



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

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

**Si₃N₄ KATKILI EPOKSİ NANOKOMPOZİTLERİN HAZIRLANMASI VE
KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SENA BALTACI

DANIŞMAN: Dr.Öğr.Üyesi MAHMUT BİNGÖL

**YALOVA
OCAK 2025**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

Si_3N_4 KATKILI EPOKSİ NANOKOMPOZİTLERİN HAZIRLANMASI VE
KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SENA BALTACI
218113041

DANIŞMAN: Dr.Öğr.Üyesi MAHMUT BİNGÖL

YALOVA
OCAK 2025

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez/Proje Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım “Si₃N₄ Katkılı Epoksi 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.

Sena BALTACI



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden yardımlarını esirgemeyen, akademik anlamda bana her zaman destek olan ve doğru yolu gösteren sayın danışman hocam Dr.Öğr.Üyesi Mahmut Bingöl'e teşekkür ederim. Her zaman yanımda olduğu ve benden desteğini hiçbir zaman esirgemediği için anneme bu teşekkürü borç bilirim.

Ocak 2025

Sena BALTACI



İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN	i
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT	x
1.GİRİŞ	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	3
2.1. Matris Malzemesine Göre Kompozit Türleri	5
2.1.1. Seramik matrisli kompozitler.....	5
2.1.2. Metal matrisli kompozitler.....	5
2.1.3. Polimer matrisli kompozitler	5
2.1.3.1. Termoset matrisler	7
2.1.3.2. Termoplastik matrisler	7
3. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	9
3.1. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemi	9
3.1.1. Termoset bazlı polimer matrisli kompozitlerin üretim yöntemi.....	9
3.1.2. El yatırma tekniği (Açık kalıplama)	10
3.1.3. Püskürtme yöntemi (Spray-up).....	10
3.1.4. Otomatik fiber yerleştirme (Automated Fiber Placement-AFP).....	11
3.1.5. Filament sarma yöntemi.....	12
3.1.6. Pultrüzyon Yöntemi.....	13
3.1.7. Reçine transfer kalıplama yöntemi	13
3.1.8. Vakum infüzyon yöntemi	14
3.1.9. Vakum torbalama yöntemi.....	14
3.1.10. Basınçlı kalıplama yöntemi	15
3.1.11. Otoklav yöntemi	16
3.1.2. Termoplastik bazlı polimer matrisli kompozit malzemelere uygun üretim yöntemleri	17
3.1.2.1. Enjeksiyon kalıplama yöntemi.....	17
3.1.2.2. Basınçlı kalıplama yöntemi	18
3.1.2.3. Sıcak presleme (Sıkıştırma kalıplama) yöntemi	18
4. NANOMALZEMELER	19

4.1. Nanokompozitler	19
4.1.1. Polimer matrisli nanokompozitler	20
4.1.1.1. Epoksi matrisli nanokompozitler	20
5. MATERYAL VE YÖNTEM	22
5.1. Kullanılan hammaddeler ve cihazlar	22
5.1.1. Kullanılan hammaddeler	22
5.1.2. Kullanılan cihazlar	23
5.2. Deneyisel Çalışmalar	24
5.2.1. Kalıpların hazırlanması	24
5.2.2. Epoksi matrisli nanokompozitlerin üretimi	24
5.3. Karakterizasyon	26
5.3.1. Çekme testi	26
5.3.2. Üç eksenli eğme testi	28
5.3.3. SEM(Taramalı elektron mikroskobu)	29
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	31
6.1. Çekme testi sonuçları	31
6.2. Üç Noktalı Eğme Testi Sonuçları	36
6.3. FE-SEM (Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu)Testi Sonuçları	39
6.4. Termogravimetrik Analiz Sonuçları	42
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	47
KAYNAKLAR.....	49
ÖZGEÇMİŞ	52

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

A_0	: Numunenin İlk Kesit Alanı
b	: Numune Genişliği
E	: Elastite Modülü
h	: Numune Kalınlığı
L	: Span Uzunluğu
I	: Numunenin Son Boyu
I_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	: Gerinme Değeri
$\Delta\sigma$	: Delta Gerilme
$\Delta\epsilon$	: Delta Birim Uzama

KISALTMALAR

ISO 178	: Üç Noktalı Bükülme Deneyi Standartı
ISO 527	: Çekme Deneyi Standartı
RTV	: Oda Sıcaklığında Vulkanizasyon
FE-SEM	: Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
TGA	: Termogravimetrik Analiz

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 5.1. Silisyum nitrür tozunun sahip olduğu teknik özellikler	22
Tablo 5.2. Silisyum nitrürün bazı fiziksel , kimyasal ve mekanik özellikler	23
Tablo 5.3. Tez çalışması kapsamında kullanılan cihazlar.	23
Tablo 6.1. Çekme testi sonucunda elde edilen nano silisyum nitrür ilavesinin mekanik özelliklere etkisi	31
Tablo 6.2. Üç noktalı eğme testi sonucunda elde edilen nano silisyum nitrür katkısının malzemenin eğilme dayanımı özelliklerine etkisi	37



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Kompozit malzemede matris-takviye bağı oluşumunda ara yüzey ve arafazlar	4
Şekil 2.2. Polimerizasyonun işlem sırası.....	6
Şekil 2.3. Termoplastik erime	7
Şekil 2.4. Kompozit malzemelerin üretim yöntemi	8
Şekil 3.1. Elle yatırma proses aşamaları.	10
Şekil 3.2. Püskürtme yöntemi	11
Şekil 3.3. Otomatik fiber yerleştirme sistemi alt bileşenleri	12
Şekil 3.4. Filament sarma yöntemi.....	12
Şekil 3.5. Pultrüzyon üretim hattı.....	13
Şekil 3.6. Vakum infizyon yöntemi	14
Şekil 3.7. Vakum torbalama yöntemi.....	15
Şekil 3.8. Basınçlı kalıplama yöntemi.....	16
Şekil 3.9. Basınçlı kalıplama yöntemi.....	17
Şekil 3.10. Enjeksiyon kalıplama yöntemi.....	17
Şekil 3.12. Sıcak presleme yöntemi	18
Şekil 4.1. Nanokompozit türleri	20
Şekil 5.1. Hazırlanan kalıp silikon	24
Şekil 5.2. Deney numunesi ölçüleri	24
Şekil 5.3. Üretim aşamalarının şematik gösterimi	26
Şekil 5.3'te Zwick ZS 100 çekme test cihazı	27
Şekil 5.4. Çekme testinin üretilen deney numunelerine uygulanması	27
Şekil 5.5. Üç eksenli eğme testinin üretilen deney numunelerine uygulanması	29
Şekil 5.6. Taramalı elektron mikroskobu çalışma prensibi	30
Şekil 6.1. Yüzde nano katkı oranı - elastisite modülü grafiği	32
Şekil 6.2. Yüzde nano katkı oranı - çekme dayanımı grafiği	32
Şekil 6.3. Yüzde nano katkı oranı - kopma uzaması grafiği	33
Şekil 6.4. Saf epoksi reçine - çekme dayanımı grafiği.....	34
Şekil 6.5. Ağırlıkça %0,125 Si ₃ N ₄ nano katkı oranı - çekme dayanımı grafiği	35
Şekil 6.6. Ağırlıkça %0,25 Si ₃ N ₄ nano katkı oranı - çekme dayanımı grafiği	35
Şekil 6.7. Ağırlıkça %0,50 Si ₃ N ₄ nano katkı oranı - çekme dayanımı grafiği	36
Şekil 6.8. Yüzde nano katkı oranı – eğilme modülü grafiği	37
Şekil 6.9. Yüzde nano katkı oranı – eğilme dayanımı grafiği.....	38

Şekil 6.10. (a) Saf epoksi reçine, (b) ağırlıkça %0,125 nano Si_3N_4 katkılı epoksi reçine, (c) ağırlıkça %0,25 nano Si_3N_4 katkılı epoksi reçine, (d) ağırlıkça %0,50 nano Si_3N_4 katkılı epoksi reçineye ait FE-SEM görüntüleri.....	39
Şekil 6.11. Saf epoksi reçine grubuna farklı büyütme uygulanarak çekilen FE-SEM görüntüleri	40
Şekil 6.12. Ağırlıkça %0,125 oranında nano silisyum nitrür takviyeli epoksi reçine matrisli numune grubuna farklı büyütme uygulanarak çekilen FE-SEM görüntüleri	41
Şekil 6.13. Ağırlıkça %0,25 oranında nano silisyum nitrür takviyeli epoksi reçine matrisli numune grubuna farklı büyütme uygulanarak çekilen FE-SEM görüntüleri	41
Şekil 6.14. Ağırlıkça %0,50 oranında nano silisyum nitrür takviyeli epoksi reçine matrisli numune grubuna farklı büyütme uygulanarak çekilen FE-SEM görüntüleri	42
Şekil 6.15. Saf epoksi reçineye ait TGA sonuçları	43
Şekil 6.16. Ağırlıkça %0,125 Si_3N_4 bulunan epoksi reçine matrisli nanokompozit malzemeye ait TGA sonuçları	43
Şekil 6.17. Ağırlıkça %0,25 Si_3N_4 bulunan epoksi reçine matrisli nanokompozit malzemeye ait TGA sonuçları	44
Şekil 6.18. Ağırlıkça %0,50 Si_3N_4 bulunan epoksi reçine matrisli nanokompozit malzemeye ait TGA sonuçları	44

Si₃N₄ KATKILI EPOKSİ NANOKOMPOZİTLERİN HAZIRLANMASI VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Kompozit malzeme, iki ya da daha fazla sayıdaki aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerinin, yeni ve tek bir malzemede toplayarak, makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak adlandırılırlar. Kompozitler, matris ve takviye elemanının kombinasyonundan oluşmaktadır. Bu iki malzeme, kompozitte benzersiz özellikler sağlamak için birlikte çalışır. Kompozit içerisinde, bu farklı malzemeler birbirleriyle çözünmediği veya birbirine karışmadığı için kolayca ayırt edilebilir. Bu çalışmada, matris malzemesi olarak epoksi reçine tercih edilmiştir. Epoksi reçineler, yüksek mekanik dayanım, ısı ve elektrik direnci ile üstün yapışma özelliklerine sahiptir. Ancak bu özellikler, yapıya uygun katkı maddeleri eklenerek daha da iyileştirilebilir.

Bu bağlamda, epoksi reçineye farklı oranlarda nano boyutta silisyum nitrür (Si₃N₄) eklenmiştir. Si₃N₄, yüksek mekanik dayanım, düşük yoğunluk, yüksek ısıl direnç ve kimyasal dayanıklılık gibi üstün özelliklere sahiptir. Kompozit yapıda kullanılan nano katkı maddeleri, malzemenin mikro yapısını iyileştirerek performansı artırır. Bu çalışmada, hazırlanan numunelere mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla çekme ve üç noktalı eğme testleri uygulanmıştır.

Çekme testi, malzemenin mekanik özelliklerini ortaya çıkartmak için en yaygın kullanılan mekanik testtir. Bu testin sonuçlarından yararlanılarak diğer mühendislik işlemleri yapılabilir. Çekme mukavemeti, gerinim değeri, elastik modülü hesaplanabilir. Üç noktalı eğme testi, malzemenin eğilme dayanımı ve elastik modülü gibi parametrelerini değerlendirmek için yapılmıştır. Bu testlerin sonuçları, nano boyutta Si₃N₄ eklenmesinin epoksi reçine esaslı kompozitlerin mekanik performansını belirgin şekilde artırdığını göstermiştir. Çalışma, nano katkı maddelerinin kompozit malzeme teknolojisindeki önemini ve kullanım potansiyelini vurgulamaktadır.

Anahtar kelimeler: Polimer kompozit; Mekanik özellikler; Epoksi; Nanokompozit

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF Si_3N_4 ADOPTED EPOXY NANOCOMPOSITES

ABSTRACT

Composite materials are defined as materials formed by combining two or more materials from the same or different groups at the macro level to achieve a new material that combines their best properties. Composites are composed of a matrix material and a reinforcing element. These two components work together to provide unique properties in the composite. In composites, the different materials remain distinct and do not dissolve or mix with each other, making them easily distinguishable.

In this study, epoxy resin was chosen as the matrix material. Epoxy resins are known for their high mechanical strength, heat and electrical resistance, and excellent adhesive properties. However, these properties can be further enhanced by incorporating suitable additives into the structure.

In this context, nano-sized silicon nitride (Si_3N_4) was added to the epoxy resin in varying proportions. Si_3N_4 possesses superior properties, including high mechanical strength, low density, high thermal resistance, and excellent chemical durability. Nano-scale additives in composite structures improve the microstructure of the material, thereby enhancing its performance. In this study, tensile and three-point bending tests were performed on the prepared specimens to evaluate their mechanical properties.

Tensile testing is one of the most commonly used mechanical tests to reveal the mechanical properties of materials. Results from this test can be used to determine parameters such as tensile strength, strain values, and elastic modulus. The three-point bending test was conducted to evaluate parameters such as flexural strength and elastic modulus. The results of these tests demonstrated that the incorporation of nano-sized Si_3N_4 significantly improved the mechanical performance of epoxy resin-based composites. This study highlights the importance and potential of nano additives in composite material technology.

Keywords: Polymer composite; Mechanical properties; Epoxy; Nanocomposite

1.GİRİŞ

Geleneksel malzemeler kullanılarak teknolojinin tüm gereksinimlerini karşılamak zordur. Bu amaçlar doğrultusunda kompozit malzemeler üretilmiştir. Gelişen teknoloji ve sanayileşmeden kaynaklanan malzeme ihtiyacı, kompozit malzemelerin keşfedilip, geliştirilmesini sağlamıştır. Kompozit malzemeler geleceğin kimyası olarak adlandırılıp üzerinde çalışmalar yapılan çok kıymetli bir malzeme grubudur. Belirli istenilen özelliklere sahip bir malzeme elde etmek için, özellikleri ve kimyasal bileşenleri birbirinden farklı, birbiri içerisinde makro anlamda çözünemeyen iki ya da daha fazla malzemenin birleştirilmesi ile meydana gelen yeni malzemeye kompozit malzeme denir. Kompoziti oluşturan iki temel bileşen vardır. Bunlar; matris ve takviye elemanıdır. Kompozit içinde genellikle daha sert ve daha yüksek dayanıma sahip kısım takviye olarak adlandırılır. Kompozitin ana yapı malzemesi olarak da tanımlanan, biraz daha düşük dayanıma sahip olan ama genellikle sünekliği yüksek olan kısım ise matris olarak adlandırılır [1].

Kompozitler, üretimlerinde kullanılan matris malzemesinin türüne göre; polimer matrisli kompozitler, metal matrisli kompozitler ve seramik matrisli kompozitler olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Takviye malzemesinin yapısına göre ise elyafli kompozitler, parçacıklı kompozitler, tabakalı kompozitler ve karma kompozitler olmak üzere sınıflandırılır [2].

Polimer kompozitlerin en önemli özellikleri yüksek mukavemet ve yüksek elastiklik modülüdür, bu özellikleri sayesinde diğer malzemelere göre üstün durumdadırlar. Yoğunluğu düşük hafif malzemelerdir. Üretim teknikleri kolay, hızlı ve ekonomik olarak üretilebilirler. Polimer matrisli kompozit malzemelerin kullanıldığı ortamlarda göz önüne alınması gereken en önemli faktörler sıcaklık ve nemdir. Polimerlerde kullanılan takviye malzemelerinden en önemli olanları; cam fiber, bor fiber ve karbon fiberlerdir [3,4,5].

Nano kompozitler en az bir fazı (matris veya takviye elemanı) nanometrik boyutlardan oluşan yeni malzeme çeşididir.

Bu çalışmada, epoksi reçine içerisine ilavesi gerçekleştirilen farklı oranlarda nano boyutta Silisyum Nitrat 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 iyileştirilmesi 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 silisyum nitrat ilavesi bu çalışmanın özgünlüğünü göstermektedir. Epoksi reçine içerisine nano boyutta nikel oksit ilave edilerek mekanik, ısıl ve mikroyapısal özellikler açısından optimum oran tespit edilmeye çalışılmıştır.



2. KOMPOZİT MALZEMELER

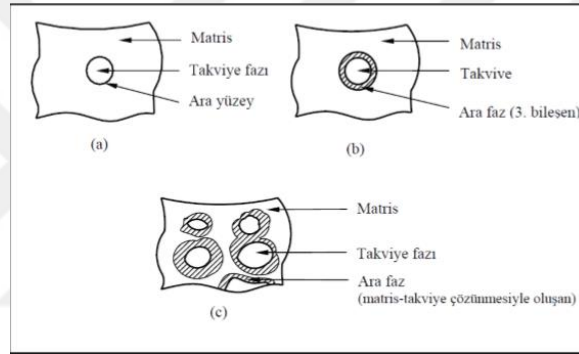
Kompozit malzemeler, mühendisliğin tüm dallarında tasarımcıların ufkunu genişletmektedir. Bununla birlikte, bu malzeme ailesi zor mühendislik problemlerine yeni ve heyecan verici çözümler sunma imkanı vermektedir. Kompozitlerde, malzemeler, eksikliklerinin etkilerini bir miktar azaltırken özelliklerinin daha iyi kullanılması için birleştirilir. Bu işlem, bir tasarımcının geleneksel malzemelerin seçimi ve üretimi gibi kısıtlamalarda serbest çalışmasını sağlayabilmektedir. Kompozit malzeme tasarımında, bilim adamları ve mühendisler, yeni nesil malzemeler üretmek için çeşitli metalleri, seramikleri ve polimerleri bir araya getirdiler. Çoğu kompozit sertlik, tokluk ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi mekanik özellikleri geliştirmek için üretilmiştir [2].

"Kompozit" kavramı ilk başta insanlar tarafından bulunmamıştır. Hem hayvanlarda hem de bitkilerde doğal kompozitler bulunmaktadır. Örneğin, ahşap bir kompozittir. Lignin adı verilen daha zayıf bir madde ile bir arada tutulan uzun selüloz elyaflarının birleşiminden oluşur. Selüloz da pamuğun içinde bulunmaktadır, ancak onu birbirine bağlamak için lignin olmadan çok daha zayıftır. İki zayıf madde olan lignin ve selüloz birlikte çok daha güçlü bir yapı oluşturur. Vücudumuzdaki kemik de bir kompozittir [1,2].

İlk modern kompozit malzeme fiberglastır. Günümüzde de hala spor malzemeleri, tekne gövdeleri, araç gövdesi ve bina panellerinde kullanılmaktadır. Fiberglasta matris bir plastiktir ve takviyesi de ince iplikler halinde yapılmış ve çoğu zaman bir tür kumaşa dokunmuş camdır. Kendi başına cam çok güçlü bir malzemedir ancak kırılıgandır ve keskin bir şekilde bükülürse kırılır. Plastik matris, cam elyafları bir arada tutmaktadır ve aynı zamanda üzerlerine etki eden kuvvetleri paylaşarak zarar görmelerini önlemektedir. Bazı ileri kompozitler artık cam yerine karbon elyaf kullanılarak üretilmektedir. Bu malzemeler cam elyafından daha hafif ve daha sağlamdır, ancak üretilmesi daha pahalıdır. Uçak yapılarında ve golf kulüpleri gibi pahalı spor ekipmanlarında kullanılırlar. Örneğin dünyanın en büyük yolcu uçağı olan yeni Airbus A380 tasarımında modern kompozitlerden yararlanılmaktadır. A380'in % 20'sinden fazlası, özellikle karbon fiberlerle takviye edilmiş plastikten, kompozit malzemelerden yapılmıştır [6].

Kompozit malzeme, iki ya da daha fazla sayıdaki aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerinin, yeni ve tek bir malzemedeki toplayarak, makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak adlandırılırlar. Kompozitler, matris ve takviye elemanının kombinasyonundan oluşmaktadır. Bu iki malzeme, kompozitte benzersiz özellikler sağlamak için birlikte çalışır. Kompozit içerisinde, bu farklı malzemeler birbirleriyle çözünmediği veya

birbirine karışmadığı için kolayca ayırt edilebilir. Matris metal,seramik veya polimer olabilir ve takviye genellikle matristen farklı bir malzeme türüdür. Matris ve takviye elemanının malzemede olan görevi ise tam olarak şöyledir; matris, takviye elemanlarının yüzeylerini dış ve çevresel etkilere karşı koruyup dirençlerini arttırmakta, kompozit üzerine gelen yükü takviye elemanına homojen olarak dağıtmakta ve kompozit içerisindeki hata ihtimalini azaltmaktadır. Takviye elemanının temel görevi ise gelen yükü taşımak ve matrisin rijitlik ve dayanımını artırmaktır. Belirtilen özellikleri içeren kompozit malzemeler genellikle, matris malzemesine göre; polimer matrisli kompozitler (PMK'ler), metal matrisli kompozitler (MMK'ler) ve seramik matris kompozitler (SMK'ler) olarak sınıflandırılır. Takviye türlerine göre ise, elyaf takviyeli kompozitler, parçacık takviyeli kompozitler, tabakalı kompozitler ve karma kompozitlerdir [1,7]. Şekil 2.1' de kompozit malzemelerde matris-takviye bağı oluşumunda ara yüzey ve ara fazlar gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Kompozit malzemede matris-takviye bağı oluşumunda ara yüzey ve arafazlar [8].

Kompozit malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerini belirleyen en önemli faktör uygun matris/takviye malzemesinin seçimidir. Bu seçimin bu kadar önemli olmasının nedeni, matrisler tarafından malzemeye iletilen yükün takviye fazına iletilmesinde matris ile takviye malzemesi arasındaki ara yüzey bağının fonksiyonudur. Ara yüzey bağının kuvvetli olması için bileşenlerin uyumu ve matris elemanının ıslatılabilirlik özelliğinin iyi olması gerekmektedir. Diğer bir etken ise, takviye fazının matris içerisinde homojen olarak dağılması, matris ve takviye malzemelerinin uygun seçilmesidir. Bu nedenle, en uygun matris ve takviye malzemesi seçilmelidir.

Bu bilgiler ışığında kompozit malzemelerin özelliklerini belirleyen dört temel faktör vardır. Bunlar:

1. Matris malzemesinin özellikleri,
2. Takviye malzemesinin özellikleri,
3. Ara yüzey özellikleri,
4. Mikro yapı özellikleridir [8,9].

2.1. Matris Malzemesine Göre Kompozit Türleri

2.1.1. Seramik matrisli kompozitler

İnorganik, doğal veya sentetik hammadde ya da hammadde karışımlarının belirlenen tane boyutuna öğütülüp uygun bir yöntemle şekillendirilme işleminden sonra, belirlenmiş bir ısıl işlemle kullanıma uygun teknik özellikler kazandırılmış yapılarına seramik denir.

Seramik malzemelerin çok fazla tercih edilmelerinin nedenleri; yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılık, hafiflik, kimyasal kararlılık, yüksek basma dayanımı gibi özelliklerdir. Fakat bu malzemelerin yük taşıma kapasitesinin düşüklüğü, üretim sırasında oluşabilecek çatlak türünde kusurlar kullanımını önemli ölçüde azaltır.

Seramik matrisli kompozitler; Al_2O_3 , SiC, Si_3N_4 gibi seramik matris üzerine seramik veya metal parçacık takviyesiyle oluşan üstün ısıl dayanıma ve mukavemete sahip malzemelerdir. Seramik matrisli kompozitlerin üretimindeki amaç, takviye ve matris malzemesi olarak iki ayrı malzemeyi bir araya getirerek seramik matrisin tokluğunu artırmaktır. Seramik esaslı kompozit malzemeleri (SMK) iki farklı grup altında toplayabiliriz:

1. Sürekli fiber takviyeli SMK,
2. Süreksiz takviyeli SMK[10,11].

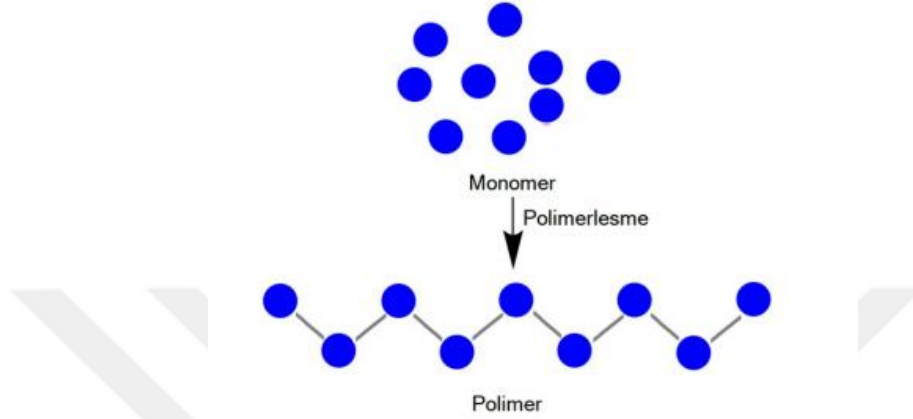
2.1.2. Metal matrisli kompozitler

Günümüzdeki rekabet ortamında, daha kaliteli ürünlerin daha düşük maliyetlerle piyasaya sürülmesi gerekmektedir. Bu gereklilik endüstrideki yeni nesil malzemelerinin geliştirilerek kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Endüstrideki birçok mühendislik uygulamalarında daha düşük yoğunluklu, rijit ve yüksek dayanımlı malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Metal matris kompozitler olarak adlandırılan bu malzemeler ihtiyaçları karşılayabilmek adına üretilmiştir. Adından da anlaşılacağı gibi, eğer matris bir metal ise, kompozitler metal matris kompozitler olarak adlandırılır. Genellikle metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde alüminyum (Al), magnezyum (Mg), çinko (Zn), bakır (Cu), titanyum (Ti) ve nikel (Ni) gibi metaller ve bu metallerin alaşımları matris malzemesi olarak kullanılmaktadır [11,12,13].

2.1.3. Polimer matrisli kompozitler

Polimerler, monomer olarak adlandırılan küçük moleküllerin kovalent bağlarla birbirine bağlanmasıyla meydana gelen kimyasal yapılardır. Çoğunlukla farklı dolgu ve katkı maddeleri ile kompozit malzemeler oluşturulmaktadır. Polimer matrisli kompozitler; korozyona dirençli,

uzun süreli kullanımlara yatkın, işlenmeleri kolay, hafif, karmaşık geometrilere şekillendirilebilen ve birim kütle başına yük taşıma kapasiteleri yüksek malzemelerdir bu sebeple 1940 lı yıllarda alüminyum ve çelik alaşımlarının yerine havacılık sektöründe polimer matrisli kompozitlere geçilmeye başlanmıştır [4,5]. Monomerlerin birbirine bağlanması ile meydana gelen yapı Şekil 2.2’de polimerizasyon işlem sırası gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Polimerizasyonun işlem sırası [14].

Polimer matrisli kompozitlerin kullanımının artmasındaki en önemli sebepler, bu malzemelerin sağladığı avantajlardır. Özellikle sağlamlık, esneklik, hafiflik, darbe dayanımı ve dayanıklılık gibi özellikleri sayesinde günlük kullanımda önemli faydalar sağlarlar. Bununla birlikte, bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar arasında düşük çarpışma enerjisi performansı, geri dönüşüm zorlukları, maliyet baskıları ve endüstrinin bu malzemelere olan yabancılığı öne çıkmaktadır [14,15,16].

Polimer matrisli kompozitler, iki ana kategoride incelenebilir: parçacık dolgulu kompozitler ve sürekli elyaf kompozitler. Parçacık dolgulu kompozitler, bir matris içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde yer almasıyla elde edilir ve mukavemeti bu parçacıkların sertliği belirler. Yaygın olarak plastik matrislerde metal parçacıklar kullanılarak ısı ve elektriksel iletkenlik sağlanır. Ayrıca, metal matrislerde seramik parçacıklar kullanıldığında yüksek sertlik ve sıcaklık dayanımı elde edilir [15].

Sürekli elyaf kompozitlerde ise polimer matrisler termoset ve termoplastikler olarak ikiye ayrılır. Sürekli fiberlerle takviye edilen polyster ve epoksi reçine matrisli kompozitler en yaygın olanlarıdır. Takviye malzemeleri olarak cam fiber, Kevlar® fiber, bor fiber ve karbon fiber gibi malzemeler kullanılır.

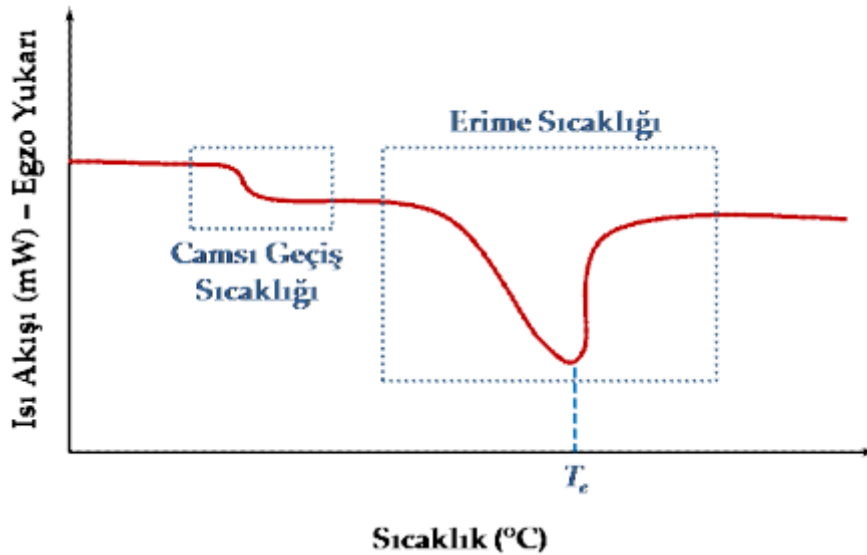
Polimer matrisli kompozitlerin fiber çeşitleri; bor elyaflar, cam elyaflar , alümina elyaflar, aramid elyaflar, karbon elyaflar ve silisyum karbür elyaflar. polimer matris türleri ise; Termoset ve Termoplastik olarak ikiye ayrılır [14,15,16].

2.1.3.1. Termoset matrisler

Polimer malzemelerde en çok kullanılan matris termoset matristir. Moleküller birbirleri ile çapraz bağlı oldukları için atomlar birbiri üzerinde kaymaz. Isı ve basınç altında şekillendirildikten sonra yeniden şekillenemeyen polimer yapılardır. Isı ve basınç ile birlikte sert, katı ve plastik olmayan bir madde elde edilir kauçuk gibi. Epoksi ve polyester en çok tercih edilen termosettir. Sıcaklara karşı dayanım ve mukavemet termoplastiklere oranlara daha fazladır ve uzun süreli kullanım için uygundur. Metal ve seramik matris ile kıyasla polimer matrisli kompozitler sıvılar ile daha kolay etkileşime giriyor.

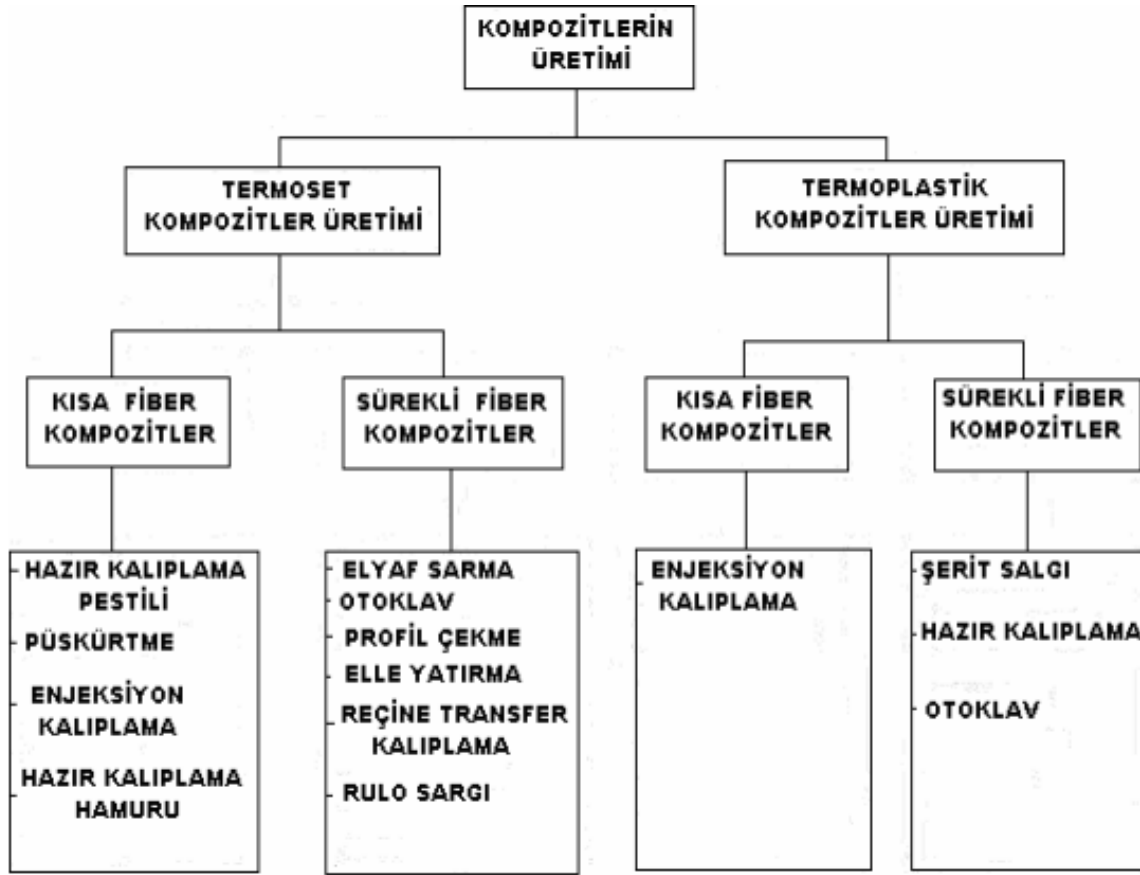
2.1.3.2. Termoplastik matrisler

Bu yapının molekülleri düz zincirli olduğu için atomlar birbiri üzerinden kayar, zincir yapıları üzerinde çapraz bağ asla görülmez. Geri dönüşümü olan ve ısıtıldıktan sonra tekrar soğutularak kullanılabilir fakat ısıtma işlemi yapıldığında (T_g) camsı geçiş sıcaklığına bağlı olarak yumuşak bir malzeme olabilirler. Isıtma ve soğutma işleminde herhangi kimyasal bir değişiklik olmasa da fiziksel özellikleri değişir [17].



Şekil 2.3.Termoplastik erime [18].

Kompozit malzemelerin üretimini reçine malzemesine göre iki kısma ayırabiliriz. Termoset reçineli kompozit malzemeler ve termoplastik reçineli kompozit malzemeler. Şekil 2.4’de kompozit malzemelerin üretim yöntemleri gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Kompozit malzemelerin üretim yöntemi

3. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

3.1. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemi

Bu çalışmada, polimer matrisli kompozit malzemelerin genel özellikleri, üretim süreçleri ve bu süreçlerde kullanılan yöntemler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Polimer matrisli kompozitler, matris olarak polimer reçinelerin ve takviye elemanları olarak genellikle fiberlerin kullanıldığı bir malzeme grubudur. Üretilmesi planlanan malzemenin hedeflenen mekanik ve fiziksel özelliklerini sağlayabilmesi için üretim yönteminin ve üretim şartlarının doğru bir şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan matris malzemeleri genellikle termoset veya termoplastik özellikte olup, yaygın olarak epoksi, polyester, poliüretan ve fenolik reçineler tercih edilmektedir. Takviye elemanları ise fiber, partikül ve flak formlarında bulunmakta olup, cam, karbon ve aramid lifleri gibi malzemeler sıklıkla kullanılmaktadır. Çekirdek ve yapıştırıcı malzemeler de kompozit yapıların tasarımında ve performansında kritik bir rol oynamaktadır.

Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan yöntemler açık kalıplama, kapalı kalıplama, ardışık ve sürekli prosesler olarak sınıflandırılmaktadır. Açık kalıplama yöntemleri genellikle düşük maliyetli ve hızlı bir üretim sağlarken, kapalı kalıplama yöntemleri daha karmaşık yapılar ve yüksek yüzey kalitesi için uygundur. Üretim sürecinde kullanılan kütleme işlemi, kompozit malzemenin son özelliklerini belirleyen en önemli aşamalardan biri olup, sıcaklık, basınç ve zaman gibi parametrelere bağlı olarak gerçekleştirilmektedir.

Sonuç olarak, polimer matrisli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılacak yöntemlerin seçimi, malzemenin uygulama alanındaki gerekliliklerine ve istenen özelliklerine uygun olarak yapılmalıdır. Bu malzemelerin hafiflik, yüksek dayanım, korozyon direnci gibi avantajları sayesinde havacılık, otomotiv ve inşaat gibi pek çok sektörde geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır [19,20,21].

3.1.1. Termoset bazlı polimer matrisli kompozitlerin üretim yöntemi

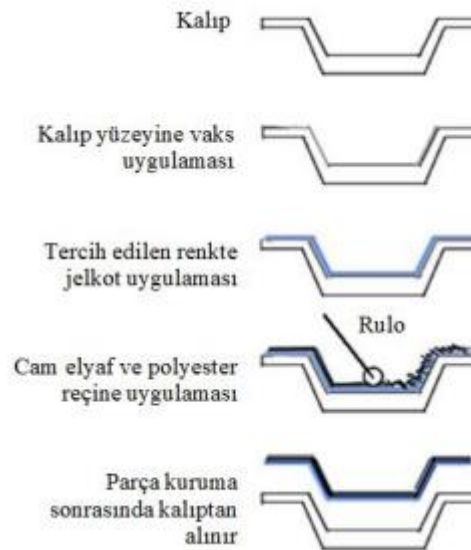
Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan en yaygın matris malzemeleri termoset esastır. Bu tür malzemeler, üretim esnasında bir kez ısıtılıp biçimlendikten sonra yeniden şekillendirilmesi mümkün olmayan bir yapıya sahiptir. Bunun nedeni, termoset malzemelerin moleküllerinin çapraz bağlar oluşturarak birbirine sabitlenmesidir. Bu bağlanma yapısı, malzeme ısıtıldığında moleküllerin hareket ederek yeni bir şekil almasını engeller. Ayrıca, termoset malzemeler çözünmez bir yapıya sahiptir. Termoset plastikler, termoplastiklere kıyasla mukavemet ve

yüksek sıcaklıklara dayanım açısından daha üstün özellikler sunsa da geri dönüştürülemez olmaları ve ısıtma-soğutma süreçlerinde kimyasal değişime uğramamaları, gelişen üretim teknikleri doğrultusunda termoplastiklerin daha fazla tercih edilmesine yol açmaktadır.

Termoset malzemeler arasında en çok kullanılan türler epoksi reçineler, polyesterler, vinilesterler ve fenolik reçinelerdir. Bu malzemeler, polimer matrisli kompozitlerin üretiminde üstün mekanik özellikler, kimyasal direnç ve yapısal dayanım sağlaması nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir [22,23].

3.1.1. El yatırma tekniği (Açık kalıplama)

El yatırma yöntemi az sayıdaki üretim adetlerinde yaygın kullanımı olan, sektörde gelişime açık olan üretim yöntemlerinden olmuştur. Bu yöntemde bir kalıba elle yerleştirilen elyaflara / kumaşlara bir rulo veya fırça ile reçine emdirilmesi sonucunda kalıbın şeklinin verilmesi işlemidir. Şekil 3.1’de elle yatırma proses aşamaları verilmiştir. Bu yöntemin avantajları ise öğrenmesi ve uygulamasının kolay olması gelmektedir [24].

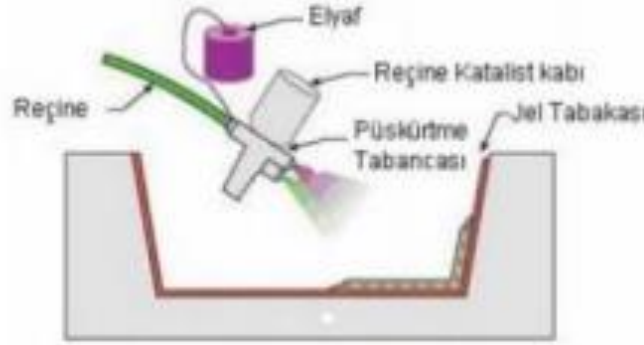


Şekil 3.1. Elle yatırma proses aşamaları [25].

3.1.2. Püskürtme yöntemi (Spray-up)

Bu yöntemde özel bir tabanca kullanılır ve reçine ve takviye lifleri kalıp yüzeyine püskürtülür. Püskürtme tabancasında özel bir sistem bulunur bu sistem sayesinde sertleştirici ve reçine püskürtülür ve lifleri kıran küçük parçalar vardır. Kalıp yüzeyine reçine ve sertleştirici karışım püskürtülürken belli büyüklükte kesilen lif parçaları da reçine ile beslenir. Bu yöntemde ilk olarak püskürtme hazırlığı yapılır. Matris malzemesi çoğunlukla termoset reçineler ve fiberler çoğunlukla cam elyaf püskürtme tabancası ile hazırlanır. Reçineyi genellikle bir katalizör ile

kariştırarak işleme dahil ederiz. İkinci adım olarak tabanca ile püskürtme işlemi gerçekleştirilir. Polimer matris ve tabanca sistemi sayesinde kısa kesilmiş fiber aynı anda yüzeye püskürtölür. Yüksek bir basınç ile püskürtölün malzeme, kalıp yüzeyinde katmanlar halinde birikir. Reçine fiberleri kaplar ve matris oluşur. Her püskürtme işleminde yüzeyde katman oluşumu gerçekleşir. Kalınlık ve fiber oranını işlemi gerçekleştiren kişi tarafından kontrol edilir bu sebeple bu yöntemde işlemi gerçekleştirecek kişinin kabiliyeti önemlidir. Bu işlemlerden sonra oda sıcaklığı ya da yüksek sıcaklıkta kürleme işlemine tabi tutulur. Termoset reçine sertleşir ve fiberlerle güçlü bir bağ oluşturulur. Kürleme sonrası kompozit malzeme kalıptan çıkartılır eğer gerekiyorsa yüzey iyileştirme işlemi uygulanır. Son olarak zımparalama , delme gibi işlemler gerçekleştirilir. Bu işlemin avantajları; Hızlı üretim sağlamak, düşük maaliyet ve karmaşık geometrideki parçaların üretiminde oldukça etkilidir. Dezavantajları ise; Fiber dağılım hakimiyeti kurmak zordur, yüzey kalitesi, fiber oranları kısıtlıdır. Bu yöntem daha çok düşük mekanik performans gerektiren fakat hızlı ve ekonomik üretimin öne çıktığı yerlerde kullanılır[16,25,26].

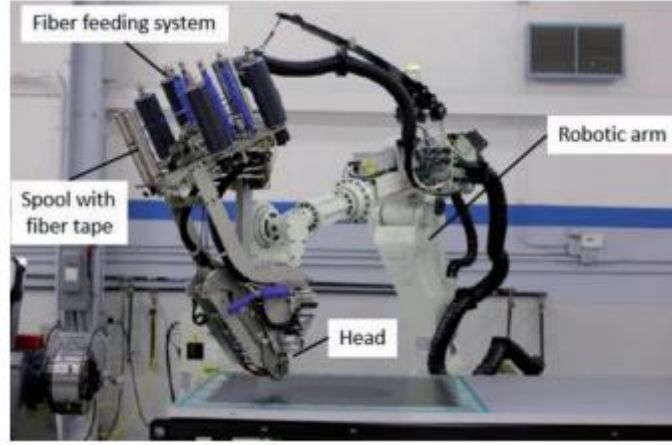


şekil 3.2. Püskürtme yöntemi [25].

3.1.3. Otomatik fiber yerleştirme (Automated Fiber Placement-AFP)

Bu yöntem ileri düzey bir üretim teknolojisidir. Özellikle havacılık, uzay ve otomotiv gibi yüksek performanslı ve hassasiyet gerektiren endüstrilerde tercih edilir. Bu yöntem sürekli fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerin üretiminde, fiberlerin önceden belirlenen düzen de yerleşmesi için kullanılır. Çoğunlukla karbon, aramid, cam gibi yüksek dayanım gösteren fiberler kullanılır. Prepreg halde ya da kuru fiber kullanılabilir. Prepreg fiberler yerleştirme sırasında reçine ile fiberin beraber uygulanmasına imkan verir. Fiberleri CNC kontrollü sistemler ya da AFP makinaları kullanarak istenilen geometrik şekil verilebilir. Fiberler bir başlık aracılığı ile yüzeye yerleştirilir ve gerilimi kontrol altına alınır. Dar katman halinde yüzeye yerleştirilir ve katman katman döşenir. Fiberlerin açıları isteğe göre ayarlanabilir. Fiber yerleştirilirken başlık aynı zamanda ısı uygular ve fiberin matris malzemesine yapışmasını

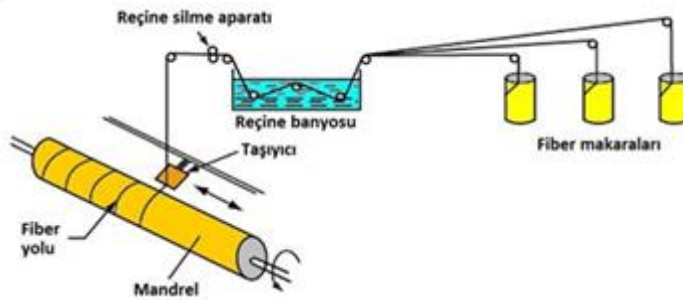
sağlar. Fiber yüzeye sıkıca oturup katmanlar arasında iyi bir bağ oluşmasını sağlar. Tüm bu proseslerin sonunda kürlleme yöntemi ile sertleştirilir. Matris sertleşir ve fiberlerle sıkı bir bağ oluşur. Kürlleme işlemi bittikten sonra yüzey işleme, delme, kesme gibi işlemler yapılabilir [23,27].



Şekil 3.3. Otomatik fiber yerleştirme sistemi alt bileşenleri [27].

3.1.4. Filament sarma yöntemi

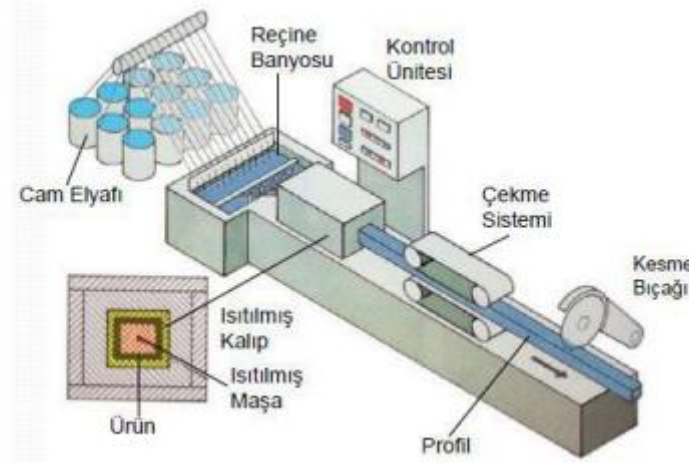
Sürekli fiberlerin bir çekirdek çoğunlukla boru ya da silindirik şeklinde etrafına sarılarak kaplanması ile yapılan bir üretim yöntemidir. Mukavemetin yüksek olması gereken durumlarda bu üretim yöntemi tercih edilir. Filamentler belirli bir açı ve düzen içerisinde sarılarak istenilen mekanik özelliklerde kompozit yapı oluşturulur. Bu üretim yönteminin başlıca avantajı yüksek mukavemet sağlamasıdır. Fiberler belirli açıda sarılması yüksek dayanım sağlar. Geneleksişel metallere göre daha hafif yapıları vardır. Farklı fiber ve reçine türü kullanılarak özellikleri değiştirilebilir. Seri üretime uygundur ve yüksek mekanik oranı kompozitin mekanik özelliklerini artırır. Dezavantajları ise karmaşık geometrilerde maliyetli bir yöntemdir. Geometrik sınırlamaları olan bir üretim yöntemidir. Simetrik, silindirik ya da boru benzerinde yapıların üretiminde tercih edilir. Yüksek hassasiyette üretim süreci uzuyabilir. Uygulama sırasında katman kalınlığı ya da reçine homojenliği eşit sağlanamayabilir [11,23,25].



Şekil 3.4. Filament sarma yöntemi [28].

3.1.5. Pultruziyon Yöntemi

Sürekli fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılan bir üretim yöntemidir. Cam, karbon, aramid takviye malzemeleri reçine banyosundan geçirilir ve bu sırada takviye malzemesi reçine ile kaplanır. İstenilen şekli elde etmek için kaplanmış fiberler kalıptan geçirilir. Bu işlem neticesinde sürekli bir boru, çubuk ya da levha elde edilir. Fiberler kalıptan geçerken ısıtılma işlemi uygulanır böylece kalıptan çıkan malzeme sert ve kullanıma hazırdır. Son olarak istenilen boyutlarda kesme ve yüzey işlemleri yapılır. Bu işlemin avantajları; sürekli üretim sağlanması, hafif ve dayanıklılık, iyi yüzey kalitesi sağlanması kalıp ile şekillendirildiği için, çeşitli kesit profiller üretilmesi bu üretim yönteminin seçilme sebeplerindendir. Çoğunlukla inşaat, denizcilik ve otomotiv gibi sektörlerde tercih edilir [30].



Şekil 3.5. Pultruziyon üretim hattı [30].

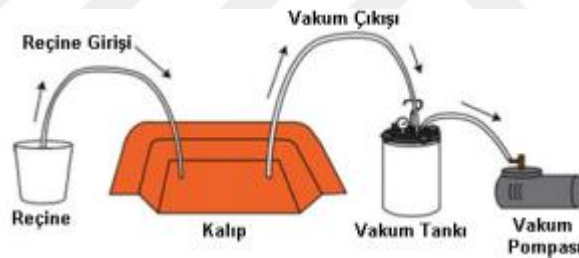
3.1.6. Reçine transfer kalıplama yöntemi

Fiber takviyeli kompozit parçaların üretilmesinde kullanılan bir üretim yöntemidir. Bu yöntemde fiber takviyeler kapalı bir kalıba yerleştirilir ve kalıba basınç altında reçine elde edilerek sertleştirilir. Karmaşık şekil ve büyük hacimli parçalar için büyük bir avantajdır. İlk olarak takviye fiberi kalıba yerleştirilir. Fiberin düzeni parçanın mekanik özelliklerini belirler. Fiberleri yerleştirdikten sonra kalıp kapatılır. Genellikle kalıp iki paçadan oluşur. Kapalı kalıba reçine belli bir basınç altında enjekte edilir. Reçine kalıp içinde tüm boşlukları doldurarak kompozit yapının oluşmasını sağlar. Reçine kalıp içinde fiberlerle temas ettikten sonra sertleşme süreci gerçekleşir. Reçine sertleştikten sonra kalıptan parça ayrılır ve parça çıkartılır. Gerekli yüzey işlemleri yapılır. Bu yöntemde fiberlerin yoğunluğu, yerleşimi optimize edilebildiği için güçlü ve hafif parçalar üretilir. Kalıp sayesinde iyi yüzey kalitesi sağlanır.

Açık kalıplamaya göre daha az reçine atığı vardır. Bu üretim yöntemini çoğunlukla savunma sanayi, havacılık, denizcilik ve otomotiv sektöründe kullanılır [19,23].

3.1.7. Vakum infüzyon yöntemi

Fiber takviyeli kompozit parçaların üretiminde kullanılan ve büyük ölçekli, hafif ve yüksek mukavemetli parçalar elde etmeyi sağlayan bir üretim metodudur. Kalıbın üzerine yerleştirilen kuru takviye fiberlere vakum etkisi ile reçine çekilir ve reçine fiberlerin tüm yüzeyine eşit derecede dağılır. Prosesin başında kuru takviye fiberleri kalıba yerleştirilir. Takviyelerin düzeni, nihai ürünün mukavemetini belirler. Takviye fiberlerin üstüne sızdırmazlık sağlayan bir vakum torbası yerleştirilir. Torba kenarları sıkıca kapatılır ve tam vakum sağlanır. Vakum ile torbanın içindeki hava tamamen boşaltılır. Bu işlem sayesinde reçine fiberlerin arasına hızla ve eşit şekilde yayılır. Reçine fiberlerle tamamen temas ettikten sonra kürleme işlemi başlar. Bu işlem oda sıcaklığında ya da kontrollü bir sıcaklıkta gerçekleştirilir. Kalıptan sertleşen parça çıkartılır ve eğer herhangi bir yüzey işlemi yapılacaksa bu aşamada yapılır. Bu üretim yönteminde minimum reçine tüketimi gerçekleşir. Hafif ve yüksek mukavemetli yapılar elde edilir. Vakum torbası sayesinde sızdırmazlık sağladığı için yüzeyde daha az pürüz oluşur [30].



Şekil 3.6. Vakum infüzyon yöntemi [30].

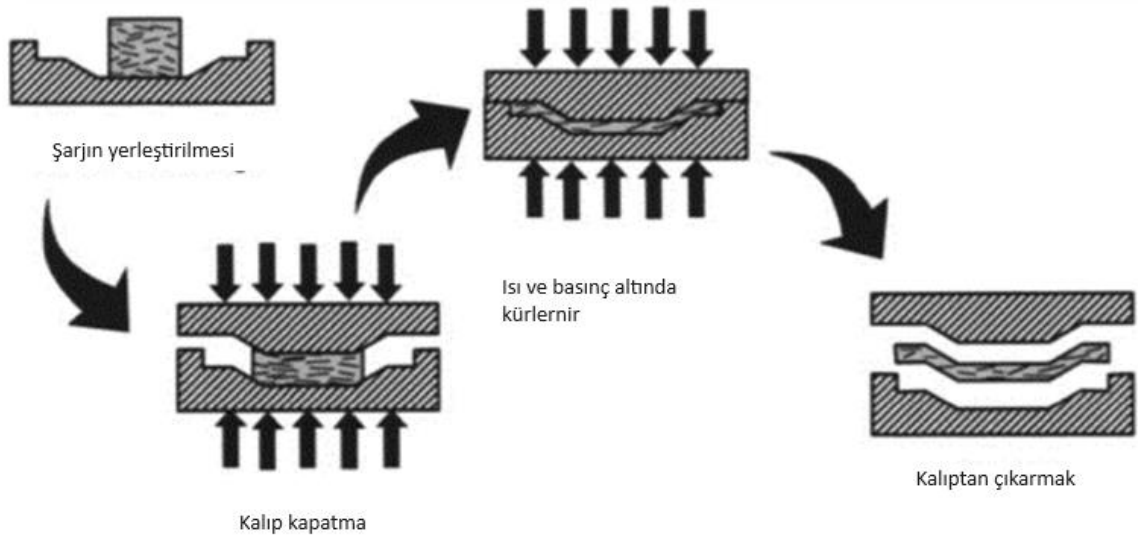
3.1.8. Vakum torbalama yöntemi

Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan bir üretim tekniğidir. Bu yöntemde takviye malzemelerinin üzerine reçine uygulanır ve vakum torbası içinde hava boşluklarının minimuma indirilmesi ile yüksek mukavemetli hafif ve kaliteli kompozit parçaların üretilmesi sağlanır. Vakum torbalamada katmanlar arasındaki boşluklar ortadan kaldırılarak yüksek mekanik dayanım elde edilir. İlk olarak kalıbın üzerine kuru fiberler yerleştirilir. Fiberlerin yerleşimi nihai ürünün dayanım ve esneklik özelliklerini belirler. Fiberlerin üzerine fırça veya el yardımıyla reçine uygulanır. Takviye malzemesinin tüm yüzeyine eşit miktarda yayılır. Bu işlemde hava kabarcıklarının oluşmaması önemlidir. Reçine yapışmasını engellemek için reçine kaplanmış takviye malzemesinin üzerine yüzey kalitesini arttırmak için ayırıcı film ya da

delikli bir kumaş eklenir. Esnek bir vakum torbası tüm katmanların üzerine yerleşir. Torba, kalıp ve malzeme arasındaki tüm boşlukları kaplar. Vakum devam ederken reçine, fiberlerin etrafında sertleşir ve bu işlem genellikle oda sıcaklığında ya da belirli bir sıcaklık altında gerçekleşir. Sertleşme tamamlandığında vakum torbası çıkartılır. Sertleşmiş kompozit parça kalıptan çıkartılır eğer ihtiyaç varsa yüzey işlemleri yapılır [31]. Şekil 3.7 vakum torbalama yöntemi gösterilmektedir.

Şekil 3.7. Vakum torbalama yöntemi [31].

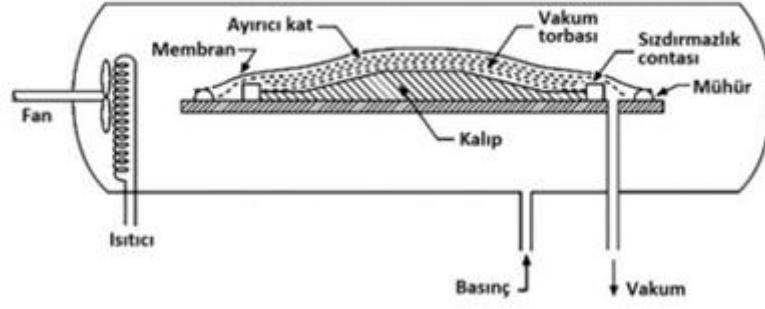
Termoset polimerler, yalnızca polimerizasyon ve olgunlaşma sürecinde şekillendirilebilen ve bu aşamalardan sonra geri dönüşüm olmayan bir yapıya sahiptir. Termoset malzemelerin kalıplanmasında basınçlı kalıplama yöntemi tercih edilir. Önceden ısıtılmış olan bir malzeme yine ısıtılmış bir kalıp boşluğuna yerleştirilir. Kalıp kapatılarak üzerine basınç uygulanır. İşlem sırasında malzemenin sıcaklığı genellikle 102-160°C arasında tutulur ve basınç değerleri 10-140 bar arasında değişir. Parçanın boyutları, şekli ve kalınlığına göre bu ısı çevirimi 1 -5 dakika arasında değişiklik gösterir. Tüm boşlukların kolayca doldurulması için kalıp duvarlarının malzemenin ergime sıcaklığının üzerinde ısıtılması gerekir. Tamamen kurlenene kadar kalıp malzeme kapalı tutulur. Otomobil ön tamponları, ev aletleri ve çeşitli elektrik parçalarının üretiminde sıklıkla kullanılır. Basınçlı kalıplama yöntemi çoğunlukla fiberglas polyester reçine sistemleri (SMC/BMC), Polifenilen sülfür (PPS) ve poliamid bazlı vespel gibi malzemelerle üretilir. Şekil 3.8’de basınçlı kalıplama yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Basınçlı kalıplama yöntemi [37].

3.1.10. Otoklav yöntemi

Kapalı kalıplama proseslerinden olan otoklav yöntemi, yüksek basınç ve sıcaklık altında kürlleme sürecidir. İlk adımda fiber takviyeli malzemeler reçine ile kaplanır ve kalıbın üzerine dikkatlice yerleştirilir. Kompozit tabakalar arasında istenilen mekanik özellikleri sağlamak için fiberler belirli bir düzende yerleştirilir. Yerleştirilen kompozit malzemelerin üzerine vakum torbası geçirilir. Sızdırmazlık sağlanır. Torbalama işlemi makine içerisinde oluşabilecek hava boşluklarını minimize etmek için yapılır. Bu malzemenin kalitesini arttıran bir yöntemdir. Vakumlanmış kompozit malzeme, otoklav adı verilen yüksek basınç ve sıcaklık sağlayabilen özel bir fırına yerleştirilir. Otoklavda malzemeye belirli bir sıcaklık ve basınç uygulanır. Sıcaklık ve basınç koşullarının çok hassas kontrol edilmesi sebebiyle yüksek kalite ile kompozit malzemeler elde edilir. Bu işlem sırasında reçine fiberlerin arasında daha iyi yayılarak kürlenir ve kompozit malzeme istenen sertliğe ve dayanıklılığa ulaşır. Isı ve basınç altında kürlleme tamamlandıktan sonra malzeme soğutulur ve otoklavdan çıkarılır. Kürlleme işlemi sonlandıktan sonra kompozit parça kalıptan çıkartılır. Bu yöntem kompleks yapıların güvenilir ve kaliteli bir şekilde üretimini sağlar. Şekil 3.9. 'da basınçlı kalıplama yöntemi gösterilmektedir.



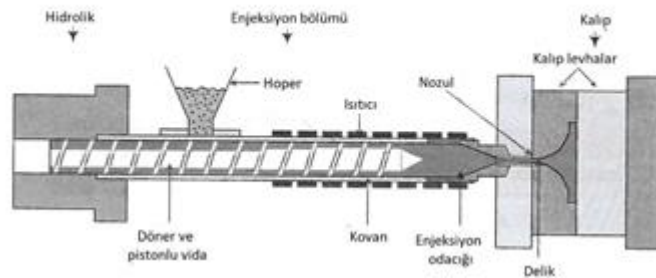
Şekil 3.9. Basınçlı kalıplama yöntemi

3.1.2. Termoplastik bazlı polimer matrisli kompozit malzemelere uygun üretim yöntemleri

Termoplastik malzemeler, ısıtıldıklarında yumuşayarak akışkan hale gelir ve soğutulduklarında yeniden sertleşir. Kimyasal bağlanma olmadığından her ısıtma soğutma döngüsünde tekrar eder. Verilen ısı ortadan kalktığında sertleşme davranışı gösterebilir. Termoplastik malzemelerin üretim aşamalarının gerçekleşmesinde bir çok üretim yöntemi mevcuttur. Üretim yönteminin seçilmesinde üretim yönteminin avantaj ve dezavantajlarına ve nihai ürünün gerekliliklerine bağlı olarak tercih edilir [3].

3.1.2.1. Enjeksiyon kalıplama yöntemi

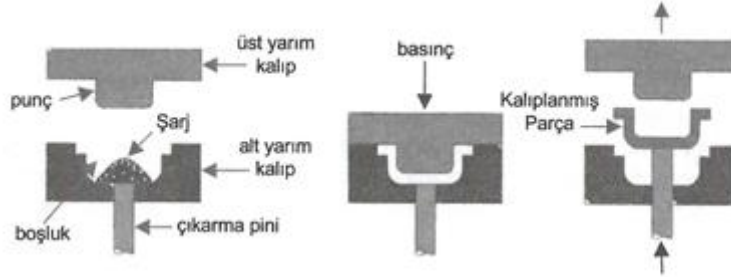
Toz ya da granül halindeki termoplastik malzemelerin ergitilmesi ve bir kalıba enjekte edilmesi prosesine dayanan bir üretim metodudur. Ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa getirildiğinde şekillerini korumaktadır. Bu yöntemin bir çok avantajı vardır. Enjeksiyon kalıplama aynı hacimlerde aynı plastik malzemelerin imalatı için en uygun üretim yöntemidir. Geniş malzeme aralığı ve yüksek verimlilik sunar [3]. Şekil 3.10’da enjeksiyon kalıplama yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Enjeksiyon kalıplama yöntemi [3].

3.1.2.2. Basınçlı kalıplama yöntemi

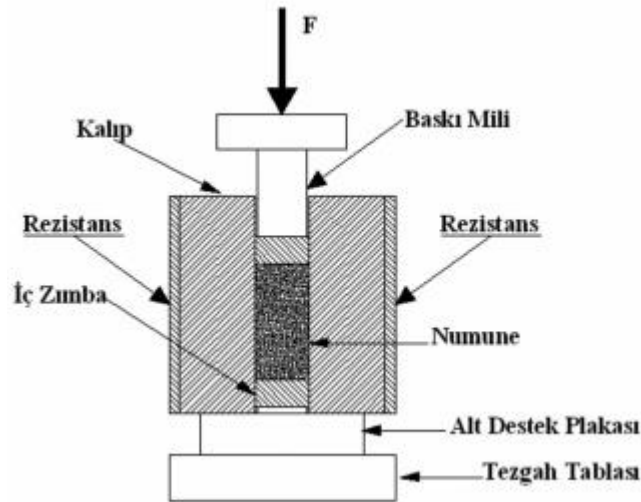
Kompozit ve polimer malzemelerin yüksek basınç altında şekillendirilmesi için kullanılan üretim yöntemidir. Malzeme yüksek basınç altında ısıtılmış bir kalıba yerleştirilir. Basınç uygulanarak istenilen şekil ve boyutlara getirilir. Büyük boyutlu ürünlerin üretilmesinde kullanılır [23]. Şekil 3.11 Basınçlı kalıplama yöntemi kullanılmaktadır.



Şekil 3.11. Basınçlı kalıplama yöntemi [23].

3.1.2.3. Sıcak presleme (Sıkıştırma kalıplama) yöntemi

Termoset ve termoplastik malzemelerin kalıplama işlemlerinde kullanılan bir üretim tekniğidir. Ham malzeme önceden ısıtılmış bir kabın içerisine konulur ve yüksek basınç ve sıcaklık altında kalıp içerisinde şekillenir. Sıcak presleme parçalara yüksek dayanıklılık, homojen bir yapı ve kaliteli bir yüzey sağlar [28]. Şekil 3.12 sıcak presleme yöntemi kullanılmaktadır.



Şekil 3.12. Sıcak presleme yöntemi [28].

4. NANOMALZEMELER

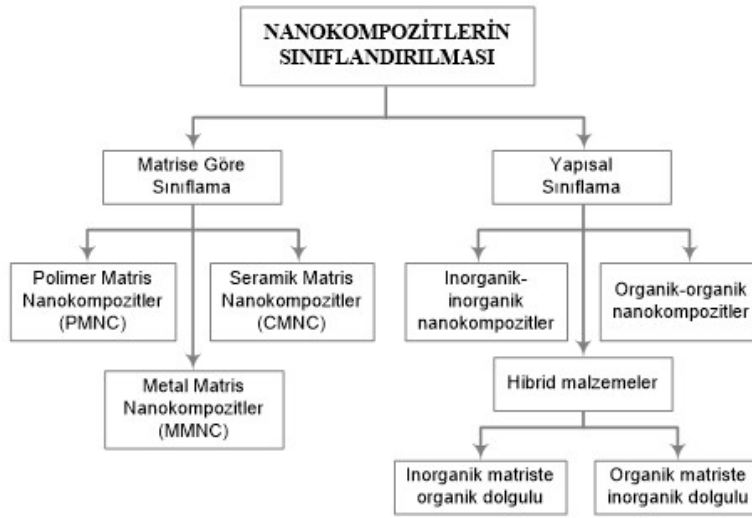
Nano kelimesi milyarda biri ifade eder ve bu malzemeler makroskobik boyuttaki malzemelere kıyasla oldukça farklı fiziksel ve kimyasal özellikler gösterir. Nanoteknoloji, boyutları nanometre seviyesinde olan malzeme ve cihazların üretilmesi ile ilgilenilir. Nano boyutta yaklaşık 5-10 atom yan yana dizilebilir. Bu ölçekteki malzemelerle çalışıldığında daha farklı sonuçlar elde edilir. Nanoteknoloji disiplinler arası bir alandır. Malzeme bilimi, biyoloji, elektronik, fizik, tıp, kimya ve daha pek çok alanda kullanılmaktadır. Daha hafif malzemeler geliştirmek ya da biyosensörler tasarlamak gibi amaçlarla kullanılır. Nanoteknolojinin temel hedefleri arasında nano ölçekli yapıların analiz edilmesi, fiziksel özelliklerinin belirlenmesi, yeni üretim yöntemlerinin araştırılması ve daha dayanıklı ve hafif ürünler elde edilmesi yer alır. Nano boyutlu malzemeler genellikle 1-100 nm arasında değişen tozlar veya parçacıklardan oluşur. Malzemelerin atom ve molekül yapılarını değiştirerek farklı özellikler kazandırılmasıyla elde edilen malzemelere nanomalzemeler denir. Nanoteknoloji günümüzde üstün teknolojik ürünler üretme kapasitesine sahiptir [32,33].

4.1. Nanokompozitler

Nanokompozitler en az bir fazı 100 nanometreden (nm) küçük boyutlara sahip olan kompozitlerdir. Başka bir ifade ile yapıyı oluşturan farklı fazlar arasında tekrarlanan mesafelerin nanometre cinsinden olduğu çok fazlı katı kompozitlerdir. Nanometre boyutundaki yapı taşları nanokompozitlerin fiziksel olağanüstü esneklik ve iyileştirmeler sağlamak için yeni malzemeler inşa etmek ve üretmek amacıyla kullanılır. Verilen bu tanımlardan, gözenekli ortamlar, kolloidler, jeller ve kopolimerler için de geçerli olabilir. Ancak burada, özellikleri yapı ve kimyadaki farklılıklardan dolayı değişen, yığın matrisi ve nano boyutlu faz ya da fazların katı kombinasyonunu kastedilmektedir. Nanokompozitlerin özellikleri, onları oluşturan malzemelerden önemli ölçüde farklıdır. Farklı nanoboyutlar farklı sonuçlara yol açar; Bunlar şunlardır:

1. Katalitik aktivite oluşturmak için $< 5\text{nm}$
2. Daha yumuşak bir manyetik malzeme oluşturmak için $< 20\text{nm}$
3. Kırılma indekslerini değiştirmek için $< 50\text{ nm}$
4. Süperparamanyetizmanın hareketini kısıtlamak, mekanik güçlendirme veya matris dislokasyonu için $< 100\text{ nm}$ [32,33].

Nanokompozitlerin sınıflandırılması Şekil 4.1’de verilmektedir.



Şekil 4.1. Nanokompozit türleri

4.1.1. Polimer matrisli nanokompozitler

Temel olarak polimer bir matris malzemesi ve nanoölçekli dolgu malzemelerinin uygun bir üretim yöntemi ile birleştirilmesi ile oluşur. Nano boyuttaki malzemelerin özellikleri aynı malzemenin daha büyük parçacıklarına kıyasla daha üstün ve yenilikçidir. Makro boyutlu türlerine göre daha yüksek bir yüzey alanına sahiptir. Nanokompozitlerin yüksek yüzey /hacim oranları sebebiyle bu tür malzemelerde matris malzemesi ile takviye elemanının ara yüzey alanları makro seviyedekilere göre daha yüksektir. Bu da malzemelerin daha üstün özelliğe sahip olmasını sağlar. Bu kompozitlerin üretiminde çoğunlukla eriyik harmanlama, çözücü yöntemi ya da yerinde polimerizasyon gibi yöntemler kullanılır. Yöntemlerden hangisinin kullanılacağı hedeflenen ürünün özellikleri ve verimliliğine göre tercih edilir. Takviye elemanlarının matris içerisinde homojen bir şekilde dağılması polimer matrisli nanokompozit malzemelerin üstün mekanik özelliklerini göstermesinde en önemli husustur. Polimer matrisli nanokompozitler mikro ve makro boyuttaki kompozitlere nazaran daha iyi özellik sunarlar. Daha yüksek elastik modül, daha iyi mukavemet, iyi bir ısı kararlılık, daha düşük gaz geçirgenliği sağlar [19,32,33].

4.1.1.1. Epoksi matrisli nanokompozitler

Epoksi, kompozit yapımında sık tercih edilen bir matris malzemesidir. Epoksi reçine içerisine genellikle 1-100 nm boyutlarında takviye malzemesinin homojen dağılmasıdır. İstenilen nitelikte nanokompozit malzemenin üretilmesinde matris içine eklenen nanoparçacıkların homojen dağılması, nanoparçacık ve yüzey etkileşimi açısından önemlidir. Düşük viskozite

değeri sayesinde oda sıcaklığında kalıplanabilir olması. Korozyon ve kimyasal direncinin iyi olması aynı zamanda istenilen nanokompozit yapının sahip olması istenilen özelliklere göre epoksi reçinenin yapısında değişiklikler yapılabilir. Kür oranının değiştirilmesi ve işlem sıcaklıkları özellikleri değiştirilebilir [19,32,33].



5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Kullanılan hammaddeler ve cihazlar

Deney numunelerinin şeklini alacağı kalıbın hazırlanması için kalıp silikonundan yararlanılırken, deney numunelerin üretimi için hammadde olarak epoksi malzemeye, nano boyuttaki silisyum nitrür malzemesi katılmıştır.

5.1.1. Kullanılan hammaddeler

Deney çalışmasının ilk adımı olarak RTV-3030 kalıp silikonu ve sertleştiricisi kullanılmıştır. Deney numuneleri için matris olarak matris için epoksi reçine ,takviye elemanı olarak silisyum nitrür kullanılmıştır. Silisyum nitrürün boyutu 20-35 nm arasında seçilmiştir. Kalıp silikonu olarak Verpol RTV-3030 yarı şeffaf kalıp silikonu kullanılmış ve Verpol Boya firmasından teminatı sağlanmıştır. Silikonun yoğunluğu $1,15 \text{ g/cm}^3$ 'tür . Viskozite değeri 20000 MPa.s'dır. Katalizör oranı ,oda sıcaklığında %3 olarak kullanılmıştır. Kalıp silikonu ve katalizörün homojen bir şekilde karıştırılması önemli bir adımdır. Tez numuneleri için MGS LR285 laminasyon epoksi reçine olarak kullanılmıştır. Yoğunluk değeri $1,18-1,23 \text{ g/cm}^3$ değerleri arasındadır. Viskozite değeri , 600-900 mPa.s arasındadır. Sertleştirici olarak , LH287 kodlu sertleştirici kullanılmıştır. Epoksi reçine ile sertleştiricinin karışım oranı 100:40 olarak belirlenmiştir yapılan diğer çalışmalar referans alınarak. Takviye elemanı olarak ise silisyum nitrür (Si_3N_4) nano tozu , Nanografi firmasından temin edilmiştir. Tablo 5.1'de silisyum nitrür tozunun sahip olduğu teknik özellikler ve Tablo 5.2'de silisyum nitrürün bazı fiziksel , kimyasal ve mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.1. Silisyum nitrür tozunun sahip olduğu teknik özellikler

Saflik (%)	99,5
Renk	Beyaz
Ortalama Parçacık Boyutu	20-35
Yığın yoğunluğu (g/ cm^3)	0,05
Gerçek yoğunluk (g/ cm^3)	3,32
Özgül Yüzey Alanı(m^2/g)	40.0-125.0
Zeta Potansiyeli(mV)	-21,5
Morfoloji	Küresel
Üretim Yöntemi	Plazma Ark Buharı

Tablo 5.2’de Silisyum nitrürün bazı fiziksel , kimyasal ve mekanik özellikler

Ayrışma Sıcaklığı	1900°C
Teorik Yoğunluğu (g/cm ³)	3.168-3.188
α — Si ₃ N ₄	3.190-3.202
β - Si ₃ N ₄	
Yoğunluk (g/cm ³)	
Yoğun Si ₃ N ₄	Teorik yoğunluğun %90-100’ü
Reaksiyon bağlı Si ₃ N ₄	Teorik yoğunluğun %70-88’i
Termal genleşme katsayısı (10 ⁻⁶⁰ l/C) (20-1500 °C)	2.9-3.6
Termal iletkenlik (W/mK)	
Yoğun Si ₃ N ₄	15-50
Reaksiyon bağlı Si ₃ N ₄	4-30
Termal difüzyon katsayısı (cm/sn)	
Yoğun Si ₃ N ₄	0,08-0.29
Reaksiyon bağlı Si ₃ N ₄	0,02-0.22
Spesifik isi (J/kg°C)	700
Elektriksel direnç (Ωcm)	10 ¹³
Mikrosertlik (Vickers MN/m ²)	1600-2200
Young modülü (GN/m ²)	
Yoğun Si ₃ N ₄	300-330
Reaksiyon bağlı Si ₃ N ₄	120-220
Kırılma tokluğu (MN/m ²)	
Yoğun Si ₃ N ₄	3.4-82
Reaksiyon bağlı Si ₃ N ₄	1.5-2.8

5.1.2. Kullanılan cihazlar

Yapılan çalışmada kullanılan cihazlar ve onların kullanım hedefleri Tablo 5.3’te gösterilmiştir.

Tablo 5.3.Tez çalışması kapsamında kullanılan cihazlar.

Kullanılan Cihaz	Marka/Model	Kullanım Amacı
Tartı	Desis AHW6+	Epoksi reçine ,sertleştirici ve kalıp malzemelerinin tartılması.
Mekanik karıştırıcı	Jet JDP-8L	Epoksi reçine ve sertleştiricinin karıştırılması.
Hassas Terazı	Weightlab Instruments / VL-303	Kullanılan takviye malzemesinin tartılması.
Etüv	Binder ED 53	Epoksi reçinenin ısıtılması, nano katkı maddesinin neminin alınması ,kalıbın ısıtılması ve post kür işleminin gerçekleşmesi.
Ultrasonik karıştırıcı	Bandelin HD2070 Ultrasonik Homojenizatör	Epoksi ve nanokatki malzemesinin karıştırılması.

5.2. Deneysel Çalışmalar

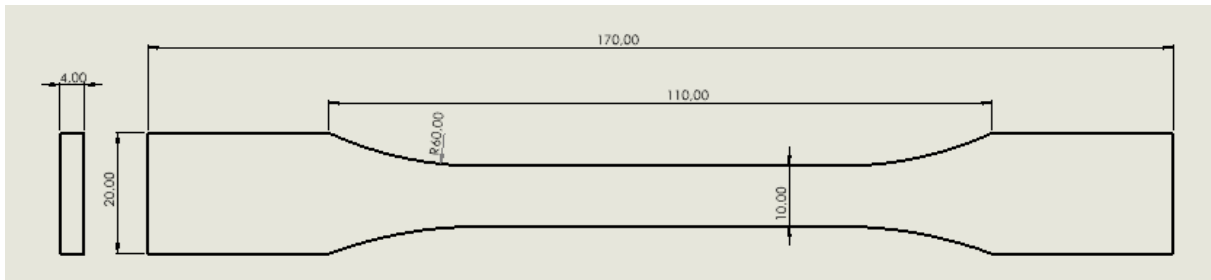
Deney çalışmaları kapsamında ilk adım deney numuneleri için kalıpların hazırlanmasıdır. Numuneler hazırlandıktan sonra mekanik ve termal karakterizasyon ile yüzey morfolojisi incelenir.

5.2.1. Kalıpların hazırlanması

Prosesin ilk adımı üretilecek olan deney numunelerinin döküleceği kalıbın hazırlanmasıdır. Kalıbın hazırlanmasında dikkat edilmesi gereken husus ise epoksi reçinenin yapışmayacağı bir kalıp malzemesinin seçilmesidir. Bu sebeple RTV-3030 kalıp silikonu tercih edilmiştir. Kalıp silikonunu bir beherin içinde tartıp, ağırlığının %3 oranında ek sertleştirici eklenip karışım homojen olana kadar karıştırılmıştır. Kalıp silikonu ve sertleştiriciden oluşan karışım ile referans alınan numunelerin desteğiyle istenilen kalıp elde edilmiştir. Hazırlanan silikon kalıp Şekil 5.1’de verilmiştir. Şekil 5.2’de ise deney numunesinin ölçüleri verilmektedir.



Şekil 5.1. Hazırlanan kalıp silikon



Şekil 5.2. Deney numunesi ölçüleri

5.2.2. Epoksi matrisli nanokompozitlerin üretimi

Epoksi matris içine katkı olarak silisyum nitrür seçilmiştir. Bu çalışmada kullanılan silisyum nitrürün boyutları 20-35 nanometre olarak tercih edilmiştir. Deney çalışmalarına başlarken ilk olarak etüv fırınında silisyum nitrürün neminin alınması gerekmektedir. Bu sebeple silisyum nitrür tozu her kompozisyon için ayrı ayrı hassas terazi yardımıyla tartılıp beher içerisinde etüv

fırın içerisinde 100 °C ‘de 16 saat bekletilmiştir. Epoksi içerisinde takviye elemanının daha iyi dağılması için epoksi reçine 60 °C de 1 saat boyunca etüv fırında ısıtılmıştır. Dolgu maddesinin epoksi içerisinde homojen bir şekilde dağılması için en etkili yol ultrasonik homojenizatördür. Bu yöntemde homojen dağılım sağlanırken epoksi yüksek sıcaklıklara çıkmaktadır bu sebeple olumsuz durumların oluşmaması için her biri 5 dakikada bir epoksi reçine buz banyosunda soğutulmuştur. Toplam bir kompozisyon için bu işlem 20 dakika sürmüştür . Toplamda 4 sefer buz banyosunda soğutulan reçine en son oda sıcaklığına gelmesi beklenerek 10:4 oranında sertleştirici ilave edilmiştir. Sertleştirici ilave edildikten sonra mekanik karıştırıcıda 5 dakika boyunca karıştırılıp ardından hava kabarcıklarının alınması için 20 dakika boyunca 1 bar basınç altında vakum uygulanıp hava kabarcıkları giderilmiştir. Hava kabarcıksız karışımdan sonra, karışım önceden hazırlanan kalıplara dökülmüştür. 24 saat oda sıcaklığında bekletilen numuneler daha sonra kalıptan çıkarılıp 80°C’de 16 saat post kür işlemi için bırakılmıştır. Şekil 5.3’de süreç şematik olarak verilmiştir.



Si₃N₄ tartımı



Epoksi reçine tartımı



Epoksi reçineye Si₃N₄ katılması ve ultrasonik karıştırılması



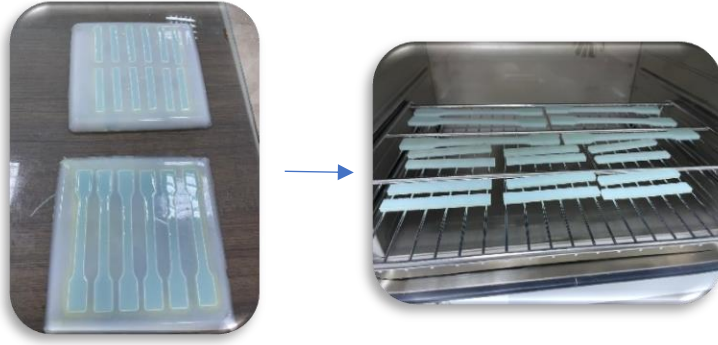
Sertleştirici eklenmesi



Mekanik karıştırıcı ile karıştırılması



Vakum uygulanması (1 bar 20 dk)



Silikon kalıpta 24 saat bekletildi

Etüvde bekletme (16 saat 80 °C’de post-kür)

Şekil 5.3. Üretim aşamalarının şematik gösterimi

5.3. Karakterizasyon

Hazırlanan numunelerin mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla çekme ve üç eksenli eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin mikroyapılarının incelenmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikroyapısal analizler gerçekleştirilmiştir.

5.3.1. Çekme testi

Çekme testi malzemenin mekanik özelliklerini ortaya çıkartmak için en yaygın kullanılan test işlemidir. Boyutları standartlara uygun olan deney numunesi, birbirine göre aşağı ve yukarı hareket edebilen çeneye yerleştirilir ve çenelerden birisi sabit hızda hareket ettirilerek deney numunesine farklı ölçülerde çekme kuvveti uygulanır bunun neticesinde bu kuvvete karşılık gelen uzama kaydedilir. Bu test neticesinde çıkan sonuçlar mühendislik işlemlerinde kullanılmaktadır. Şekil 5.3’te Zwick ZS 100 çekme test cihazı gösterilmektedir.



Şekil 5.3'te Zwick ZS 100 çekme test cihazı

Bu çalışma kapsamında, çekme testleri Yalova Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarı Mekanik Test Laboratuvarı'nda Zwick Roell Z020 test cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.4. Çekme testinin üretilen deney numunelerine uygulanması

ISO-527 standartına uygun olarak çekme testinin sonuçlarından yararlanılarak; Denklem 5.1 kullanılarak çekme mukavemeti , 5.2 kullanılarak gerinim değeri ve 5.3 kullanılarak elastiste modülü hesaplanır.

Elastite modülü (E); Malzemenin kuvvet altında şekil değiştirme ölçüsüdür. Çekme mukavemeti; Bir numunenin kaldırabileceği maksimum mekanik gerilimi tanımlar. Gerinim ise yük uygulanan malzemenin ,uygulanmadan önceki durumuna kıyasla şeklinin nasıl değiştiğini tanımlar.

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

$$\varepsilon = \frac{I-I_i}{I_i} \quad (5.2)$$

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

5.3.2. Üç eksenli eğme testi

Deney numunesinin iki destek noktası üzerine yerleştirilmesi ve orta noktaya kuvvet uygulanması ile gerçekleşir. Şekil 5.5'te üç eksenli eğme testinin deney numunelerine uygulanması gösterilmiştir. Tez çalışması kapsamında, üç eksenli eğme testi Yalova Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarı Mekanik Test Laboratuvarı'nda Zwick Roell Z020 test cihazında yapılmıştır. Üç eksenli eğme testi sonuçlarından yararlanılarak eğme elastite modülü ve mukavemeti değerleri belirlenebilir. ISO-178 standartına göre yapılmıştır. Denklem 5.4 kullanılarak eğme mukavemeti denklem 5.5 kullanılarak elastite modülü değeri belirlenebilir.

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

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



Şekil 5.5. Üç eksenli eğme testinin üretilen deney numunelerine uygulanması

5.3.4. SEM(Taramalı elektron mikroskobu)

Bir malzemenin yüzeyini yüksek çözünürlükte incelemek için kullanılan bir görüntüleme yöntemidir. Bu yöntem yüzey morfolojisi ve yapısal özellikler ve malzemenin kimyasal bileşimi hakkında bilgi verir. Taramalı elektron mikroskobunun çalışma prensibi, İlk olarak yüksek enerjili bir elektron demeti numunenin yüzeyine erişir, elektron demeti lananit hekzaborür (LaB_6) ya da tungsten filamentidir. Elektronlar numunenin yüzeyi ile çarpıştığında farklı türde sinyaller oluşur. Toplanan sinyaller, dedektör vasıtası ile işlenir ve yüzeyin üç boyutlu görselliğe yakın bir görsellik oluşturulur. Geniş bir büyütme aralığı sunması ve üç boyut hissi veren yüzey görüntülerinin yanında elementel analiz birleştirebilme fırsatlarını bize sunmaktadır.

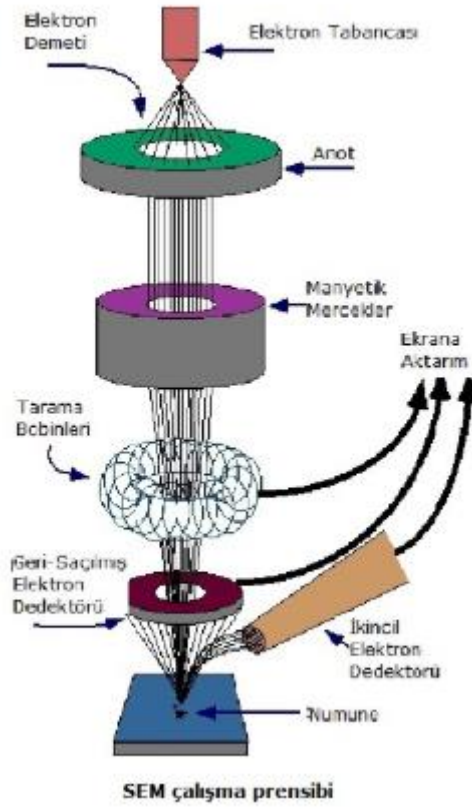
SEM ile malzeninin incelenen özellikleri ;

Yüzey morfolojisi

Elektriksel Dağılım

Kristal Yapılar

Büyütme Kapasitesi



Şekil 5.6. Taramalı elektron mikroskobu çalışma prensibi [34].

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu kısımda hazırlanan tez numunelerinin mekanik ve termal özelliklerini incelemek amacıyla yapılan çekme testi ve üç noktalı eğme testi sonuçları incelenecek ve tartışılacaktır.

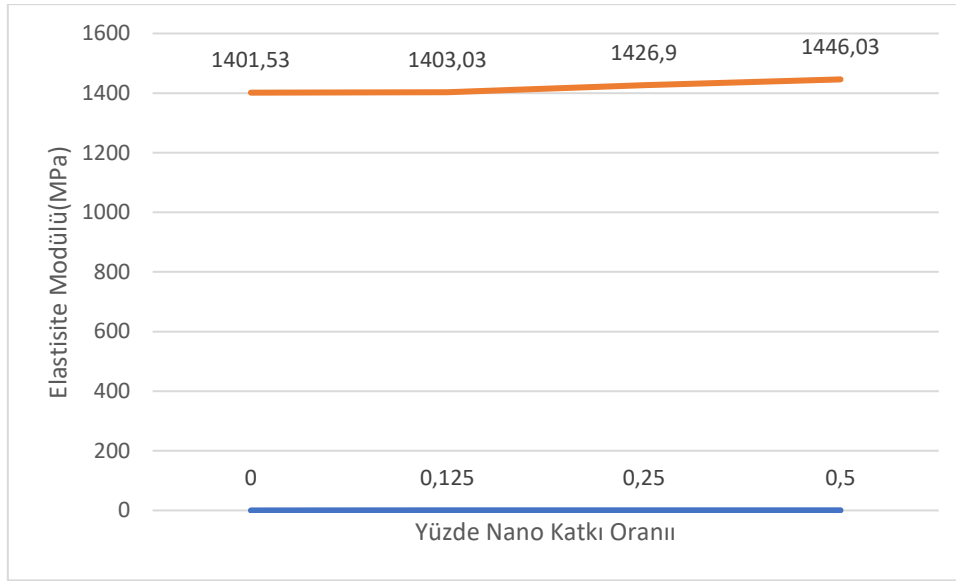
6.1. Çekme testi sonuçları

Tez çalışmasında , hazırladığımız çekme numuneleri, çekme dayanımı, elastisite modülü ve kopma uzaması değerlerinin belirlenebilmesi ve yapı içerisine takviye edilen nano boyuttaki silisyum nitrürün 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 yapılan çekme testi sonucunda; elastisite modülü, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerini ve standart sapma verileri bulunmaktadır.

Tablo 6.1. Çekme testi sonucunda elde edilen nano silisyum nitrür ilavesinin mekanik özelliklere etkisi.

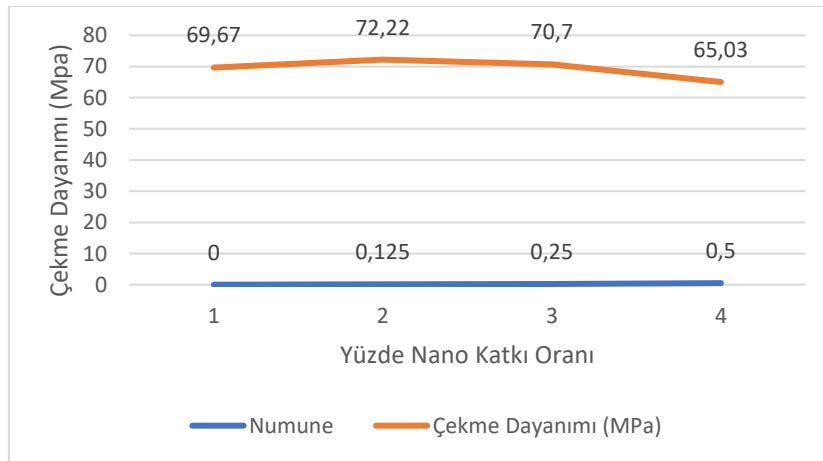
Numune	Elastisite Modülü (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması(%)
Saf (%0) epoksi reçine	1401,53±171,81	69,67±0,81	7,2±0,73
%0,25 Silisyum Nitrür takviyeli epoksi reçine	1403,03±5,40	72,22±0,85	7,45±0,22
%0,125 Silisyum Nitrür takviyeli epoksi reçine	1426,90±78,22	70,70±0,94	6,81±0,47
%0,50 Silisyum Nitrür takviyeli epoksi reçine	1446,03±83,20	65,03±0,06	6,42±0,52



Şekil 6.1. Yüzde nano katkı oranı - elastisite modülü grafiği

Şekil 6.1 incelendiğinde, epoksi reçine içerisine nano silisyum nitrür 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 1401,53 MPa değerine sahip olan saf epoksi grubu olduğunu görmekteyiz. En yüksek elastisite modülü değerine sahip numune grubuna baktığımızda ise, içerisinde ağırlıkça %0,50 oranında nano boyutta silisyum nitrür bulunan ve 1446,03 MPa elastisite modülü değerine sahip olan numune grubunun olduğunu görmekteyiz.

Deney sonuçları referans alınarak , yapı içerisine nano silisyum nitrür eklenmesi ile birlikte, malzemenin sahip olduğu elastisite modülü değerlerinde bir artış eğilimi görülmektedir aynı zamanda kompozit malzeme yapısı içerisindeki dolgu oranının artmasıyla birlikte malzemenin daha gevrek ve rijit özellik kazandığını da deney sonuçlarına göre söylenebilir.

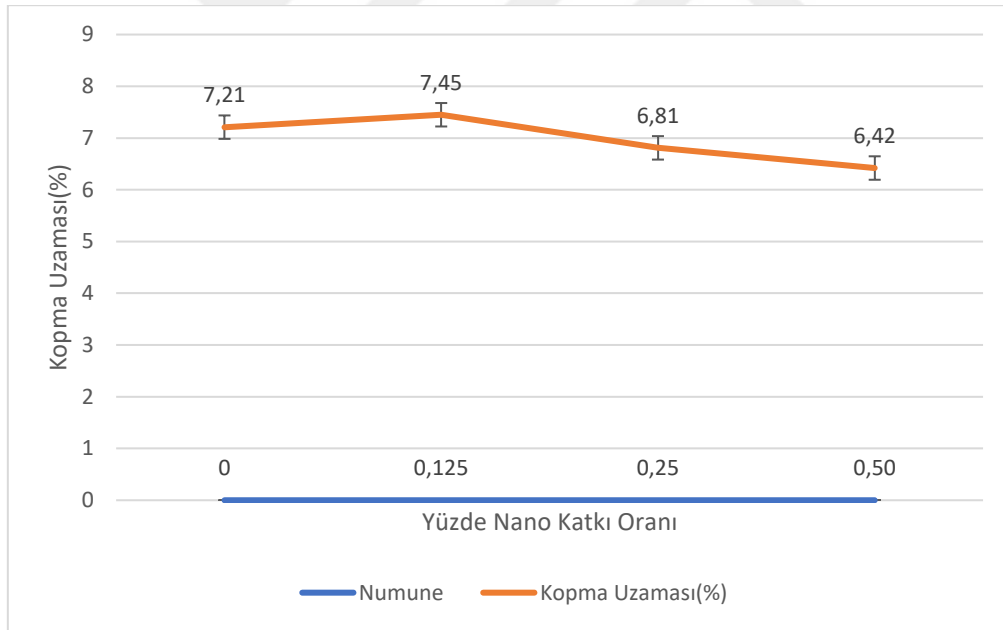


Şekil 6.2. Yüzde nano katkı oranı - çekme dayanımı grafiği

Şekil 6.2’de bulunan yüzde nano katkı oranı/çekme dayanımı grafiğini incelediğinde, epoksi reçine içerisine nano silisyum nitrür’ün ilave edilmesiyle birlikte, çekme dayanımı değerlerinde bir düşüş görüldüğü görülmektedir. İçerisinde nano boyutta silisyum nitrür katkısı bulunan %0,5 nano silisyum nitrür takviyeli epoksi reçine grubu, 65,05 MPa çekme dayanımı değeriyle birlikte, en düşük çekme dayanımı değerine sahip olan gruptur.

Buna karşın, en yüksek çekme dayanımı değerine sahip olan grup ise 72,22 MPa çekme dayanımına sahip olarak, en yüksek elastisite modülü değerine sahip olan %0,125 oranında nano silisyum nitrür ilaveli epoksi reçine grubudur.

Yapı içerisine nano silisyum nitrür ilave edildiğinde, çekme dayanımında bir düşüş görülmektedir. Yapı içerisine takviye elemanı eklenmesiyle, matris ve takviye elemanı arasında zayıf bağların oluşma ihtimali sebep olabilir. Bunun yanında, katkı elemanının yapı içerisinde homojen bir dağılım sergileyememesinde topaklanma oluşturmaları sebebiyet verebilir. Yapı içerisinde gerilme yığılma bölgelerinde meydana gelebilecek çentik etkisinden kaynaklı malzemenin dayanım değerlerinde de bir düşüş görülebilmektedir.



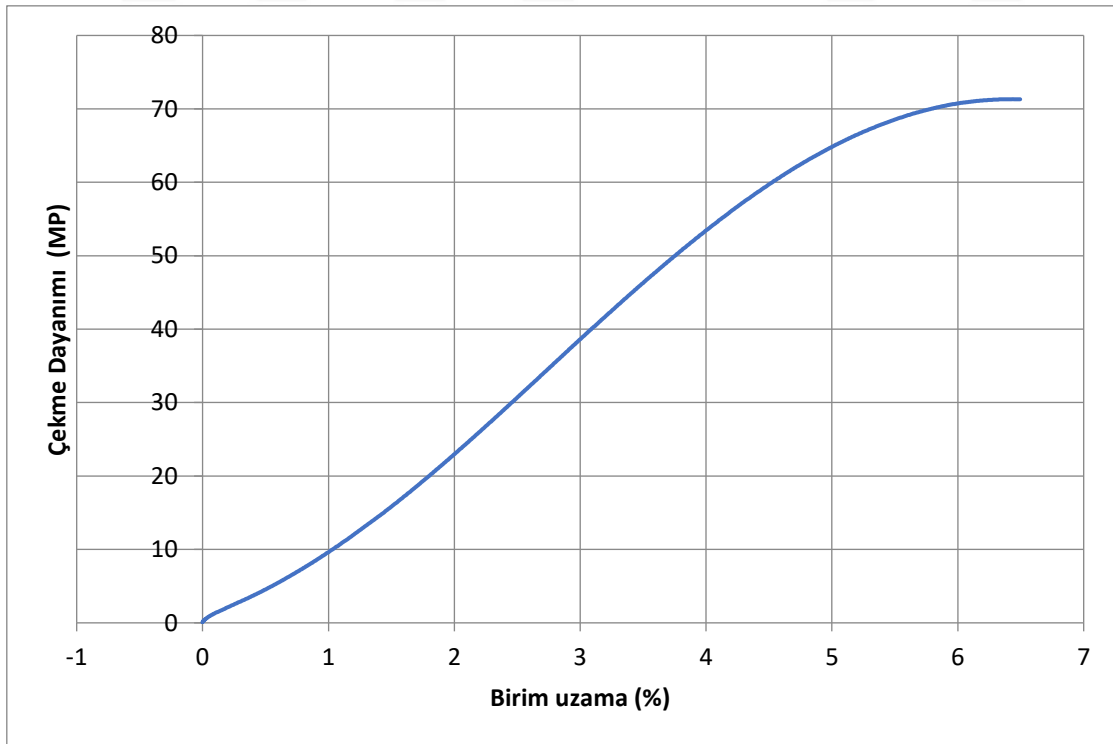
Şekil 6.3. Yüzde nano katkı oranı – kopma uzaması grafiği

Şekil 6.3’de yer alan, yüzde nano katkı oranı/yüzde kopma uzaması grafiği incelendiğinde, epoksi reçine içerisine nano silisyum nitrür ilavesi gerçekleştirildiğinde, yapının sahip olduğu yüzde kopma uzaması değerlerinde bir düşüş olduğu görülmektedir. En yüksek yüzde kopma uzaması değerine sahip olan numune grubu %7,45 kopma uzaması değeriyle birlikte % 0,125 nano katkılı silisyum nitrür epoksi reçine grubudur. Ağırlıkça %0,50 oranında nano silisyum

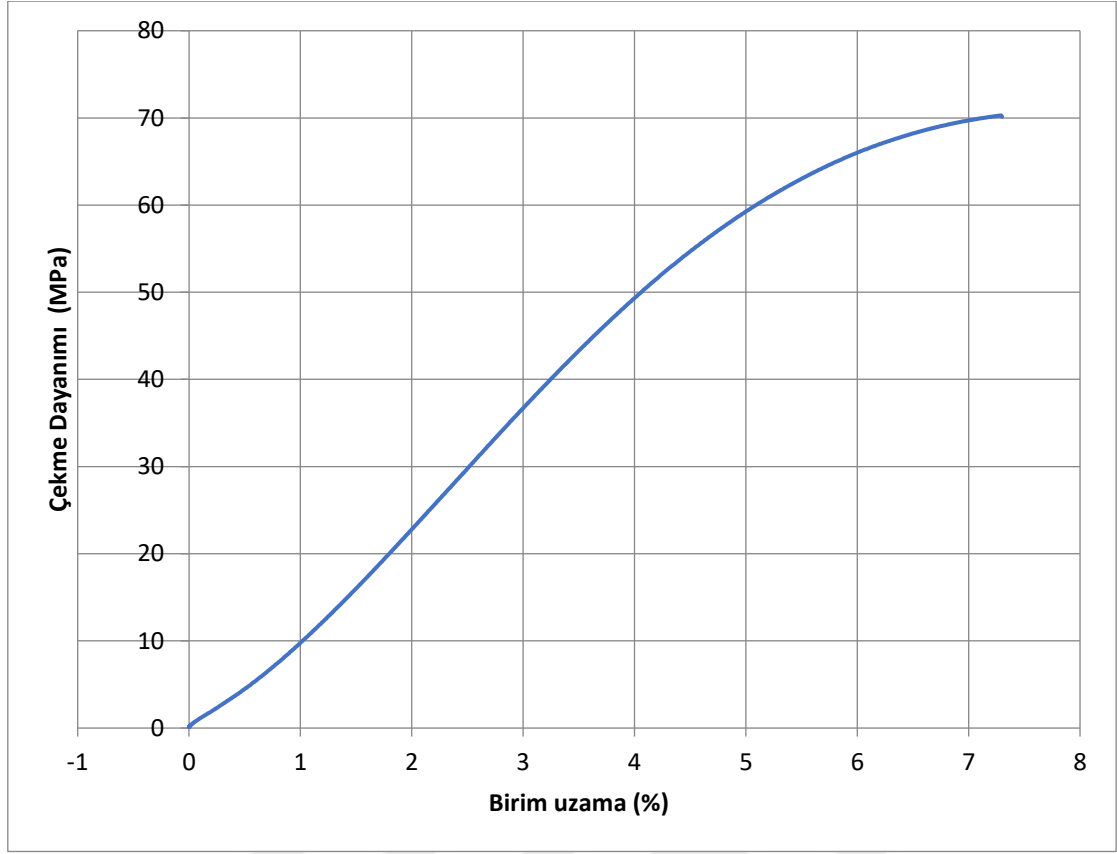
nitrür takviyeli epoksi reçine grubu; %6,42 kopma uzaması ile en düşük yüzde kopma uzaması değerine, en yüksek elastisite modülü değerine ve en düşük çekme dayanımı değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Grafik üzerindeki sonuçlar incelendiğinde, nano dolgu ilave edilmesi sonucunda malzemelerin gevreklik özelliklerinde artış olduğu yorumu yapılabilmektedir. Çekme testi sonuçlarında %0,5 silisyum nitrür katkılı epoksi numunelerinin en yüksek elastisite modülü, en düşük kopma uzaması ve çekme dayanımı değerlerine sahip olduğu söylenebilmektedir. Ayrıca ağırlıkça %0,125 oranında nano silisyum nitrür takviyeli epoksi reçine grubunun da , elastisite modülün de artış olmakta ve en yüksek yüzde kopma uzaması değeri ve çekme dayanımı değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Yapılan çekme testine göre , optimum nano silisyum nitrür katkı oranının, %0,125 olduğu söylenebilir.

Benzer başka bir çalışmada epoksiye nano silisyum oksit katıldığında epoksiye göre eğilme dayanımında artış görülmektedir yani saf epoksiye göre eğilme dayanımı artmıştır[35]. Bir başka çalışmada ise nano boyutta eklenen bor nitrürün saf epoksiye göre elastik modülünü 3.5 kat arttırdığı fakat takviye oranı arttıkça çekme dayanımının düştüğü ve kopma uzamasının takviye oranı arttıkça saf epoksiye yakın % kopma uzaması gösterdiği görülmektedir[36].

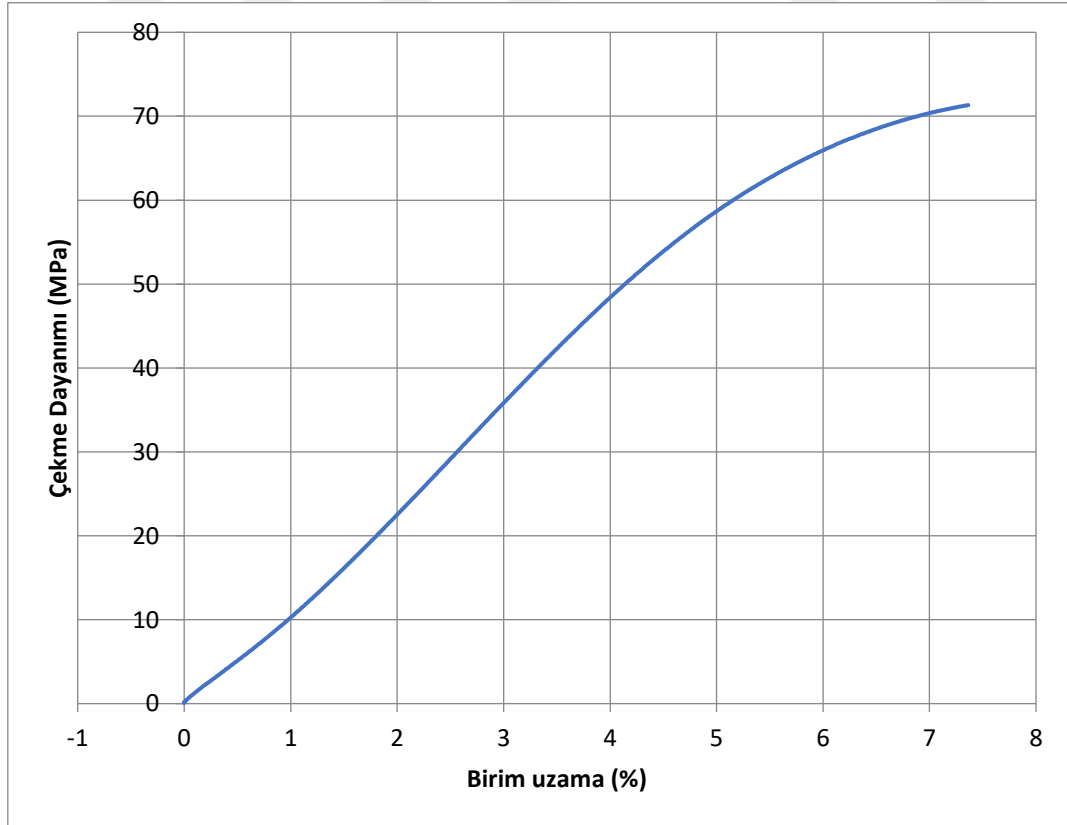
Aşağıdaki şekillerde % nano katkılı silisyum nitrür'ün gerçek çekme değerleri gösterilmektedir.



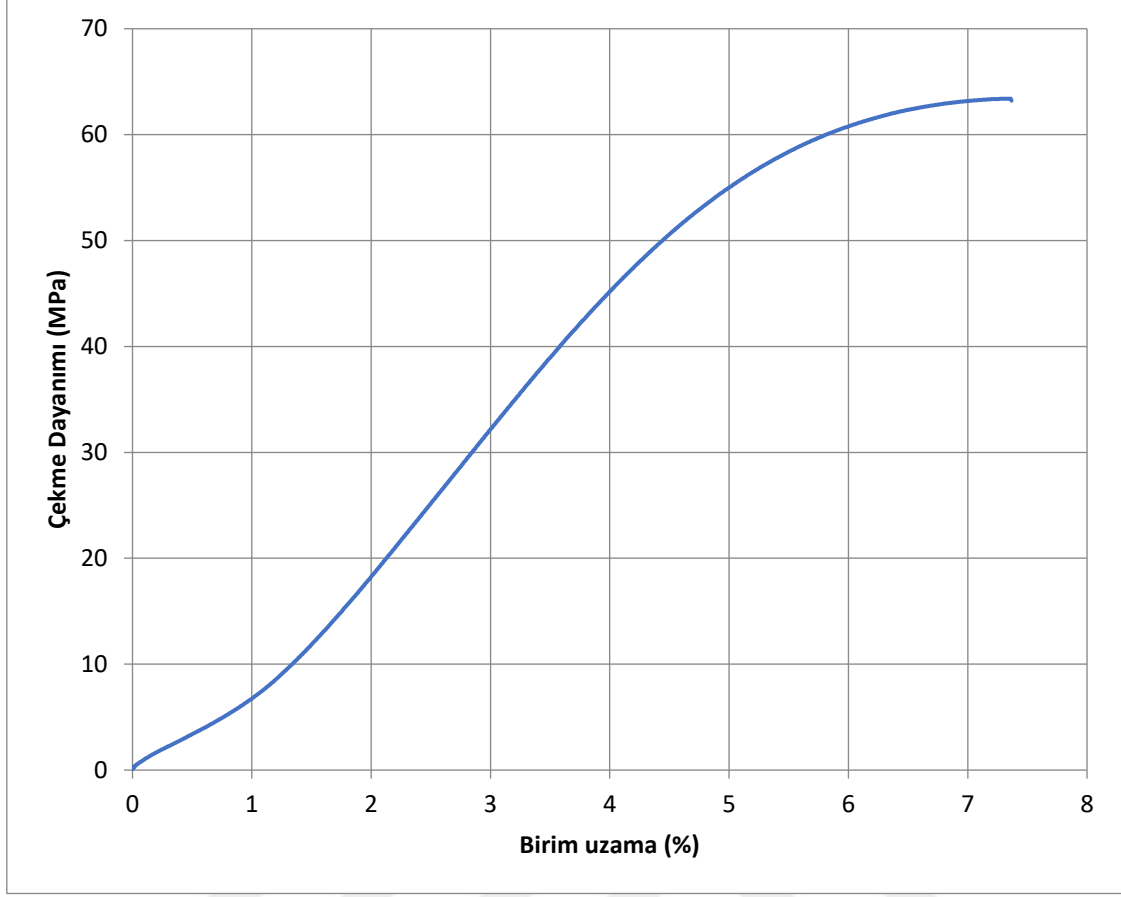
Şekil 6.4. Saf epoksi reçine - çekme dayanımı grafiği



Şekil 6.5. Ağırlıkça %0,125 Si₃N₄ nano katkı oranı - çekme dayanımı grafiği



Şekil 6.6. Ağırlıkça %0,25 Si₃N₄ nano katkı oranı - çekme dayanımı grafiği



Şekil 6.7. Ağırlıkça %0,50 Si_3N_4 nano katkı oranı - çekme dayanımı grafiği

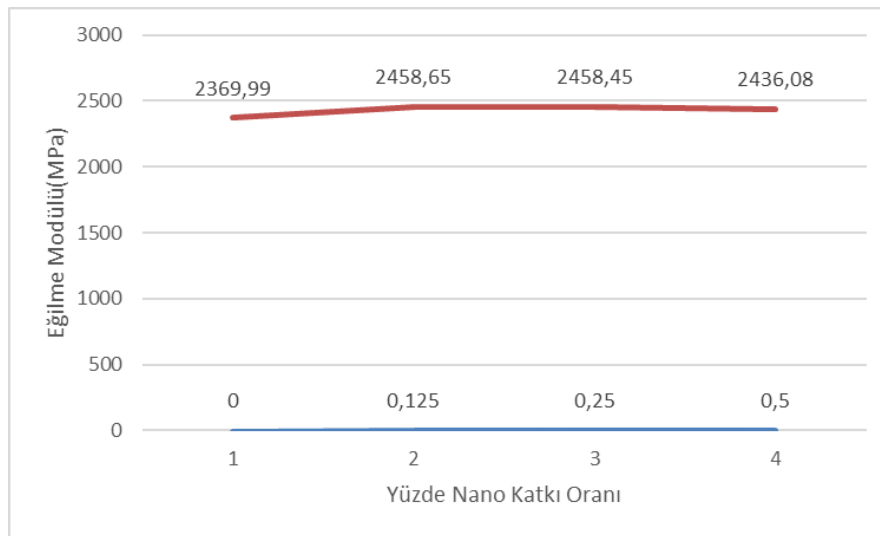
6.2. Üç Noktalı Eğme Testi Sonuçları

Hazırlanan eğme deney numuneleri kapsamında, eğilme modülü ve eğilme dayanımı değerlerinin elde edilmesi amacıyla, üç noktalı eğme testi yapılmıştır. Bu test neticesinde, yapı içerisine ilave edilen nano boyuttaki silisyum nitrürün mekanik özelliklere hangi oranda etki ettiğini belirlenmiştir. Bu test neticesinde malzemenin eğilme dayanımını ölçebiliriz. Malzemenin çatlak oluşumunu ve bu çatlakların yayılmasına karşı gösterdikleri davranışı gözlemleyebiliriz. Malzemenin elastik ve plastik davranışlarını belirleyebilir bu ölçütler doğrultusunda aksiyon alabiliriz. Malzemenin kırılğan ya da sünek olduğunu tespit edebiliriz. Bu test yaygın olarak seramik, cam, beton ve bazı metal gibi malzemelerin mekanik özelliklerinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılır. Test sırasında malzeme iki sabit destek noktasından tutulur ve üçüncü bir noktadan genellikle numunenin ortasından kuvvet uygulanır. Uygulanan kuvvet genellikle bir test makinesi tarafından kontrollü bir şekilde uygulanır. Numunenin deformasyonu sürekli olarak kaydedilir. Elde edilen veriler malzemenin eğilme dayanımı, elastik modülü ve diğer mekanik özelliklerini hesaplamak üzere kullanılır.

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

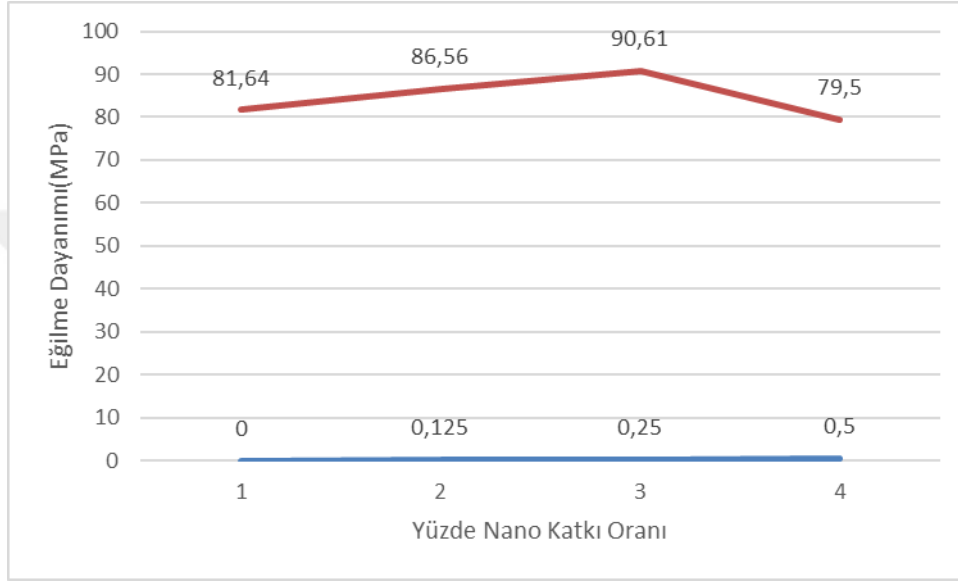
Tablo 6.2. Üç noktalı eğme testi sonucunda elde edilen nano silisyum nitrür katkısının malzemenin eğilme dayanımı özelliklerine etkisi.

Numune	Elastisite Modülü (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
Saf (%0) epoksi reçine	2269,99±40,79	81,64±2,93
%0,125 Silisyum Nitrür takviyeli epoksi reçine	2458,65±54,10	86,56±2,29
%0,25 Silisyum Nitrür takviyeli epoksi reçine	2458,45±100,77	86,56±2,29
%0,50 Silisyum Nitrür takviyeli epoksi reçine	2436,08±25,25	79,50±5,92



Şekil 6.8. Yüzde nano katkı oranı – eğilme modülü grafiği

Şekil 6.8’de bulunan yüzde nano katkı oranı/eğilme modülü grafiği incelendiğinde, epoksi reçine içerisine nano silisyum nitrür ilavesinin gerçekleştirilmesi ve bu katkı oranının yapı içerisinde arttırılması sonucunda, eğilme modülü değerlerinde bir düşüş eğilimi görüldüğünü söyleyebiliriz. İçerisinde nano boyutta silisyum nitrür ilavesi bulunmayan saf epoksi reçine, 2369,99 MPa eğilme modülü değeriyle birlikte, en yüksek eğilme modülü değerine sahip olan deney numunesidir. Bunun yanında %0,50 silisyum nitrür katkılı epoksi reçinenin 2436,08 MPa değeri ile en düşük eğilme modülü değerine sahip olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 6.9. Yüzde nano katkı oranı – eğilme dayanımı grafiği

Şekil 6.9’de bulunan grafik incelendiğinde, epoksi reçine içerisine nano silisyum nitrür ilavesinin gerçekleştirilmesi ve bu katkı oranının yapı içerisinde arttırılması sonucunda, eğilme dayanımı değerlerinde bir artış eğilimi görüldüğünü söyleyebiliriz.

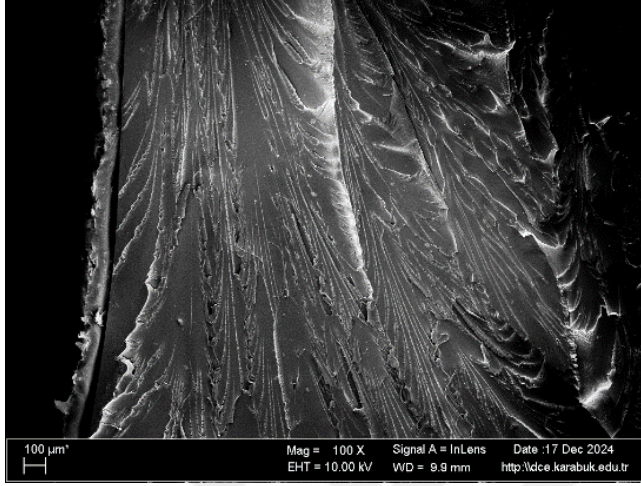
%0,50 silisyum nitrür katkılı epoksi reçine, 79,5 MPa eğilme dayanımı değeriyle birlikte, en düşük eğilme dayanımı değerine sahip olan deney grubudur.

Grafiğe göre , en yüksek eğilme dayanımı değerine sahip olan numune grubu ise 90,61 MPa eğilme modülü değerine sahip olan %0,25 oranında nano silisyum nitrür takviyeli epoksi reçine grubudur. Ağırılıkça %0,25 nano nikel oksit takviyeli epoksi reçine grubundan sonraki takviye elemanı katkı oranlarında eğilme dayanımı değerlerinde bir düşüş başlamaktadır.

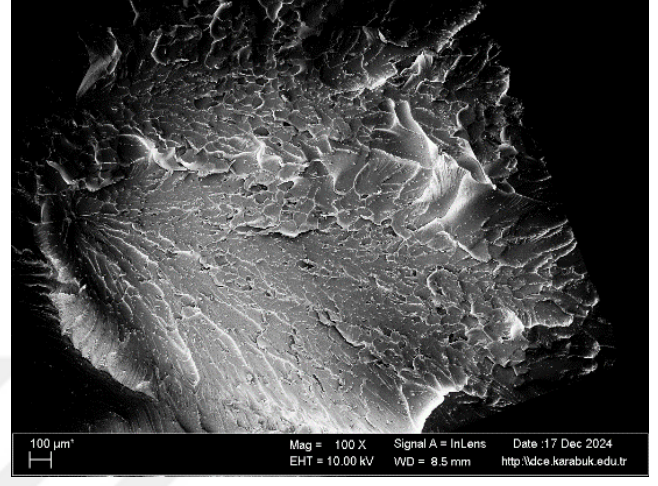
Üç noktalı eğme testinin sonuçları incelendiğinde, eğilme modülü ve eğilme dayanımı değerleri baz alınır, optimum nano silisyum nitrür katkı oranı ağırlıkça %0,25 olduğu söylenebilir.

6.3. FE-SEM (Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu) Testi Sonuçları

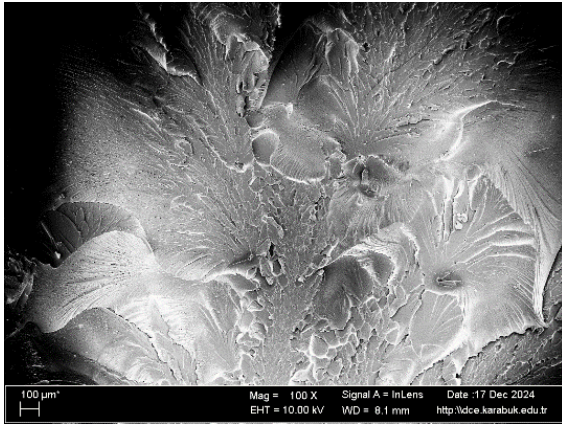
Taramalı elektron mikroskopları mikron ölçekte yapıları incelemek amacıyla kullanılmıştır. Büyük numunelerin yüksek çözünürlükte görüntülenebildiği boyutsal ölçümlerin alınabildiği ve kompozisyonel analizin gerçekleştirilebildiği çok yönlü bir tekniktir.



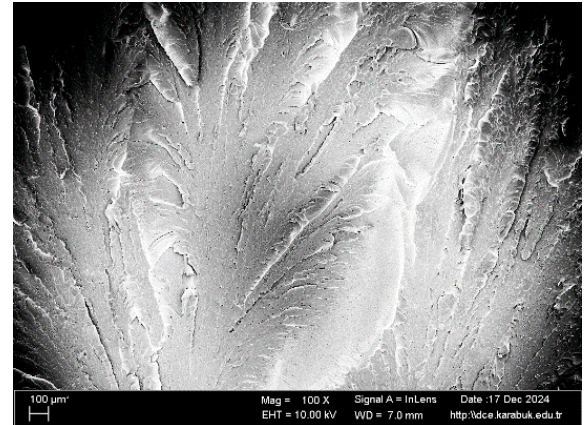
(a)



(b)



(c)

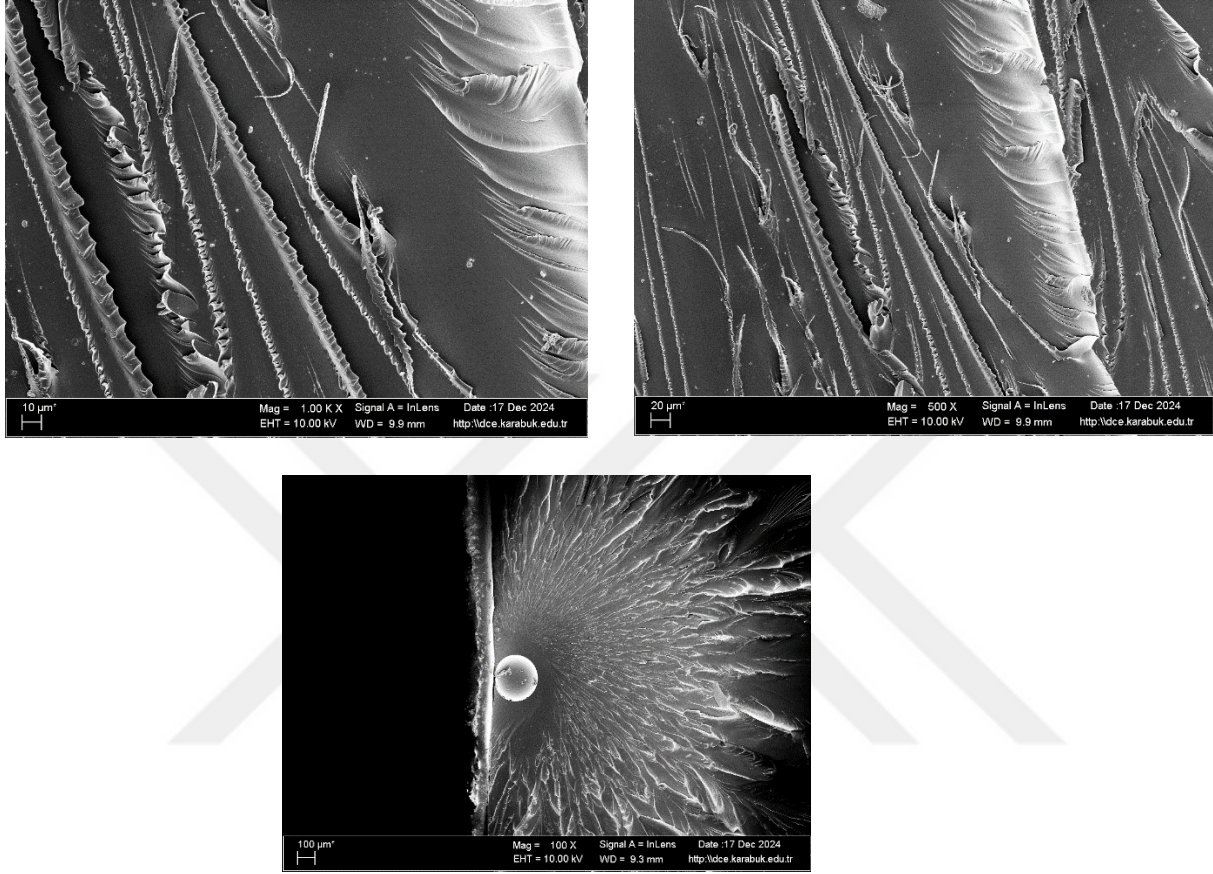


(d)

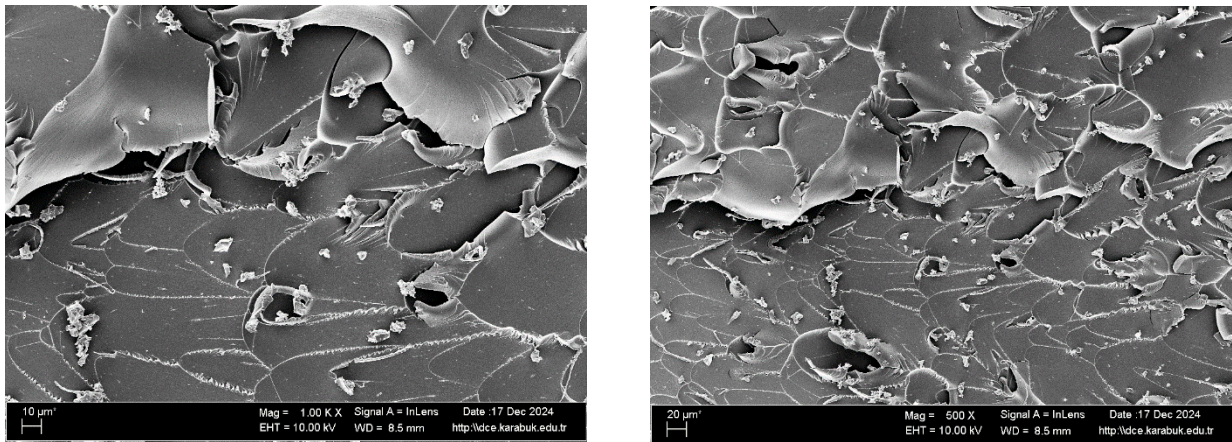
Şekil 6.10. (a) Saf epoksi reçine, (b) ağırlıkça %0,125 nano Si_3N_4 katkılı epoksi reçine, (c) ağırlıkça %0,25 nano Si_3N_4 katkılı epoksi reçine, (d) ağırlıkça %0,50 nano Si_3N_4 katkılı epoksi reçineye ait FE-SEM görüntüleri.

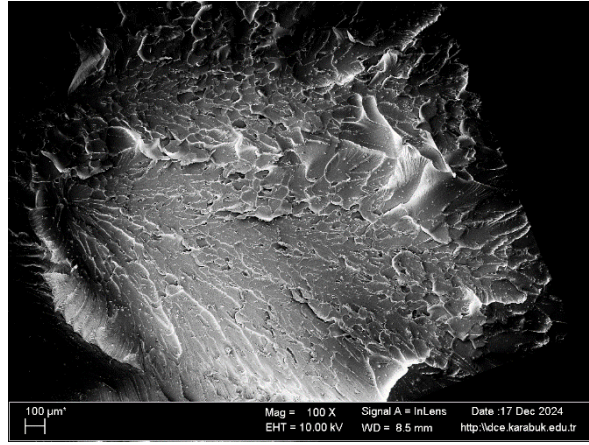
Şekil 6.10'deki SEM görüntülerinde, epoksi reçine yapısı içerisinde nano boyutta silisyum nitritr'ün ilave edilmesiyle birlikte, tane boyutlarında küçülme meydana gelmiştir. Saf epoksi reçinede , yüzey üzerinde oluşmuş paralel çizgiler oluklara benzer yapı göstermektedir. Kırılma

yüzeylerinden alınan görüntülerden yola çıkarak dik bağların kopması neticesinde ortaya çıkan klivaj kırılma gerçekleştiği yorumu yapılabilir. Tane sınırlarının artması ile birlikte dislokasyonlarda artış gerçekleşmiştir. Katkı oranı arttıkça homojen dağılım gerçekleşmediği aşağıda ki SEM görüntülerinde görülmektedir.

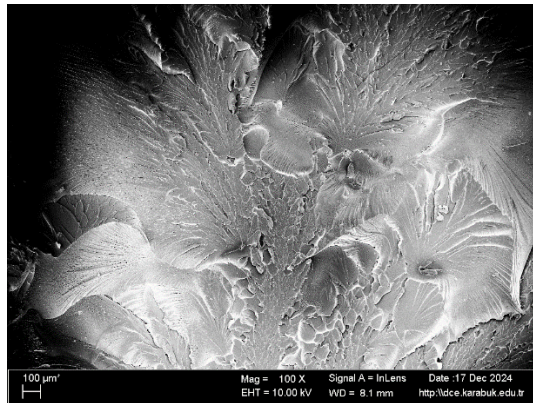
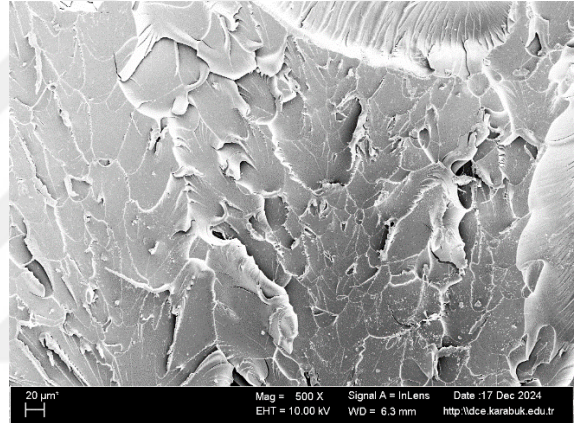
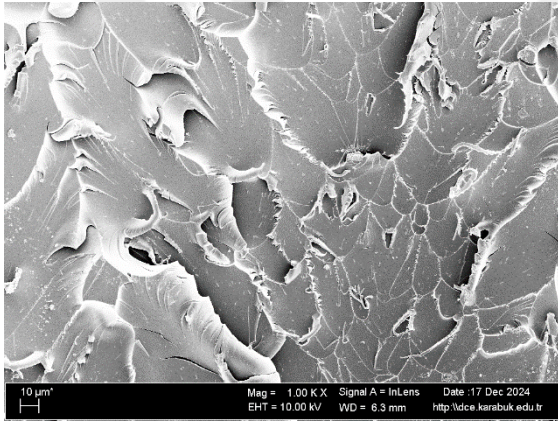


Şekil 6.11. Saf epoksi reçine grubuna farklı büyütme uygulanarak çekilen FE-SEM görüntüleri

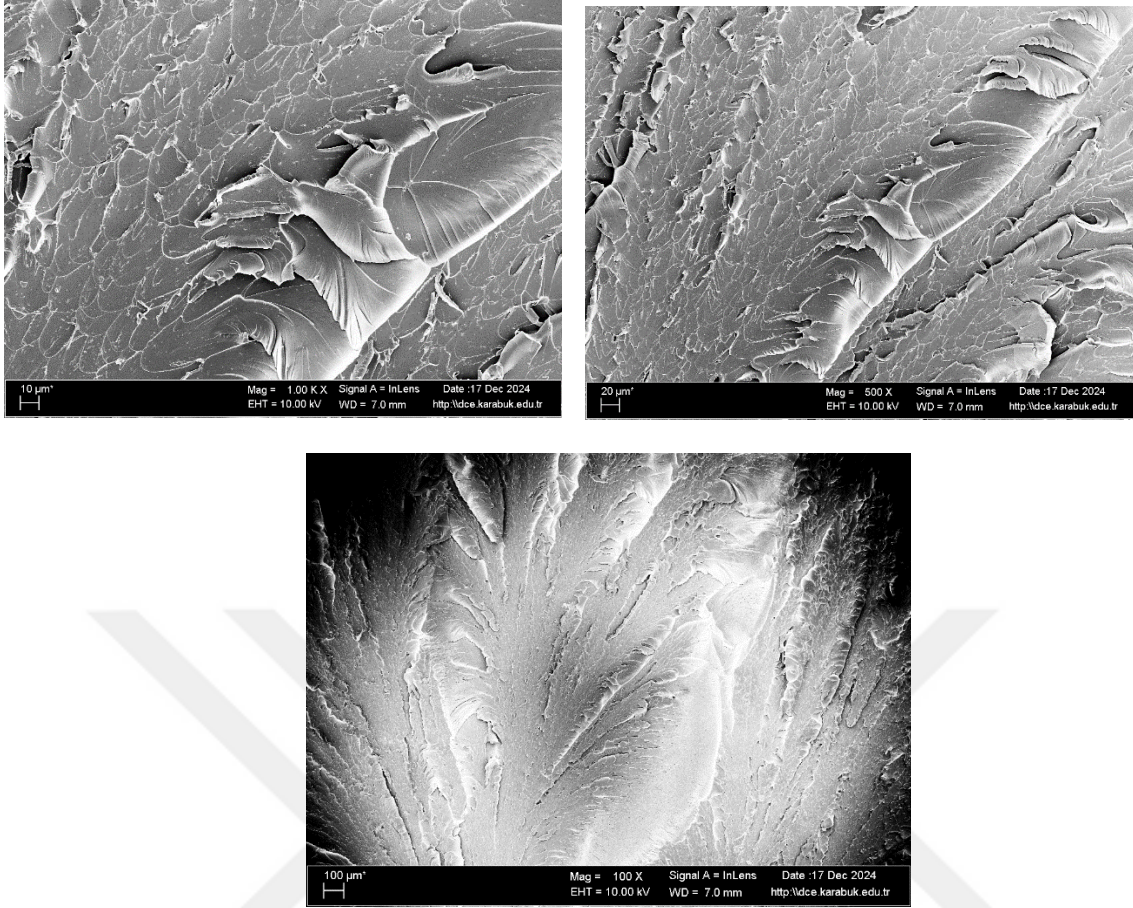




Şekil 6.12. Ağırlıkça %0,125 oranında nano silisyum nitrür takviyeli epoksi reçine matrisli numune grubuna farklı büyütme uygulanarak çekilen FE-SEM görüntüleri



Şekil 6.13. Ağırlıkça %0,25 oranında nano silisyum nitrür takviyeli epoksi reçine matrisli numune grubuna farklı büyütme uygulanarak çekilen FE-SEM görüntüleri

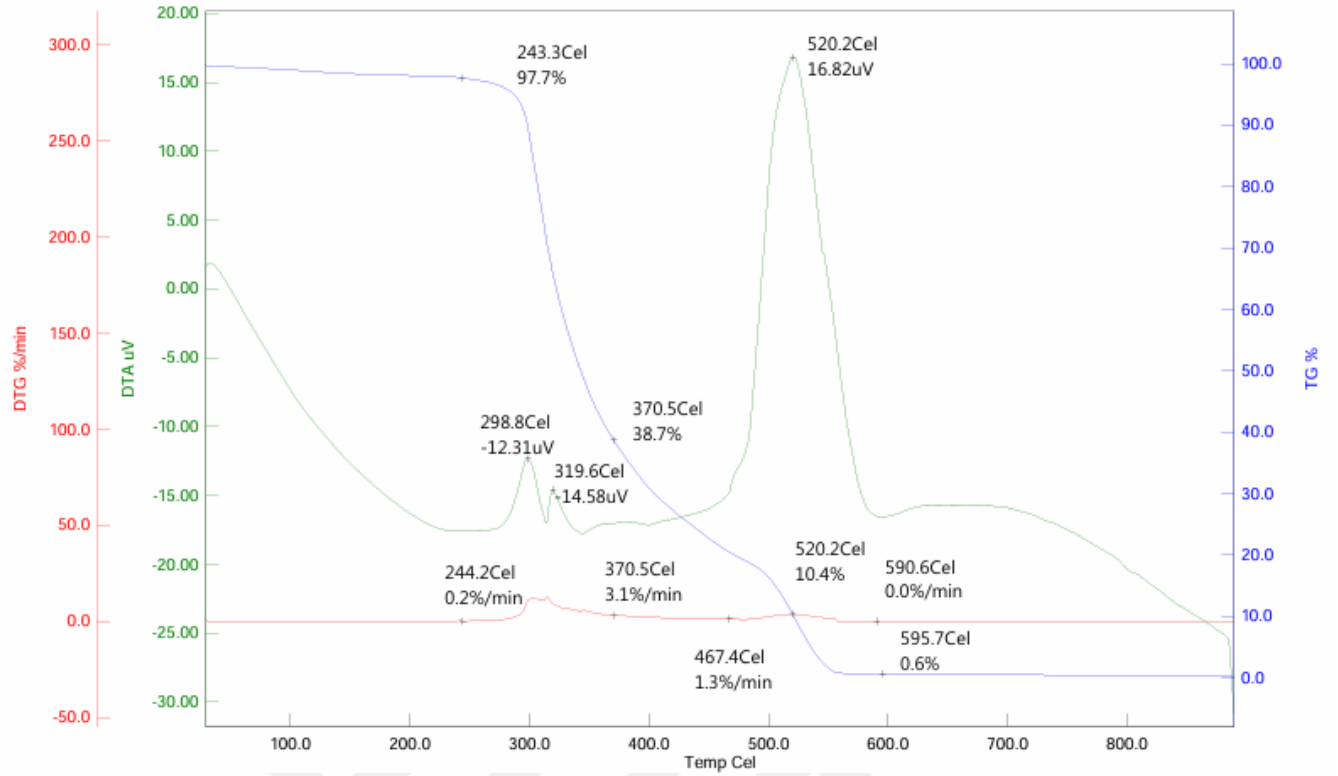


Şekil 6.14. Ağırlıkça %0,50 oranında nano silisyum nitrür takviyeli epoksi reçine matrisli numune grubuna farklı büyütme uygulanarak çekilen FE-SEM görüntüleri

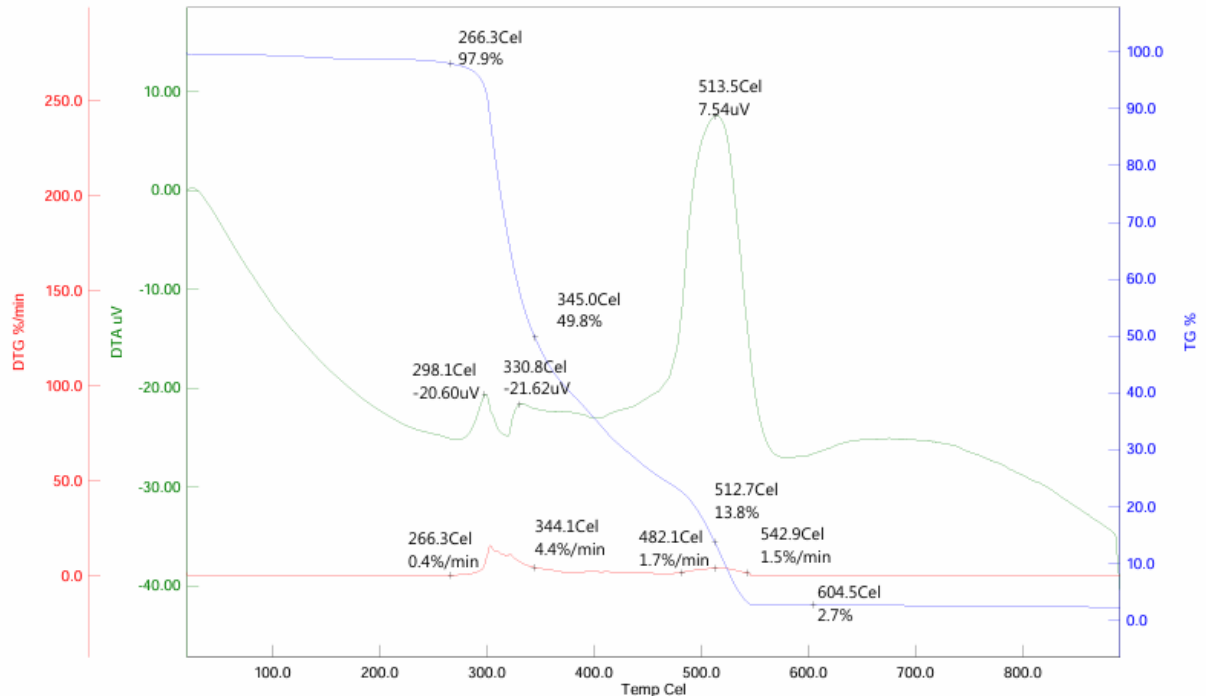
6.4. Termogravimetrik Analiz Sonuçları

Termogravimetrik analiz, sıcaklık değiştikçe deney numunesinin kütlesinin değişiminin ölçüldüğü bir deneydir. Deney numunesi sabit ısıtma hızında ısıtılır ve oluşan kütle değişimini sıcaklığın bir fonksiyonu şeklinde yazılır. Çalışmada elde edilen sonuçlar 6.11-14'de verilmiştir.

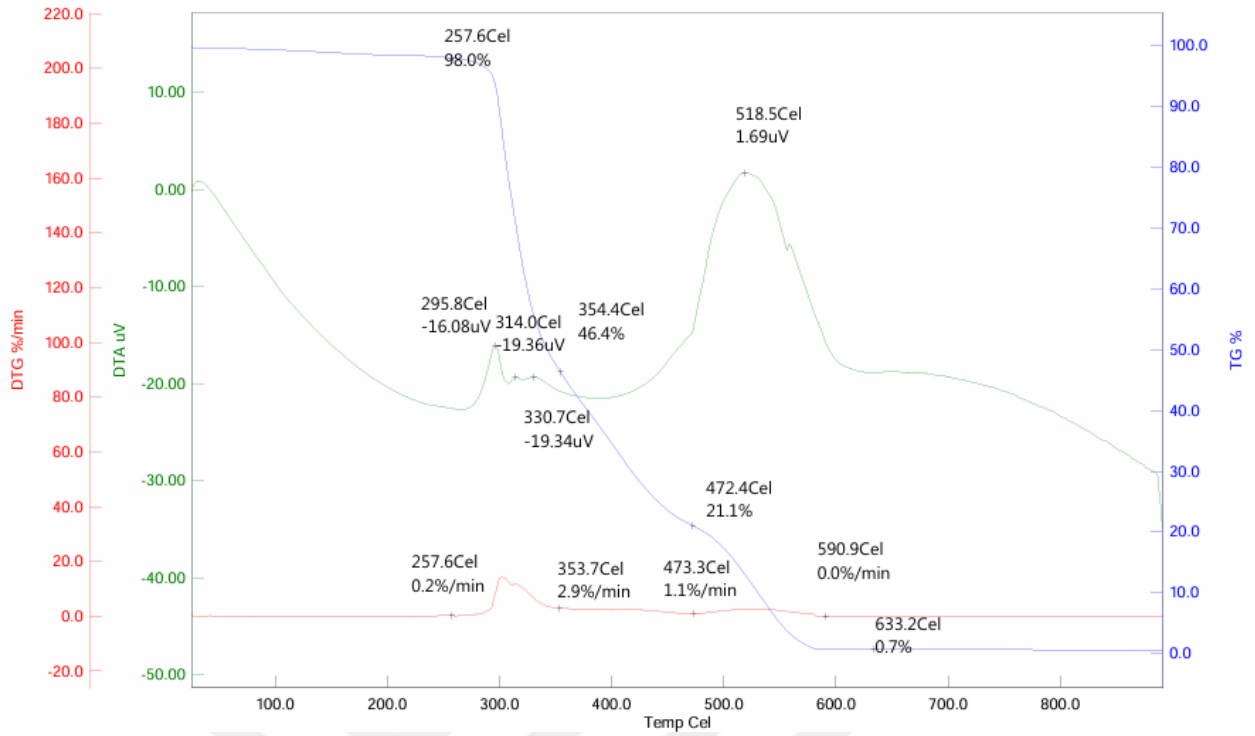
Grafik üzerinde kırmızı renk ile çizilen çizgi DTG (Diferansiyel Termal Termogravimetrik) olarak tanımlanır, bu gösterimde hedef malzeme kaybının en fazla hangi sıcaklıkta gerçekleştiğini görmektir. Yeşil renk ile gösterilen kısım ise DTA (Diferansiyel Termal Analiz) olarak tanımlanır, maddenin fiziksel ya da kimyasal değişimleri incelenir. TGA (Termalgravimetrik Analiz) ile aynı anda ölçülebilir. Mavi renk ile gösterilen kısım ise TG(Termogravimetrik) demektir. Kütlenin zamana yada sıcaklığa karşı çizilen grafiğidir.



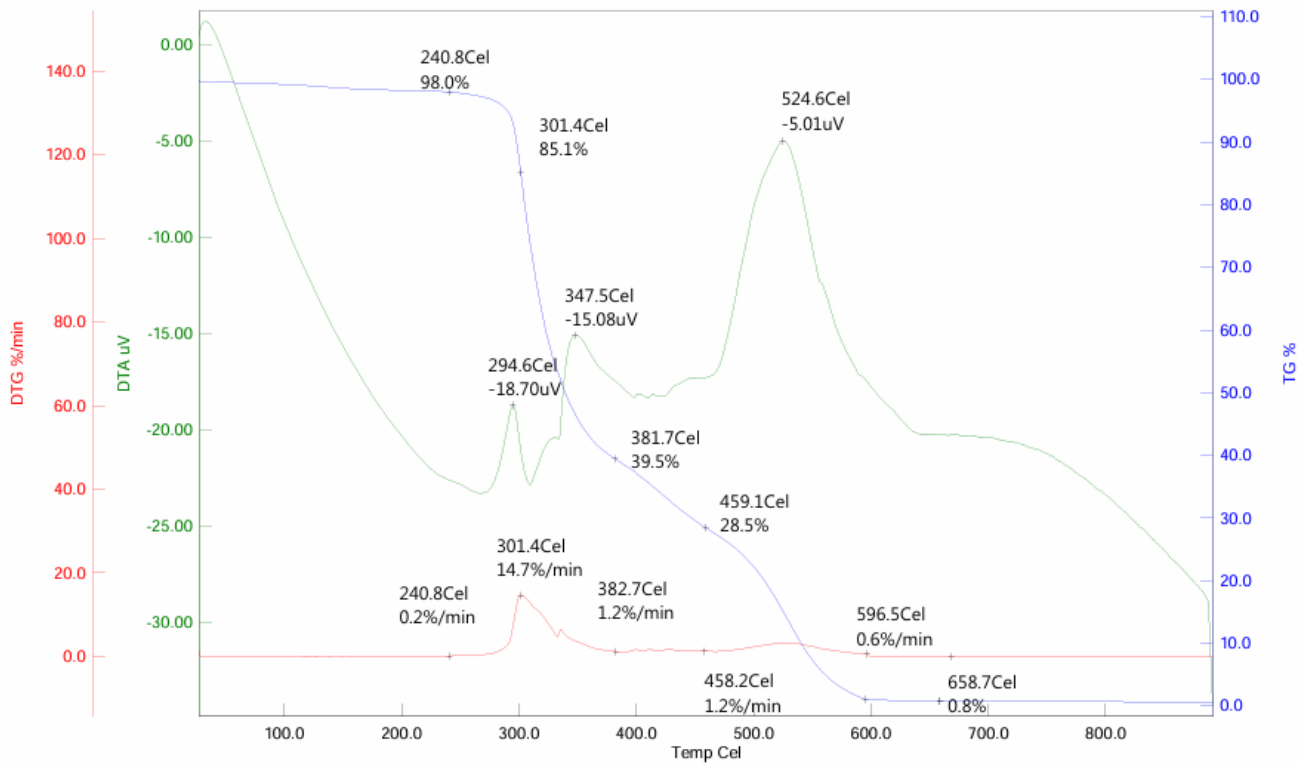
Şekil 6.15. Saf epoksi reçineye ait TGA sonuçları



Şekil 6.16. Ağırlıkça %0,125 Si_3N_4 bulunan epoksi reçine matrisli nanokompozit malzemeye ait TGA sonuçları



Şekil 6.17. Ağırlıkça %0,25 Si_3N_4 bulunan epoksi reçine matrisli nanokompozit malzemeye ait TGA sonuçları



Şekil 6.18. Ağırlıkça %0,50 Si_3N_4 bulunan epoksi reçine matrisli nanokompozit malzemeye ait TGA sonuçları

Deney numunesi içerisinde farklı oranlarda nano boyutlarda silisyum nitrür ilave edilerek hazırlanan epoksi reçine matrisli nanokompozit malzemenin TGA sonucunda elde edilen grafikleri verilmiştir. Tablo 6.4'te gerçekleştirilen termogravimetrik analizleri sonucunda elde edilen, numunelerin bozunma başlangıç sıcaklıkları ve bozunma bitiş sıcaklıkları verilmiştir.

Tablo 6.4. Numunelerin TGA sonuçları

Numune	Bozunma Başlangıç Sıcaklığı °C	Bozunma Bitiş Sıcaklığı (°C)
Saf (%) epoksi reçine	244.2	590.6
%0,125 Silisyum Nitrür Takviyeli Epoksi Reçine	266.3	542.9
%0,25 Silisyum Nitrür Takviyeli Epoksi Reçine	257.6	590.6
%0,50 Silisyum Nitrür Takviyeli Epoksi Reçine	240.8	596.5

Grafikler ve Tablo 6.4 'te belirtilen değerler yorumlandığında, yapı içerisinde nano boyutta silisyum nitrür ilavesi olduğunda malzemenin başlama sıcaklığında bir artış söz konusu olmaktadır. Bozunma sıcaklığının artması ise malzemenin termal kararlılığının arttığını ve daha yüksek sıcaklıklara kadar yapısal bütünlüğünü koruyabildiğini ifade etmektedir. Kimyasal veya fiziksel bozunmaya daha dirençli olduğu anlamına gelmektedir. Bozunma sıcaklığının artmasının sebepleri ; malzemelerin kimyasal yapısındaki güçlü bağlar sebebiyet oluşturmuş olabilir. FE-SEM görüntülerinde gözlemlediğimiz düzenli ve sık kristal yapı termal kararlılık açısından daha dayanıklı olmasına sebebiyet vermiştir. Polimer malzemelere eklenen nano boyutta ki seramik dolgular bozunma sıcaklığını arttırmaktadır. Bozunma sıcaklığının

artmasının yapılan deney çalışmasında ki anlamı ise daha iyi termal kararlılık göstermesidir bu da yüksek sıcaklık ortamlarında daha kararlı olduğu anlamına gelmektedir. Spesifik olarak uzay, havacılık, otomotiv ve elektronik sektörleri için yüksek önem arz etmektedir. Ağırlık kaybının en fazla görüldüğü pik ise bozunma başlangıç sıcaklığı en düşük olan 240.8°C olan ve bozunma bitiş sıcaklığı en yüksek olan 596.5°C değerlerine sahip ve en yüksek bozunma hızı 14.7 %/min değerine sahip olan ağırlıkça %50 Si₃N₄ bulunan epoksi reçine matrisli nanokompozit malzemeye ait olan TGA grafiğinde görülmüştür.



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında, farklı oranlarda nano boyutlarda silisyum nitrür ilavesi gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkça %0, %0,125, %0,25 ve %0,50 oranında dört farklı numuneler elde edilmiştir. Üretim aşamasının tamamlanmasının ardından deney numunelerinin mekanik, ısı ve mikroyapısal özelliklerinde ki değişimler incelenmiştir.

Çekme testi sonuçları göz önüne alındığında epoksi reçine içerisine nano silisyum nitrür katkısının ilave edilmesi ile birlikte katkı oranı arttıkça elastite modülünde de bir artış olduğu gözlemlenmektedir. En düşük elastite modülünün saf epoksiye ait olduğu söylenebilir. En yüksek elastite modülü ise ağırlıkça %50 oranında nano boyutta silisyum nitrür bulunan epoksi reçine olduğu söylenenebilir. Saf epoksiye göre, yapı içerisinde ağırlıkça %0,50 nano boyutta silisyum nitrür ilavesi yapılmış epoksi reçine matrisli yapının elastisite modülünde yaklaşık olarak %3,18 oranında bir artış gerçekleşmiştir. Nano dolgunun artması ile birlikte malzemede rijitlik ve gevreklik özelliklerinde de bir artış gerçekleşmektedir. Nano boyutta silisyum nitrürün artmasıyla çekme dayanımında bir düşüş gözlenmektedir. En yüksek çekme dayanımına sahip grubun ağırlıkça % 0,125 nano Si_3N_4 katkılı epoksi reçine olduğu gözlenmektedir. En düşük çekme dayanımı ise en yüksek elastite modülüne sahip olan numune grubu %0,50 oranında nano silisyum nitrür takviyeli epoksi reçine grubu olduğu görülmüştür. Saf epoksi yapısına göre %8,41 düşüş gözlenmektedir. Çekme dayanımında düşüş yaşanmasının sebepleri; homojen olmayan dağılım, topaklanma(agresyon), zayıf matris ve katkı bağı, yüzey modifikasyon eksikliği, düşük katkı oranı veya aşırı katkı oranı, hatalı karıştırma, hava kabarcıkları ya da kütleme parametreleri olabilir. Epoksi reçine içerisine nano silisyum nitrür ilavesinin eklenmesiyle ve katkı oranının arttırılması neticesinde, yapının sahip olduğu yüzde kopma uzaması değerinde bir düşüş eğilimi olduğu görülmektedir. En yüksek yüzde kopma uzaması, Ağırlıkça %0,125 silisyum nitrür takviyeli epoksi reçine kompozisyonuna aittir. En düşük kopma uzaması ise ağırlıkça %0,50 nano silisyum nitrür katkılı epoksi reçineye aittir. En yüksek kopma uzaması değerine sahip olan % nano katkılı malzeme grubu ile en düşük % nano katkılı kopma uzaması grubu arasında %14,62 düşüş gözlenmektedir. Malzemelerin gevreklik özelliklerinde artış olduğu söylenebilir. Üç noktalı eğme testinin sonuçları incelendiğinde; matris içerisine nano silisyum nitrür katkısının eklenmesi ve bu katkı oranının yapı içerisinde saf epoksiye kıyasla arttırılması sonucunda, eğilme modülü değerlerinde saf epoksi reçineye kıyasla bir artış eğilimi görüldüğü söylenebilir. İçerisinde nano silisyum nitrür katkısı bulunmayan kompozisyon grubu diğer ağırlıkça % nano silisyum nitrür katkılarına kıyasla en düşük eğilme modülü değerini göstermektedir. En yüksek

eğilme modülü, ağırlıkça % 0,125 silisyum nitrür takviyeli epoksi reçine grubu olmaktadır. Saf epoksi reçine ile , ağırlıkça %0,125 silisyum nitrür katkılı epoksi reçine arasında %3,73 oranında bir artış olduğu söylenebilir. Eğilme dayanımında saf epoksi reçineye göre %0,125 ve %0,25 silisyum nitrür takviyeli epoksi reçine gruplarında artış olduğu söylenebilir fakat %50 silisyum nitrür takviyeli reçine grubunun eğilme dayanımında saf epoksiye oranda %2,69 oranında düşüş olduğu söylenebilir. Bunun sebepleri ise partikül topaklanması yani agresyon olabilir ya da matris katkı uyumunun bozulması . Gevrek yapının artması. Karıştırma ve epoksi matrisin sürekliliğin bozulması bu sebepler arasında yer alabilir.

Deney numunelerinin kırık yüzeylerinden alınan FE-SEM kesit görüntüleri ile numunelerin mikro yapıları incelendiğinde. Matris içerisinde nano boyutta silisyum nitrür katkılarının artmasıyla birlikte mukavemet ve gevreklik özelliklerinde bir artış olduğu söylenebilir.

Termogravimetrik analiz sonuçlarına göre, epoksi reçine içerisine nano boyutta silisyum nitrür katkısı eklendiğinde malzemenin bozunma başlangıç sıcaklığında bir artışa sebep olduğu söylenebilir % 0,125 ve %0,25 nano silisyum nitrür katkısı için %0,50 nano silisyum nitrür katkısında matris içerisinde agresyonlar sebebiyle bozunma başlangıç sıcaklığının düştüğünü söyleyebiliriz. Bu bağlamda malzemenin termal özellikleri incelendiğinde epoksi reçine matrisi içerisine en optimum katkı oranının ağırlıkça %0,125 nano silisyum nitrür katkılı epoksi olduğu söylenebilir. Yapılan deney çalışmasının sonuçlarının iyileştirilmesi için aşağıdaki öneriler sunulmuştur; Kimyasal yüzey geliştirme ve kaplama işlemleri üzerinde çalışmalar yapılarak mekanik özelliklerinde iyileştirmeler sağlanabilir. Nano malzemeyi reçine içerisinde homojen ve daha az hava kabarcıkları oluşacak karıştırma koşulları denenebilir. Bu deney çalışması kapsamında epoksi reçine içerisine %0,50 silisyum nitrür eklenmesi sonucunda elde edilen mekanik ve termal özellikler kendinden önceki kompozisyona göre düşüş gözlenmektedir. Bunun sebebi katkı oranının fazla olabileceğindendir. Matris içerisine uygun ajanların eklenmesi ve optimum aralıklarda katkı oranlarının seçilmesi ile mekanik özelliklerde artış gözlemlenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Odabaşı, Ç., “Toz metalürjisi ile üretilen Nb-V mikroalaşım çeliğine bakır ilavesinin mikroyapı mekanik özellikleri üzerine etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 19-23 (2017).
- [2] Harris, B., “Engineering Composite Materials”, The Institute of Materials, London, 5-7 (1999).
- [3] Mutlu, Y., “AA2024 matrisli B₄C SiC VE B₄C-Y₂O₃ parçacık takviyeli kompozitlerin toz metalürjisi yöntemiyle üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 11-12,19-23 (2019).
- [4] Bulut, M., “Türkiyede kompozit malzeme üretimi ve kompozit malzeme sektörünün genel değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 7-14 (2014)
- [5] Deniz, M. E., “Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ve ısıtma işlemle presleme tekniğini kullanarak kompozit malzeme üretecek bir düzeneğin tasarımı ve imalatı”, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, 31-42 (2005).
- [6] Şahin, Y., “Kompozit Malzemelere Giriş”, Seçkin Yayıncılık, Ankara, sayfa no (2015)
- [7] Kurt, H., “Kompozit malzeme üretiminde karıştırma tekniğinin kompozitin aşınma davranışı üzerine etkilerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 4-22, 50-60 (2010).
- [8] Nazik, C., “Alüminyum matrisli B₄C parçacık takviyeli kompozitlerin toz metalürjisi yöntemiyle üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 13 (2013).
- [9] Buytoz, S., “Al matrisli Al₂O₃ takviyeli kompozit malzemelerin katı hal birleştirme teknikleri ile kaynak edilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 35-42 (1999).
- [10] Şeker, H., “Al₂O₃-SiC kompozitlerin fiziksel ve elektromanyetik ekranlama özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 23-26 (2013).
- [11] Kalemtaş, A., “Metal matrisli kompozitlere genel bir bakış”, Putech & Composites, Ekim-Kasım-Aralık sayısı : 18-30 (2014).
- [12] Uygur, İ. ve Saruhan, H., “Alüminyum esaslı metal matris kompozit malzemelerin mekanik özellikleri”, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 8 167-174 (2004).
- [13] Kaykılarlı, C., “Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen grafen katkılı Al-Cu alaışımının sertlik ve aşınma değerlerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 4-5,21-24 (2018).
- [14] SECKIN, T., 2015, Polimer Kimyası Fonksiyonel Yaklaşım ve Uygulamaları. Seçkin Yayıncılık San. Ve Tic. A.Ş., No:42, Ankara, s.21-122.

- [15] İ. Durgun, “Otomobil Geliştirme Sürecinde El Yatırma Yöntemi İle Kompozit Parça Üretimi,” İzmir, 2013.
- [16] R.-M. Wang, S.-R. Zheng, and Y. Zheng, *Polymer Matrix Composites and Technology*. Elsevier, 2011
- [17] 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.
- [18] İnternet:https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/%C5%9Ei%C5%9Firme%20Makine%20Ayarlar%C4%B1.pdf
- [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] 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
- [21] A. Brody, “Nano, Nano” *Food Packaging Technology-Packaging*, Food Technology-Chicago, vol. 57, no. 12, pp. 52–54, 2003.
- [22] T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, “Termoset Kalıplama İle Üretimde Kalıp Ve Ham Madde Hazırlama,” *İn Plastik Teknolojisi*, Ankara, 2014
- [23] B. Beşergil, *Kompozitler Temel İlkeler Test Metotları*. Ankara: Gazi Kitabevi, 2016.
- [24] T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, “Termoset Kalıplama Makinelerinde Üretim Ayarları,” *İn Plastik Teknolojisi*, Ankara, 2012.
- [25] 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.
- [26] J Serbest, B.S., Binbir, E., 2008, Basit Kapalı Kalıp Enjeksiyon Yöntemi (L-RTM), *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, Sayı: 178
- [27] automated dynamics, 2015, “automated dynamics Performance in composites”, from <http://www.automateddynamics.com/>.
- [28] A. Kalemtaş, “Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler,” Bursa: Putech and Composites, 2015.
- [29] DENİZ, M. E., *Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemler Ve Isıl İşleme Presleme*
- [30] Tekniğini Kullanarak Kompozit Malzeme Üretecek Bir Düzenğin Tasarım Ve İmalatı, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendisliği Anabilim Dalı, Şanlıurfa, 2005
- [31] İ. Durgun, “Vakum İnfüzyon Yöntemi İle Kompozit Parça Üretimi,” Bursa, 2014.

- [32] 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
- [33] T. Baykara, V. Günay, and E. Musluoğlu, Nanoteknoloji ve nano-malzeme süreçleri. Tübitak MAM, 2010.
- [34] A. Akay, “Daha Yakın Olmak İçin: Elektron Mikroskopları,” <http://www.acikbilim.com/2014/02/dosyalar/daha-yakin-olmak-icin-elektron-mikroskoplari-2.html>, 2014.
- [35] Çınar, K. T. & Ekrem, M. (2021). Nanoparçacık Takviyeli Epoksi Nanokompozitlerin Eğilme Davranışları. European Journal of Science and Technology, (28), 1415-1418.
- [36] N. Akçalıoğlu, “ Bor Nitrür Nano Yapı Takviyeli Polimer Kompozlerin Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması”, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ocak 2019.
- [37] Campbell, F. C. (2004). Commercial composite processes: These commercial processes produce far more parts than the high-performance processes. In F. C. Campbell (Ed.), Manufacturing processes for advanced composites (Chapter 11). Elsevier Science.

ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini Yalova’da tamamladı. 2016 yılında girdiği Karabük Üniversitesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümünden 2021 yılında çift ana dal yaparak mezun oldu. 2022 yılından beri Yalova Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde tezli yüksek lisans yapmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

S. Baltacı, M. Bingöl, “Si₃N₄ Katkılı Epoksi Nanokompozitlerin Hazırlanması Ve Karakterizasyonu,” 5. Uluslararası Trakya Bilimsel Araştırmalar Kongresi. Edirne, 2024

