



**T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**EPOKSİ REÇİNE/NİO NANOKOMPOZİTLERİN HAZIRLANMASI VE
KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DENİZ KILIÇGEDİK

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ MAHMUT BİNGÖL

**YALOVA
TEMMUZ 2023**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

EPOKSİ REÇİNE/NİO NANOKOMPOZİTLERİN HAZIRLANMASI VE
KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DENİZ KILIÇGEDİK
218113045

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ MAHMUT BİNGÖL

YALOVA
TEMMUZ 2023

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım “Epoksi Reçine/NiO Nanokompozitlerin Hazırlanması Ve Karakterizasyonu” başlıklı bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Deniz KILIÇGEDİK



Sevgili Eşime,



ÖNSÖZ

Yalova Üniversitesi eğitim hayatım boyunca sürekli beni destekleyen ve yardımlarını esirgemeyen, hem akademik anlamda hem de yaşam konusunda bana her zaman doğru yolu gösteren, bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren sayın danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Bingöl'e teşekkür ederim. Her zaman yanımda olan ve eğitim hayatım boyunca beni her zaman destekleyen anneme, babama ve kardeşime teşekkür ederim.

Üniversite hayatımdan beri en zor anlarda bile yanımda olan, beni her zaman her konuda destekleyen, bir an bile olsun bana olan güvenini kaybetmeyen, beraber bir aile kurduğumuz canımdan çok sevdiğim canım eşime; bana kattıkları ve katacakları için sonsuz teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının desteklenmesine olanak sağlayan Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimine (Proje No: 2022/YL/0014) teşekkür ederim.

Temmuz 2023

Deniz KILIÇGEDİK



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	v
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ.....	xi
SİMGELER	xi
KISALTMALAR	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xv
ÖZET.....	xix
ABSTRACT.....	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	2
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	3
2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	5
2.1.1. Kompozit malzemelerin matrise göre sınıflandırılması	5
2.1.1.1. Metal matrisli kompozit malzemeler	6
2.1.1.2. Seramik matrisli kompozit malzemeler	6
2.1.1.3. Polimer matrisli kompozit malzemeler	8
2.1.2. Kompozit malzemelerin takviye elemanına göre sınıflandırılması	9
2.1.2.1. Fiberli kompozit malzemeler	9
2.1.2.2. Tabakalı kompozit malzemeler	10
2.1.2.3. Parçacıklı kompozit malzemeler	10
3. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER	11
3.1. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	14
3.1.1. Termoset bazlı polimer matrisli kompozit malzemelere uygun üretim yöntemleri.....	16
3.1.1.1. Elle yatırma yöntemi (Islak lay-up / Hand lay up).....	16
3.1.1.2. Püskürtme (Sprey kalıplama / Püskürtmeyle yığma) yöntemi.....	18
3.1.1.3. Otomatik fiber yerleştirme (Otomatik teyp lay-up) yöntemi	20
3.1.1.4. Filament sarma yöntemi	21
3.1.1.5. Pultrüzyon yöntemi	22
3.1.1.6. Reçine transfer kalıplama yöntemi.....	23
3.1.1.7. Enjeksiyon kalıplama yöntemi	25
3.1.1.8. Vakum infüzyon yöntemi.....	26
3.1.1.9. Vakum torbalama yöntemi.....	27



3.1.1.10. Basınçlı kalıplama yöntemi.....	28
3.1.1.11. Otoklav yöntemi.....	29
3.1.2. Termoplastik bazlı polimer matrisli kompozit malzemelere uygun üretim yöntemleri.....	30
3.1.2.1. Enjeksiyon kalıplama yöntemi.....	30
3.1.2.2. Basınçlı kalıplama yöntemi.....	31
3.1.2.3. Sıcak presleme (Sıkıştırma kalıplama) yöntemi	31
4. NANOMALZEMELER.....	33
4.1. Nanokompozitler	34
4.1.1. Polimer matrisli nanokompozitler	35
4.1.1.1. Epoksi matrisli nanokompozitler	36
5. MATERYAL VE YÖNTEM	41
5.1. Kullanılan Hammaddeler ve Cihazlar	41
5.1.1. Kullanılan hammaddeler.....	41
5.1.2. Kullanılan cihazlar.....	42
5.2. Deneysel Çalışmalar.....	43
5.2.1. Kalıpların hazırlanması.....	43
5.2.2. Epoksi matrisli nanokompozitlerin üretimi	44
5.3. Karakterizasyon.....	45
5.3.1. Çekme testi	46
5.3.2. Üç eksenli eğme testi.....	48
5.3.3. Termogravimetrik analiz	49
5.3.4. SEM (Taramalı elektron mikroskobu).....	50
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	53
6.1. Çekme Testi Sonuçları	53
6.2. Üç Noktalı Eğme Testi Sonuçları.....	58
6.3. Termogravimetrik Analiz Sonuçları.....	61
6.4. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Sonuçları	65
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	71
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	79

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

A_0	: Numunenin İlk Kesit Alanı
b	: Numune Genişliği
E	: Elastisite Modülü
h	: Numune Kalınlığı
L	: Span Uzunluğu
l	: Numunenin Son Boyu
l_i	: Numunenin İlk Boyu
MPa	: Mega Paskal
nm	: Nanometre
P	: Uygulanan Kuvvet
P_{max}	: Uygulanan Maksimum Yük
σ	: Normal Gerilme
$\sigma_{\checkmark}$	: Çekme Dayanımı
σ_m	: Eğme Dayanımı
ϵ	: Gerinim Değeri
$\Delta\sigma$	: Delta Gerilme
$\Delta\epsilon$	: Delta Birim Uzama

KISALTMALAR

ISO 178	: Üç Noktalı Bükülme Deneyi Standardı
ISO 527	: Çekme Deneyi Standardı
RTV	: Oda Sıcaklığında Vulkanizasyon
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TGA	: Termogravimetrik Analiz



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Farklı seramik matris kompozit gruplarının tipik özellikleri [6]	7
Tablo 5.1. Nano nikel oksit tozunun sahip olduğu teknik özellikler	42
Tablo 5.2. Nano nikel oksit tozunun elementel analizi (%).....	42
Tablo 5.3. Tez çalışması kapsamında kullanılan cihazlar.....	42
Tablo 6.1. Çekme testi sonucunda elde edilen nano nikel oksit ilavesinin mekanik özelliklere etkisi.....	53
Tablo 6.2. Üç noktalı eğme testi sonucunda elde edilen nano nikel oksit ilavesinin malzemenin eğilme dayanımı özelliklerine etkisi	58
Tablo 6.3. Numunelerin TGA sonuçları	64





ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Venn diyagramı kullanılarak malzemelerin sınıflandırılması [4].....	4
Şekil 2.2. Kompozit malzemelerin matrise göre sınıflandırılması.....	6
Şekil 2.3. Kompozit malzemelerin takviye elemanlarına göre sınıflandırılması.....	9
Şekil 3.1. Elle yatırma prosesi [17].....	17
Şekil 3.2. Püskürtme yöntemi [17].....	19
Şekil 3.3. Otomatik fiber yerleştirme yöntemi [6]	21
Şekil 3.4. Filament sarma yöntemi [3].....	22
Şekil 3.5. Pultrüzyon üretim hattı [12].....	23
Şekil 3.6. Reçine transfer kalıplama yöntemi [8].....	24
Şekil 3.7. Reçine transfer kalıplama yönteminde enjeksiyon aşaması [19].....	24
Şekil 3.8. Vakum destekli reçine transfer kalıplama yönteminin şematik gösterimi [5]	25
Şekil 3.9. Enjeksiyon kalıplama [3]	26
Şekil 3.10. Vakum infüzyon yöntemi [8].....	27
Şekil 3.11. Vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi [22]	28
Şekil 3.12. Basınçlı kalıplama yöntemi [25].....	29
Şekil 3.13. Otoklav yöntemi [13].....	30
Şekil 3.14. Enjeksiyon kalıplama prosesi [6].....	31
Şekil 3.15. Basınçlı kalıplama prosesi [6].....	31
Şekil 3.16. Sıcak presleme yöntemi [3]	32
Şekil 4.1. Nanomalzemelerin türleri [6].....	34
Şekil 4.2. Nanokompozitlerin sınıflandırılması [6].....	35
Şekil 4.3. Epoksi reçinenin yapısı [39]	37
Şekil 4.4. Epoksi reçinenin çapraz bağlanma mekanizması [39].....	37
Şekil 4.5. Epoksi reçine ve sertleştirici arasındaki reaksiyon [39]	37
Şekil 5.1. Hazırlanan silikon kalıp	44
Şekil 5.2. Üretim aşamasının şematik olarak gösterimi.....	45
Şekil 5.3. Çekme numunesi ve çekme testi yöntemi [50].....	46
Şekil 5.4. Çekme testinin üretilen deney numunelerine uygulanması	47
Şekil 5.5. Üç eksenli eğme testinin üretilen deney numunelerine uygulanması.....	49
Şekil 5.6. Taramalı elektron mikroskobu çalışma prensibi [53]	50
Şekil 6.1. Yüzde nano katkı oranı - elastisite modülü grafiği.....	54
Şekil 6.2. Yüzde nano katkı oranı - çekme dayanımı grafiği.....	55



Şekil 6.3. Yüzde nano katkı oranı – kopma uzaması grafiği	56
Şekil 6.4. Yüzde nano katkı oranı – eğilme modülü grafiği	59
Şekil 6.5. Yüzde nano katkı oranı – eğilme dayanımı grafiği.....	60
Şekil 6.6. Saf epoksi reçineye ait TGA sonuçları	61
Şekil 6.7. Ağırlıkça %0,25 NiO bulunan epoksi reçine matrisli nanokompozit malzemeye ait TGA sonuçları.....	61
Şekil 6.8. Ağırlıkça %0,50 NiO bulunan epoksi reçine matrisli nanokompozit malzemeye ait TGA sonuçları.....	62
Şekil 6.9. Ağırlıkça %0,75 NiO bulunan epoksi reçine matrisli nanokompozit malzemeye ait TGA sonuçları.....	62
Şekil 6.10. Ağırlıkça %1 NiO bulunan epoksi reçine matrisli nanokompozit malzemeye ait TGA sonuçları.....	63
Şekil 6.11. Kompozisyonlara göre termogravimetrik eğriler	65
Şekil 6.12. (a) Saf epoksi reçine, (b) ağırlıkça %0,25 nano NiO katkılı epoksi reçine, (c) ağırlıkça %0,50 nano NiO katkılı epoksi reçine, (d) ağırlıkça %0,75 nano NiO katkılı epoksi reçine, (e) ağırlıkça %1 nano NiO katkılı epoksi reçineye ait SEM görüntüleri	66
Şekil 6.13. Saf epoksi reçine grubuna farklı büyütme uygulanarak çekilen SEM görüntüleri	67
Şekil 6.14. Ağırlıkça %0,25 oranında nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine matrisli numune grubuna farklı büyütme uygulanarak çekilen SEM görüntüleri	68
Şekil 6.15. Ağırlıkça %0,50 oranında nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine matrisli numune grubuna farklı büyütme uygulanarak çekilen SEM görüntüleri	68
Şekil 6.16. Ağırlıkça %0,75 oranında nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine matrisli numune grubuna farklı büyütme uygulanarak çekilen SEM görüntüleri	69
Şekil 6.17. Ağırlıkça %1 oranında nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine matrisli numune grubuna farklı büyütme uygulanarak çekilen SEM görüntüleri	69



EPOKSİ REÇİNE/NİO NANOKOMPOZİTLERİN HAZIRLANMASI VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Kompozit malzemeler, temel olarak matris malzemesi ve takviye elemanından oluşmaktadır. Bir kompozit malzemenin sahip olduğu özellikler, yapı içerisindeki matris malzemesinin ve takviye elemanının özelliklerine, geometrilerine, takviye elemanının matris içerisindeki dağılımına göre değişiklik göstermektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, matris malzemesi olarak epoksi reçine kullanılmaktadır. Epoksi reçineler, yüksek mekanik özelliklere, ısı ve elektrik direncine ve yapışabilirlik özelliklerine sahip olsalar da yapı içerisine nano katkı ilave edilmesiyle yapının özelliklerinde iyileşme elde edilebilmektedir. Çalışma kapsamında, epoksi içerisine farklı oranlarda nano boyutta nikel oksit (NiO) ilave edilerek, mekanik, ısı ve mikroyapı özelliklerindeki değişim incelenmiştir. Bu bağlamda, farklı oranlarda nano boyutlu nikel oksit epoksi reçine içerisine katılarak elde edilen numunelere, mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla çekme testi ve üç noktalı eğme testi uygulanmış, ısı özelliklerin tespit edilmesinde termogravimetrik analiz yapılmış ve mikroyapının incelenmesi için taramalı elektron mikroskopuyla incelemeler gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Polimer kompozit, Nano katkı, Epoksi reçine, NiO



PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF EPOXY RESIN/NIO NANOCOMPOSITES

ABSTRACT

Composite materials basically consist of matrix material and reinforcement element. The properties of a composite material vary according to the properties of the matrix material and the reinforcement element in the structure, their geometry, and the distribution of the reinforcement element in the matrix.

In this thesis, epoxy resin is used as the matrix material. Although epoxy resins have high mechanical properties, heat and electrical resistance and adhesion properties, the properties of the structure can be improved by adding nano additives into the structure. Within the scope of the study, the changes in the mechanical, thermal and microstructural properties were investigated by adding nano-sized nickel oxide (NiO) in different proportions into the epoxy. In this context, tensile test and three-point bending test were applied to the samples obtained by adding nano-sized nickel oxide into epoxy resin at different rates in order to determine the mechanical properties, thermogravimetric analysis was performed to determine the thermal properties, and scanning electron microscopy was carried out to examine the microstructure.

Keywords: Polymer composite, Nano filler, Epoxy resin, NiO



1. GİRİŞ

Malzemeler, seramik malzemeler, polimer malzemeler ve metal malzemeler olmak üzere üç ana grupta incelenmektedir. Bu üç ana grup içerisinde ikisi ya da daha fazlasının sahip olduğu özelliklerin geliştirilmesi amacıyla bir araya getirilmesiyle meydana getirilen yeni malzeme grubu kompozit malzemeler olarak tanımlanmaktadır [1], [2].

Kompozit malzemelerin sahip oldukları mekanik özellikler, matris ve takviye elemanlarının sahip oldukları özelliklerden, matris malzemesi ve takviye elemanlarının hacim oranları, matris ve takviye elemanı arasındaki bulunan bağa ve bu bağın özelliklerine, takviye elemanının şekli, yapısı ve yönelme davranışı gibi çeşitli parametrelerden etkilenmektedir [3].

Kompozit malzemeler, yüksek dayanım, rijitlik, yorulma dayanımı, aşınma direnci, korozyon dayanımı gibi özelliklere sahiptir [4], [5].

Kompozit malzemeler sınıflandırılırken genel olarak takviye elemanına ve matrise göre sınıflandırılmaktadır. Takviye elemanına göre, fiberli kompozit malzemeler, tabakalı kompozit malzemeler, parçacıklı kompozit malzemeler ve bu grupların kombinasyonu olarak sınıflandırılırken, matris malzemesine göre ise, metal matrisli, seramik matrisli ve polimer matrisli kompozit malzemeler olarak sınıflandırılmaktadır [6].

Polimer malzemeler, monomer adı verilen kimyasal yapılardan meydana gelen zincir şeklinde bir yapıya sahip sentetik malzemeler olarak tanımlanabilir [4]. Polimer malzemeler sahip olduğu düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci, kolay şekillendirilebilmeleri gibi özellikleri sayesinde, kompozit malzemeler için oldukça avantajlı bir matris malzemesi olarak bilinmektedir. Polimer matrisli kompozit malzemelerin sahip oldukları özelliklerden kısaca bahsedecek olursak, yüksek özgül dayanım, özgül modül, yorulma direnci, elektriksel yalıtım, kimyasal kararlılık, işlenebilirlik olarak sıralayabiliriz [7].

Polimer matrisli malzemelerde, sıklıkla kullanılan matris malzemesi epoksi reçine ve polyester olarak bilinmektedir [8].

Polimer matrisli kompozit malzemeler pek çok üretim yöntemi ile gerçekleştirilebilmektedir. Üretilmesi planlanan malzemenin özellikleri göz önünde

bulundurularak tüm gerekli parametrelerin bir arada bulundurulmasını sağlayan üretim yönteminin ve üretim şartlarının doğru seçilmesi oldukça önem taşımaktadır [6].

Nanokompozitler, mineral dolgulu ve yapısı içerisinde %10'dan daha az miktarda nano boyutlu mineral içeren kompozit malzemeler olarak tanımlanabilir [5].

Bu tez çalışması kapsamında matris malzemesi olarak seçilen epoksi reçine içerisine belirli oranlarda, nano boyutta nikel oksit ilavesiyle polimer nanokompozit malzemeler elde edilerek deney numuneleri hazırlanmış daha sonra bu numunelerin mekanik, ısı ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir.

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışmada, epoksi reçine içerisine ilavesi gerçekleştirilen farklı oranlarda nano nikel oksit dolguyla meydana getirilen kompozit malzemelerin üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretim aşaması sonrasında ise, uygun karakterizasyon yöntemlerinin seçilmesi ve gerekli analizlerin uygulanması sonucunda, nano katkı elemanı ilavesinin malzemenin sahip olduğu, mekanik, ısı ve mikroyapısal özelliklere nasıl bir etkiye neden olduğu incelenmiştir. Böylelikle epoksi reçine içerisine nano katkı ilavesiyle, malzemenin sahip olduğu özelliklerin nasıl etkilendiği ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Kompozit malzemelerin sahip oldukları özelliklerin geliştirilmesi amacıyla, matris malzemesi içerisine nano katkı ilave edilmesi sıklıkla gerçekleştirilen bir işlemdir. Literatürde epoksi reçine içerisine birçok farklı nano dolgu ilavesi gerçekleştirilmiştir. Ancak kalıba döküm yöntemiyle epoksi reçine içerisine farklı oranlarda nano nikel oksit ilavesi bu çalışmanın özgünlüğünü göstermektedir. Epoksi reçine içerisine nano boyutta nikel oksit ilave edilerek mekanik, ısı ve mikroyapısal özellikler açısından optimum oran tespit edilmeye çalışılmıştır.

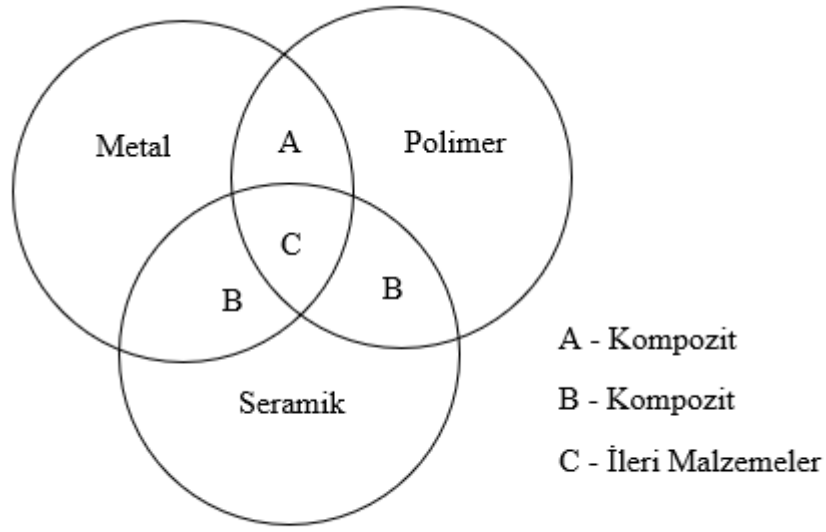
2. KOMPOZİT MALZEMELER

Endüstride kullanılmakta olan pek çok malzeme grubu mevcuttur. Bunun yanı sıra günler geçtikçe yeni malzemeler de eklenmektedir. Bu malzemeleri ayrı olarak incelemek mümkün değildir. Bu nedenle yapı ve özellikleri benzer olan malzemeleri gruplandırarak ortak olan özelliklerini tanıtmak daha uygun olmaktadır. Bu bağlamda en uygun sınıflandırma, atomlar arası bağ türlerine bakılarak yapılan sınıflandırma olarak kabul edilmiştir [1]. Bu şekilde malzemeleri sınıflandıracak olursak, metal, seramik ve polimer malzemeler olmak üzere üç ana grupta sınıflandırma yapabiliriz. Şekil 2.1’de venn diyagramı kullanılarak bu sınıflandırma ile birlikte oluşturulabilecek kombinasyonlar verilmiştir. Bu üç malzeme grubunun bazı üstün ve zayıf özellikleri mevcuttur.

Kompozit malzemelerin tarihine bakılacak olursa, insanlar tarafından üretiminin gerçekleştirilmesi ve kullanılmaya başlanması, günümüzden neredeyse 6000 yıl öncesine dayanmaktadır. Bu tarihlerde kullanılmakta olan ilk kompozit malzeme, dal ve çamurun duvar yapımında kullanılması olarak kabul edilmektedir. Geçmişte kullanılan bu inşaat malzemesi, son yüzyılda yerini çakıl gibi çimento ve takviyelerden oluşan başka bir kompozit malzeme olan betona bırakmıştır ve bu malzeme dünya çapında her yıl milyonlarca ton üretilmektedir [4].

Gerçekleşen teknolojik gelişmeler ile birlikte, mevcut olan bu malzeme gruplarından iki ya da daha fazlasının üstün olan özelliklerinin tek bir malzemede toplanması hedeflenerek mikro veya makro düzeyde bir araya getirilmesiyle elde edilen yeni malzemeler kompozit malzemeler olarak tanımlanmaktadır [2].

Bir kompozit malzeme içerisinde, çekirdek olarak adlandırılan takviye elemanını ve bu takviye elemanının etrafını çevrelemekte olan matris olarak adlandırılan yapıyı bulundurmaz. Yapıdaki mevcut takviye elemanı, değişik morfolojilere sahip kısa veya uzun elyaflar, whiskerler, kırılmış ya da parçacıklı seramikler olabilir. Takviye elemanının yapıdaki temel görevi rijitlik ve dayanımın artırılması yönündedir [5].



Şekil 2.1. Venn diyagramı kullanılarak malzemelerin sınıflandırılması [4]

Kompozit malzemelerin sahip oldukları özelliklerin belirlenmesinde, yapıdaki mevcut takviye elemanı ve matris malzemesinin yapıları ve özellikleri, takviye elemanının geometrisi ve takviye elemanı ve matris arayüzeyinin dağılımı olmak üzere üç önemli parametre mevcuttur. Bu bağlamda, kompozit malzemelerin çok sayıda bileşenden oluşan bir sistem olduğu söylenebilir [9].

Kompozit malzemelerin sahip oldukları mekanik özellikleri; yapıyı oluşturan matris ve takviye elemanının mevcut özellikleri, matris ve takviye elemanlarının hacim oranları, matris ve takviye elemanı arasındaki mevcut bağın özellikleri, takviye elemanının şekli, yapısı ve kompozit yapı içerisindeki yönelme davranışı gibi çeşitli parametrelerden etkilenmektedir [3].

Kompozit malzemelerin sahip oldukları genel özellikler şunlardır;

- Yüksek dayanım,
- Yüksek rijitlik,
- Yüksek yorulma dayanımı,
- Mükemmel aşınma direnci,
- Yüksek sıcaklık kapasitesi,
- Yüksek korozyon dayanımı,

- Düşük ağırlık/dayanım oranı,
- Düşük ısı ve elektriksel iletkenlik [4], [5].

Kompozit malzemelerin alaşımdan farkı, yapısındaki mevcut bileşenlerinin arasında atom alışverişinin bulunmamasıdır. Kullanılması planlanan uygulamaya uygun olacak şekilde, belirli geometrik, yapısal, mekanik ve kimyasal gereksinimleri karşılayacak şekilde tasarlanmaları mümkündür. Ancak kompozit malzemelerin en önemli özellikleri, düşük ağırlık/dayanım oranı olarak kabul edildiğinden bu bağlamda en yaygın kullanım alanları, biyomedikal, havacılık, otomobil ve savunma endüstrileri olarak örnek verilebilir [3].

2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler sınıflandırılırken genel olarak takviye elemanına ve matrise göre sınıflandırılmaktadır. Takviye elemanına göre, fiberli kompozit malzemeler, tabakalı kompozit malzemeler, parçacıklı kompozit malzemeler ve bu grupların kombinasyonu olarak sınıflandırılırken matris malzemesine göre ise, metal matrisli, seramik matrisli ve polimer matrisli kompozit malzemeler olarak sınıflandırılmaktadır.

2.1.1. Kompozit malzemelerin matrise göre sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, Şekil 2.2’de de verildiği gibi matris malzemelerine göre metal matrisli kompozit malzemeler, seramik matrisli kompozit malzemeler ve polimer matrisli kompozit malzemeler olarak üç grupta incelenmektedir. Son yıllarda polimer matrisli kompozit malzemelerle ilgili çalışmalar oldukça artış göstermiştir.



Şekil 2.2. Kompozit malzemelerin matrise göre sınıflandırılması

2.1.1.1. Metal matrisli kompozit malzemeler

Metal matrisli kompozit malzemeler, bir metal matris ile takviye malzemesinin oluşturduğu malzemeler olarak tanımlanabilir. Yapıda matris malzemesi, metal ya da hafif metal alaşımları olabilir [6].

Mevcut malzemelerin kullanım sıcaklıklarının daha üzerindeki sıcaklıklarda çalışabilecek malzeme arayışının ve bunun yanında daha yüksek spesifik mukavemet özelliğine sahip malzemelere duyulan ihtiyacın sonucunda, 1960'lı yılların başlangıcında bu malzeme grubu geliştirilmiştir [3].

Bu malzeme grubunun çalışma sıcaklıkları, 200°C ila 800°C arasında olduğundan yüksek sıcaklık uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir malzeme grubudur [8]. Yüksek sıcaklıkta çalışabilmelerinin yanında, düşük yoğunluğa sahip olmaları, yüksek mukavemet ve elastisite modülleri, yüksek tokluk ve darbe dayanımı özellikleri, yüksek sertlikleri, ısıl şoka karşı dirençleri ve yüksek elektrik ve ısı iletkenliği gibi özelliklerinden dolayı, otomotiv ve uzay sanayi gibi kullanım alanlarında yaygın olarak kullanılmakta olan bir malzeme grubudur [3], [5].

2.1.1.2. Seramik matrisli kompozit malzemeler

Seramik matrisli kompozit malzemeler, karbon, silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit/alümina (Al_2O_3) gibi takviye elemanları ve alüminyum oksit kalsiyum alümina silis bazlı seramik matrislerden oluşan inorganik yapıdaki malzemeler olarak

tanımlanabilir [5]. Bu malzeme grubunda genellikle takviye elemanı olarak silikon karbür ve boron nitrit gibi kısa fiberler kullanılmaktadır [10].

Genel olarak çok yüksek sıcaklık uygulamaları için kullanılmaktadır. Seramik matrisli kompozit malzemeler, yüksek ısı mekanik uygulamalar için alümina matrisler, kesici uç uygulamaları içinse seramik matrisler olarak iki temel matris malzemesi grubuna ayrılmaktadır [10]. Takviye elemanlarına göre ise, sürekli fiber takviyeli seramik malzemeler ve süreksiz fiber takviyeli seramik malzemeler olmak üzere iki grupta incelenebilir. Süreksiz fiber takviyeli yapılara, partikül, plaka, whisker ve fiber gibi yapılar örnek verilebilirken, bu yapılar enjeksiyonla kalıplama, slip döküm, şerit döküm gibi yöntemler kullanılarak üretilmektedir ve üretim aşamasının ardından bir sinterleme aşaması mevcuttur. Sinterleme işlemi, malzemenin ergime sıcaklığının yaklaşık üçte ikisi sıcaklığına getirilmesi olarak da tanımlanabilmektedir. Bunun yanında Tablo 2.1’de bahsedilen sürekli fiber takviyeli yapılar, karbon fiber takviyeli karbon kompozitler, karbon-karbon kompozit yapıları içermektedir, üretim yöntemi olarak emdirme yöntemleri kullanılmaktadır [11].

Tablo 2.1. Farklı seramik matris kompozit gruplarının tipik özellikleri [6]

Karbon-Karbon Kompozitler	Süreksiz Takviyeli Seramik Matrisli Kompozitler	Sürekli Takviyeli Seramik Matrisli Kompozitler
Yüksek sıcaklıklarda yüksek mekanik özellik	Yüksek sıcaklıklarda yüksek mekanik özellik	Yüksek sıcaklıklarda yüksek mekanik özellik
Yüksek spesifik kuvvet ve sertlik, yüksek kırılma dayanımı	Yüksek spesifik kuvvet ve sertlik	Yüksek spesifik kuvvet ve sertlik, yüksek kırılma dayanımı
Boyutsal kararlılık	Kırılma dayanımı iyi ancak sürekli takviyelilerden kötü	Boyutsal kararlılık
Yüksek termal şok direnci	Orta derecede termal şok direnci	İyi termal şok direnci

2.1.1.3. Polimer matrisli kompozit malzemeler

Polimer matrisli kompozit malzemeler, polimer matris yapılarına gömülmüş halde bulunan parçacıklar ve liflerden oluşan yapılar olarak tanımlanabilir. Yapı içerisindeki parçacık ya da lifler, malzemenin özelliklerini geliştirmek amacıyla yapı içerisine katılan katkılardır. Genellikle mikron ölçeğinde bulunan parçacıklar, malzemeye daha iyi termal kararlılık ve tokluk özellikleri sağlarken, nano ölçekteki parçacıklar ise fiziksel ve mekanik özelliklerin gelişmesinde büyük bir rol oynamaktadır [12]. Polimer matrisli kompozit malzemeler, sahip oldukları yüksek özgül dayanımları ve rijitlik özellikleri ile rüzgar türbini kanatlarından mikroelektronik malzemelere kadar oldukça geniş bir uygulama alanı bulmaktadır [13].

Bu yapı içerisinde matris malzemesi olarak, çeşitli reçineler kullanılırken, takviye elemanı olarak cam, karbon, aramid gibi çeşitli elyaflar kullanılmaktadır [10].

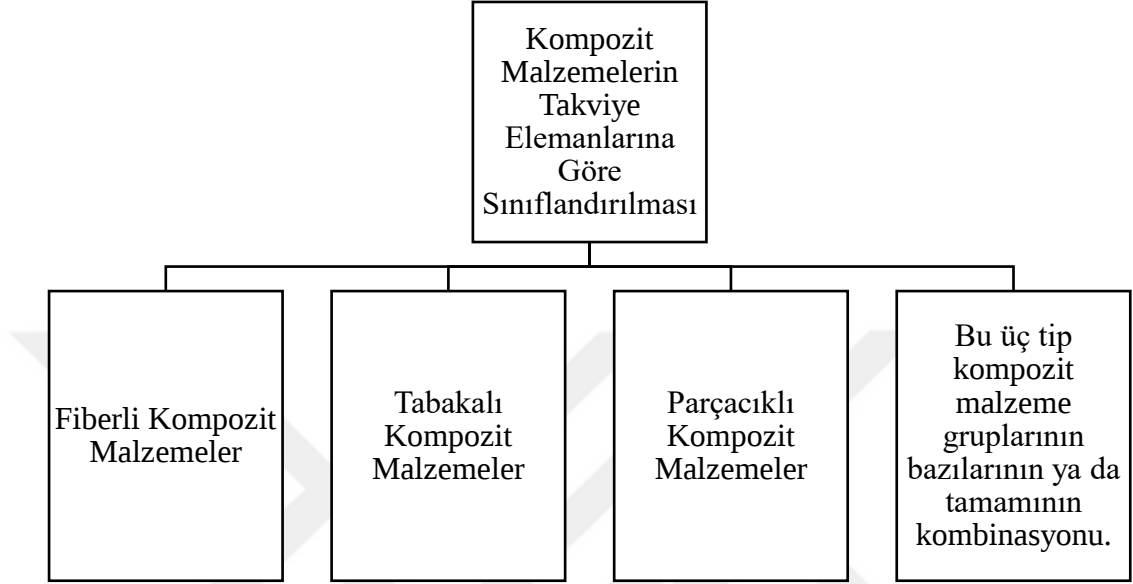
Polimer matrisli kompozit malzemeler,

- Termoplastik matrisli kompozit malzemeler,
- Termoset matrisli kompozit malzemeler,
- Elastomer matrisli kompozit malzemeler olmak üzere üç grupta incelenmektedir [10].

Termoplastik matrislere poliamid, polietilen, polipropilen örnek verilebilir. Termoplastik matrisler, yüksek darbe ve kırılma dayanımı, kısa proses süreleri, yüksek hacimlerde üretilebilir oluşları, geri dönüştürülebilirlikleri ve şekillendirmesinin kolay olması nedeniyle oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [14]. Fenol formaldehit, melamin formaldehit, üre formaldehit ve rezorsinol formaldehit reçineleri termoset matrislere verilebilecek örneklerdendir. Termoset malzemeler, sıcak presleme esnasında kurumaktadır ve tekrar ısıtılsalar bile bir yumuşama göstermeyen malzemelerdir. Bu malzemeler iyi yapışabilirlik özelliklerinden dolayı genellikle tutkal olarak kullanılmaktadır [15]. Elastomer matrisler ise, genellikle termoset özelliklere sahip polimerlerdir. Elastomer matrislerin, kürlleme işlemi sırasında polimerik zincirleri arasında çapraz bağlar meydana gelir. Bu matris malzemeleri elastik ve esnek özelliktedir. Oda sıcaklığında gerdiğimizde, bir uzama davranışı gösterirler ve ardından eski hallerine kolaylıkla

dönebilirler. En önemli örnekleri olarak, poliizopren, polibütadien kauçuğu, stiren bütadien kauçuğu örnek olarak verilebilir [6].

2.1.2. Kompozit malzemelerin takviye elemanına göre sınıflandırılması



Şekil 2.3. Kompozit malzemelerin takviye elemanlarına göre sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, Şekil 2.3’de gösterildiği gibi takviye elemanlarına göre de sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmada, fiberli kompozit malzemeler, tabakalı kompozit malzemeler ve parçacıklı kompozit malzemeler karşımıza çıkmaktadır. Bu grupların dışında ise, bu üç tip grubun bazılarının ya da tamamının kombinasyonu ile de oluşturulabilen kompozit malzemeleri bir diğer grup olarak kabul edebiliriz.

2.1.2.1. Fiberli kompozit malzemeler

Kompozit malzemelerin takviye elemanlarına göre sınıflandırılmasında karşımıza çıkan fiberli kompozit malzemeler de kendi içerisinde iki grupta incelenmektedir. Bu gruplardan ilki, sürekli fiber içeren kompozit malzemelerdir. Malzeme yapısında bulunan fiberler çok uzun ve kırılmamış, kesilmemiş halde bulunuyorsa, sürekli fiberli kompozit malzemeyi oluşturur denilebilir. İkinci grup ise, kısa fiber içeren kompozit malzemelerdir. Bu yapıda fiberler, küçük parçalar halinde bulunmaktadır [16].

2.1.2.2. Tabakalı kompozit malzemeler

Bu malzemeler, birbirine yapıştırılmış halde olan en az iki farklı malzemeyi içeren katmanları oluşturmaktadır. Tabakalama, ana katmanların ve yapıştırma malzemesinin en iyi yönlerini birleştirerek daha iyi özellikteki ve daha kullanışlı malzemelerin oluşturulması için oldukça önemlidir [16].

2.1.2.3. Parçacıklı kompozit malzemeler

Bu malzeme grubunda metalik ya da metalik olmayan parçacıklar mevcuttur. Bu parçacıklarla oluşturulabilen malzeme kombinasyonları şu şekilde sıralanabilir;

- Metalik olmayan matriste metalik olmayan parçacıklar,
- Metalik olmayan matriste metalik parçacıklar,
- Metalik matriste metalik parçacıklar,
- Metalik matriste metalik olmayan parçacıklar [16].

3. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

Polimerler, monomer olarak isimlendirilen birimlerin kimyasal bağlar ile bağlanması sonucunda oluşan uzun zincirli bileşikler olarak tanımlanmaktadır. Yüksek molekül ağırlığına sahiptirler. Polimer kelimesi, Latince çok anlamına gelen “poli” ve birim anlamına gelen “meros” kelimelerinin birleştirilmesiyle oluşmaktadır [8].

Polimer malzemeler, monomer adı verilen kimyasal yapılardan meydana gelen zincir şeklinde bir yapıya sahip sentetik malzemeler olarak da tanımlanabilir. Bir monomer polimerizasyon ile başka monomer molekülleri ile birleşerek çok uzun zincirler oluşturarak polimer malzemeleri meydana getirirler [5].

Polimer malzemeler temel olarak, termoplastikler ve termosetler olarak iki gruba ayrılmaktadır. Termoplastik malzemeler ısıtıldıkları zaman yumuşar ve daha fazla ısıya maruz kalırlarsa akışkan hale geçebilirler ve soğutuldukları zaman sertleşme davranışı göstermektedirler. Hiç kimyasal bağlanma oluşmadığından kürleme işlemi %100 geri dönüşümlü olarak gerçekleşmektedir. Bu nedenle malzemenin mikroyapısında hiçbir değişiklik oluşmaz. Bu malzemelerin çalışma sıcaklıkları düşüktür. Genel olarak 5 ila 50 °C arasında çalışılır. Termoplastik malzemelere naylon, polietilen, karbonflorür, selülozikler, akrilikler ve viniller örnek olarak verilebilirler [8].

Termoset polimerler ise, bir ısıtma işlemine maruz kaldıklarında sürekli bir katılaşma meydana gelir. Soğutulduklarında mikroyapıda değişiklikler meydana geldiğinden eski yapısına dönüşüm imkansız hale gelir. Termoset malzemelere örnek olarak polyesterler, epoksi, vinilesterler ve aminler verilebilir. En önemli termoset matrisli kompozit malzemeler, elyaf takviyeli, polyester ve epoksi reçineler olarak kabul edilebilir [8]. Polimer kompozit malzemelerde kullanılan en önemli bağlayıcı malzemeler epoksi ve polyesterler olarak kabul edilebilir [1].

Polimer malzemelerin, amorf yapıya sahip olduklarından uzun ve karmaşık yapıdaki zincirlerin komşu yapılarla uyum sağlayarak düzenli bir yapı oluşturmaları oldukça zordur. Bazı basit yapıya sahip polimer malzemeler yerel olarak düzenler oluşturabilirler. Bu amorf yapı içerisinde meydana gelen bu küçük kristal yapıdaki

bölgeler kristalitler olarak tanımlanabilir ve bu kristaller yapı içerisinde rastgele bir yönelme gösterirler [5].

Polimer malzemelerin sahip oldukları özellikler aşağıdaki gibidir:

- Karmaşık parçaların ikincil işlemlere gerek kalmadan tek seferde üretilibilmeleri,
- Metal ve seramik malzemelere göre düşük yoğunluğa sahip olmaları,
- Yüksek korozyon direncine sahip olmaları,
- Polimerlerin üretilmesi için daha az enerjiye ihtiyaç duyulması gibi oldukça avantajlı özellikleri vardır.

Bu avantajlarının yanında polimer malzemelerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır.

- Metal ve seramik malzemelere göre daha düşük dayanıma sahip olmaları,
- Düşük elastisite modülüne sahip olmaları,
- Çalışma sıcaklıklarının daha düşük olması gibi dezavantajları mevcuttur [5].

Polimer malzemelerin sahip oldukları bu özelliklerle birlikte, kompozit malzemeler için oldukça iyi ve avantajlı matris malzemesi olduğu bilinmektedir.

Polimer matrisli kompozit malzemelerin sahip oldukları özelliklere bakacak olursak;

- Yüksek özgül dayanım,
- Yüksek özgül modül,
- İyi yorulma direnci,
- Yüksek hasar toleransı,
- İyi sönümlenme özellikleri,
- Üstün elektriksel yalıtım performansı,
- Yüksek dielektrik özellikleri,
- İyi kimyasal korozyon direnci,
- İyi işlenebilirlik,
- İyi sürtünme özellikleri örnek olarak verilebilir [7].

Sönümleme özelliklerinden bahsedecek olursak; kompozit malzemelerde elyaf ve matris arasındaki mevcut arayüz, titreşim enerjisini emme konusunda oldukça iyi yeteneğe sahip olduğu bilinmektedir. Böylece malzemenin yüksek titreşim sönümlemesine neden olmaktadır. Böylece titreşim oluştuğunda kısa bir süre içerisinde durdurulabilmesi anlamına gelmektedir. Sürtünme özelliğinden bahsedecek olursak, özellikle karbon fiber, düşük sürtünme katsayısına sahip olan bir malzemedir. Ayrıca bu malzeme kendi kendine yağlayabilme özelliğine de sahiptir [7]. Yapı içerisindeki elyaf, matris ve diğer hammaddeler, ürünün kullanılması planlanan koşullarına ve performans gereksinimlerine göre özel olarak tasarlanabilmektedir. Bununla birlikte yapının sahip olması istenen özellikler yapı içerisine takviye elemanlarının eklenmesiyle birlikte elde edilebilmektedir.

Kısaca, polimer matrisli kompozit malzemelerin üretimlerinin kolay oluşu, üretim maliyetlerinin diğer malzeme gruplarına göre nispeten daha düşük oluşu ve kolayca işlenebilir oluşları nedeniyle günümüzde farklı sektörlerde oldukça sık kullanılan bir malzeme grubudur.

Polimer matrisli kompozit malzemelerde, daha önce de bahsedildiği gibi, kullanılan matris malzemesi genellikle polyester ve epoksi reçinedir. Takviye elemanları olarak ise, cam, karbon ve aramid lifleri kullanılmaktadır. Takviye elemanlarının miktarı arttırıldığında genellikle kompozit malzemelerin dayanım özelliklerinde bir artış görülmektedir [8].

Polimer matrisli kompozit malzemelerin sıklıkla kullanılmasındaki en önemli özelliklerden bazıları, yüksek özgül mukavemetleri ve yüksek özgül elastisite modülleridir diyebiliriz. Bu özelliklerinden dolayı bu malzeme grubunun uygulama alanlarında oldukça önemli bir artış görülmektedir. Polimer matrisli kompozit malzemelerin sahip oldukları yüksek özgül mukavemet özelliklerinden dolayı bu malzeme grubu sıklıkla uzay ve havacılık sanayisinde kendisine bir yer bulmaktadır. Bunun yanı sıra kompozit malzeme üretiminde en yaygın olarak kullanılan termoset matris malzeme olarak bilinen epoksi reçine, sahip olduğu iyi yapışabilme özelliği, yüksek mekanik özellikleri ve sahip olduğu iyi korozyon direnci gibi özellikleri sayesinde, havacılık sektöründe oldukça yaygın olarak kullanılan bir matris malzemesidir. Örneğin uçaklardaki kompozit sandviç yapıların oluşturulmasında epoksi reçinenin yapıştırıcı eleman olarak kullanıldığı bilinmektedir. Bunun dışında

pek çok reçine türü vardır ve çalışma alanına göre en uygun özelliklere sahip reçinenin seçilmesi önem taşıyan bir parametredir [8].

3.1. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Polimer matrisli kompozit malzemeler, matris olarak bir polimer reçinenin ve takviye elemanı olarak da fiberleri ya da diğer takviye elemanlarını içeren malzeme grubudur. Üretilmesi planlanan malzemenin özellikleri göz önünde bulundurularak tüm gerekli parametrelerin bir arada bulundurulmasını sağlayan üretim yönteminin ve üretim şartlarının doğru seçilmesi oldukça önem taşımaktadır. Üretim sırasında yapı içerisinde bulunması gereken bileşikler, matrisler, takviye elemanları, çekirdekler, yapıştırıcılar gibi yapılar dikkatle seçilmeli ve dikkatli bir şekilde bir araya getirilmelidir [6].

Matris malzemeleri, genellikle termoset özellikteki polimerler ve termoplastik özellikteki polimerlerdir. Elastomer özellikteki polimerler de matris malzemesi olarak kullanılsa da diğer gruplar kadar yaygın bir kullanımı bulunmamaktadır. Matris malzemesi olarak sıklıkla kullanılan tipik reçineleri örnekleyecek olursak; epoksi reçineler, polyesterler, poliüretanlar, fenolikler, amino reçineleri sayabiliriz.

Takviye elemanları, yapıda bulunması gereken uygun geometrik formlarda bulunan, fiberler, partiküller ve flaklardır. Mühendislik uygulamalarında kullanılması planlanan malzemelerin tasarımında genel olarak fiberlerin kullanıldığını görürüz. Polimer matrisli kompozit malzemelerin üretiminde sıklıkla karşılaştığımız fiberlere örnek olarak, cam, karbon ve aramidi verebiliriz.

Çekirdek malzemelere ise, fiberglas/fenolik balpeteği, aramid/fenolik balpeteği, köpük, kapalı hücre örnek olarak verilebilir.

Yapıda kullanılan yapıştırıcılar oldukça çeşitlilik göstermektedir. Pastalar, film, köpük, toz kuvvetlendiriciler, nano katkıları bu yapıştırıcılara örnek olarak verilebilir. Solventler, reçine ve kürlleme maddesinin bir parçası olarak kabul edilmektedir. Üretimde ve temizlik amacıyla sıklıkla kullanılırlar.

Kürlleme işlemi, sıvı termoset bir ön-polimerin sertleştirilmesi işlemine verilen isimdir. Kürlleme işlemi, bir dizi kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesine dayanan bir işlem olarak tanımlanmaktadır. Kürlleme prosesinde en önemli parametreler, zaman, sıcaklık ve basınçtır. Kürlleme, malzemenin gerekliliklerine bağlı olarak; oda

sıcaklığında, atmosfer basıncında veya kontrollü sıcaklık ve basınç altında gerçekleştirilebilmektedir [6].

Polimer matrisli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılacak olan üretim türünün seçilmesinde, kompozit malzemenin yapısındaki elyaf türüne, şekline ve yapı içerisinde kullanılan matris türüne göre değişik yöntemler kullanılabilmektedir. Örnek verilecek olursa, üretilmesi planlanan malzemenin dayanım özellikleri çok ön planda olmayacaksa ve önemli değilse, bunun yanında hızlı bir şekilde üretilmesi bekleniyorsa, el yatırma yöntemi ve presle üretimi oldukça avantajlı olacaktır. Buna karşın üretilmesi planlanan malzemede yüksek dayanım özellikleri bekleniyorsa, belirli sıcaklık ve basınç altında kürlenmiş bir matris seçiminin yapılması, örneğin epoksi reçine matris, otoklav gibi üretim metotlarının kullanılması avantaj sağlayacaktır. Burada kullanılabilen her bir üretim yönteminin bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Tasarım yapılırken, bu avantaj ve dezavantajlar göz önünde bulundurularak yapının en uygun şekilde ve en risksiz şekilde üretilen üretim yönteminin seçilmesi önem taşıyacaktır [8].

Üretimde kullanılan bazı temel prosesler mevcuttur. İlk olarak, açık kalıplama prosesleri, oda sıcaklığında ve atmosferik basınç altında gerçekleştirilen üretim prosesleridir. Açık kalıplama proseslerinde yalnızca bir adet kalıp kullanılmaktadır. Yüzey kalitesinin istenen düzeyde olmasını sağlamak amacıyla kalıp içerisindeki bir jelle kaplanması önem taşımaktadır. Kalıplanması istenen malzemeler, kalıp içerisinde, istenen kalınlıkların elde edilmesi amacıyla tabakalar halinde yerleştirilir. Daha sonrasında kütleme işlemi yapılmaktadır ve bu işlemin sonucunda kalıbın içerisine yerleştirilmiş olan malzeme kalıp içerisinden çıkartılmaktadır. Açık kalıplama prosesleri, fiber takviyeli doymamış polyesterlere ve epoksi reçinelere sıklıkla uygulanan üretim yöntemleridir [6].

Kompozit malzemelerin kapalı bir kap içerisinde ya da bir odacık içerisinde şekillendirildiği veya üretim işlemlerinin tamamlandığı üretim yöntemleri ise kapalı kalıplama prosesleri olarak tanımlanmaktadır. Tüm proses kapalı bir kap içerisinde gerçekleştiğinden, prosese müdahale çok azdır ve buna bağlı olarak da proses oldukça hızlıdır. Kompleks yapıları ürünlerin üretimi bu yöntem sayesinde gerçekleştirilebilir. Elde edilen ürünlerin yüzey kalitesi oldukça iyidir. Kapalı kalıplama ile üretimde kullanılan araçlar karmaşık yapıları, ağır ve dayanıklı

malzemelerden oluştuğu için aslında maliyetli bir yöntemdir. Kompresyon kalıplama, reçine transfer kalıplama ve enjeksiyon kalıplama gibi üretim prosesleri buna örnek olarak verilebilir [6].

Kompozit malzemelerin üretimlerinde ardışık prosesler olduğu gibi sürekli prosesler de kullanılmaktadır. Ardışık prosesler her seferinde yalnızca bir ürünün üretildiği proseslerdir ve genellikle ürünler küçük ve karmaşık yapıda olduğuunda, kütleme fazının kritik olduğu durumlarda ya da çok az sayıda ürün üretilmesi gerektiğinde sıklıkla kullanılır. Sürekli proseslere ise otomatik prosesler de denilebilir. Bu tip prosesler reçine karışımının kalıp içerisine pompalanmasını ve kapalı bir sistem içerisinde kürlenmesini kapsamaktadır [6].

Polimer matrisli kompozit malzemelerin üretilmesinde kullanılan farklı türdeki polimer matrisli kompozitlerin üretimine uygun olacak şekilde pek çok üretim yöntemi mevcuttur. Buradaki en önemli husus istenilen ürüne ve istenilen özelliklere uygun bir üretim yönteminin seçilmesidir.

3.1.1. Termoset bazlı polimer matrisli kompozit malzemelere uygun üretim yöntemleri

Termoset polimer malzemeler, bir ısıtma işlemine maruz bırakıldıklarında yapılarında sürekli olarak bir katılaşma meydana gelen polimer malzeme türüdür. Katılaşma sırasında mikroyapılarında değişiklikler meydana geldiğinden eski yapısına dönemeyen malzemelerdir [8].

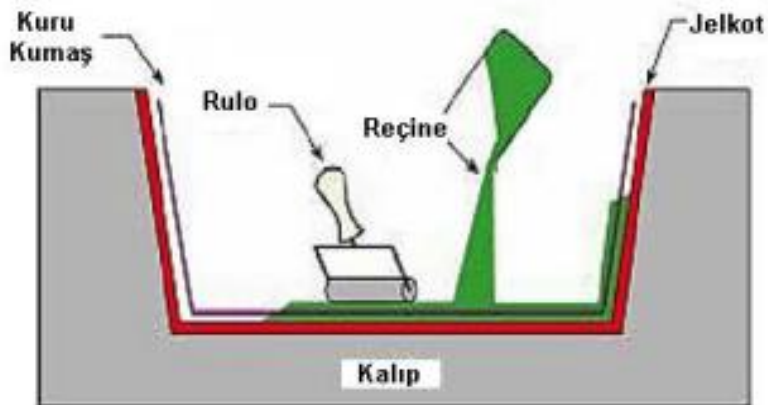
Termoset bazlı polimer matrisli kompozit malzemeler birçok üretim yöntemi kullanılarak üretilmektedir. Üretim yönteminin seçilmesindeki en önemli etken, elde edilecek ürünün gerektirdiği özelliklerin göz önünde bulundurulmasıdır. Bu özellikleri sağlayabileceğimiz üretim yönteminin seçilmesi avantaj sağlayacaktır.

3.1.1.1. Elle yatırma yöntemi (Islak lay-up / Hand lay up)

Elle yatırma yöntemi, fiber-reçine kompozit üretiminde uzun zamandır kullanılmakta olan en eski ve en basit yöntemdir [8]. Özellikle üretilmesi planlanan ürün sayısının az olduğu durumda kullanmak faydalı olmaktadır. Kullanılmaya başlandığı ilk yıllardan beri gelişime açık olan ve sürekli üzerinde çeşitli çalışmalar yapılan bir üretim şeklidir [17].

Bu yöntemle birlikte, reçine ve fiber kalıba manuel olarak el ile yerleştirilir ve ortamdan hava uzaklaştırılır. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi kalıba el ile yerleştirilmiş olan elyaflara bir rulo ya da bir fırça yardımıyla reçinenin emdirilmesi sonucunda kalıbın şeklinin verilmesi işlemi olarak kısaca çalışma prensibinin özetlenmesi mümkündür. Bu işlemde sertleştirme aşaması genellikle oda sıcaklığında gerçekleştirilir ve süreç hızlandırılmak isteniyorsa ısıtarak sürecin hızlandırılması da mümkündür. Bu yöntemde kullanılacak kalıp düz bir levha olabileceği gibi sonsuz kenarlardan oluşan bir yapı da olabilir. Reçineler kumaşlara kat kat sürülebilir ya da kumaşın özellikleri bu duruma elverişliyse çok katmana aynı anda reçine sürülmesi işlemi de gerçekleştirilebilir. Sertleştirme aşaması kurutma aşaması olarak da adlandırılabilir. Genellikle oda sıcaklığında gerçekleştirilse de gerektiği durumlarda basınç altında ya da farklı sıcaklıklara maruz bırakılarak da gerçekleştirilebilir. Kurutma işleminin tamamlanmasının ardından, parçalar kalıptan ayrılırlar. Bu üretim yönteminde ikincil işlemlere genellikle gereksinim duyulur. Bu işlemler, kesme, çapak alma ve boyama gibi işlemler olabilir. Bu işlemler de gerçekleştirildikten sonra ürün kullanıma hazır hale gelmiş olur [6], [7].

Elle yatırma yönteminde sıklıkla polyester, epoksi, vinilester, fenolik reçineler kullanılır. Bunun yanında herhangi bir fiber ya da çekirdek de kullanılabilir. Elle yatırma prosesi, oda sıcaklığında kürlenmesi gerçekleştirilen reçineler kullanıldığında oldukça ucuz bir prosestir ancak yoğun işçilik gerektirmektedir. Ürünün kalitesi işlemi yapan kişinin yeteneğine ve deneyimine göre değişiklik gösterebilir [6], [8].



Şekil 3.1. Elle yatırma prosesi [17]

Elle yatırma yönteminin bazı avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Üretim yapılmadan önce tasarım aşamasındayken bunlar dikkate alınmalıdır.

Elle yatırma yönteminin avantajları;

- Oda sıcaklığında kürlemesi gerçekleştirilen reçineler kullanılarak düşük maliyetli üretimin gerçekleştirilebilmesi,
- Fiber ve matris malzemelerinin herhangi bir kombinasyonlarının kullanılabilir oluşu,
- Diğer proseslerle karşılaştırıldığında, daha yüksek fiber içermesi ve daha uzun yapıdaki fiberlerin kullanılabilir oluşu olarak sıralanabilir.

Elle yatırma yönteminin dezavantajlarına bakılacak olursa;

- İşlem genel olarak elle gerçekleştirildiğinden, güvenlik açısından problem oluşabilmesi,
- Elle işlenebilmesi için reçinenin akışkan halde olmasının gerekliliği,
- Nihai ürünün kalitesinin, işi yapan kişinin becerisine ve deneyimine bağlı oluşu,
- Yapı içerisinde reçinenin homojen olarak dağılmasının mümkün olmayışı ve bunun sonucunda yapı içerisinde porozite miktarının artış gösterilmesi gibi dezavantajları mevcuttur [18].

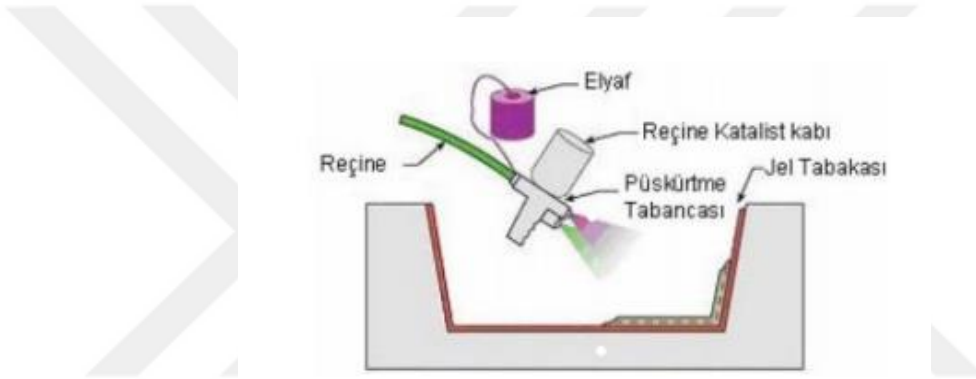
Elle yatırma yöntemi kullanılarak yüzey alanı çok büyük olmayan, çeşitli boyutlara sahip teknik parçaların üretilmesi mümkündür. Uygulama alanlarına bakılacak olursa, uçak iskeleti parçaları, rüzgar türbin kanatları, kayıklar, araç kaportası, tanklar, kanallar, yüzme havuzları, tekne ve kompozit plakalar sayılabilir [6], [17].

3.1.1.2. Püskürtme (Sprey kalıplama / Püskürtmeyle yığma) yöntemi

Sprey kalıplama yöntemi, açık kalıplama proseslerindendir. Şekil 3.2’de de görüldüğü gibi el tabancası kullanılarak gerçekleştirilen bir elle yatırma prosesi gibi de tanımlanabilir. Fiber, bir el tabancası sayesinde kesilir ve kalıp içerisindeki katalizlenmiş reçine ile beslenmektedir. Oluşan bu çökelti haldeki malzemenin standart atmosferik koşullar altında kürleme işlemi gerçekleştirilir [6].

Diğer bir deyişle, fiber (elyaf) ve reçine malzemesi jel tabakası uygulanmış kalıbın yüzeyine püskürtme tabancasıyla püskürtülmesine dayanan bir üretim prosesidir. Temel olarak reçine içerisine sertleştiricisinin ilave edilmesi sonrası tabancanın haznesine dökülmektedir. Elyafın kırılması işlemi ise tabanca üzerindeki kırpıcı sistemle gerçekleştirilmektedir. Püskürtme işleminin ardından yüzeyin elle yatırma işlemindeki gibi bir rulo ile düzeltilmesi gerekmektedir [8].

Bu proseste önemli olan bir nokta, püskürtme işleminin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmesi için kullanılan reçinenin viskozite değerinin düşük olması gerekliliğidir. Bu proseste reçine malzemesi olarak genellikle, polyester reçineler kullanılmaktadır [6].



Şekil 3.2. Püskürtme yöntemi [17]

Çok uzun yıllardan beri polimer matrisli kompozitlerin üretilmesinde kullanılan bir üretim metodudur. Kullanılan araçlar ucuz olduğundan da sıklıkla kullanılan bir yöntem olarak bilinmektedir. Son zamanlarda robotların sıklıkla kullanıldığı otomatik sistemler geliştirilmiştir ve bu yöntem otomatik olarak sıklıkla kullanılan bir yöntem haline gelmiştir. Bu sistem sayesinde yüzey kalitesinde oldukça önemli iyileşmeler meydana gelmiştir [6].

Her üretim yönteminin olduğu gibi, püskürtme yönteminin de bazı avantaj ve dezavantajları mevcuttur.

Sprey kalıplama yönteminin avantajları;

- Küçük ve orta hacimli parçaların üretimi için uygun bir yöntem oluşu,
- Oldukça ekonomik bir yöntem oluşu,

- Düşük maliyetli araçların kullanılması ve üstelik kullanılan hammaddelerin de düşük maliyetli oluşu olarak sıralanabilir.

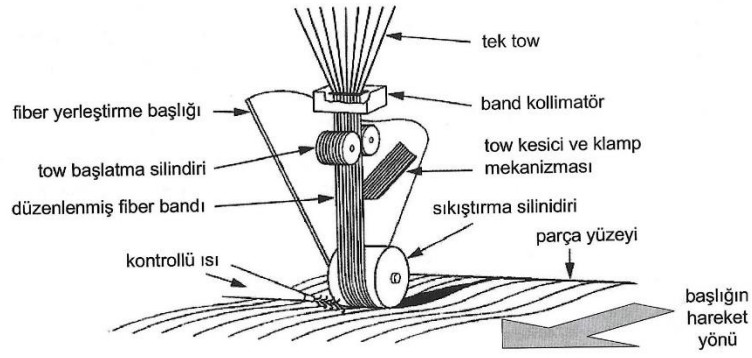
Sprey kalıplama yönteminin sınırlamalarından bazıları ise;

- Yüksek yapısal gereksinimleri olan ürünlerin üretilmesi için uygun bir yöntem olmayışı,
- Elyaf hacim oranını ve elyaf kalınlığını takip etmenin zor oluşu,
- İşlemin bir taraf için iyi bir yüzey kalitesine sahip olmasına karşın diğer tarafı için pürüzlü bir yüzey eldesine elverişli oluşu,
- İşlem tekrarlanabilirliğinin olmayışı,
- Boyutsal doğruluğun kolay bir şekilde takip edilememesi,
- Sadece kısa fiberlerin kullanımına elverişli oluşu,
- Reçinelerin püskürtülmesinin sağlanabilmesi için kullanılan reçinelerin düşük viskoziteli olarak seçilmesi zorunluluğunun bulunması olarak sıralanabilir [18].

Uygulama alanlarına bakılacak olursa, hafif yük yapı panelleri, kompleks şekillere sahip parçalar, karavan kaportaları ve banyo küvetleri örnek olarak verilebilir [5], [6].

3.1.1.3. Otomatik fiber yerleştirme (Otomatik teyp lay-up) yöntemi

Otomatik fiber yerleştirme yöntemi, Şekil 3.3’de görüldüğü gibi kompozit malzeme elemanlarının bir yüzey üzerine el yardımı ile değil de makine vasıtasıyla yerleştirildiği bir prosestir. Teyp lay-up makinesine besleme işlemi, prepreg teyp rulodan gerçekleştirilir. Bu proses bilgisayar kontrollü olarak gerçekleştirilmektedir. Dağıtıcı olarak kullanılan silindir başlığın hareket etmesiyle malzemenin yayılacağı yüzeye yaydırılması işlemi gerçekleştirilir. Başlığın hareketliliği sayesinde işlemin bitiminden itibaren direkt ikinci bir işlem gerçekleştirilebilir. Hızlı bir proses olarak tanımlanması mümkündür.



Şekil 3.3. Otomatik fiber yerleştirme yöntemi [6]

Bu yöntemle karmaşık olmayan ürünlerin üretimi olanaklıdır. Aynı zamanda büyük malzemeler üretilebilir. Bu yöntem kullanılarak, istenilen kalınlık ve dayanım kazandırılabilir ancak ürünün sahip olduğu ağırlığı olabildiğince küçük tutulmalıdır.

Bu yöntem kullanılarak uçak kanadı kaplamaları ve uçak gövdeleri için parçaların üretimi mümkündür [6].

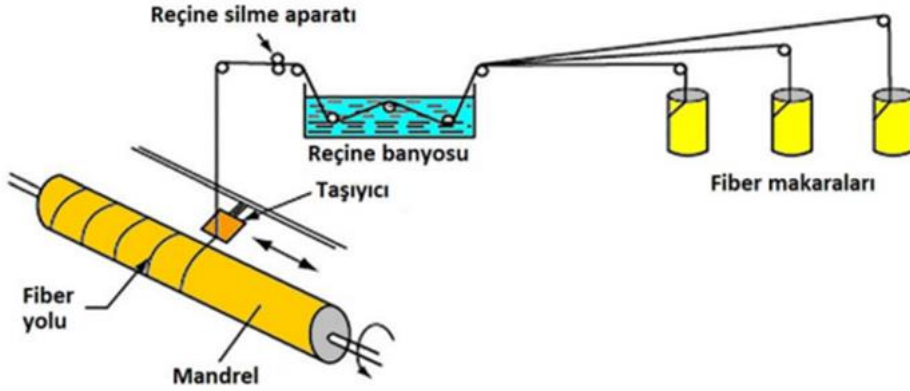
3.1.1.4. Filament sarma yöntemi

Filament sarma prosesinde, Şekil 3.4'te görüldüğü gibi bobinlere sarılı halde olan fiberler bir reçine banyosu vasıtasıyla ısıtılarak, dönen bir silindirik mandrel üzerine, gerekli mekanik özellikleri sağlayacak şekil ve açılarda sarılmaktadır. Oluşturulan bu yapının kurlama işlemi gerçekleştirilir. Kurlama işlemi genellikle oda sıcaklığında gerçekleştirilmektedir. Ardından sarıldığı mandrelden çıkarılması işlemi gerçekleştirilmektedir. Gerçekleştirilen bu sarma işlemi, genellikle otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Sarılan ürün miktarı arttıkça ürünün sertliğinde bir artış görülmektedir. Bu yöntemin kullanılmasıyla birlikte, çok yüksek fiber oranına sahip bunun yanında da yüksek dayanım değerlerine sahip polimer matrisli kompozit malzemelerin üretilmesi olanaklıdır.

Bu üretim yönteminde sıklıkla kullanılan hammaddelere bakılacak olursa, epoksiler, polyesterler, vinilesterler ve fenolikler gibi reçine grupları ve farklı fiber malzemelerin kullanılması mümkündür.

Filament sarma yöntemi, oldukça hızlı ve ekonomik bir üretim yöntemidir. Fiber fiyatları da oldukça uygundur. Proses sırasında her fiber üzerindeki mevcut reçine miktarının kontrol altında tutulabiliyor oluşu da bu yöntemin avantajlarından biridir.

Dezavantajları hakkında bilgi verilecek olursa, karmaşık şekillerin üretilmesi için uygun bir yöntem değildir. Bunun yanında elle yatırma ve püskürtme yöntemlerinde olduğu gibi, reçinenin viskozitesinin düşük olması gereklidir [6], [17].



Şekil 3.4. Filament sarma yöntemi [3]

Filament sarım yönteminin kullanılmasıyla, otomotiv tahrik milleri, helikopter kanatları, oksijen tankları, boru hatları, küresel şekilli basınçlı kaplar, yeraltı benzin depolama tanklarının üretimi mümkündür [3].

3.1.1.5. Pultrüzyon yöntemi

Pultrüzyon yöntemi, 1950 yılının öncesinde, yuvarlak çubuk imalatının gerçekleştirilmesinde oldukça sık kullanılan bir yöntemdir. Daha sonra farklı geometrilerde ürünlerin de üretilmesinde kullanılmaya başlanmış ve ardından 1951 senesinde patenti alınmış bir üretim yöntemidir [8].

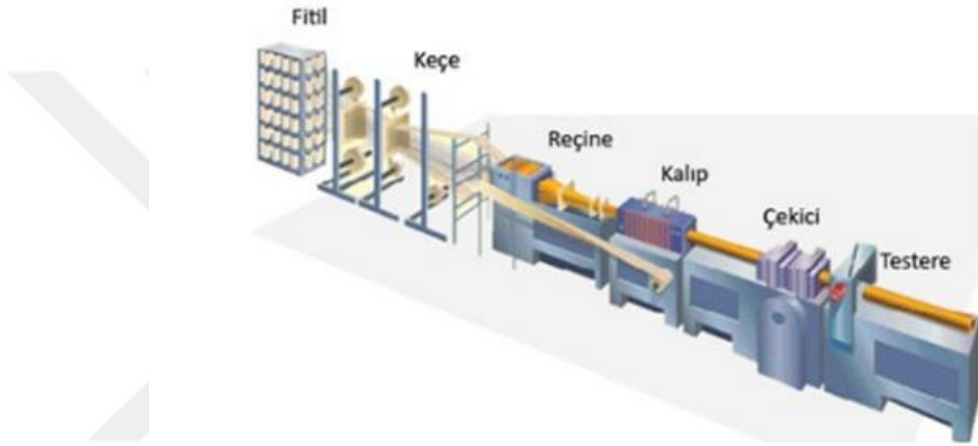
Pultrüzyon yönteminin kelime anlamına bakılacak olursa, “pull” ve “extrusion” kelimelerinden türemiş ve sürekli bir profil üretim biçimi olarak tanımlanmıştır [8].

Bu yöntemin çalışma prensibinde, Şekil 3.5’te gösterildiği gibi sürekli fiberler reçine tankına çekilir ve ardından fiberlerin reçine ile doymuş hale gelmesi sağlanmış olur. Bu aşamanın ardından çelik bir ön şekillendirme kalıbına getirilerek şekillendirildikten sonra kurlama aşamasına geçilmiş olur. Bu aşamada kalıbın sıcaklığı, kurlama işlemi için yeterli bir sıcaklığa getirilmektedir. Bu prosesin üretim hızı yaklaşık olarak dakikada 1 metre olacak şekildedir. Üretimin sonucunda elde edilen ürünler, sürekli fiberlerle takviyelendirilmiş ürünlerdir. Ürünlerin kesitleri

kalıbın açıklıklarıyla belirlenmektedir. Kürleme işlemi için ürünün uzun parçalara bölünmesi gereklidir [6].

Üretim yöntemini kısaca tanımlayacak olursak, cam, elyaf, karbon gibi takviye malzemelerinin uygun bir reçine ile birleştirilmesinin ardından sıcak bir kalıptan çekilmesi ve ardından kürleme işleminin gerçekleştirilmesi olarak tanımlamak mümkündür [8].

Bu işlemde kullanılan reçine malzemeleri, genellikle epoksi, polyester, vinilester ve fenoliklerdir. Yaygın olarak kullanılan takviye elemanı ise, cam elyafıdır [6], [8].



Şekil 3.5. Pultrüzyon üretim hattı [12]

Pultrüzyon prosesinin avantajları arasında, hızlı ve düşük maliyetli bir proses olduğu söylenebilir. Bunun yanında reçine miktarı da otomatik olarak kontrol edilebilmektedir. Kullanılan fiberler genellikle ekonomiktir. Elde edilen ürünlerin yapısal özellikleri oldukça iyidir. Bunun yanında kalıpların pahalı oluşu ve üretilebilecek malzemelerin aslında sınırlı olması bu prosesin dezavantajlarından [6].

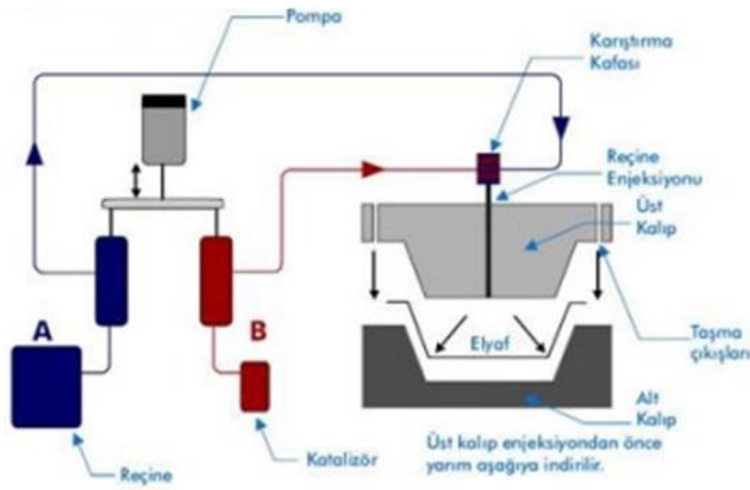
Uygulama alanları arasında, spor malzemeleri, araç şaftları, portatif merdivenler ya da trabzanlar ve bazı havacılıkta kullanılan parçalar örnek olarak verilebilmektedir [6].

3.1.1.6. Reçine transfer kalıplama yöntemi

Reçine transfer kalıplama yöntemi, kapalı bir kalıplama yöntemidir. Takviye malzemesi kalıbın içerisine konulur. Şekil 3.6'da gösterildiği gibi üst kalıbın

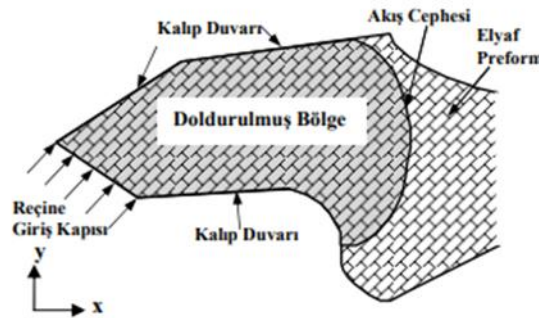
kapatılmasıyla, arada kalan boşluğa reçine enjekte edilmesi esasına dayanmaktadır. Karmaşık şekilli parçaların üretiminde sıklıkla kullanılan bir yöntem olmasının yanında oda sıcaklığında gerçekleştirilmesi de oldukça avantajlıdır. Bu üretim yönteminin kullanılmasıyla, üstün mekanik özelliklere sahip ve hafif ürünlerin üretilmesi mümkün hale gelmektedir [6], [19].

Bu yöntem kullanılarak üretilen kompozit malzemelerin kalitesi, diğer üretim yöntemleriyle üretilen ürünlere göre daha kontrol edilebilir olarak kabul edilmektedir [19].



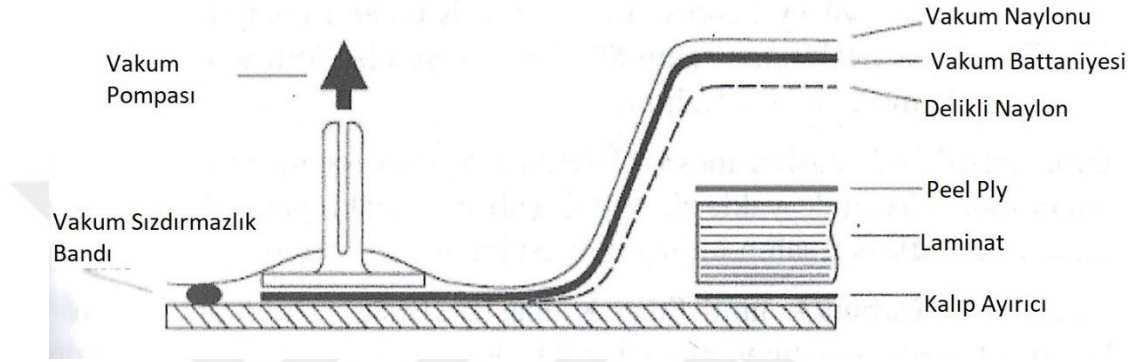
Şekil 3.6. Reçine transfer kalıplama yöntemi [8]

Bu yöntemle sıklıkla epoksi, polyester ve fenolik gibi reçineler kullanılmaktadır. Reçine transfer kalıplama yöntemi kullanılarak yüksek fiber hacmine sahip ve bunun yanında oldukça düşük porozite miktarına sahip laminatların elde edilmesi olanaklı hale gelmektedir. Elde edilen ürünün her iki yüzeyi de kalıplanmış yüzeydir [6].



Şekil 3.7. Reçine transfer kalıplama yönteminde enjeksiyon aşaması [19]

Ürün tasarımını yapmak için bazı önemli parametreleri göz önünde bulundurmanız gerekmektedir. Kalıbın içerisinde tamamen dolması için gerekli zamanı, kalıp içerisindeki basıncın dağılımını ve oluşabilecek hava kabarcıklarını göz önünde bulundurarak daha iyi ürün tasarımını gerçekleştirerek daha yüksek kalitede ürün elde edebiliriz. Bu parametreleri dikkatle incelediğimizde üretim esnasında karşılaşılabilecek problemler hakkında da bilgi sahibi olabiliriz [19].



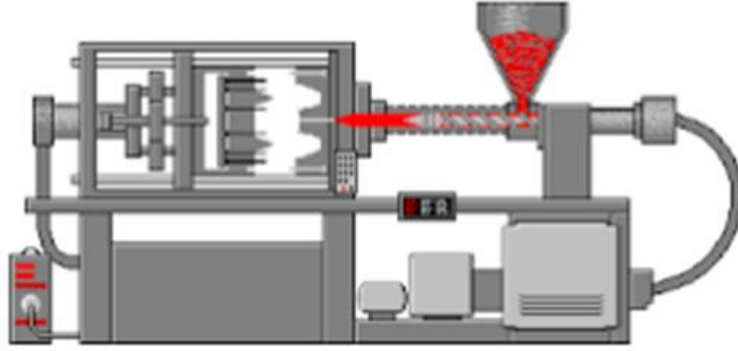
Şekil 3.8. Vakum destekli reçine transfer kalıplama yönteminin şematik gösterimi [5]

Kalıp boşluğunun doldurulma zamanı bazı parametrelerin uygun koşullarda olması ile gerçekleştirilebilir. Örneğin; geçirgenliğin arttırılması, matris malzemesinin viskozite değerinin düşürülerek akışkanlığının arttırılması, giriş basıncında bir artış meydana getirilmesi ve parça uzunluğunun azaltılması gibi işlemlerle birlikte ürünün daha hızlı bir şekilde elde edilmesi sağlanabilir [5].

Bu üretim yöntemi genellikle küçük boyuttaki parçaların üretilmesi için uygun bir yöntem olarak bilinmektedir. Uçak, otomotiv ve tren koltuklarının bazı küçük parçalarının üretilmesinde bu yöntem sıklıkla kullanılmaktadır [6].

3.1.1.7. Enjeksiyon kalıplama yöntemi

Şekil 3.9’da gösterilen yöntemin temel prensibinin, termoplastik malzemelerin ısıtıldıkları zaman yumuşama davranışı göstermesine ve ardından soğutuldukları zaman sertleşme davranışının göstermesine dayalı olduğu bilinmektedir ancak termoset malzemelerin kalıplanmasında kullanılan sistem, termoplastik malzemelerin kalıplanmasında kullanılan sisteme göre değişiklik göstermektedir. Bu da termoset malzemelerin kürleme işlemlerinden sonra tekrar ergime özelliği gösterememesinden kaynaklanmaktadır [3], [6].



Şekil 3.9. Enjeksiyon kalıplama [3]

Bu yöntem kullanılarak termoset malzemelerin kalıplanması gerçekleştirilmek isteniyorsa, ilk olarak termoset malzemenin ısıtılması böylece viskozitesinin düşürülmesi sağlanmalıdır. Kalıplamaları gerçekleştirilen ürünler, kürlleme sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklara çıkarıldıktan sonra sahip oldukları şekillerini korurlar. Bunun sebebi kürlleme sıcaklığında yapıda çapraz bağların meydana gelmesi olarak kabul edilmektedir. Bu bağlamda bu prosesdeki en önemli parametrenin, termoset malzemeler için, prosesin başlangıcında ergime sıcaklıklarına kadar ısıtılmalarının gerekli oluşu ancak bu sıcaklık kürlleme sıcaklığının altında olması gerekliliğidir [6].

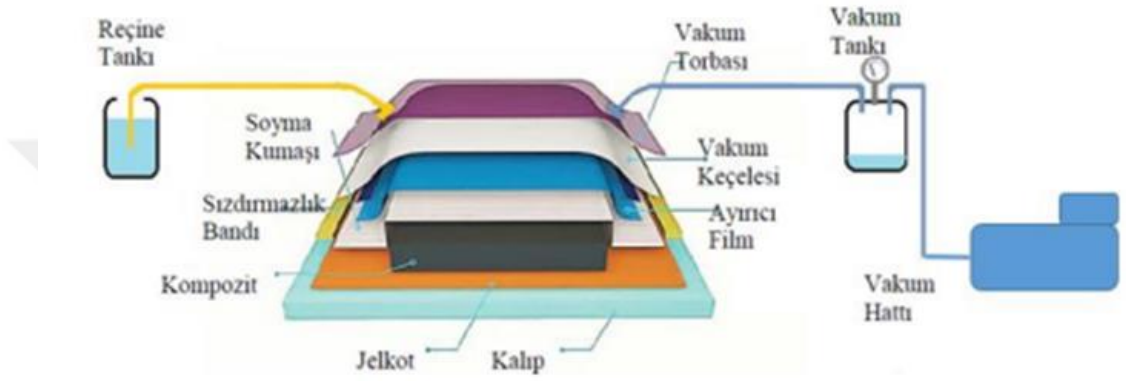
3.1.1.8. Vakum infüzyon yöntemi

Vakum infüzyon, 1980’li yıllardan günümüze kadar oldukça sık olarak kullanılan bir kompozit malzeme üretim yöntemidir. Vakumlanmış bir ortam oluşturulması ve ardından reçinenin ilerlemesinin sağlanması temeline dayanan ve bu şekilde el değmeden bir ürünün eldesini kapsayan bir üretim yöntemi olarak tanımlanabilir [20].

Vakum infüzyon yönteminde, fiber malzemesinin yerleştirilmesi ilk adımdır. Ardından torbanın tamamen kapatılması ve dışarıdaki bir kap içerisinden reçinenin vakum kullanılarak çekilmesi esasına dayanmaktadır [21].

Üretim aşamasında ilk olarak dikkat edilmesi gereken etken, kalıp yüzeyinde kir ya da bir hasar olup olmadığının kontrol edilmesidir. Böyle bir durum varsa kalıbın temizlenmesi gereklidir. Kalıp temizliğinin gerçekleştirilmesinden sonra, kalıp yüzeyine kalıp ayırıcı uygulanmaktadır ve daha sonra asıl üretime başlanmaktadır.

Şekil 3.10’da görüldüğü gibi takviye malzemeleri üst üste, istenilen kalınlığı elde edecek şartlarda konulur. Kalıbın çevresinde mevcut sistemde reçine ve vakum hatları belli olduğundan vakum pompası açılır. Reçine hazırlanır ve vakumla birlikte reçine akışı başlamaktadır. Kalıbın her noktasına reçine temas edene dek bu işleme devam edilmektedir. Reçine hatları kapatılarak, üretilen malzeme vakumun altında sertleşme işlemi tamamlanana kadar tutulmaya devam edilir. Sertleşme işlemi tamamlandığında parça sistemden çıkarılabilir [20].

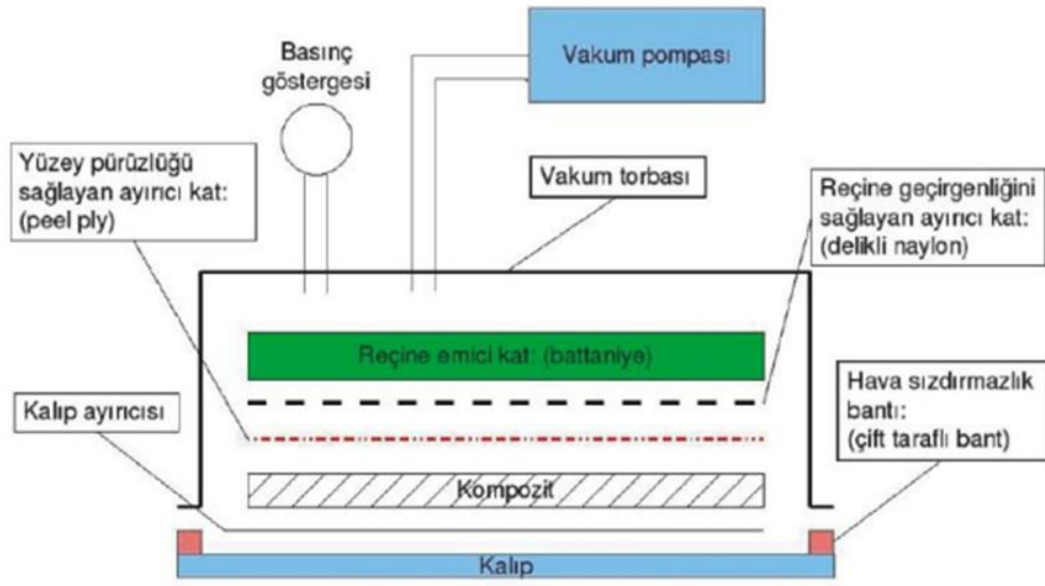


Şekil 3.10. Vakum infüzyon yöntemi [8]

Bu yöntem kullanılarak, karmaşık geometride parça üretimi mümkündür. Tren, yat ve kamyon gibi yapıların gövdelerinin imalatında oldukça sık kullanılan bir üretim yöntemidir [20].

3.1.1.9. Vakum torbalama yöntemi

Vakum torbalama yöntemi, atmosferik basıncın kullanılmasıyla lamine edilmiş olan parçanın kürlleme işlemi tamamlana kadar vakum altında kalması olarak özetlenebilir. Oda sıcaklığında kürlenebilen reçinelerin kullanılmasındaki artış ile birlikte, bu yöntemin de kullanım sıklığında bir artış görülmüştür [22].



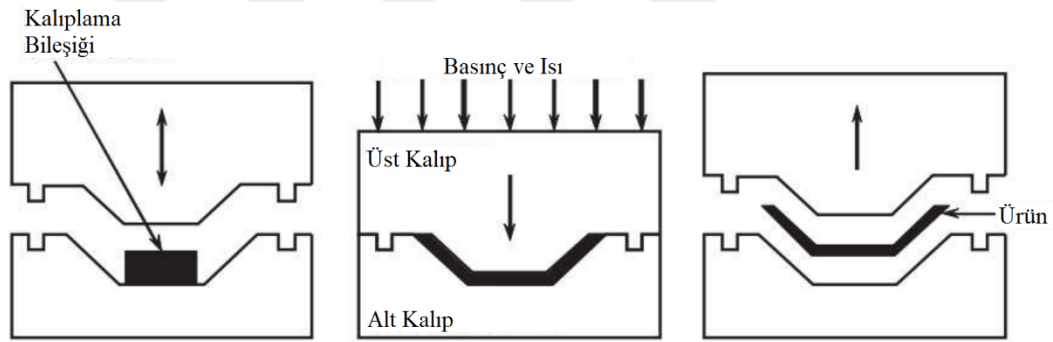
Şekil 3.11. Vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi [22]

Termoset malzemelerin üretiminde en sık kullanılan üretim yöntemi elle yatırma yöntemidir. Ancak elle yatırma yönteminde elyaf ve reçine oranı tam anlamıyla kontrollü olamadığından ürünün yüzey kalitesi çok iyi olmamaktadır. Bazı durumlarda ise, yapışma problemleri görülmektedir. Bu gibi problemlerin önüne geçilebilmek amacıyla, vakum torbalama yöntemi kullanılması önerilmektedir. Bu yöntemle birlikte, elyaf ve reçinenin sıkıştırılması amacıyla basınç uygulanmaktadır. Şekil 3.11’de gösterildiği gibi hava geçirmez bir düzenek yardımıyla reçine ve elyafın basınç altında birbirine yapıştırılması ve bu şekilde kürlendirme işleminin tamamlanmasının sağlanmasıyla üretim tamamlanmaktadır. Bu yöntem kullanılarak sağlanabilecek maksimum basınç miktarı 1 atm’dir. Ancak uygulama sırasındaki basınç farkı yaklaşık 0,4-0,8 bar arasında olmaktadır. Bu prosesdeki en önemli unsur, oluşturulan basınç, kürlendirme işlemi tamamlanana kadar devam etmesi gerekliliğidir. Bu yöntemin kullanılmasıyla birlikte, homojen bir ürün üretmek mümkündür [21], [22].

3.1.1.10. Basınçlı kalıplama yöntemi

Termoset polimerler, yalnızca polimerizasyon ve olgunlaşma süreçleri sırasında şekillendirilebilir. Termoset polimerlerin polimerizasyon süreci geri dönüşümü olmayan bir süreç olarak bilinmektedir [23]. Genel olarak termoset malzemelerin kalıplanmasında kullanılan bir prosesdir. Bu yöntemin kullanılmasıyla, iyi yüzey

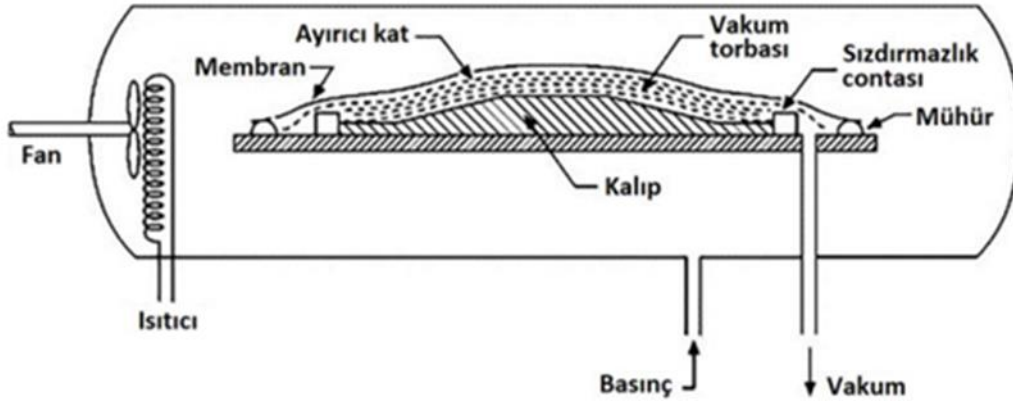
kalitesi elde edebiliriz [24]. Bu yöntemde, önceden ısıtılmış olan malzeme, ısıtılmış kalıp boşluğu içerisine yerleştirilir. Şekil 3.12’de gösterildiği gibi kalıp kapatılır ve basınç uygulanır [6]. Malzemenin sıcaklığı genellikle 105 ile 160 santigrat derecesinde olur. Uygulanan basınç ise 10-140 bar arasında bir değerdir. Elde edilecek parçanın şekline, istenilen ölçülere ve kalınlık değerine göre ısı çevrimi 1 ile 5 dakika arasında uygulanabilir [24]. Kalıplanacak malzemenin kolay akması ve kalıbın tüm boşluklarını doldurabilmesi amacıyla, kalıp duvarları malzemenin ergime noktasının üstünde bir sıcaklığa kadar ısıtılmış olmalıdır. Kalıp malzemesinin kürlenmesi tamamlanana dek kapalı olarak tutulmalıdır [6]. Bu yöntem kullanılarak araba ön tamponları, evde kullanılan cihazlar ve elektrik parçaları üretilebilmektedir [24]. Genel olarak basınçlı kalıplama yöntemi ile üretilen malzemeler genel şunları içerir; fiberglas polyester reçine sistemleri (SMC/BMC), polifenilen sülfür (PPS), vespel (Poliamid:PA) [25].



Şekil 3.12. Basınçlı kalıplama yöntemi [25]

3.1.1.11. Otoklav yöntemi

Otoklav yöntemi, kapalı kalıplama proseslerindendir. Yüksek sıcaklık ve basınç uygulanması esasına dayanmaktadır. Şekil 3.13’te görüldüğü gibi kürleme işlemi gerçekleştirilecek olan kompozit malzemelerin, reçine ile birleştirilmiş fiber tabakaları halinde makine içerisinde yerleştirilmesi sonucundaki üretim olarak tanımlanabilir. Bu yöntem ile üretilen malzemeler oldukça iyi bir nihai kaliteye sahip olmaktadır. Ürünlerin kalitesi nedeniyle genellikle havacılık alanında sıkça kullanılan bir kompozit malzeme üretim yöntemi olduğu bilinmektedir [13].



Şekil 3.13. Otoklav yöntemi [13]

Bu yöntem kullanılarak büyük geometrilere sahip parçaların üretimi mümkün hale gelmektedir. Matris malzemesi kontrollü olarak kürlendiğinden, reçinenin yapı içerisindeki dağılımı oldukça iyidir bu da hem mekanik özelliklerin iyi olmasına hem de yüzey kalitesinde bir iyileşme görülmesine neden olmaktadır. Buna karşın bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Örneğin oldukça yüksek maliyetli bir üretim yöntemidir bunun yanında bakım maliyetleri de oldukça yüksektir [13].

3.1.2. Termoplastik bazlı polimer matrisli kompozit malzemelere uygun üretim yöntemleri

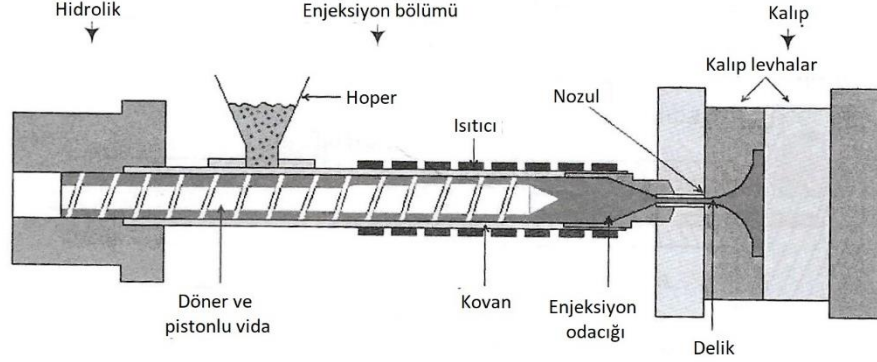
Termoplastik malzemeler, bir ısıtma işlemine maruz kaldıklarında yumuşama davranışı gösterirler ve maruz bırakıldıkları ısı arttırılırsa, akışkan hale geçebilirler. Verilen ısı ortadan kaldırıldığında sertleşme davranışı gösterebilirler. Kimyasal bağlanma oluşmadığından bu özellik sürekliedir. Her ısıtma ve soğutmaya maruz bırakıldıklarında aynı şekilde devam etmektedir [8].

Termoplastik malzemelerin üretiminin gerçekleştirilmesinde birçok üretim yöntemi mevcuttur. Üretim yönteminin seçilmesi, üretim yönteminin avantaj ve dezavantajlarına ve oluşturulacak ürünün gerekliliklerine uygun olarak gerçekleştirilmelidir.

3.1.2.1. Enjeksiyon kalıplama yöntemi

Termoplastik malzemenin ergitilmesi ve bu şekilde kalıba enjekte edilmesi temeline dayanan bir kompozit malzeme üretim metodudur. Bu yöntem kullanılarak elde edilen ürünlerin çoğu termoplastik malzemelerdir. Şekil 3.14'te gösterilen bu

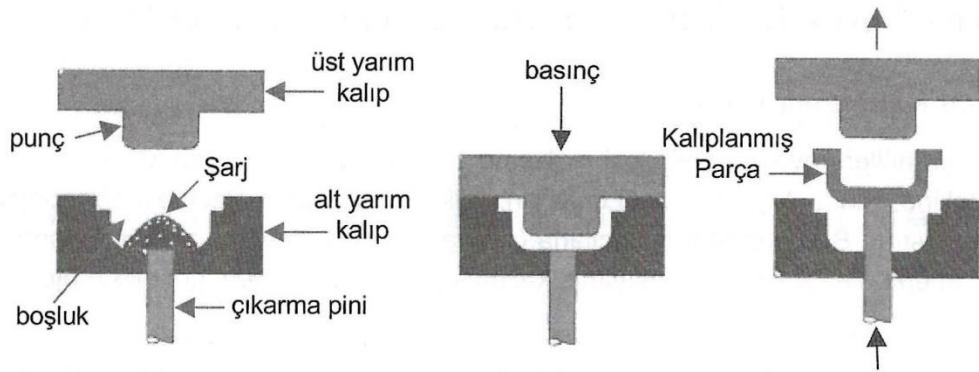
yöntemle enjekte edilmiş olan termoplastik malzemeler ergime sıcaklıklarının altında bir sıcaklığa getirildiklerinde şekillerini korumaktadırlar [6].



Şekil 3.14. Enjeksiyon kalıplama prosesi [6]

3.1.2.2. Basınçlı kalıplama yöntemi

Basınçlı kalıplama prosesi, genellikle termoplastik bazlı kompozit malzemeler için kullanılan bir üretim yöntemi olarak bilinmektedir. Büyük boyutlardaki ürünlerin üretilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Kapalı bir kalıplama prosesidir. Şekil 3.15'te görüldüğü gibi eşleşen iki adet kalıp kullanılmaktadır. Altta bulunan kalıp içerisine takviye elemanı ve reçine konulur ve üst kalıbın da üstüne konulmasıyla makineye takılır. Üstte bulunan kalıba basınçlı sıcak hava verilmektedir. Sıkıştırılma sonucunda ürüne, nihai şekli verilmiş olur ve kalıptan çıkartılmaktadır [6].

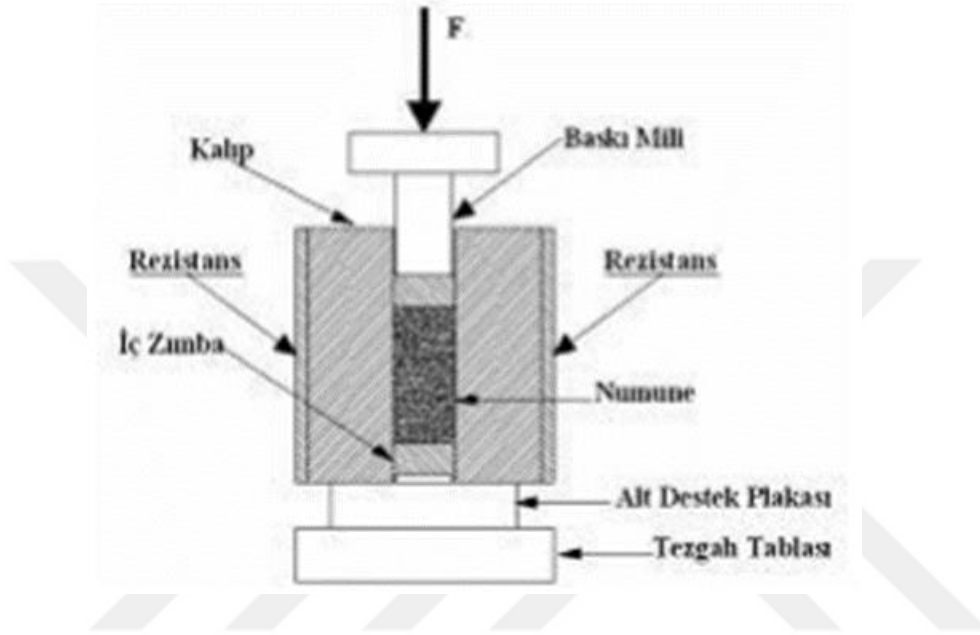


Şekil 3.15. Basınçlı kalıplama prosesi [6]

3.1.2.3. Sıcak presleme (Sıkıştırma kalıplama) yöntemi

Şekil 3.16'da gösterilen bu yöntem hazır kalıplama malzemeleri olarak bilinen kompozit malzemelerin sıcak pres kalıplar kullanılarak ürün haline dönüştürülmesi

işlemi olarak tanımlanabilir. Karmaşık geometriye sahip parçaların üretimi bu yöntem kullanılmasıyla mümkündür. Ürünler üzerinde delik tarzı boşlukların bırakılması da bu yöntemle birlikte sağlanılabilmektedir. Ancak bu yöntemin de bazı dezavantajları mevcuttur. Örneğin maliyeti yüksektir ve kalıplama bileşenleri buzdolabında saklanması gerektiğinden bir depolama alanı gereksinimi vardır [3].



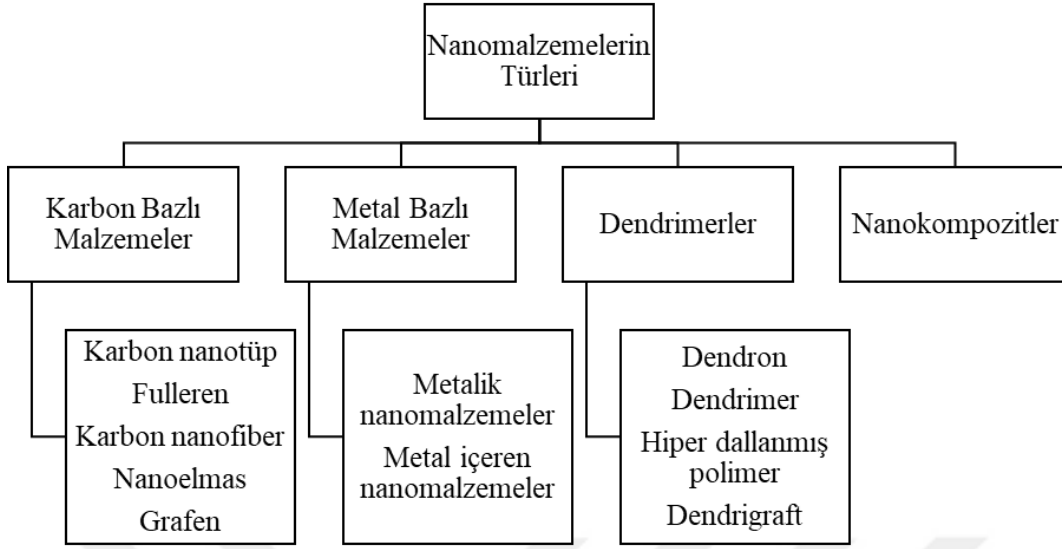
4. NANOMALZEMELER

“Nano” kelimesi, herhangi bir fiziksel büyüklüğün milyarda birine (10^{-9}) denk gelmektedir. Nano ölçekteki malzemelerin özellikleri makroskobik ölçekteki malzemelerden oldukça farklı özellikler göstermektedir [5].

Nanoteknoloji ise, en az bir karakteristik boyutu nanometre seviyesinde olan fonksiyonel malzemelerin üretilmesi anlamına gelen bir terimdir [5]. Diğer bir deyişle, nanoteknoloji, çok küçük boyutlardaki yapıların iyi özelliklerini kullanılabilir hale getirebilmek amacıyla nanometre skalasında çeşitli malzemeler, cihazlar üretilmesine olanak veren bir terim olarak da tanımlanabilir [6].

Bir nanometre boyutta yan yana dizilmiş yaklaşık olarak 5 ile 10 atom arasında atom bulunabilir. Nano boyutlarda çalışıldığında, malzemelerde makro boyutlara oranla oldukça farklı fiziksel ve kimyasal özelliklerle karşılaşmak mümkündür. Bu nedenle nanoteknoloji, disiplinler arası oldukça sık çalışılan bir konudur. Örneğin, malzeme biliminde daha hafif malzemelerin elde edilmesi üzerine sıklıkla çalışılırken, biyoloji alanında biyosensörlerin tasarlanması ve üretimi gibi konular çalışılmaktadır. Bu alanlar dışında, elektronik, matematik, fizik, kimya, bilgisayar, tıp ve eczacılık gibi alanlarda da oldukça sık çalışılan bir konu haline gelmiştir. Bu çalışmalardaki ortak amaç, nano ölçekli yapıların analizlerinin sağlanması, bu yapıların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi, bu yapıların üretilmesi, daha iyi özelliklerin elde edilebileceği yeni üretim yöntemlerinin araştırılması ve malzeme tasarımlarının gerçekleştirilmesi, daha dayanıklı ve hafif ürünlerin elde edilmesi gibi yeni bir şeyin ortaya çıkarılması ve şu anki teknolojiden ve ürünlerden daha üstün teknolojilere ve ürünlere ulaşma ihtiyacı olarak söylenebilir [5].

Boyutları 1-100 nm aralığında olan tozlar veya parçacıklar, nano boyutlu malzemelerin temelini oluşturmaktadır [26]. Malzemelerin atom ve molekül yapıları üzerinde değişiklikler gerçekleştirilerek farklı yapıların üretilmesi ve işlevsel hale getirilerek oluşturulan ürünler nanomalzeme olarak adlandırılmaktadır [27]. Bu nanomalzemelerin türleri Şekil 4.1’de verilmiştir.

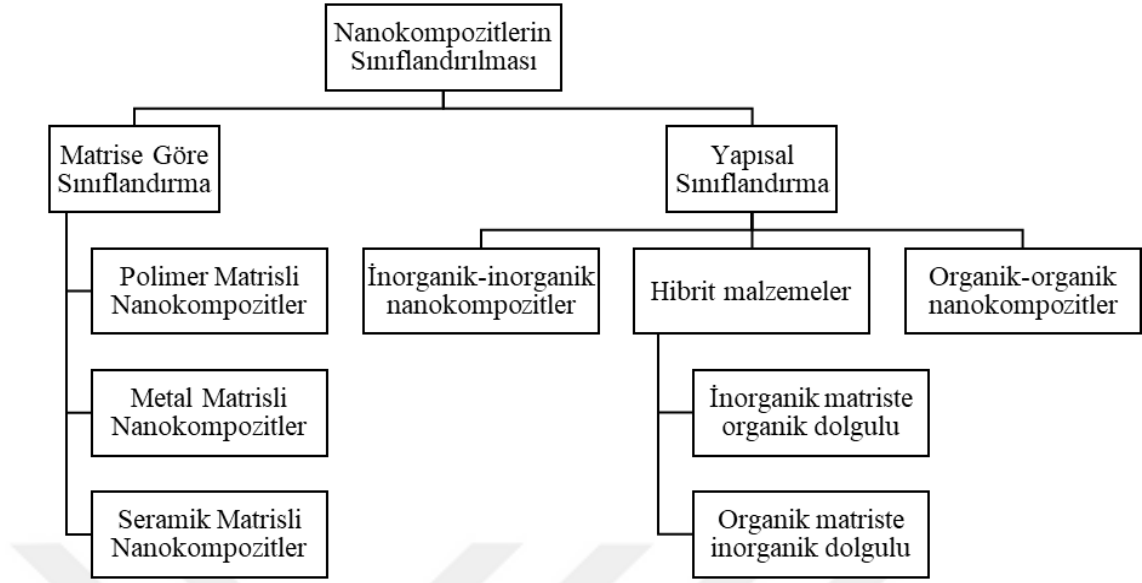


Şekil 4.1. Nanomalzemelerin türleri [6]

4.1. Nanokompozitler

Nanokompozit malzemeler, kompozit malzemeyi oluşturan bir ya da daha fazla fazın nano boyutlarda olduğu bir malzeme sınıfına verilen isimdir [6]. Nano boyuttaki bir fazın yapıya ilave edilmesi, yapının özelliklerinde değişime neden olabilir. Daha iyi özelliklere sahip bir yapıyı elde etmek amacıyla nano boyutta bir takviye elemanını yapı içerisine ilave etmek, yapının özelliklerinin iyileşmesine neden olabilir. Takviye elemanının yüzey alanı/hacim oranı nanokompozit malzemenin yapı özellik ilişkisini belirlemektedir [6]. Nanokompozitlerin sınıflandırılması Şekil 4.2’de verilmiştir.

Nanokompozitler, mineral dolgulu ve yapısı içerisinde %10’dan daha az miktarda nano boyutlu mineral içeren kompozit malzemeler olarak tanımlanabilir. Nanokompozitler pek çok alanda kullanılabilir. Örneğin, film, kaplama, tekstil ve elektronik alanlarda oldukça sıkça karşılaşılan bir malzeme grubudur. Yüksek tokluk özelliklerinden, elastiklik özelliklerinden, yanmayı geciktirme gibi özelliklerinden dolayı tercih edilen bir malzeme grubudur [5].



Şekil 4.2. Nanokompozitlerin sınıflandırılması [6]

4.1.1. Polimer matrisli nanokompozitler

Polimer matrisli nanokompozitler temelde polimer bir matris malzemesi ve nano düzeyde dolgu malzemelerinin uygun bir üretim yönteminin seçilmesiyle bir araya getirilmesi sonucu meydana gelen bir malzeme grubu olarak tanımlanabilir [28]. Genellikle nano boyuttaki malzemelerin sahip olduğu özellikler, aynı malzemelerin daha büyük parçacıklarının sahip olduğu özellikler ile karşılaştırıldığında boyutları nedeniyle daha iyi ve yeni özelliklerdir [29].

Nano boyuttaki malzemelerin, makro boyuttaki türlerine göre daha yüksek yüzey alanına sahip olduğu bilinmektedir [30]. Nanokompozitlerin sahip oldukları yüksek alan/hacim oranları nedeniyle, bu tip malzemelerde matris malzemesi ile takviye elemanlarının ara yüzey alanları makro seviyedekine göre daha büyük olduğundan, bu tür malzemeler daha iyi özelliklere sahiptir [31].

Polimer matrisli nanokompozit malzemelerin üretilmesinde genellikle, ergiyikten harmanlama, çözücü metodu, yerinde polimerizasyon gibi üretim yöntemleri kullanılmaktadır [32], [33]. Üretimde kullanılan bu yöntemlerin hangisinin seçileceği, üretilmesi planlanan ürünün sahip olması istenilen özelliklerine ve üretim verimliliğine uygun olacak şekilde seçilmelidir [19].

Polimer matrisli nanokompozit malzemelerin iyi mekanik özelliklere sahip olmasındaki en önemli etken takviye elemanının matris malzemesi içerisinde homojen olarak dağılmasıdır [19].

Polimer matrisli nanokompozitler, mikro ve makro seviyedeki kompozit malzemelerle karşılaştırıldığında, daha üstün özelliklere sahiptir. Örneğin, daha yüksek elastisite modülüne, daha yüksek mukavemet değerlerine, daha iyi ısıl kararlılığa, daha düşük gaz geçirgenliğine sahiptir [19]. Polimer matrisler içerisine eklenen çok düşük yoğunluğa sahip nano boyuttaki tanecikler bile yapıda oldukça belirgin bir mekanik ve fiziksel özelliklere etki göstermektedir [34].

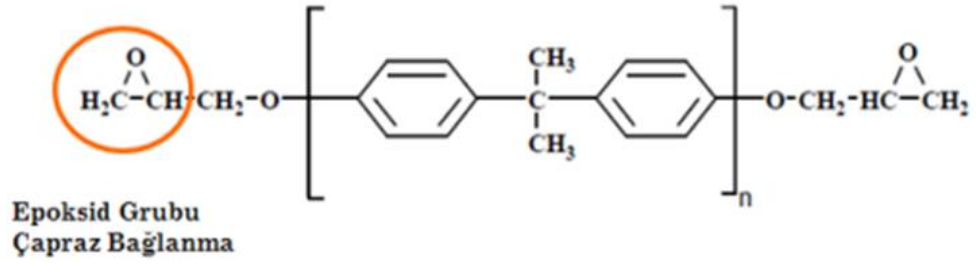
4.1.1.1. Epoksi matrisli nanokompozitler

Epoksi reçine, kompozit malzeme üretiminde oldukça sıkça karşılaşılan matris elemanıdır. Bunun nedeni olarak düşük viskozite değerine sahip olduğundan oda sıcaklığında kalıplanabilir oluşu örnek olarak verilebilir. Bunun yanında sahip olduğu yüksek mekanik mukavemeti, korozyon ve kimyasal direnci ve takviyeleri ıslatabilirliği nedeniyle de tercih edilmektedir [35].

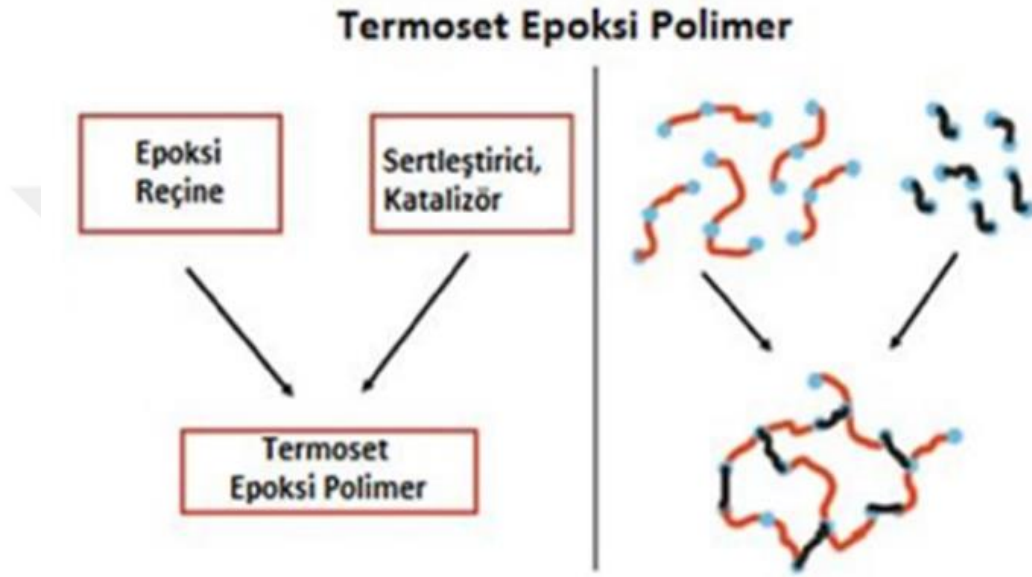
Elde edilecek nanokompozit ürünün sahip olması istenilen özelliklerine göre, epoksi reçinenin formülasyonunda değişiklikler yapılabilir. Bu değişiklikler ile birlikte, malzemenin istenilen özelliklere sahip olması sağlanabilir. Yapılabilecek değişikliklere örnek verilecek olursa, kür oranı, işlem sıcaklıkları gibi özellikler sıralanabilir [36].

İstenilen özelliklere sahip bir epoksi matrisli nanokompozit malzemenin üretilmesinde, matris içerisinde ilave edilen nano parçacıkların homojen bir şekilde dağılmış olmasına ve nanoparçacık ile matris elemanı arasındaki arayüzey etkileşimine bağlıdır [37].

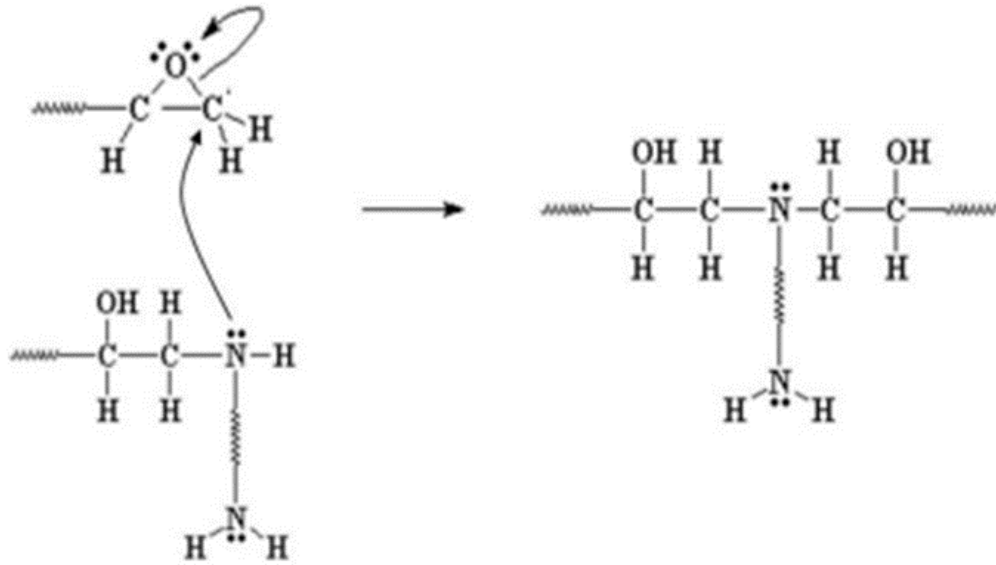
Epoksi reçinelerin yapılarında iki ya da daha fazla epoksi halkası bulunmaktadır [38]. Şekil 4.3'te epoksi reçinenin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Epoksi reçinenin yapısı [39]



Şekil 4.4. Epoksi reçinenin çapraz bağlanma mekanizması [39]



Şekil 4.5. Epoksi reçine ve sertleştirici arasındaki reaksiyon [39]

Epoksi reçineler, doğrusal yapılı oligomer bileşikler olarak bilinmektedir. Bundan dolayı fiziksel özellikleri iyi değildir. Yapılarına sertleştirici eklenmesiyle ve bunun yanında katalizörlerin de etkisiyle fazla sayıda çapraz bağ içeren bir yapıya sahip olmaktadır. Şekil 4.4'te epoksi reçinenin çapraz bağlanma mekanizması verilmiştir. Çapraz bağların oluşmasıyla epoksi reçineler termoset özellik gösterirler ve bununla birlikte mekanik özelliklerinde, kimyasal ve aşınma dirençlerinde bir artış görülmektedir [40], [41]. Şekil 4.5'te epoksi reçine ve sertleştirici arasındaki reaksiyon verilmiştir.

Literatürde, epoksi matrisli nanokompozitlerle ilgili çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda epoksi reçine matris içerisine nano boyutta takviye elemanı ilaveleri gerçekleştirilerek yapının sahip olduğu özelliklerin iyileştirilmesi hedeflenmektedir.

Bu hedefe yönelik mevcut bir çalışmada, epoksi matris içerisine farklı oranlarda silisyum oksit (SiO_2) ilave edilmesiyle elde edilen numunelerin eğilme testleri gerçekleştirilmiş olup, numunelerin sahip olduğu eğilme dayanımı, elastisite modül değerleri ve birim uzama özelliklerinin karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda eğilme dayanımı için en yüksek artış miktarının sağlandığı yapı kompozisyonu tespit edilmiş olup optimum takviye elemanı oranı tespit edilmiştir [42].

Başka bir çalışmada ise, aramid elyaf epoksi takviyeli epoksi nanokompozit malzemelerin üretimi gerçekleştirilerek bu yapıların mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında yapı içerisine farklı oranlarda yüzeyi modifiye edilmiş alümina (Al_2O_3) nanopartiküller ilave edilmiştir. Bunun yanı sıra, nanopartiküller sadece life katılarak da numuneler elde edilmiştir. Çalışma sonucunda, çekme testi, üç nokta eğme testi ve darbe testleri gerçekleştirilerek, aramid elyaf takviyeli epoksi kompozitlere modifiye edilmiş alümina (Al_2O_3) nanopartikül katmanın hem lif için hem epoksi için mekanik özellikleri arttırdığı görülmüştür [43].

Benzer bir tez çalışmasında ise, mikro ve nano dolgulu epoksi esaslı kompozit malzemelerin tribolojik ve mekanik özelliklerini incelenmiş ve modellemeleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonunda epoksi reçine içerisine nano dolguların eklenmesiyle çekme dayanımı ve eğilme dayanımı değerlerinde bir artış olduğu tespit edilmiştir. Dolgu oranının optimum değerler üzerine çıkılmasıyla birlikte,

çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinde bir azalma meydana geldiği, elastisite modülü, eğilme modülü ve sertlik özelliklerinde ise bir artış meydana geldiği bildirilmiştir [44].

Nanopartiküllerin yapıştırıcılar üzerindeki etkilerinin incelendiği bir çalışmada ise, metallerin yapıştırılmasında kullanılmakta olan epoksi reçineler içerisine farklı oranlarda karbon nanopartiküller ilave edilmiş olup, yapışma dayanımındaki değişim irdelenmiştir [45].

Başka bir çalışma kapsamında ise, hegzagonal bor nitrür nanoplateler ve farklı oranlarda nano gümüş kullanılmasıyla, epoksi matrisli nanokompozit malzemelerin üretimi gerçekleştirerek çekme testi yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda takviyeli nanokompozit malzemenin mekanik özelliklerinin uygun oranda takviye elemanının ilavesiyle epoksinin mekanik özelliklerine göre arttığı görülmüştür [46].

Bir diğer çalışmada ise, nano boyuttaki titanyum oksit (TiO_2) ve mikron boyutlarındaki titanyum oksit (TiO_2) epoksi reçine içerisine ilave edilerek farklı kompozit malzemeler elde edilmiştir. Nano dolgulu kompozit malzemede mekanik özelliklerde önemli derecede bir artış meydana geldiği görülmüştür [47].

Başka bir çalışma kapsamında ise, epoksi matrisli grafen nanoparçacık katkılı yapıştırıcıların mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapı içerisindeki grafen, düşük katkı oranlarında, dayanım ve şekil değiştirilebilirliğe olumlu bir etki yapmıştır. Yüksek katkı oranlarında ise, reçine içerisinde homojen bir şekilde dağılma gösteremediğinden dayanımda bir düşüşe neden olduğu belirtilmiştir [48].



5. MATERİYAL VE YÖNTEM

Bu kısımda, kullanılan hammadde ve cihazların listeleri verilecek ve sahip oldukları özellikler ile ilgili bilgiler verilecektir. Aynı zamanda deneysel çalışmalardan da bahsedilecek ve tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen numune hazırlama aşamaları detaylı olarak anlatılacaktır. Ardından tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen karakterizasyon yöntemlerine yer verilecektir.

5.1. Kullanılan Hammaddeler ve Cihazlar

Deney numunelerinin hazırlanacağı kalıbın hazırlanması için kalıp silikonu kullanılırken, numunelerin üretimi için hammadde olarak epoksi ve nano boyuttaki nikel oksit malzeme kullanılmıştır.

5.1.1. Kullanılan hammaddeler

Çalışma yapılırken, ilk olarak kalıp hazırlama prosesi için, RTV-3030 kalıp silikonu ve sertleştiricisi kullanılmıştır. Numuneler hazırlanırken, matris elemanı olarak epoksi reçine, takviye elemanı olarak ise nano boyutta nikel oksit kullanılmıştır. Nano boyutta nikel oksitin boyutu 8-18 nm arasında seçilmiştir.

Kalıp hazırlama prosesi için kullanılmakta olan, kalıp silikonu olarak Verpol RTV-3030 yarı şeffaf kalıp silikonu, Verpol Boya firmasından temin edilmiştir. Kalıp silikonunun yoğunluğu $1,15 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Viskozite değeri ise, 20000 mPa.s'dır. Katalizör oranı, oda sıcaklığında %3 olarak kullanılmaktadır. Homojen bir karışım elde edilene kadar kalıp silikonu ve katalizörün karıştırılması önemli bir üretim prosesidir.

Tez numunelerinin hazırlanması aşamalarında kullanılan, epoksi reçine için MGS LR285 laminasyon epoksi reçine olarak kullanılmıştır. Yoğunluk değeri 1,18 ile 1,23 g/cm^3 değerleri arasındadır. Viskozite değeri ise, 600 ile 900 mPa.s arasındadır. Sertleştirici olarak ise LH287 kodlu sertleştirici kullanılmıştır. Epoksi reçine ile sertleştiricinin karışım oranı 100:40 olarak önerildiği için bu oran kullanılmıştır.

Takviye elemanı olarak kullanılan Nikel Oksit (NiO) nano tozu, Nanografi firmasından temin edilmiştir. Tablo 5.1'de nano nikel oksit tozunun sahip olduğu teknik özellikler ve Tablo 5.2'de elementel analizi verilmiştir.

Tablo 5.1. Nano nikel oksit tozunun sahip olduğu teknik özellikler

Saflık (%)	99,5
Renk	Gri, siyah
Biçim	Küresele yakın
Ortalama Tane Boyutu (nm)	8 – 18
Özgöl Yüzey Alanı (m ² /g)	>95
Kitle Yoğunluğu (g/cm ³)	0,8
Gerçek Yoğunluk (g/cm ³)	6,8

Tablo 5.2. Nano nikel oksit tozunun elementel analizi (%)

Alüminyum	Baryum	Kalsiyum	Magnezyum	Demir	Çinko
0,002	0,0025	0,0092	0,01	0,002	0,006

5.1.2. Kullanılan cihazlar

Yapılan tez çalışması kapsamında kullanılan cihazlar ve kullanım amaçları Tablo 5.3'te listelenmiştir.

Tablo 5.3. Tez çalışması kapsamında kullanılan cihazlar

Kullanılan Cihaz	Marka / Model	Kullanım Amacı
Hassas Terazı	Weightlab Instruments / VL-303	Takviye malzemesinin tartılması.
Tartı	Desis AHW6+	Kalıp malzemelerinin, epoksi reçine ve sertleştiricinin tartılması.
Mekanik karıştırıcı	Jet JDP-8L	Sertleştirici ve epoksi reçinenin karıştırılması

Tablo 5.3. (Devam) Tez çalışması kapsamında kullanılan cihazlar

Etüv	Binder ED 53	Epoksi reçinenin ısıtılması, nano katkı malzemesinin neminin alınması ve post kür işlemlerinin gerçekleştirilmesi.
Ultrasonik karıştırıcı	Bandelin HD2070 Ultrasonik Homojenizatör	Epoksi ve nano katkı malzemesinin karıştırılması.

5.2. Deneysel Çalışmalar

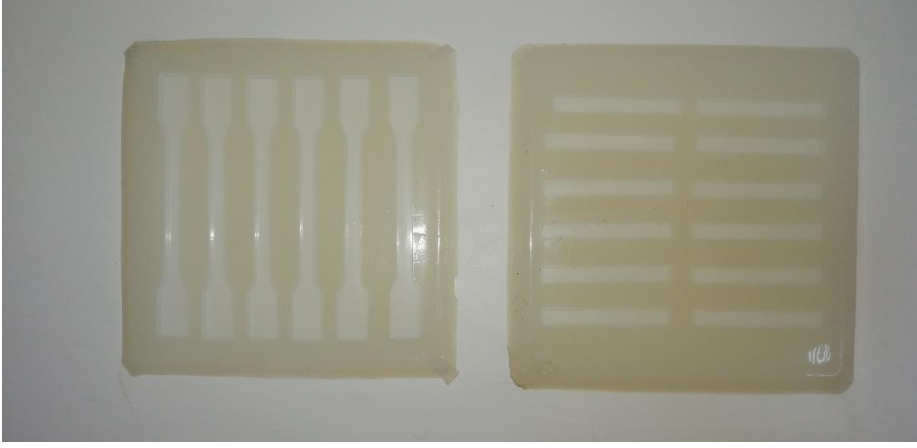
Deneysel çalışmalar kapsamında, ilk aşama olarak test numuneleri için kalıpların hazırlanması sonrasında deney numunelerinin hazırlanması aşaması mevcuttur. Bu numuneler hazırlandıktan sonra mekanik ve termal karakterizasyon ile yüzey morfolojisi incelenmeye çalışılmıştır.

5.2.1. Kalıpların hazırlanması

Deneysel çalışmaların ilk adımı, üretilecek olan epoksi matrisli nanokompozitlerin döküleceği kalıbın hazırlanmasıdır. Kalıbın hazırlanmasındaki dikkat edilmesi gereken etken, epoksi reçinenin yapışmayacağı bir kalıp malzemesinin seçilmesidir. Bu amaçla RTV-3030 kalıp silikonu seçilmiştir.

Bir beher içerisinde kalıp silikonu tartılarak üzerine ağırlığının %3 oranına ek sertleştirici eklenip bu karışım homojen olana kadar karıştırılmıştır.

Kalıp silikonu ve sertleştiriciden oluşan karışım ile ve referans numuneler yardımıyla istenen kalıp elde edilmiştir. Elde edilen silikon kalıp Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Hazırlanan silikon kalıp

5.2.2. Epoksi matrisli nanokompozitlerin üretimi

Epoksi matris içerisinde katkı elemanı olarak nano boyuttaki nikel oksit seçilmiştir. Çalışmada kullanılan nikel oksitin boyutları 8-18 nanometre tercih edilmiştir. Çalışma yapılırken ilk olarak kullanılacak nano boyuttaki nikel oksit tozunun neminin alınması gerekmektedir. Bu amaçla, nano nikel oksit tozu üretilecek her kompozisyon için ayrı olarak hassas terazi yardımıyla bir beher içerisinde tartılmıştır. Daha sonra, beher ile birlikte etüv fırınına konularak 100 °C’de 4 saat bekletilmiştir.

Takviye elemanının, epoksi içerisinde daha iyi dağılmasını sağlamak amacıyla, epoksi reçineye 40 °C’de ısıtma işlemi uygulanmıştır. Isınmış olan epoksi reçine içerisine kurutulan bu katkı malzemesi eklenmiştir. Eklenen katkı malzemesi, nano boyutta olduğundan dolayı homojen bir dağılım elde etmek güçtür. Bu nedenle mekanik karıştırıcı yeterli olmamaktadır. Dolgunun epoksi içerisine düzgün dağılmasını sağlamak için en uygun yol ultrasonik homojenizatördür. Ancak ultrasonik homojenizatörde katkı dağılırken epoksi yüksek sıcaklıklara çıkmaktadır. Bu durum da olumsuz sonuçlara yol açabilmektedir. Bu nedenle her biri 5 dakika olmak üzere aralıklı olarak toplamda 20 dakika karıştırılmıştır ve her bir karıştırma sonrasında katkılanmış epoksi reçine, buz banyosu içerisinde soğutulmuştur. Son olarak epoksi reçinenin oda sıcaklığına gelmesi beklenip üzerine 10:4 oranında sertleştirici ilavesi gerçekleştirilmiştir. Sertleştiricinin de eklenmesinin ardından mekanik karıştırıcıda bir süre daha karıştırılma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ardından hazırlanan karışım içerisinde bulunan hava kabarcıklarını almak için 15 dakika 0.75 bar vakum uygulanmıştır.

Hava kabarcıksız bir karışım elde edildikten sonra önceden hazırlanmış olan kalıplara dökülmüştür. 24 saat oda sıcaklığında bekletilen deney numuneleri, sonrasında kalıplardan çıkarılıp etüv içerisine 60 °C’de 16 saat post kür işlemi için bırakılmışlardır. Şekil 5.2’de üretim şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Üretim aşamasının şematik olarak gösterimi

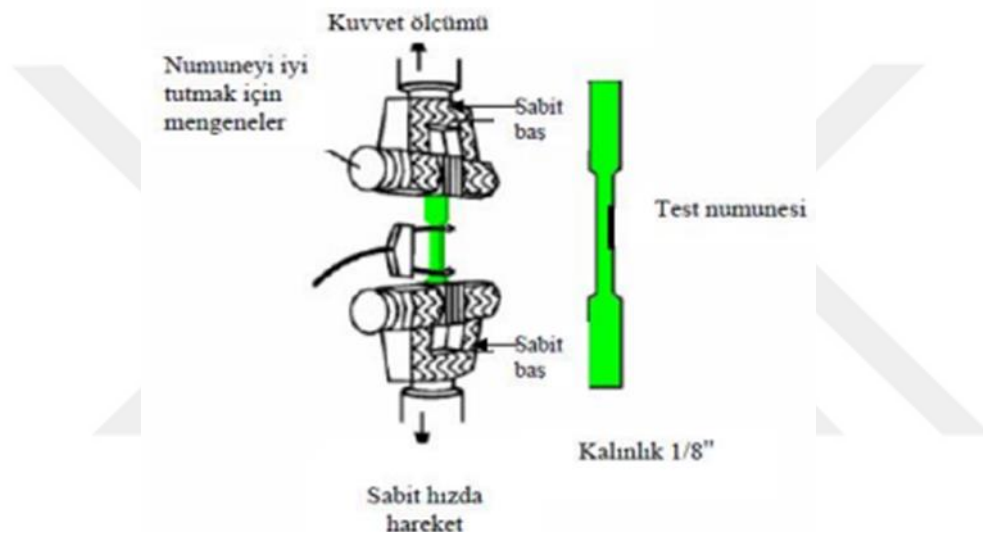
5.3. Karakterizasyon

Tez çalışması kapsamında, hazırlanan numunelerin mekanik özelliklerinin tespiti için, çekme testi ve üç eksenli eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin termal

özelliklerinin tespit edilmesi için termogravimetrik analiz (TGA) yapılmış ve son olarak mikroyapılarının incelenmesi amacıyla, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikroyapısal analizleri gerçekleştirilmiştir.

5.3.1. Çekme testi

Şekil 5.3'te gösterildiği gibi çekme testi, standartlara uygun olarak hazırlanan numunelerin, tek eksenli, belirli bir hız ve sabit bir sıcaklık altında numunenin kopuncaya dek çekilmesine dayanan, malzemelerin sahip oldukları mekanik özelliklerin belirlenmesinde sıklıkla kullanılmakta olan bir testtir [49].

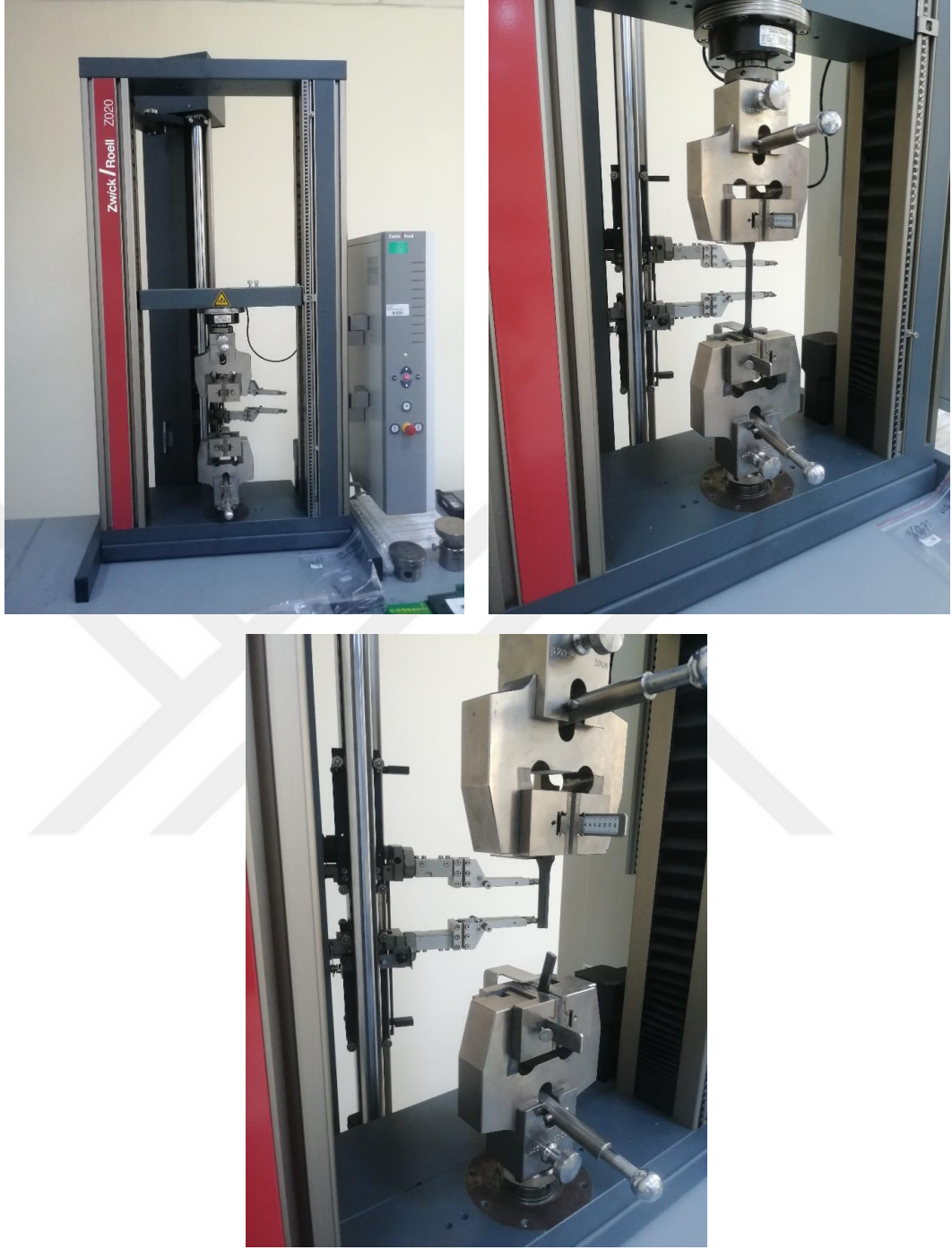


Şekil 5.3. Çekme numunesi ve çekme testi yöntemi [50]

Çekme testi cihazı, birbirine göre hareket edebilen ve deney numunelerinin yerleştirilmiş olduğu iki adet çeneye sahiptir. Cihazın çalışma prensibi, çenelerden biri, sabit hızda çekilmesine ve numune üzerine farklı oranlarda çekme kuvveti uygulanmasına dayanmaktadır. Bunun sonucunda kuvvete karşılık gelen uzama miktarının kaydedilmesiyle test tamamlanmaktadır [51], [52]. Şekil 5.4'te çekme testinin üretilen deney numunelerine uygulanması verilmiştir.

Çalışma kapsamında, çekme testi Yalova Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarı Mekanik Test Laboratuvarı'nda Zwick Roell Z020 test cihazında gerçekleştirilmiştir.

Çekme testi sonuçlarıyla, çekme mukavemeti, elastisite modülü ve gerinim değerlerini hesaplamak mümkündür.



Şekil 5.4. Çekme testinin üretilen deney numunelerine uygulanması

ISO-527 standardına göre çekme testinin ardından, denklem 5.1 kullanılarak çekme mukavemeti bulunabilirken, denklem 5.2 kullanılarak gerinim değeri, denklem 5.3 kullanılarak ise elastisite modülü hesaplanabilir.

Çekme dayanımı, çekme numunesinin kopmadan hemen önce dayanabildiği maksimum gerilme değeri olarak tanımlanabilir. Elastisite modülü ise, malzemenin

deformasyona ne kadar iyi dayandığını gösteren bir değer olarak tanımlanabilir. Gerinim ise, malzeme üzerinde gerçekleşen şekil değişiminin bir oranı olarak tanımlanabilir.

$$\sigma_{\zeta} = \frac{P_{\max}}{A_0} \quad (5.1)$$

$$\varepsilon = \frac{l - l_i}{l_i} \quad (5.2)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5.3)$$

5.3.2. Üç eksenli eğme testi

Üç noktalı eğme testi, numunenin iki destek noktası üzerine yerleştirilmesi ve daha sonra orta nokta üzerinden bir kuvvet uygulanması prensibine dayanmaktadır. Deney kapsamında, deney direncinin belirlenmesi üzerine çalışılmaktadır. Şekil 5.5'te üç eksenli eğme testinin üretilen deney numunelerine uygulanması gösterilmiştir.

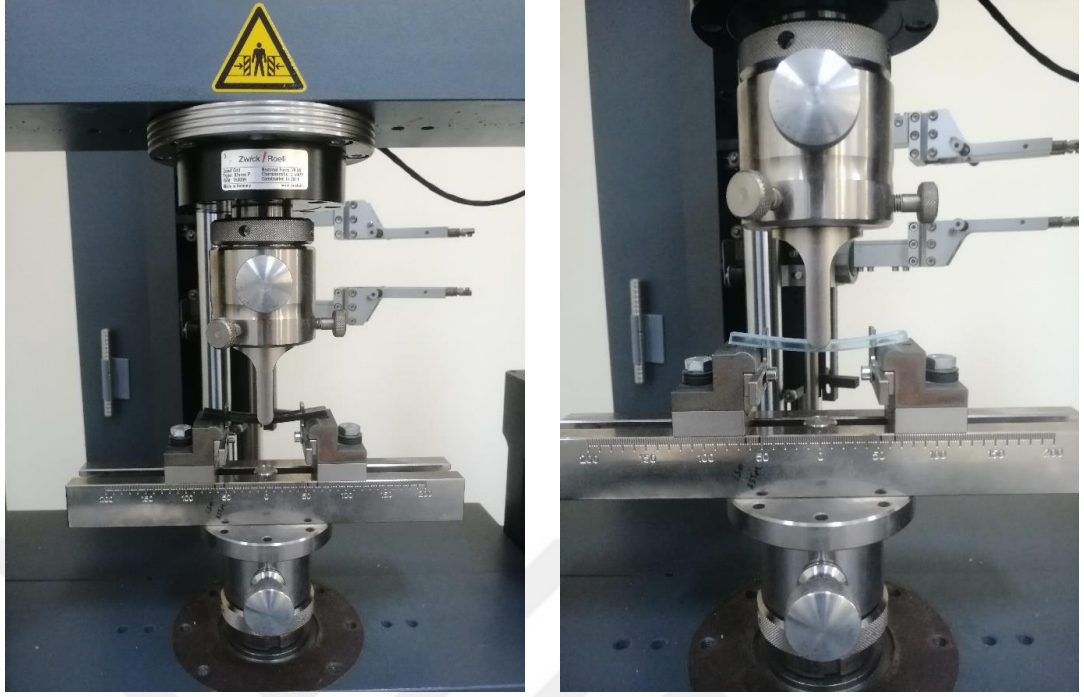
Çalışma kapsamında, üç eksenli eğme testi Yalova Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarı Mekanik Test Laboratuvarı'nda Zwick Roell Z020 test cihazında gerçekleştirilmiştir.

Bu deneyle birlikte, eğme elastisite modülü ve eğme mukavemeti değerleri belirlenebilir.

ISO-178 standardına göre üç eksenli eğme testinin ardından, denklem 5.4 kullanılarak eğme mukavemeti belirlenebilirken, denklem 5.5 kullanılarak elastisite modülü değeri belirlenebilir.

$$\sigma_m = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (5.4)$$

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad (5.5)$$



Şekil 5.5. Üç eksenli eğme testinin üretilen deney numunelerine uygulanması

5.3.3. Termogravimetrik analiz

Kontrollü şartlar altında, malzemenin sıcaklığının değiştirilmesi sonucunda ağırlığındaki değişimin ölçülmesine termogravimetri denmektedir. Termogravimetrik analizde ölçülen değişkenler, ağırlık, zaman ve sıcaklık olarak sıralanabilir. Polimer malzemelerin termal olarak kararlılıklarının ölçülmesinde termogravimetrik analiz kullanılmaktadır.

Termogravimetri, malzemelerde zaman ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak, meydana gelen kütle kaybı veya kazanımlarının belirlenmesini temel alan bir analiz biçimi olarak bilinmektedir. Deney numunesinin kütle kaybına uğramasının sebepleri arasında, bozunma reaksiyonları, yükseltgenme reaksiyonları ya da yapı içerisindeki herhangi bir bileşenin buharlaşması olarak birkaç örnek verilebilir.

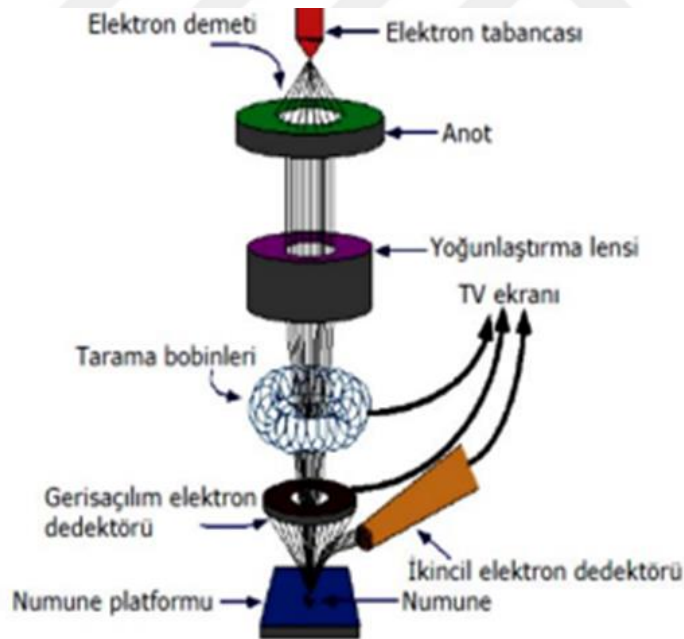
Termogravimetrik analizin kullanılmasıyla birlikte, bir malzemenin bozunmaya başladığı sıcaklık belirlenebilir. Bunun yanında malzemenin yarı ömrü de belirlenebilmektedir. Yarı ömrü, malzemenin ağırlığının yarısını kaybettiği noktaya verilen isimdir.

Çalışma kapsamında, termogravimetrik analiz Yalova Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarı Termal Analiz Laboratuvarı'nda Seiko, TG/DTA 6300 test cihazında gerçekleştirilmiştir. Test koşulları 25-950 °C sıcaklıkları arasında, sıcaklık değişim hızı 10 °C/dk olarak belirlenmiştir.

5.3.4.SEM (Taramalı elektron mikroskobu)

Işık mikroskobunun, malzemenin mikroyapısını detaylı bir şekilde inceleyemeyeceği durumlarda, çok yüksek büyültme yeteneğine sahip olan taramalı elektron mikroskobu kullanmak oldukça iyi bir tercih olacaktır.

Şekil 5.6'da gösterildiği gibi taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilen analizlerde, numunenin yüzeyi odaklanmış bir elektron demetine maruz bırakılır. Numune yüzeyiyle etkileşimleri sonrasında, elektronlar farklı açılarda saçılmalar gösterir. SEM cihazı üzerinde bulunan dedektör yardımıyla saçılan elektronlar toplanır ve bu toplanan elektronların oluşturduğu sinyallerin işlenmesi sonucunda görüntü elde edilmektedir.



Şekil 5.6. Taramalı elektron mikroskobu çalışma prensibi [53]

Taramalı elektron mikroskobu kullanılarak, numunenin kırılma yüzeyleri hakkında bilgi sahibi olabileceğimiz gibi, malzemenin mikroyapısı hakkında da bilgi sahibi olabiliriz.

Kompozit malzemelerde, takviye elemanı ile matris arasındaki arayüzeyin incelenmesinde bu analizi kullanabileceğimiz gibi, takviye elemanı ve matris malzemesi arasındaki etkileşimi, bunun yanında matris malzemesinin takviye elemanını ıslatabilme özelliklerini ve matris malzemesi içerisinde takviye elemanının nasıl bir dağılım gösterdiğinin incelenmesinde de kullanabiliriz.

Çalışma kapsamında, kırılma yüzeyi Fei, Quanta Feg 250 görüntüleme cihazında incelenmiştir.





6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu kısımda, tez numunelerinin hazırlanmasının ardından gerçekleştirilen karakterizasyon yöntemlerinin sonucunda elde edilen sonuçlar incelenecektir. Mekanik özelliklerin incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen çekme testi ve üç noktalı eğme testi sonuçları tartışılacaktır. Termal özelliklerin incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen termogravimetrik analizin sonuçları tartışılacaktır ve son olarak elde edilen numunelerin mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi amacıyla yapılan SEM (taramalı elektron mikroskobu) analizi sonuçları incelenecek ve tartışılacaktır.

6.1. Çekme Testi Sonuçları

Tez çalışmaları kapsamında, hazırlanan çekme numuneleri, çekme dayanımı, elastisite modülü ve kopma uzaması değerlerinin belirlenebilmesi ve yapı içerisine takviye edilen nano boyuttaki nikel oksitin yapının mekanik özelliklerini hangi oranda değiştirdiğinin belirlenebilmesi için çekme testi uygulanmıştır.

Çekme numunesi kopuncaya kadar tek bir ekseninde çekme kuvvetlerine maruz bırakılması sonucunda elastisite modülü, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri elde edilmiştir.

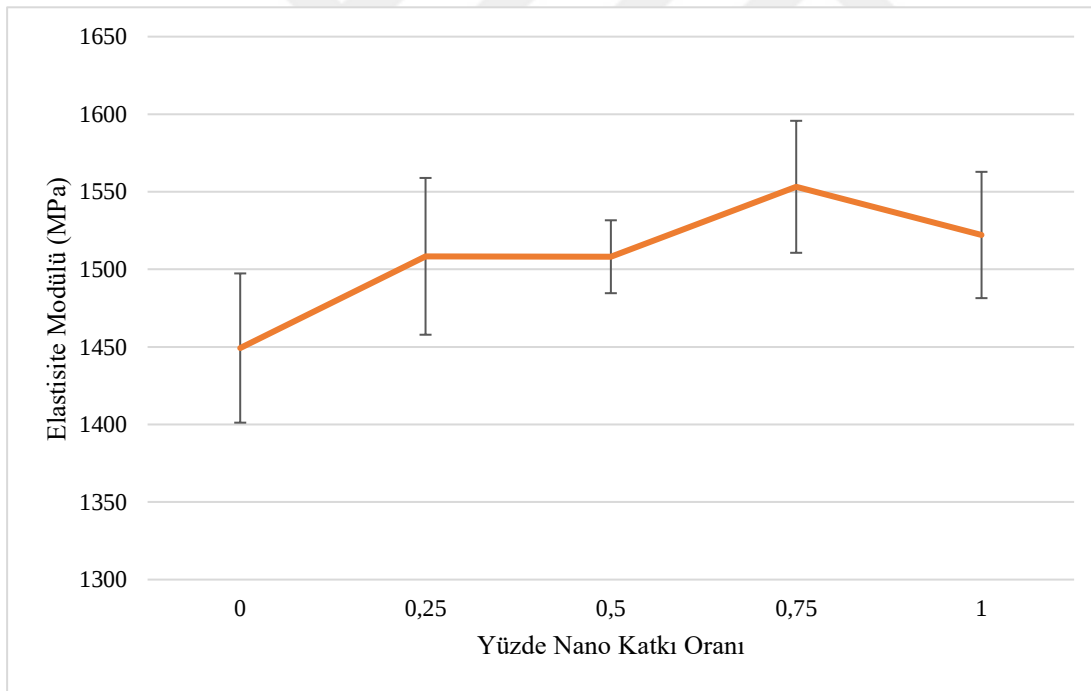
Tablo 6.1’de çekme testi sonucunda elde edilen elastisite modülü, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri ve standart sapma verileri verilmiştir.

Tablo 6.1. Çekme testi sonucunda elde edilen nano nikel oksit ilavesinin mekanik özelliklere etkisi

Numune	Elastisite Modülü (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
Saf (%0) epoksi reçine	1449,26 ± 48,10	63,26 ± 8,54	5,76 ± 1,31
%0,25 nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine	1508,37 ± 50,53	54,1778 ± 2,48	4,21 ± 0,32

Tablo 6.1. (Devam) Çekme testi sonucunda elde edilen nano nikel oksit ilavesinin mekanik özelliklere etkisi

%0,50 nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine	1508,12 ± 23,50	55,16 ± 3,68	4,27 ± 0,278867
%0,75 nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine	1553,20 ± 42,53	53,97 ± 1,95	4,05 ± 0,16
%1 nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine	1522,15 ± 40,70	55,10 ± 3,99	4,38 ± 0,47



Şekil 6.1. Yüzde nano katkı oranı - elastisite modülü grafiği

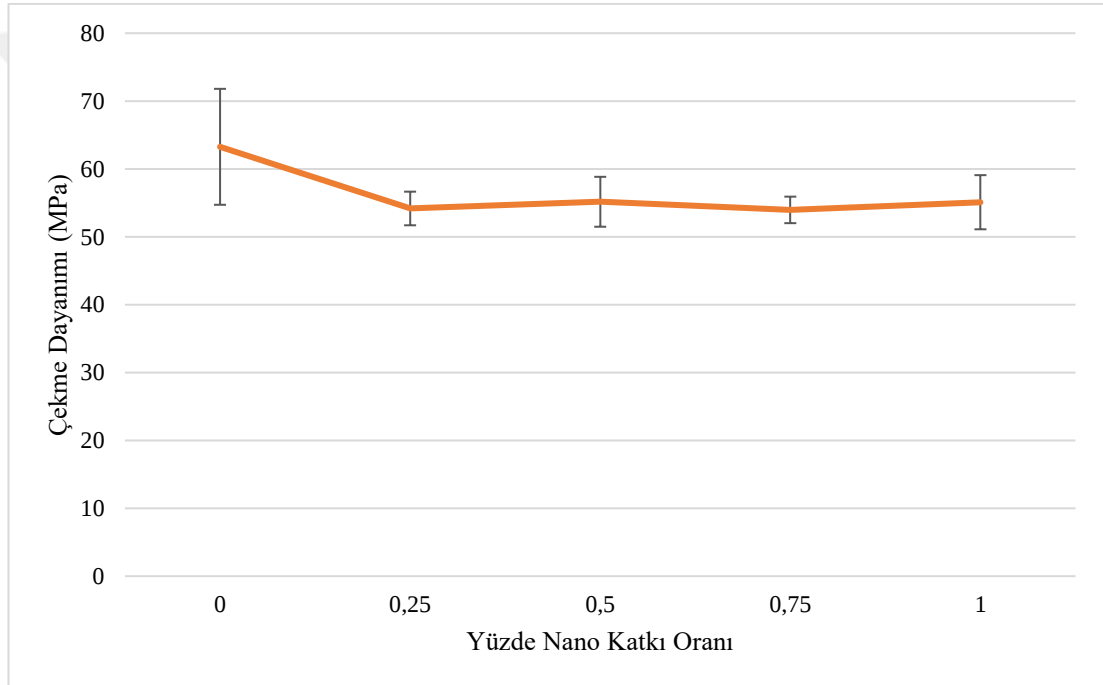
Şekil 6.1 incelendiğinde, epoksi reçine içerisine nano nikel oksit katkısının eklenmesiyle, elastisite modülünde bir artış eğilimi olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 6.1’de bulunan yüzde nano katkı oranı/elastisite modülü grafiğini incelediğimizde en düşük elastisite modülüne sahip numune grubunun ortalama

1449,26 MPa elastisite modülü değerine sahip olan, içerisinde nano nikel oksit katkısı bulunmayan saf epoksi grubu olduğunu görmekteyiz.

Ancak en yüksek elastisite modülü değerine sahip numune grubuna baktığımızda ise, içerisinde ağırlıkça %0,75 oranında nano boyutta nikel oksit bulunan ve 1553,20 MPa elastisite modülü değerine sahip olan numune grubunun olduğunu görmekteyiz.

Sonuç olarak, yapı içerisinde nano nikel oksit ilave edilmesiyle birlikte, malzemenin sahip olduğu elastisite modülü değerlerinde bir artış eğilimi olduğu şeklinde bir yorum yaparken bunun yanında kompozit malzeme yapısı içerisindeki dolgu oranının artırılmasıyla malzemenin daha gevrek ve rijit özellik kazandığını da söylenebilir.



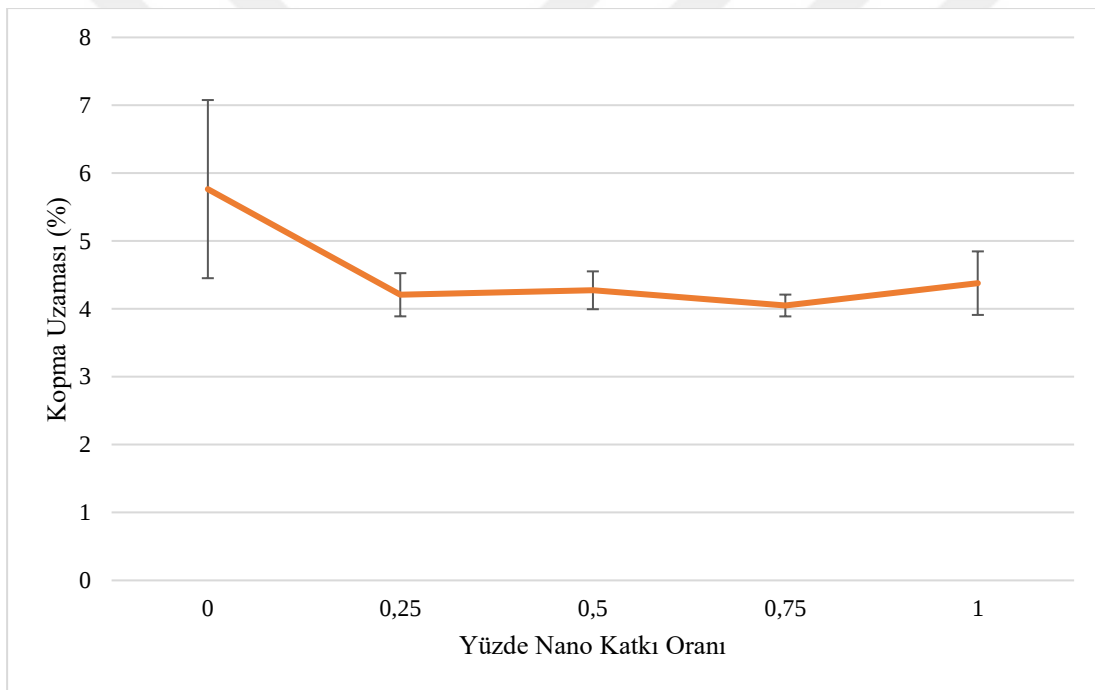
Şekil 6.2. Yüzde nano katkı oranı - çekme dayanımı grafiği

Şekil 6.2’de bulunan yüzde nano katkı oranı/çekme dayanımı grafiğini incelediğinde, epoksi reçine içerisinde nano nikel oksit katkısının ilave edilmesiyle birlikte, çekme dayanımı değerlerinde bir düşüş görüldüğü yorumu yapılabilir.

İçerisinde nano boyutta nikel oksit ilavesi bulunmayan yani %0 nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine grubu, 63,26 MPa çekme dayanımı değeriyle birlikte, en yüksek çekme dayanımı değerine sahip olan gruptur.

Buna karşın, en düşük çekme dayanımı değeriine sahip olan grup ise 53,96 MPa çekme dayanımına sahip olarak, en yüksek elastisite modülü değeriine sahip olan %0,75 oranında nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine grubudur.

Yapı içerisine nano katkı elemanı takviye edildiğinde, çekme dayanımında bir düşüş gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak, yapı içerisine takviye elemanı ilavesiyle birlikte, matris ve takviye elemanı arasında zayıf bağların oluşma ihtimali örnek verilebilir. Ayrıca katkı elemanının yapı içerisinde iyi bir dağılım sergileyememesinden dolayı topaklanma oluşması da örnek verilebilir. Bu iki örneğin dışında, yapı içerisinde gerilme yığılma bölgelerinde oluşabilecek çentik etkisinden dolayı malzemenin dayanım değerlerinde bir düşüş görülebilmektedir.



Şekil 6.3. Yüzde nano katkı oranı – kopma uzaması grafiğı

Şekil 6.3’de yer alan, yüzde nano katkı oranı/yüzde kopma uzaması grafiğı incelendiğinde, epoksi reçine içerisine nano nikel oksit takviyesi gerçekleştirildiğinde, yapının sahip olduğu yüzde kopma uzaması değerlerinde bir düşüş olduğu görülmektedir.

En yüksek yüzde kopma uzaması değeriine sahip olan numune grubu %5,76 kopma uzaması değeriyle birlikte nano katkısız epoksi reçine grubudur.

Ağırlıkça %0,75 oranında nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine grubu; %4,05 kopma uzaması ile en düşük yüzde kopma uzaması değerine, en yüksek elastisite modülü değerine ve en düşük çekme dayanımı değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Grafik üzerindeki sonuçlar incelendiğinde, nano dolgu ilave edilmesi sonucunda malzemelerin gevreklik özelliklerinde bir artış olduğu yorumu yapılabilmektedir.

Çekme testi sonuçlarında saf epoksi numunelerinin en düşük elastisite modülü, en yüksek kopma uzaması ve çekme dayanımı değerlerine sahip olduğu söylenebilmektedir. Ayrıca ağırlıkça %0,75 oranında nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine grubunun ise, en yüksek elastisite modülü ve en düşük yüzde kopma uzaması değeri ve en düşük çekme dayanımı değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

Çekme testi sonuçlarına göre, optimum nano nikel oksit katkı oranının, %0,75 olduğu söylenebilir.

Benzer bir çalışma kapsamında, epoksi reçine içerisine mikro dolguların eklemesiyle saf epoksiye oranla elastisite modülü ve sertlik değerlerinde bir artış görülürken çekme dayanımı değerinde bir düşüş meydana geldiği tespit edilmiştir. Nano boyuttaki Al_2O_3 ve TiO_2 dolguların ilavesiyle birlikte ise, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinde bir azalma meydana gelirken elastisite modülü ve sertlik değerlerinde bir artış meydana gelmiştir [44]. Çalışma kapsamında ise benzer şekilde elastisite modülü değerinde artış görülürken kopma uzaması ve çekme dayanımı değerlerinde bir azalma söz konusudur. Gerçekleştirilen çalışmadan farklı olarak çalışma kapsamında, numunelere sertlik testi uygulandığında anlamlı bir sonuç elde edilememiştir.

Bu çalışmaya benzer şekilde, daha önce yapılan başka bir çalışmada üç farklı yapıda Al_2O_3 epoksi reçine içerisine ilave edilerek kompozit bir malzeme yapısı oluşturulmuştur. İlave edilen nano katkıların yapısı, küçük nano çubuklar, büyük nano çubuklar ve küresel nano katkılar olarak tanımlanmıştır. Büyük nano çubukların yapıya ilavesiyle yapının özelliklerindeki artış, küçük nano çubukların ilavesiyle elde edilen artıştan daha iyi olsa da küresel yapıdaki nano alümina yapısına göre daha kötüdür. Yapı içerisine gerçekleştirilen ilaveler sonucunda, bizim çalışmamıza benzer şekilde çekme dayanımı değerinde bir düşüş meydana gelirken, elastisite modülü değerinde bir artış tespit edilmiştir [54].

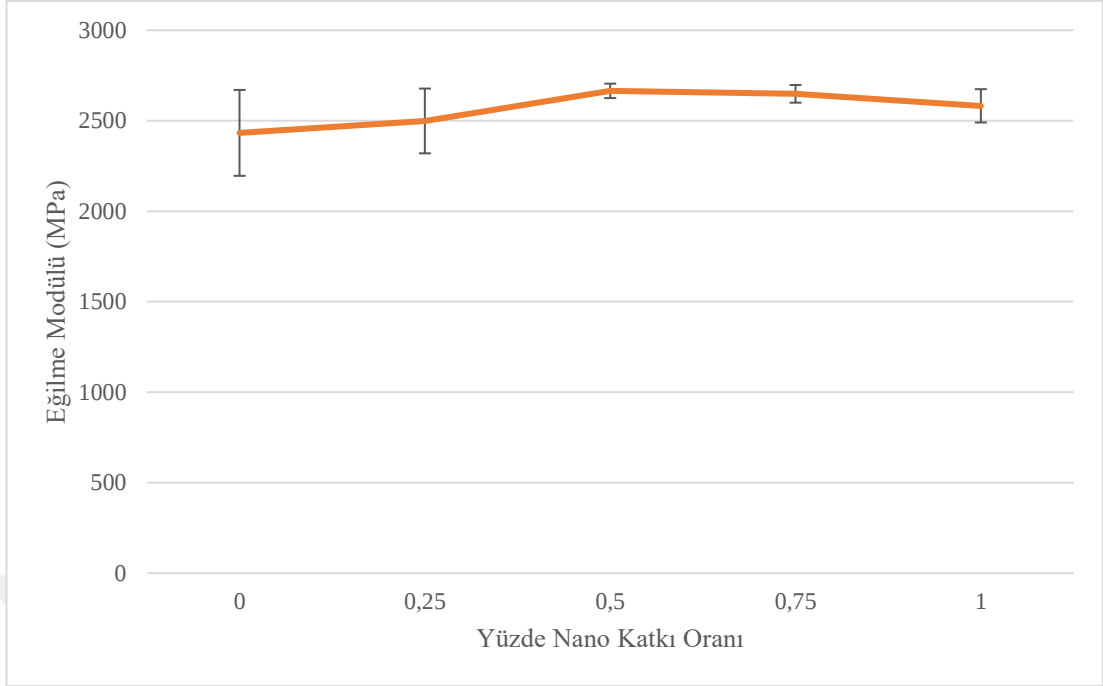
6.2. Üç Noktalı Eğme Testi Sonuçları

Tez çalışmaları kapsamında, hazırlanan eğme numuneleri, eğilme modülü ve eğilme dayanımı değerlerinin elde edilmesi amacıyla, üç noktalı eğme testi uygulanmıştır. Bu test sonucunda, yapı içerisine takviye edilen nano boyuttaki nikel oksitin mekanik özelliklere hangi oranda etki ettiğini belirlenmiştir.

Tablo 6.2’de üç noktalı eğme testi sonucunda elde edilen eğilme modülü ve eğilme dayanımı değerleri ve standart sapma verileri verilmiştir.

Tablo 6.2. Üç noktalı eğme testi sonucunda elde edilen nano nikel oksit ilavesinin malzemenin eğilme dayanımı özelliklerine etkisi

Numune	Eğilme Modülü (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)
Saf epoksi reçine	2432,86 ± 237,35	79,48 ± 8,92
%0,25 nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine	2498,71 ± 178,96	80,48 ± 5,96
%0,50 nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine	2664,97 ± 39,88	87,90 ± 2,77
%0,75 nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine	2648,65 ± 48,97	84,78 ± 2,20
%1 nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine	2582,27 ± 92,10	83,81 ± 4,46



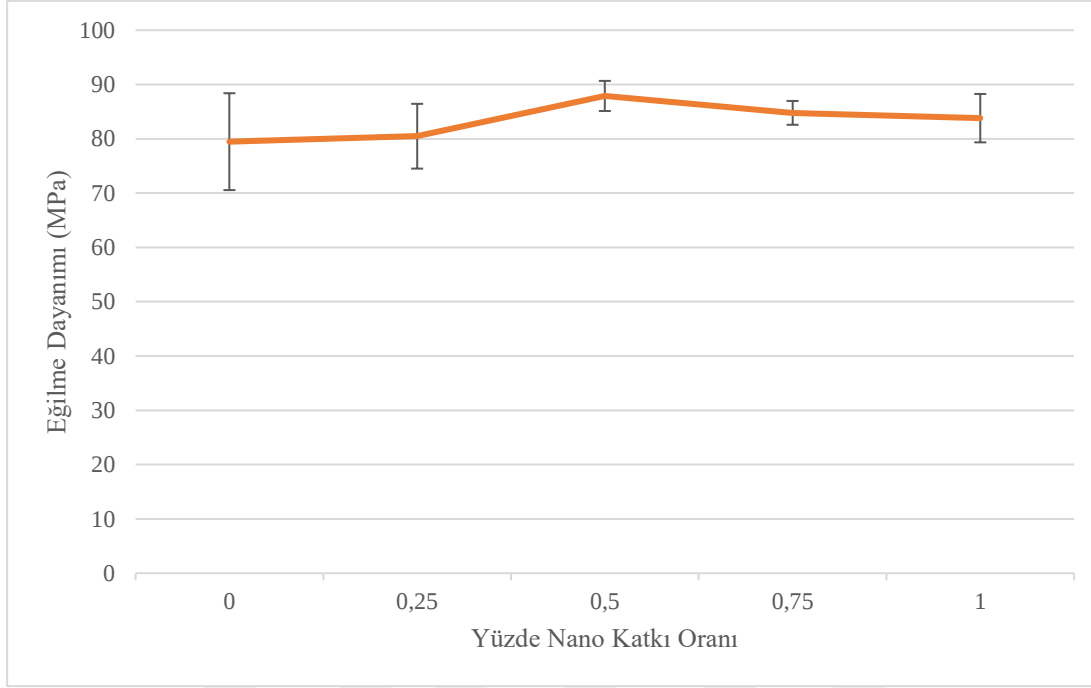
Şekil 6.4. Yüzde nano katkı oranı – eğilme modülü grafiği

Şekil 6.4’de bulunan yüzde nano katkı oranı/eğilme modülü grafiği incelendiğinde, epoksi reçine içerisine nano nikel oksit katkısının gerçekleştirilmesi ve bu katkı oranının yapı içerisinde artırılması sonucunda, eğilme modülü değerlerinde bir artış eğilimi görüldüğünü söyleyebiliriz.

İçerisinde nano boyutta nikel oksit ilavesi bulunmayan saf epoksi reçine, 2432,85 MPa eğilme modülü değeriyle birlikte, en düşük eğilme modülü değerine sahip olan deney numunesidir.

Buna karşın, en yüksek eğilme modülü değerine sahip olan grup ise 2664,97 MPa eğilme modülü değerine sahip olan %0,50 oranında nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine grubudur.

Ağırlıkça %0,50 nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine grubundan sonraki takviye elemanı katkı oranlarında eğilme modülü değerlerinde bir düşüş başlamaktadır.



Şekil 6.5. Yüzde nano katkı oranı – eğilme dayanımı grafiği

Şekil 6.5’de bulunan grafik incelendiğinde, epoksi reçine içerisine nano nikel oksit katkısının gerçekleştirilmesi ve bu katkı oranının yapı içerisinde arttırılması sonucunda, eğilme dayanımı değerlerinde bir artış eğilimi görüldüğünü söyleyebiliriz.

Saf epoksi reçine, 79,48 MPa eğilme dayanımı değeriyle birlikte, en düşük eğilme dayanımı değerine sahip olan deney grubudur.

Buna karşın, en yüksek eğilme dayanımı değerine sahip olan numune grubu ise 87,89 MPa eğilme modülü değerine sahip olan %0,50 oranında nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine grubudur. Ağırlıkça %0,50 nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine grubundan sonraki takviye elemanı katkı oranlarında eğilme dayanımı değerlerinde bir düşüş başlamaktadır.

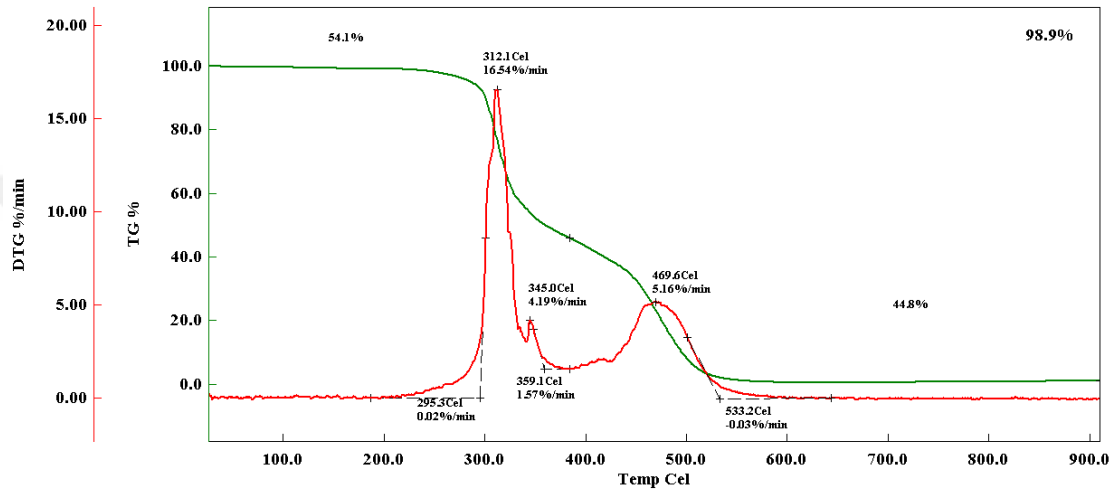
Üç noktalı eğme testinin sonuçları incelendiğinde, eğilme modülü ve eğilme dayanımı değerleri baz alınır, optimum nano nikel oksit katkı oranı ağırlıkça %0,50 olduğu söylenebilir.

Literatürde yapılan benzer bir çalışmada, epoksi reçine yapısı içerisine nano boyutta Al_2O_3 ve TiO_2 ilavesiyle birlikte eğme dayanımı değerinde azalma görülürken eğme

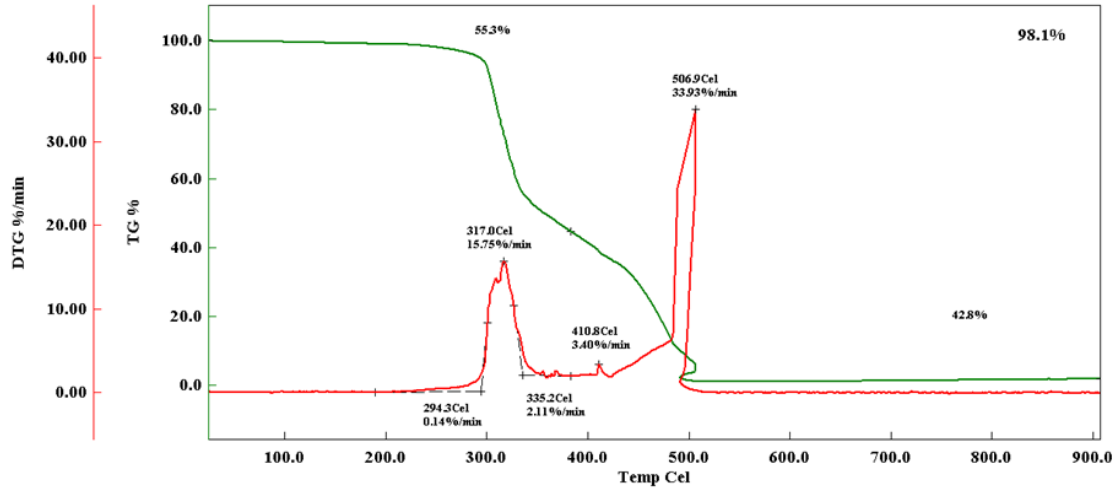
modülü değeriinde artış meydana gelmiştir [44]. Çalışmadan farklı olarak, yapılan çalışma kapsamında eğme dayanımı değeriinde de bir artış meydana gelmiştir.

6.3. Termogravimetrik Analiz Sonuçları

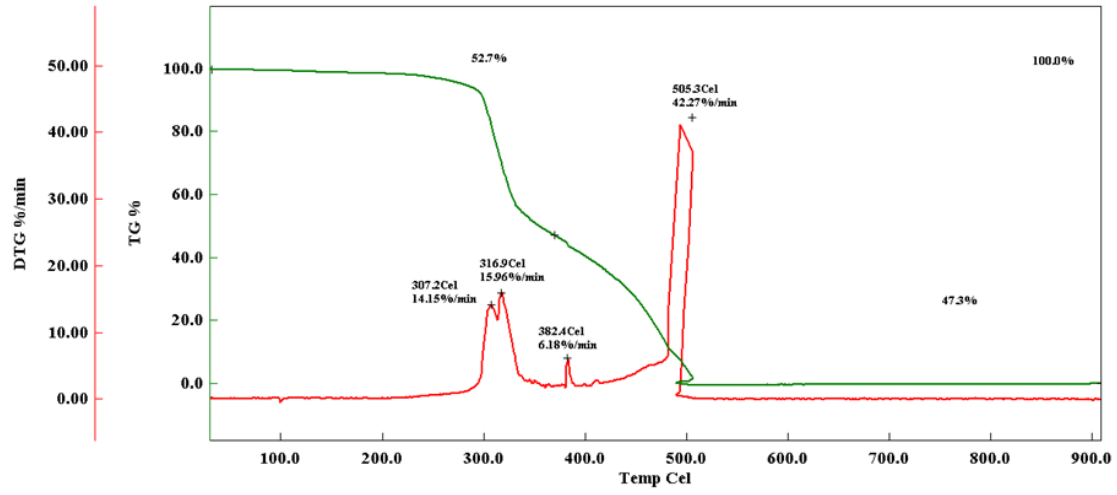
Termogravimetrik analiz ile, malzemelerin ağırlık kaybına uğradığı sıcaklık saptanmaktadır. Ağırlık kaybının görülmeyişi sıcaklık aralığı ise malzemenin kararlı olduğı durumu temsil etmektedir. Elde edilen sonuçlar Şekil 6.6-10’da verilmiştir.



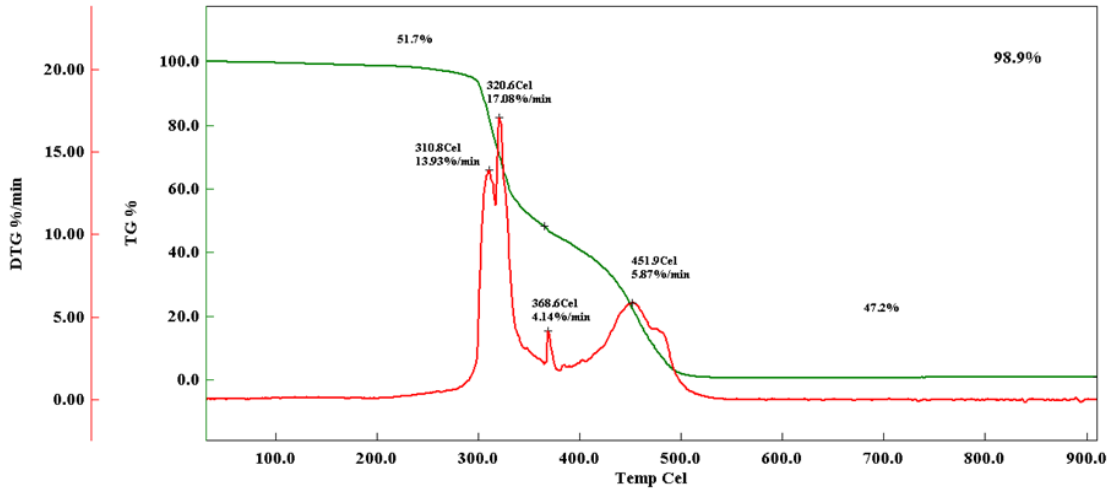
Şekil 6.6. Saf epoksi reçineye ait TGA sonuçları



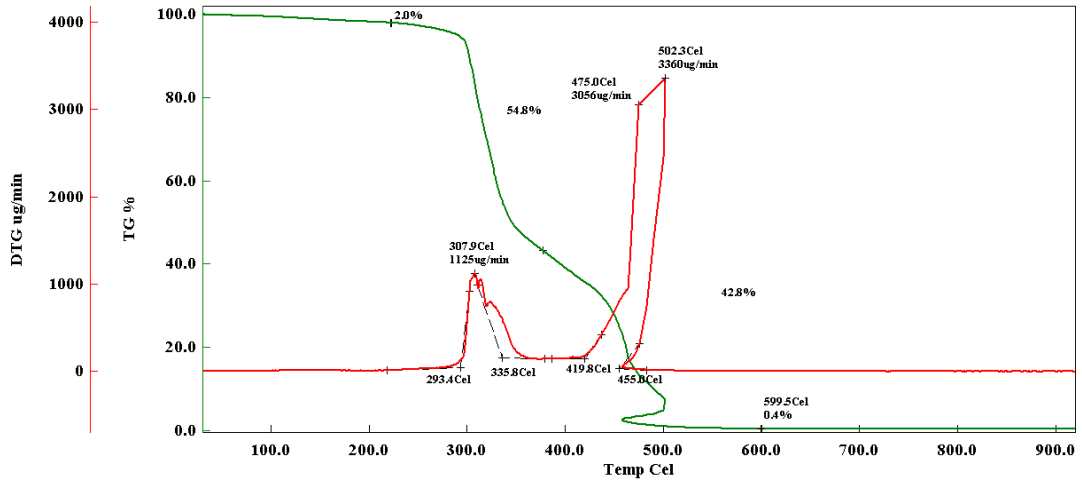
Şekil 6.7. Ağırlıkça %0,25 NiO bulunan epoksi reçine matrisli nanokompozit malzemeye ait TGA sonuçları



Şekil 6.8. Ağırlıkça %0,50 NiO bulunan epoksi reçine matrisli nanokompozit malzemeye ait TGA sonuçları



Şekil 6.9. Ağırlıkça %0,75 NiO bulunan epoksi reçine matrisli nanokompozit malzemeye ait TGA sonuçları



Şekil 6.10. Ağırlıkça %1 NiO bulunan epoksi reçine matrisli nanokompozit malzemeye ait TGA sonuçları

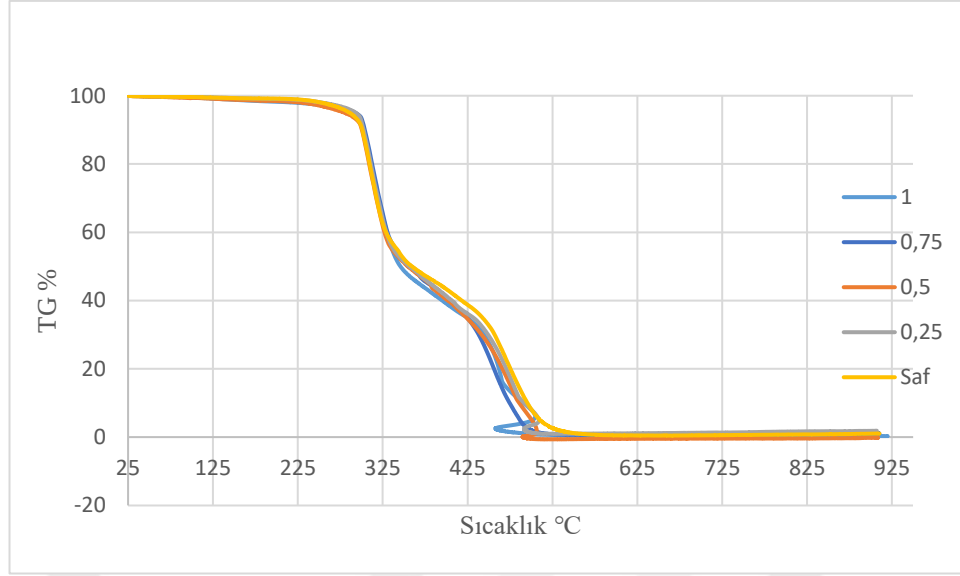
Grafik üzerinde mevcut, yeşil renkle belirtilen çizgi, sıcaklık ve ağırlık veya kütle yüzdesi arasında çizilen çizgi olarak tanımlanmaktadır ve termal bozunma eğrisi olarak isimlendirilmektedir. Bu çizgiyi inceleyerek, malzemenin ağırlık kaybına uğradığı sıcaklığı tespit edebiliriz. Burada tespit edilen kayıp, malzemenin buharlaştığını ya da bozunmaya uğradığını göstermektedir.

Termogravimetrik analizde, gerçekleşen ağırlık değişimleri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kaydedilebilir ancak bunun yanında dW/dT olarak da kaydedilebilir. Grafik üzerinde kırmızı renk ile gösterilen çizgi bu değeri belirtmektedir ve diferansiyal termal gravimetre analizi olarak bilinmektedir. Bu analize göre, ağırlık kaybı hızı, sıcaklık ya da süre parametrelerinin bir fonksiyonu olarak kaydedilmektedir. Bu analizle birlikte, ağırlık kaybının en fazla görüldüğü sıcaklığın belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Yapı içerisine farklı oranlarda nano boyutta nikel oksit ilave edilerek hazırlanan epoksi reçine matrisli nanokompozit malzemenin TGA sonucunda elde edilen grafikleri verilmiştir. Tablo 6.3'te gerçekleştirilen termogravimetrik analizleri sonucunda elde edilen, numunelerin bozunma başlangıç sıcaklıkları ve bozunma bitiş sıcaklıkları verilmiştir.

Tablo 6.3. Numunelerin TGA sonuçları

Numune Grubu	Bozunma Başlangıç Sıcaklığı (°C)	Bozunma Bitiş Sıcaklığı (°C)
Saf epoksi reçine malzeme	295.3	533
Ağırlıkça %0,25 NiO bulunan epoksi reçine matrisli nanokompozit malzeme	294.3	506.9
Ağırlıkça %0,50 NiO bulunan epoksi reçine matrisli nanokompozit malzeme	307.2	505.3
Ağırlıkça %0,75 NiO bulunan epoksi reçine matrisli nanokompozit malzeme	310.8	451.3
Ağırlıkça %1 NiO bulunan epoksi reçine matrisli nanokompozit malzeme	307.9	502.3



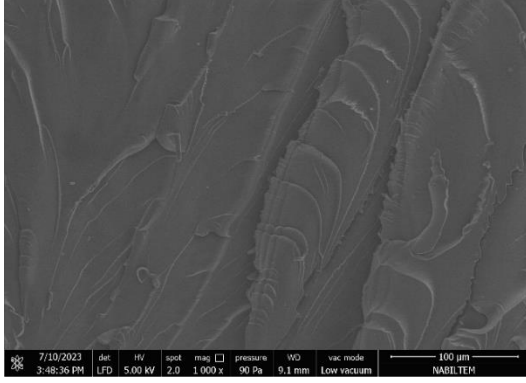
Şekil 6.11. Kompozisyonlara göre termogravimetrik eğriler

Grafikler ve Tablo 6.3'te belirtilen değerlere göre, yapı içerisine nano boyutta nikel oksit ilavesinin gerçekleştirilmesinin, malzemenin bozunmaya başlama sıcaklığında bir artışa neden olduğu yorumu yapılabilir. Literatürdeki benzer çalışmalar ışığında veriler değerlendirildiğinde yapı içerisine nano boyutta nikel oksit ilavesinin gerçekleştirilmesi sonucu bozunma sıcaklığının artışı, alev geciktirici özelliklerinde de bir iyileşmeye neden olduğu düşünülmektedir.

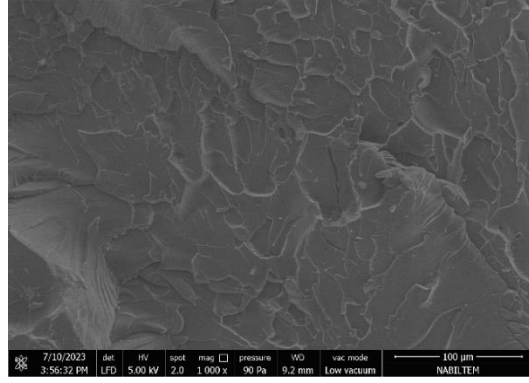
Ağırlık kaybının en fazla görüldüğü pik, en yüksek sıcaklık değeri olan 310.8 değerine ve en yüksek bozunma hızına 17.8 %/dk değerine sahip olan ağırlıkça %0,75 NiO bulunan epoksi reçine matrisli nanokompozit malzemeye ait olan TGA grafiğinde görülmüştür. Bu bağlamda, yapı içerisine nano nikel oksit katkısının gerçekleştirilmesi, malzemenin ısı kararlılığında bir iyileşmeye neden olduğu yorumu yapılabilmektedir.

6.4. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Sonuçları

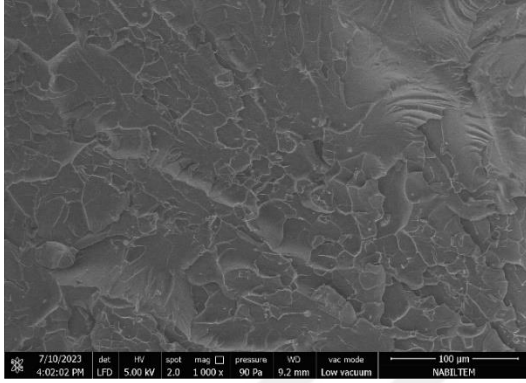
Mikroyapıların incelenmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Kırık yüzeyden SEM görüntüleri alınarak kırılma tipi, malzemenin mikroyapısında gerçekleşen tane yapısıyla alakalı hususlar incelenmiştir.



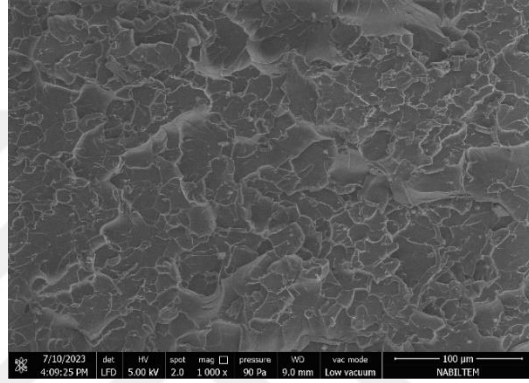
(a)



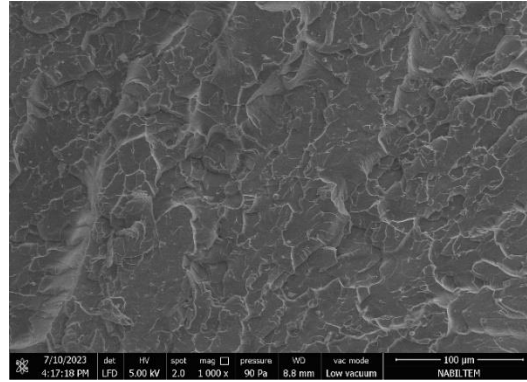
(b)



(c)



(d)



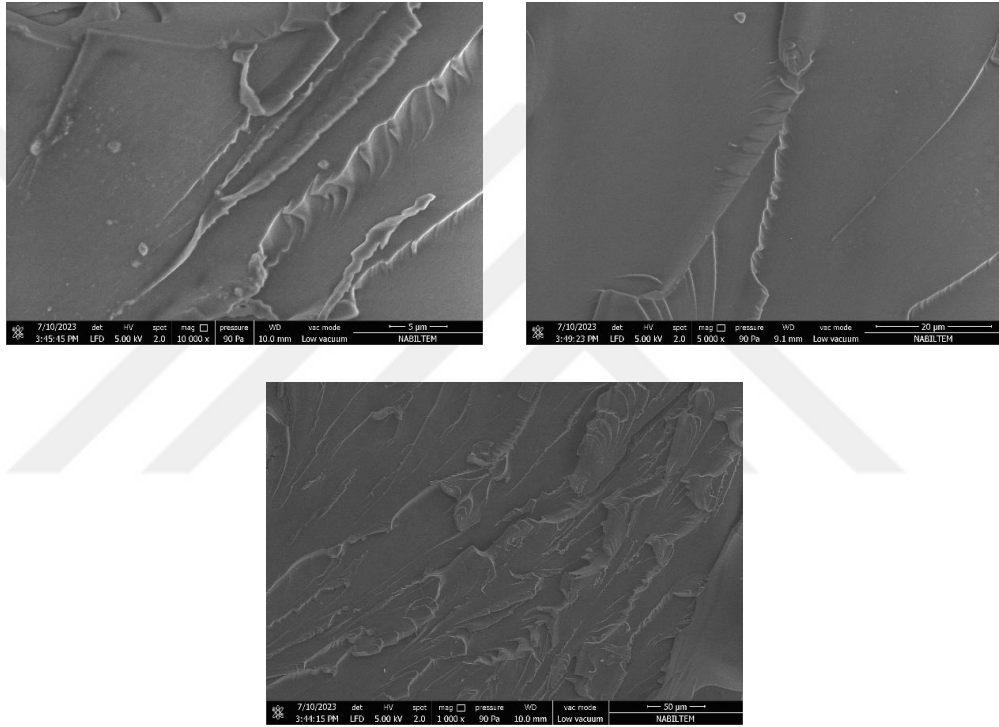
(e)

Şekil 6.12. (a) Saf epoksi reçine, (b) ağırlıkça %0,25 nano NiO katkılı epoksi reçine, (c) ağırlıkça %0,50 nano NiO katkılı epoksi reçine, (d) ağırlıkça %0,75 nano NiO katkılı epoksi reçine, (e) ağırlıkça %1 nano NiO katkılı epoksi reçineye ait SEM görüntüleri

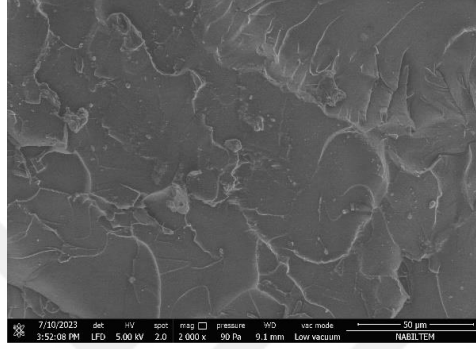
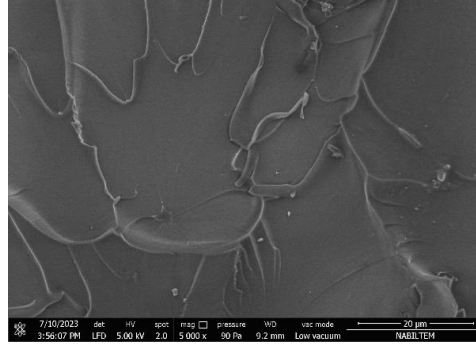
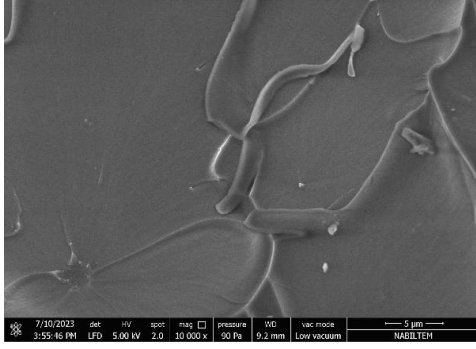
Şekil 6.12'deki SEM görüntülerinde görüldüğü gibi, epoksi reçine yapısı içerisine nano boyutta nikel oksitin ilave edilmesiyle birlikte, tane boyutlarında küçülme meydana gelmiştir ve taneler beşgen şeklini almaya başlamışlardır. Tane boyutlarında küçülmeye birlikte, tane sınırları artmış ve dislokasyonlar için engel

oluşumunun artmasına neden olmuştur. Yapı içerisinde fazla miktarda dislokasyonun hareketsiz kalması sonucunda, malzemenin dayanım özelliklerinde bir artış meydana gelmiştir.

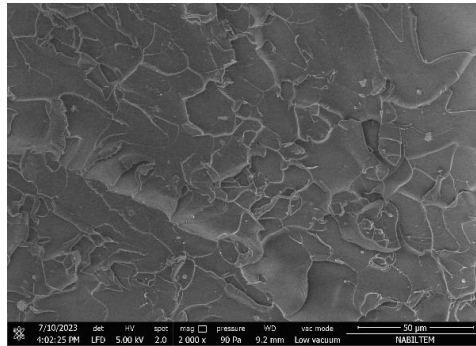
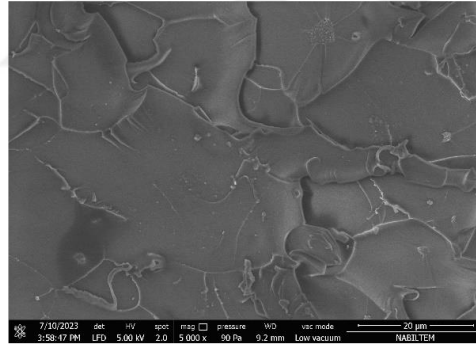
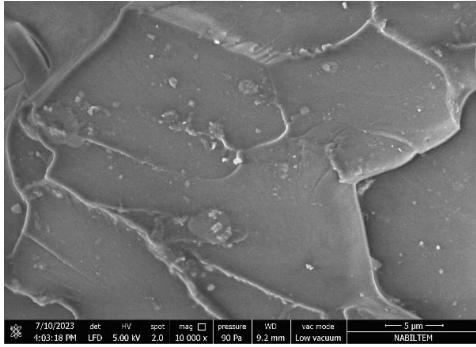
Kırılma yüzeylerinden alınan SEM görüntülerinde malzemenin gevrek kırılma gösterdiğini söyleyebiliriz. Görüntülerden yola çıkarak kırılma düzlemine dik bağların kopması sonucu oluşan kırılma türü olarak bilinen klivaj kırılma gerçekleştiği yorumu yapılabilir. Şekil 6.13-17’de sem görüntüleri verilmiştir.



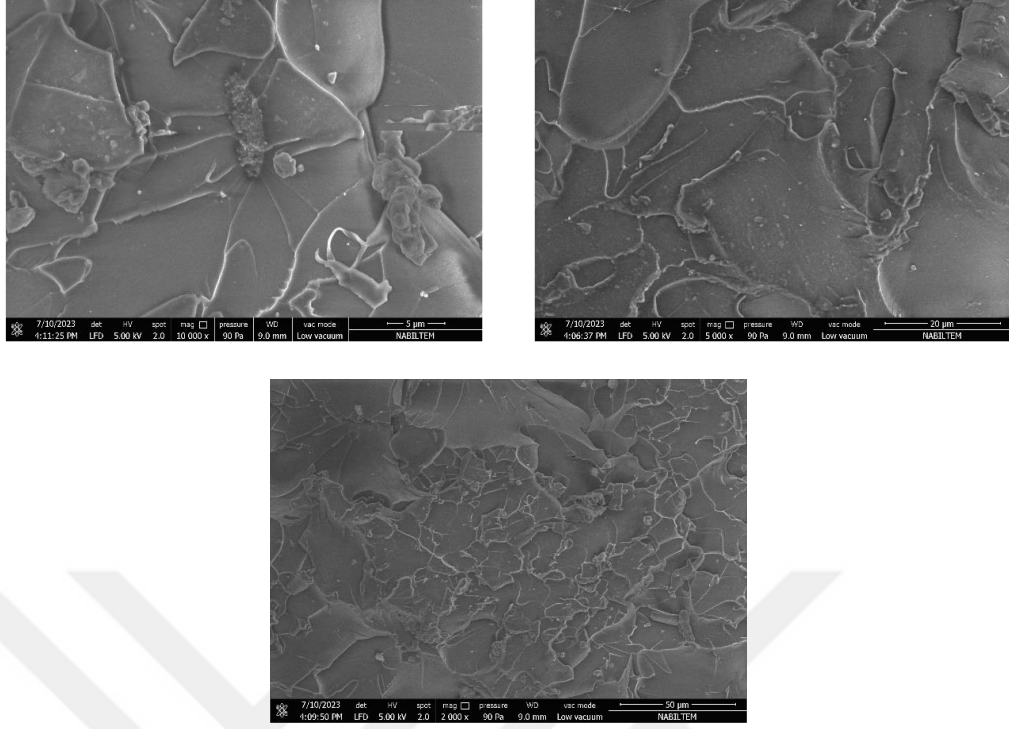
Şekil 6.13. Saf epoksi reçine grubuna farklı büyütme uygulanarak çekilen SEM görüntüleri



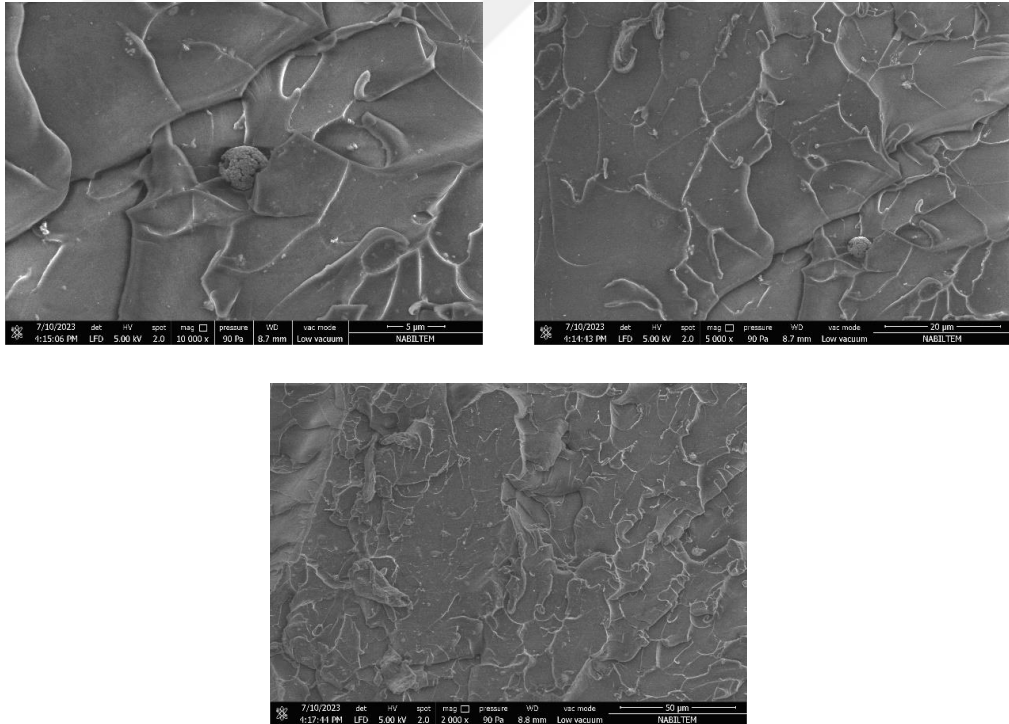
Şekil 6.14. Ağırlıkça %0,25 oranında nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine matrisli numune grubuna farklı büyütme uygulanarak çekilen SEM görüntüleri



Şekil 6.15. Ağırlıkça %0,50 oranında nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine matrisli numune grubuna farklı büyütme uygulanarak çekilen SEM görüntüleri



Şekil 6.16. Ağırlıkça %0,75 oranında nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine matrisli numune grubuna farklı büyütme uygulanarak çekilen SEM görüntüleri



Şekil 6.17. Ağırlıkça %1 oranında nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine matrisli numune grubuna farklı büyütme uygulanarak çekilen SEM görüntüleri

Farklı kompozisyonlardaki numunelerin, farklı büyütme seviyelerinde alınmış SEM görüntüleri mevcuttur. Görüntüler incelendiğinde, yapı içerisindeki nano seviyedeki nikel oksitin ağırlıkça %1 katkı oranına kadar yapı içerisinde iyi bir dağılım gösterdiği söylenebilir. Ancak Şekil 6.17’de görüldüğü gibi ağırlıkça %1 oranında nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine matrisli numunenin SEM görüntüleri incelendiğinde yapı içerisinde topaklanmalar görülmüştür.



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, epoksi reçine içerisine farklı oranlarda nano boyutta nikel oksit takviyeleri gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkça %0, %0,25, %0,50, %0,75 ve %1 oranında nano boyutta nikel oksit, epoksi reçine içerisine ilave edilerek 5 farklı kompozisyona sahip numuneler elde edilmiştir. Üretim aşamasının gerçekleştirilmesinin ardından ise, yapının mekanik, ısı ve mikroyapısal özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

Çekme testi sonuçları incelendiğinde, epoksi reçine içerisine nano nikel oksit katkısının eklenmesiyle ve katkı oranının artırılması sonucunda, elastisite modülünde bir artış eğilimi olduğunu söylemek mümkündür. Test sonucunda elde edilen elastisite modülü değerleri irdelendiğinde, en düşük elastisite modülüne sahip numune grubunun saf epoksi reçine grubu olduğu görülmüştür. En yüksek elastisite modülü değerine sahip olan numune grubuna bakıldığında ise, içerisinde ağırlıkça %0,75 oranında nano boyutta nikel oksit bulunan epoksi reçine matrisli numune grubu olduğu görülmüştür. Saf epoksiye göre, yapı içerisinde ağırlıkça %0,75 nano boyutta nikel oksit ilavesi yapılmış epoksi reçine matrisli yapının elastisite modülünde yaklaşık olarak %7 oranında bir artış gözlenmiştir. Böylelikle dolgu oranının artırılmasıyla malzeme, gevreklik ve rijitlik özelliklerinde artış eğilimi olduğunu göstermektedir olarak yorumlanabilir.

Epoksi reçine içerisine nano nikel oksit katkısının eklenen katkı oranının artırılması sonucunda, çekme dayanımı değerinde bir düşüş eğilimi olduğu söylenebilir. Sonuçlar incelendiğinde, en yüksek çekme dayanımı değerine sahip olan numune grubunun içerisinde saf epoksi reçine grubu olduğu görülmüştür. Bunun yanında en düşük çekme dayanımı değerine sahip olan malzeme grubunun ise, en yüksek elastisite modülü değerine sahip olan %0,75 oranında nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine grubu olduğu görülmüştür. Çekme dayanım değeri, epoksi reçine yapısı içerisine nano nikel oksit ilavesiyle birlikte en fazla düşüş gösterdiği yapı kompozisyonu olan %0,75 oranında nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine grubunda, saf epoksi reçine yapısına göre yaklaşık olarak %17 kadar bir düşüş yaşanmıştır. Çekme dayanımında düşüş yaşanmasını, yapı içerisine takviye elemanı ilavesi gerçekleştirilmesi sonucunda yapıda zayıf bağların oluşturulabileceğine, katkı elemanının yapı içerisinde homojen bir dağılım gerçekleştirilememesinden dolayı

olabileceğine ve yapı içerisinde çentik etkisi oluşabileceğine gibi nedenler söylenebilir.

Epoksi reçine içerisine nano nikel oksit katkısının eklenmesiyle ve katkı oranının arttırılması sonucunda, yapının sahip olduğu yüzde kopma uzaması değerinde bir düşüş eğilimi olduğu söylenebilir. En yüksek yüzde kopma uzaması değerine sahip olan grup saf epoksi reçine grubudur. En düşük yüzde kopma uzaması değerine sahip olan grup ise, en yüksek elastisite modülü değerine ve en düşük çekme dayanımı değerlerine sahip olan ağırlıkça %0,75 oranında nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine grubudur. Bu iki grup arasında yaklaşık olarak %42 oranında bir düşüş meydana gelmiştir. Böylece, malzemelerin sahip olduğu gevreklik özelliklerinde bir artış görüldüğü yorumu yapılabilir.

Çekme testi sonuçları genel olarak incelendiğinde, saf epoksi reçine grubuna ait numunelerin en düşük elastisite modülü ve en yüksek kopma uzaması ve çekme dayanımı değerlerine sahip olduğu söylenebilir. Ayrıca ağırlıkça %0,75 oranında nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine grubunun ise, en yüksek elastisite modülü ve en düşük yüzde kopma uzaması değeri ve en düşük çekme dayanımı değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Çekme testi sonuçlarına göre, optimum nano nikel oksit katkı oranının, %0,75 olduğu söylenebilir.

Üç noktalı eğme testi sonuçları incelendiğinde, epoksi reçine matris içerisine nano nikel oksit katkısının gerçekleştirilmesi ve bu katkı oranının yapı içerisinde arttırılması sonucunda, eğilme modülü değerlerinde bir artış eğilimi görüldüğü söylenebilir. İçerisinde nano boyutta nikel oksit ilavesi bulunmayan yani %0 nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine grubu, en düşük eğilme modülü değerine sahip olan gruptur. Buna karşın, en yüksek eğilme modülü değerine sahip olan grup ise yapı içerisinde ağırlıkça %0,50 oranında nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine grubudur. Bu iki grup arasında yaklaşık olarak %9 oranında bir artış mevcuttur. Ancak ağırlıkça %0,50 nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine grubundan sonraki takviye elemanı katkı oranlarında eğilme modülü değerlerinde bir düşüş başlamaktadır.

Epoksi reçine içerisine nano nikel oksit katkısının gerçekleştirilmesi ve bu katkı oranının yapı içerisinde arttırılması sonucunda, eğilme dayanımı değerlerinde bir artış eğilimi görüldüğünü söyleyebiliriz. Saf epoksi reçine grubu, en düşük eğilme

dayanımı değerine sahip olan gruptur. Buna karşın, en yüksek eğilme dayanımı değerine sahip olan grup ise, %0,50 oranında nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine grubudur. Bu iki grup arasında eğilme dayanımı değerlerinde yaklaşık olarak %10 oranında bir artış meydana gelmiştir. Ancak eğme modülünde görüldüğü gibi, eğilme dayanımı değerlerinde de, ağırlıkça % 0,50 nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine grubundan sonraki takviye elemanı katkı oranlarında eğilme dayanımı değerlerinde bir düşüş başlamaktadır.

Üç noktalı eğme testinin sonuçları incelendiğinde, eğilme modülü ve eğilme dayanımı değerleri baz alınır, optimum nano nikel oksit katkı oranı ağırlıkça %0,50 olduğu görülmüştür.

Termogravimetrik analiz sonuçlarına göre, epoksi reçine yapısı içerisine nano boyutta nikel oksit ilavesiyle birlikte, malzemenin bozunma başlangıç sıcaklığında bir artışa neden olduğu görülmektedir. Kompozisyonlar ve bozunma başlangıç sıcaklıkları karşılaştırıldığında yapı içerisinde ağırlıkça %0,75 NiO bulunan numune grubunun en yüksek bozunma başlangıç sıcaklığına sahip olduğu görülmüştür. Bu bağlamda, malzemelerin termal özellikleri irdelendiğinde, epoksi reçine matrisi içerisine gerçekleştirilen katkı elemanı oranının optimum değerinin ağırlıkça %0,75 NiO olduğu görülmüştür. Böylece, bu kompozisyonun ısı kararlılığında diğer kompozisyonlara göre daha fazla iyileşme görüldüğü söylenebilir.

Numunelerin kırılma yüzeylerinden elde edilen SEM kesit görüntüleri ile mikroyapı incelendiğinde, yapı içerisine nano boyutta nikel oksit ilavesi ve bu oranın artırılmasıyla birlikte, yapı içerisindeki tanelerin küçülme eğilimi gösterdiği ve böylece dislokasyonların yığılması sonucunda da yapının mukavemet özelliklerinde bir artış meydana geldiği yorumu yapılabilir. Bunun yanında kırılma şekilleri incelendiğinde, çekme testi sonuçlarına da paralel olarak malzemelerin gevreklik özelliklerinde bir artış gösterdiği ve kırılma esnasında gevrek kırılma gösterdiği yorumunu da yapmak mümkündür.

Daha iyi sonuçlar elde edebilmek için aşağıdaki öneriler sunulmuştur;

Nanokompozit malzemeleri üretmek amacıyla gerçekleştirilen mekanik üretim yöntemleri sınırlıdır. Bu nedenle kimyasal yüzey geliştirme ve kaplama işlemleri üzerinde de çalışmaların yapılmasıyla daha iyi mekanik özelliklere sahip kompozit malzemelerin elde edilmesi mümkün olabilir.

Farklı karıştırma koşullarının denenmesi sonucunda, epoksi reçine içerisine gerçekleştirilen nano katkının daha iyi karışması sonucunda daha homojen bir yapı eldesiyle, özelliklerde bir artış sağlanabilir. Çalışma kapsamında epoksi içerisine ağırlıkça %1 oranında nano boyutta nikel oksit ilavesi sonucunda elde edilen mekanik özelliklerde kendinden önceki kompozisyona göre düşüş gözlenmiştir. Bunun nedeni, yüksek bir katkı oranı olabileceğidir.

Yapı içerisine, uygun yardımcı ajanların ilavesiyle birlikte yapının mekanik özelliklerinde bir artış elde edilmesi söz konusu olabilir.



KAYNAKLAR

- [1] K. Onaran, *Malzeme Bilimi*. Bilim ve Teknik Kitabevi, 1999.
- [2] A. İ. Kaya, “Kompozit Malzemeler ve Özellikleri,” *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, vol. 29, pp. 38–45, 2016.
- [3] A. Kalemtaş, “Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler,” *Bursa: Putech and Composites*, 2015.
- [4] M. K. Egbo, “A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering,” *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 33, no. 8, pp. 557–568, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jksues.2020.07.007.
- [5] Y. Şahin, *Kompozit Malzemelere Giriş*. Ankara: Seçkin Yayıncılık, 2015.
- [6] B. Beşergil, *Kompozitler Temel İlkeler Test Metotları*. Ankara: Gazi Kitabevi, 2016.
- [7] İ. Durgun, “Otomobil Geliştirme Sürecinde El Yatırma Yöntemi İle Kompozit Parça Üretimi,” İzmir, 2013.
- [8] R.-M. Wang, S.-R. Zheng, and Y. Zheng, *Polymer Matrix Composites and Technology*. Elsevier, 2011.
- [9] A. Şeker, “Epoksi Reçine/Sepiyollit Kompozitlerinin Hazırlanması ve Karakterizasyonu,” Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [10] C. Töre, *Kompozit malzeme temelleri polimer matrisli*. TBMMO Makine, 2011.
- [11] S. G. Advani and K.-T. Hsiao, “Introduction to composites and manufacturing processes,” in *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*, Elsevier, 2012, pp. 1–12. doi: 10.1533/9780857096258.1.1.
- [12] M. R. Kessler, “Polymer Matrix Composites: A Perspective for a Special Issue of Polymer Reviews,” *Polymer Reviews*, vol. 52, no. 3, pp. 229–233, Jul. 2012, doi: 10.1080/15583724.2012.708004.
- [13] S. Sharma, *Composite Materials: Mechanics, Manufacturing and Modeling*. CRC Press, 2021.
- [14] M. Kaplan, “Termoplastik Kompozitler için Hibrit İplik Üretimi,” *Tekstil ve Mühendis*, vol. 23, no. 101, pp. 61–79, Mar. 2016, doi: 10.7216/1300759920162310106.
- [15] N. Kaya, “Fındık ve Çeltik Kabukları ve Odun Talaşı İle Takviye Edilmiş Termoset Kompozitlerde Reçine Türünün Fiziksel Özelliklere Etkisi,” *Afyon*

Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering, vol. 17, no. 3, pp. 1076–1087, Dec. 2017, doi: 10.5578/fmbd.66108.

- [16] M. Arıcı, “Parçacık takviyeli epoksi esaslı polimer matrisli kompozit malzemelerin bazı mekanik özelliklerinin incelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü , 2022.
- [17] P. Sharma, H. S. Mali, and A. Dixit, “Mechanical behavior and fracture toughness characterization of high strength fiber reinforced polymer textile composites,” *Iranian Polymer Journal*, vol. 30, no. 2, pp. 193–233, Feb. 2021, doi: 10.1007/s13726-020-00884-8.
- [18] İ. Durgun and O. Vatansever, “VAKUM TORBALAMA YÖNTEMİ İLE KARBON FİBER PARÇA ÜRETİMİ,” İzmir, 2013.
- [19] F. Şen, H. Palancıoğlu, and K. Aldaş, “Polimerik nanokompozitler ve kullanım alanlar,” *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi (elektronik)*, vol. 7, no. 1, pp. 111–118, 2010.
- [20] M. Erdal, H. İpek, and H. S. Şaş, “İleri Kompozit Malzemelerin Reçine Transfer Kalıplama Yöntemiyle Üretiminde Kalıp İçi Reçine Akışının Modellenmesi,” *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, vol. 11, no. 1, pp. 22–23, 2009.
- [21] H. Dinkci, “Vakum Torbalamada Basınç Değişkeninin Karbon Elyaf Matrisli Epoksi Yapılarda Estetik ve Mekanik Özelliklere Etkisi,” *Uluslararası Bilim, Teknoloji Ve Tasarım Dergisi*, vol. 1, no. 1, pp. 1–21, 2020.
- [22] İ. Durgun, “Vakum İnfüzyon Yöntemi İle Kompozit Parça Üretimi,” Bursa, 2014.
- [23] T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, “Termoset Kalıplama İle Üretimde Kalıp Ve Ham Madde Hazırlama,” İn *Plastik Teknolojisi*, Ankara, 2014.
- [24] T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, “Termoset Kalıplama Makinelerinde Üretim Ayarları,” İn *Plastik Teknolojisi*, Ankara, 2012.
- [25] M. Beltrán and A. Marcilla, *Tecnologia de Polimeros. Procesado y propiedades*, 2012.
- [26] H. Ateş, “NANO PARÇACIKLAR VE NANO TELLER,” *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, vol. 3, no. 1, pp. 437–442, 2015.
- [27] T. Baykara, V. Günay, and E. Musluoğlu, *Nanoteknoloji ve nano-malzeme süreçleri*. Tübitak MAM, 2010.
- [28] A. Kurt and H. Çelebi, “Selüloz Nanowhiskey Esaslı Polimer Nanokompozitlerin Hazırlanması ve Mekanik-Termal Özelliklerinin Geliştirilmesi,” Çanakkale, 2012.

- [29] H. Ateş and E. Bahçeci, “Nano Malzemeler İçin Üretim Yöntemleri,” *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, vol. 3, no. 2, pp. 483–499, 2015.
- [30] S. Kathirvelu, “Nanotechnology applications in textiles.,” *Indian J Sci Technol*, vol. 1, no. 5, pp. 1–10, Oct. 2008, doi: 10.17485/ijst/2008/v1i5.14.
- [31] P. M. Ajayan, L. S. Schadler, and P. V. Braun, Eds., *Nanocomposite Science and Technology*. Wiley, 2003. doi: 10.1002/3527602127.
- [32] B. Chen, “Polymer–clay nanocomposites: an overview with emphasis on interaction mechanisms,” *British Ceramic Transactions*, vol. 103, no. 6, pp. 241–249, Dec. 2004, doi: 10.1179/096797804X4592.
- [33] A. Brody, “Nano, Nano” Food Packaging Technology-Packaging,” *Food Technology-Chicago*, vol. 57, no. 12, pp. 52–54, 2003.
- [34] A. D. Erem and G. Özcan, “Polimer Esaslı Nanokompozitler ve Tekstil Uygulamaları,” *Tekstil ve Mühendis*, vol. 20, pp. 36–47, 2013, doi: 10.7216/130075992013208905.
- [35] D. D. L. Chung, *Composite Materials Science and Applications*. London: Springer London, 2010. doi: 10.1007/978-1-84882-831-5.
- [36] S. Mazumdar, *Composites Manufacturing*. CRC Press, 2001. doi: 10.1201/9781420041989.
- [37] A. Navidfar, A. Sancak, K. B. Yildirim, and L. Trabzon, “A Study on Polyurethane Hybrid Nanocomposite Foams Reinforced with Multiwalled Carbon Nanotubes and Silica Nanoparticles,” *Polym Plast Technol Eng*, vol. 57, no. 14, pp. 1463–1473, Sep. 2018, doi: 10.1080/03602559.2017.1410834.
- [38] A. K. Kulshreshtha and C. Vasile, *Handbook of polymer blends and composites*. iSmithers Rapra Publishing, 2002.
- [39] M. Karadurmuş, “Epoksi reçine ile hazırlanan kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi,” Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2017.
- [40] R. C. Herdman, *Saving Energy in U.S. Transportation*. Washington, DC: Office of Technology Assessment, 1994.
- [41] S. Jahanmir, *Friction and Wear of Ceramics*. CRC Press, 1993.
- [42] K. T. ÇINAR and M. EKREM, “Nanoparçacık Takviyeli Epoksi Nanokompozitlerin Eğilme Davranışları,” *European Journal of Science and Technology*, Nov. 2021, doi: 10.31590/ejosat.1015227.
- [43] G. Demircan, “Al₂O₃ nanopartikül katkılı aramid elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri,” Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.

- [44] İ. Özsoy, “Mikro ve nano dolgulu epoksi kompozitlerin tribolojik ve mekanik özelliklerinin incelenmesi ve modellenmesi,” Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.
- [45] S. Aydın, “Nanopartiküllerin metal yapıştırıcılar üzerindeki etkilerinin araştırılması,” *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 36, no. 3, pp. 1289–1302, May 2021, doi: 10.17341/gazimmfd.687718.
- [46] M. Ekrem, “Hekzagonal Bor Nitrür Nanoplate-Nano Ag/Epoksi Kompozitler: Üretimi, Mekanik ve Termal Özellikleri,” *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, Sep. 2019, doi: 10.31202/ecjse.559083.
- [47] C. B. Ng, B. J. Ash, L. S. Schadler, and R. W. Siegel, “A Study of the Mechanical and Permeability Properties of Nano- and Micron-Tio₂ Filled Epoxy Composites,” *Advanced Composites Letters*, vol. 10, no. 3, May 2001, doi: 10.1177/096369350101000301.
- [48] Y. Özdemir, N. Ataberk, and M. Ekrem, “Nano Parçacık Katkılı Epoksi Bazlı Yapıştırıcıların Havacılık Uygulamalarında Kullanılması İçin Mekanik Ve Termal Özelliklerinin İncelenmesi,” İzmir, 2021.
- [49] P. Bozkurt, “Epoksi reçine/çar kompozitlerinin hazırlanması ve karakterizasyonu,” Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.
- [50] F. Işık, “Nanocomposites based on blends of polyethylene,” Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
- [51] A. Yıldız, “Bor katkılı epoksi reçineli termoset kompozit malzemelerin geliştirilmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2020.
- [52] H. Y. Ağa, “Delik içeren grafen katkılı karbon/epoksi nanokompozit plakaların mekanik özellikleri ve hasar analizi,” Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2023.
- [53] A. Akay, “Daha Yakın Olmak İçin: Elektron Mikroskopları,” <http://www.acikbilim.com/2014/02/dosyalar/daha-yakin-olmak-icin-elektron-mikroskoplari-2.html>, 2014.
- [54] V. Verma, A. H. M. Sayyed, C. Sharma, and D. K. Shukla, “Tensile and fracture properties of epoxy alumina composite: role of particle size and morphology,” *Journal of Polymer Research*, vol. 27, no. 12, p. 388, Dec. 2020, doi: 10.1007/s10965-020-02359-z.

ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2015 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden 2019 yılında mezun oldu. 2020 yılında Sakarya Üniversitesinde Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2022 yılında Yalova Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2022 yılından beri Yalova Üniversitesinde Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programında eğitimini sürdürmektedir.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

D. Kılıçgedik, M. Bingöl, “Nano Boyutta Toz Katkılı Epoksi Reçine Malzemenin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, 1.Bilisel Uluslararası Dünya Bilim ve Araştırma Kongresi, Temmuz 2023, İstanbul.