S., Mohanty, S. ve Nayak, K., S., 2009. Enhancement Banana/Glass Fiber-Reinforced Polypropylene Hybrid Composites: Fabrication and Performance Evaluation, Polymer- Plastics Technology and Engineering, 48, 4, 397-414.

- Schartel, B. ve Hull, T., R., 2007. Development of Fire-retarded Materials-Interpretation of Cone Calorimeter Data, Fire and Materials, 31, 327-354.
- Shahzamani, M., Bagheri, R., Bahramian, R., A. ve Masoomi, M., 2016. Preparation and Characterization of Hybrid Aerogels from Novolac and Hydroxyl-terminated Polybutadiene, Journal of Materials Science, 51, 7861-7873.
- Shen, M., Chen, W., Yuen, S., Tsai, K., Kuan, C., Kuan, H., Chou, H. ve Chiang, C., 2017. Preparation of Expandable Graphite and its Flame Retardant Properties in HDPE Composites, Polymer Composites, 38, 2378-2386.
- Sheikh-Ahmad, J., Y., 2009. Machining of Polymer Composites, Springer Science+Business Media, Newyork, U.S.A.
- Shimbo, M., Ochi, M. ve Shigeta, Y., 1981. Shrinkage and Internal Stress during Curing of Epoxide Resins, Journal of Applied Polymer Science, 26, 2265-2277.
- Solak, H., H., 2012. Lif ve Mineral Takviyeli Melamin Matrisli Kompozit Malzemelerin Isıl ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lİsans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Somunkıran, İ. ve Balın, A., 2011. Sıcak Presleme Tekniğiyle Üretilen Co Esaslı Co-Cr-Mo Toz Alaşımında Presleme Sıcaklığının Mikroyapı Üzerine Etkisi, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elâzığ.
- Sönmez, M., 2009. Polimer Matrisli Kompoitlerin Endüstri Ürünleri Tasarımında Önemi ve Geleceği: Türkiye'den Dört Örnek Firma Üzerine Bir İnceleme, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İstanbul.
- Sperling, H., L., 2015. Introduction to Physical Polymer Science, 4. Baskı, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, U.S.A., 626s.
- Subaşı, A., Zurnacı, M., Kahyaoğlu, A. ve Demir, E., 2017. Polyester/Grafen Kompozitlerin Mekanik ve Termal Özelliklerinin İncelenmesi, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 4, 3, 472-481.
- Suherman, H., Mahyoedin, Y., Septe, E. ve Rizade, R., 2019. Properties of Graphite/epoxy Composites: The In-plane Conductivity, Tensile Strength and Shore Hardness, AIMS Materials Science, 6, 2, 165–173.
- Suresha, B., Chandramohan G., Renukappa N. ve Siddaramaiah, M., 2007. Mechanical and Tribological Properties of Glass-epoxy Composites With and Without Graphite Particulate Filler, Journal of Applied Polym Science, 103, 2472–2480.
- Suzin, S., H., 2011. Grafit ve Sic Takviyeli ZA 27 Hibrit Kompozit Malzemelerin Isıl İşleminin Aşınma Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Tanoglu, M., McKnight, S., H., Palmese, G., R. ve Gillespie, J., W., 2001. Dynamic Stress/strain Response of The Interphase in Polymer Matrix Composites, Polymer Composites, 22, 5, 621-635.
- Teh, L., P., M., Jaafar, N., Akil, M., H., Seetharamu, N., K., Wagiman, R., N., A. ve Beh, S., K., 2008. Thermal and Mechanical Properties of Particulate Fillers Filled Epoxy Composites for Electronic Packaging Application, Polymers for Advanced Technologies, 19, 308-315.
- Tekin, V., O., 2007. Eş-anlı Polimerizasyon ile Kil Modifikasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tekmen, Ç. 2006. Metal Matriksli Kompozitlerin Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemi ile Üretimi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Thirumal, M., Singha, N., K., Khastgir, D., Manjunath, B., S. ve Naik, Y., P., 2010. Halogen-Free Flame-Retardant Rigid Polyurethane Foams: Effect of Alumina Trihydrate and Triphenylphosphate on the Properties of Polyurethane Foams, Journal Of Applied Polymer Science, 116, 2260-2268.
- Tomar, N. ve Maiti, S., N., 2010. Mechanical Properties of Mica-Filled PBT/ABAS Composites, Journal of Applied Polymer Science, 117, 672-681.
- Torralba, JM., Da Costa, CE. ve Velasco, F., 2003. P/M Aluminum Matrix Composites: An Overview, Journal of Materials Processing Technology, 133, 203– 206.
- Türkmen, İ., 2012. Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerde Elyaf Tabaka Sayısına Bağlı Mekanik Özelliklerin ve Darbe Dayanımının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, C.B.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Türkmen, M., 2018. Cam Elyaf Takviyeli Polimerik Kompozit Malzemelerde Lazerli Kesme ve Delme Parametrelerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Ulcay, Y., Akyol, M. ve Gemci, R., 2002. Polimer Esaslı Lif Takviyeli Kompozit Malzemelerin Arabirim Mukavemeti Üzerine Farklı Kür Metotlarının Etkisinin İncelenmesi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik- Mimarlık Fakültesi Dergisi, 7, 1, 93-116.
- Vijay, B., R. ve Srikantappa, S., A., 2019. Physico-Mechanical and Tribological Properties of Glass Fiber Based Epoxy Composites, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 8, 6, 929-934.
- Vautard, F., Grappe, H. ve Ozcan, S., 2014. Engineered Interface Chemistry to Improve the Strength of Carbon Fiber Composites Cured by Electron Beam, Industrial Engineering Chemistry Research, 53, 12729–12736.

- Wang, S., Adanur, S. ve Jang, Z., 1997. Mechanical and Thermo-mechanical Failure Mechanism Analysis of Fiber/filler Reinforced Phenolic Matrix Composites, Composites Part B 28B, 215-231.
- Wang, F., Ma, M., C. ve Wu, W., 2001. Thermal Degradation of Polyethylene Oxide Blended with Novolac Type Phenolic Resin, Journal of Materials Science, 36, 943-947.
- Wang, J., Laborie, M., P., G. ve Wolcott, M., P., 2005. Comparison of Model-free Kinetic Methods for Modeling the Cure Kinetics of Commercial Phenol-formaldehyde Resins. Thermochimica Acta, 439, 68-73.
- Wang, T., M., Chen, S. B., Wang, Q. H. ve Pei, X. Q., 2010. Damping Analysis of Polyurethane/epoxy Graft Interpenetrating Polymer Network Composites Filled with Short Carbon Fiber and Micro Hollow Glass Bead, Materials and Design, 31, 8, 3810-3815.
- Wang, R., M., Zheng, S., R. ve Zheng Y., G., 2011. 'Introduction,' in Polymer Matrix Composites and Technology, Cornwall, UK: Woodhead Publishing, U.K., 1-5s.
- Wang, Y., Wang, S., Bian, C., Zhong, Y. ve Jing, X., 2014. Effect of Chemical Structure and Cross-link Density on the Heat Resistance of Phenolic Resin, Polymer Degradation and Stability, 111, 239-246.
- Widya, T. ve Macosko, C., W., 2005. Nanoclay-Modified Rigid Polyurethane Foam, Part B: Journal of Macromolecular Science, 44, 6, 897-908.
- Wilkie, A., C. ve Morgan, B., A., 2010. Fire Retardancy of Polymeric Materials, 2. baskı, Copyright Clearance Center Inc., New York, U.S.A., 704-722s.
- Wolfrum, J. ve Ehrenstein, W., G., 1999. Interdependence Between the Curing, Structure, and the Mechanical Properties of Phenolic Resins, Journal of Applied Polymer Science, 74, 3173-3185.
- Yadav, S., Haque, Z. MD., Kumar, S. ve Sandeep, 2016. Mechanical and Sliding Wear Behaviour of E-GLASS Fiber Reinforced with EPOXY Composites, International Research Journal of Engineering and Technology, 3, 563-567.
- Yaman, B., Aıkbaşı, G. ve Aıkbaşı, N., 2019. Epoksi Matrisli Kompozitlerde Katı Yağlayıcı İlavesinin Sürtünme Kaybının Azaltılmasına Etkisinin İncelenmesi, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8, 1, 583-592.
- Yang, M. ve Yujing, N., 2011. Study on Modification of Phenolic Resin/glass Fiber Composite by Polyvinyl Alcohol, Applied Mechanics and Materials, 44, 3045-3048.
- Yasmin, A. ve Daniel, I., M., 2004. Mechanical and Thermal Properties of Graphite Platelet/epoxy Composites, Polymer 45, 8211-8219.

- Yilmaz, K., 2008. Dynamic Mechanical Characterizations of Carbon Fiber- Polyurethane and Epoxy Composites, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Young, R., J. ve Beaumont, P., W., 1977. Effect of Composition upon Fracture of Silica Particle-Filled Epoxy-Resin Composites, Journal of Materials Science, 12, 684-692
- Zarate, N., C., Aranguren, I., M. ve Reboredo, M., M., 2003. Influence of Fiber Volume Fraction and Aspect Ratio in Resol-Sisal Composites, Journal of Applied Polymer Science, 89, 2714-2722.
- Zhandarov, S. ve Mäder, E., 2005. Characterization of Fiber/matrix Interface Strength: Applicability of Different Tests, Approaches and Parameters, Composites Science And Technology, 65, 1, 149–160.
- Zhang, X., Shen, L., Xia, X., Wang, H. ve Du, Q., 2008. Study On The Interface of Phenolic Resin/expanded Graphite Composites Prepared Via in situ Polymerization, Materials Chemistry and Physics, 111, 368–374.
- Zhang, L., Y. ve Ma, J., 2010. Effect of Coupling Agent on Mechanical Properties of Hollow Carbon Microsphere/phenolic Resin Syntactic Foam, Composite Science and Technology, 70, 1265–1271.
- Zhao, G., Wang, T., M. ve Wang, Q. H., 2011. Surface Modification of Carbon Fiber and Its Effects on the Mechanical and Tribological Properties of the Polyurethane Composites, Polymer Composites, 32, 11, 1726-1733.
- Zhou, G., Movva, S. ve Lee, L., J., 2008. Nanoclay and Long-Fiber-Reinforced Composites Based on Epoxy and Phenolic Resins, Journal of Applied Polymer Science, 108, 3720–3726.
- Zhu, Z. K., Yang, Y. ve Yin, J., 1993. Preparation and Properties of Organ Soluble Polyimide/Silica Hybrid Materials by Sol-Gel Process, Journal of Applied Polymer Science, 73, 2977-2984.

ÖZGEÇMİŞ

2011 yılında Fatih Sultan Mehmet Anadolu Lisesi'ni bitirdi. 2012 yılında Bursa Teknik Üniversitesi Doğa Bilimleri Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümünde Lisans eğitime başladı. 2017 yılında Bursa Teknik Üniversitesi'nden “Mekatronik Mühendisi” ünvanı ile mezun oldu. Aynı yıl K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2018 yılından başlayarak 2020 yılının haziran ayına kadar Trabzon Faruk Başaran Bilim ve Sanat Merkezi'nde proje öğretmenliği yaptı. Daha sonra TSE (Türk Standardları Enstitüsü)'de uzman mühendis olarak çalıştı. Şubat 2021'de Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde 50/d kadrosuna Araştırma Görevlisi olarak atanmıştır ve görevine devam etmektedir. İyi derecede İngilizce bilmektedir. 1 adeti SCI/SCI exp. İndeksli uluslararası dergiden kabul almış makalesi bulunmaktadır. 5 adet sempozyum ve kongrelerde sunulmuş bildirisi bulunmaktadır. 1 adet BAP projesinde bursiyer araştırmacı olarak görev yapmıştır.