



**ATIK DÖKÜM KUMU MORFOLOJİSİNİ
KULLANARAK HAVA ARAÇLARI İÇİN
POLİMER KOMPOZİT MALZEME
GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

Yüksek Lisans Tezi

Betül ÖZCAN

Eskişehir 2024

**ATIK DÖKÜM KUMU MORFOLOJİSİNİ KULLANARAK HAVA ARAÇLARI
İÇİN POLİMER KOMPOZİT MALZEME GELİŞTİRİLMESİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Betül ÖZCAN

Yüksek Lisans Tezi

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Servet TURAN

İkinci Danışman: Prof. Dr. Tahir Hikmet KARAKOÇ

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Kasım 2024

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Betül ÖZCAN'nın ATIK DÖKÜM KUMU MORFOLOJİSİNİ KULLANARAK HAVA ARAÇLARI İÇİN POLİMER KOMPOZİT MALZEME GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU başlıklı çalışması 19/11/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Prof. Dr. Servet Turan

Üye

: Prof. Dr. Abdullah Tuğrul SEYHAN

Üye

: Prof. Dr. Melih Cemal KUŞHAN

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

19/11/2024

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Betül ÖZCAN, ATIK DÖKÜM KUMU MORFOLOJİSİNİ KULLANARAK HAVA ARAÇLARI İÇİN POLİMER KOMPOZİT MALZEME GELİşTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Prof. Dr. Servet TURAN

ÖZET

ATIK DÖKÜM KUMU MORFOLOJİSİNİ KULLANARAK HAVA ARAÇLARI İÇİN POLİMER KOMPOZİT MALZEME GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Betül ÖZCAN

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kasım 2024

Danışman: Prof. Dr. Servet TURAN

İkinci Danışman: Prof. Dr. Tahir Hikmet KARAKOÇ

Bu tezde, kuvars ve atık döküm kumu ilavesinin cam fiber/epoksi kompozitlerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, atık döküm kumu katkılı numunelerin genellikle daha yüksek yoğunluk ve sertlik değerlerine sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle 63-100 μm kuvars ilavesi, ortalama sertlik değerini en yüksek oranda artırmıştır. Daha küçük toz taneli kuvars ve atık döküm kumu numunelerinin daha düşük yoğunlukları, küçük partikül boyutlarının aglomerasyon etkilerini artırabileceğini ve boşluklar oluşturabileceğini göstermektedir.

Kuvars ve Atık Döküm Kumu katkısı, eğilme gerilmesi ve Young modülünde de belirgin artışlar sağlamış; özellikle 63-100 μm atık döküm kumu numuneleri en yüksek rijitlik ve dayanımı sunmuştur. Kuvars ise benzer sertlik artışları sağlasa da, atık döküm kumu kadar yüksek rijitlik göstermemektedir. Genel olarak, atık döküm kumu katkısının mekanik özelliklerde daha fazla iyileşme sağladığı gözlemlenmiştir. Tezin bulguları, atık döküm kumunun malzeme performansını artırmada kuvarstan daha etkili olduğunu ve optimize edilmiş kompozit malzemeler geliştirilmesinde önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Anahtar Sözcükler: Kompozit, Polimer, Kuvars, Döküm kumu, Mekanik özellikler

ABSTRACT

DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF POLYMER COMPOSITE MATERIAL FOR AIRCRAFT USING WASTE FOUNDRY SAND MORPHOLOGY

Betül ÖZCAN

Department of Material Science and Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, November 2024

Supervisor: Prof. Dr. Servet TURAN

Co-Supervisor: Prof. Dr. Tahir Hikmet KARAKOÇ

In this thesis, the effects of quartz and waste casting sand addition on the mechanical properties of glass fiber/epoxy composites were investigated. The results show that samples with waste casting sand additives generally have higher density and hardness values. Especially, 63-100 μm quartz addition increased the average hardness value to the highest extent. The lower densities of smaller powdered quartz and waste casting sand samples indicate that small particle sizes can increase the agglomeration effects and create voids.

Quartz and Waste Casting Sand additives also provided significant increases in bending stress and Young's modulus; especially 63-100 μm waste casting sand samples provided the highest stiffness and strength. Quartz, on the other hand, provided similar hardness increases, but did not show as high stiffness as waste casting sand. In general, it was observed that waste casting sand additive provided greater improvements in mechanical properties. The findings of the thesis reveal that waste foundry sand is more effective than quartz in improving material performance and plays an important role in developing optimized composite materials.

Keywords: Composite, Polymer, Foundry sand, Mechanical properties.

TEŞEKKÜR

Saygıdeğer danışmanlarım Prof. Dr. Servet Turan ve Prof. Dr. Tahir Hikmet Karakoç'a, yüksek lisans sürecimde sergiledikleri destekler için derin bir minnet borçluyum. Bana inandıkları ve fikirleri ile yolumu aydınlattıkları için kendilerine sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez savunma jürisinin saygıdeğer üyeleri, Prof. Dr. Abdullah Tuğrul Seyhan ve Prof. Dr. Melih Cemal Kuşhan'a zamanlarını ve fikirlerini cömertçe paylaştıkları ve tez çalışmalarımın değerlendirilmesinde bana yol gösteren kıymetli görüşlerini ifade ettikleri için çok teşekkür ederim.

Çalışmalarımın en başından sonuna kadar, Seramik Araştırma Merkezi A.Ş. ailesinin sınırsız katkıları için ve kariyerimde ilk adımlarımı atarken bana güzel kapılarını açan çok kıymetli Elba Basınçlı Döküm Sanayi A.Ş. Odöksan Osmaneli Şubesi ailesine bu süreçteki değerli katkıları için şükranlarımı sunarım.

Ayrıca çalışmalarımı gerçekleştirirken sınırsız faydalandığım çok değerli Anatolia Aero Design Proje Takımı'na kalpten teşekkürlerimi iletmek isterim.

Son olarak, yüksek lisans yolculuğumda yanımda olan tüm arkadaşlarıma ve aileme teşekkür ederim. Bu yolculukta bana ilham olduğu için ve hayat boyu unutmayacağım çok kıymetli destekleri için Mohsen Zamani'ye derin minnet duyuyorum ve kendisine tüm süreçteki kıymetli katkıları için ayrıca teşekkür ederim.

Betül ÖZCAN

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Betül ÖZCAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XII
1. GİRİŞ	13
2. HAVA ARAÇLARINDA KULLANILAN KOMPOZİT MALZEMELER.....	15
2.1. Takviye Elemanlarına Göre Kompozit Malzemeler.....	15
2.1.1. Elyaf takviyeli kompozitler.....	16
2.1.1.1. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler	18
2.1.1.2. Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler	19
2.1.1.3. Aramid elyaf takviyeli kompozit malzemeler	20
2.1.2. Partikül takviyeli kompozitler	21
2.1.3. Tabakalı kompozitler	21
2.2. Kuvarsın Genel Özellikleri ve Kompozit Malzemelerde Kullanımı	24
2.3. Matris Türüne Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	26
2.4. Polimer Esaslı Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	29
3. AMAÇ VE ÖNEM	33
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	35
4.1. Kompozitlerin Plakaların Hazırlanması	35

4.2. X-ışını Floresans Spektrometresi (XRF) Kimyasal Analizi	36
4.3. X-ışını Kırınımı Spektrometresi (XRD) Mineralojik Analizi	36
4.4. Yoğunluk Ölçümü.....	36
4.5. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Young Modülü ve Hesaplama Yöntemi.....	37
4.6. Üç Noktada Eğme Testi.....	37
4.7. Shore Sertlik Ölçümü	38
4.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi.....	39
5. SONUÇLAR	40
6. TARTIŞMA	63
7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİ	68
KAYNAKÇA.....	70
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Fiberlerin Fiziksel Özellikleri [10]	17
Tablo 2.2. Epoksi/Cam Elyafının Özellikleri.....	19
Tablo 2.3. E Cam ve S Cam (% ağırlıkça) kimyasal içeriği	19
Tablo 2.4. Farklı hammaddelerden elde edilmiş karbon elyafının mekanik özellikleri.	20
Tablo 2.5. Karbon elyaf ürünleri mekanik özellikleri.....	20
Tablo 2.6. Bazı kompozitlerin ve geleneksel malzemelerin özellikleri	24
Tablo 2.7. Kuvarsın Termal Özellikleri	25
Tablo 2.8. Kuvarsın Elektriksel Özellikleri	25
Tablo 2.9. Kuvarsın Mekanik Özellikleri	26
Tablo 2.10. Kuvarsın Sıcaklık karşısındaki davranışı.....	26
Tablo 2.11. Bazı Termoset Malzemelerin Özellikleri [http-3].	28
Tablo 5.1. İşlem görmüş döküm kumunun lazer difraksiyon tekniği ile ölçülen tane boyut analiz sonucu (%hacimce).....	42
Tablo 5.2. İşlem görmüş döküm kumunun elek öncesi ve sonrası lazer difraksiyon tekniği ile ölçülen tane boyut analiz sonucu (%hacimce).....	43
Tablo 5.3. elek öncesi ve sonrası işlem görmüş döküm kumunun % ağırlıkça kimyasal analizleri	44
Tablo 5.4. Kullanılan kuvars hammaddesinin % ağırlıkça kimyasal analizleri	46
Tablo 5.5. Numunelerin yoğunluk değerleri.	54
Tablo 5.6. Shore Sertlik Deneyi Sonuçları (μm)	56
Tablo 5.7. Numunelerin Z doğrultularında ölçülen Eğilme Dayanımları ve Young Modülleri.....	58

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Kompozit bileşenleri	15
Şekil 2.2. Takviye Edicilere Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması	16
Şekil 2.3. Elyafların Kompozit İçerisindeki Yerleşim Biçimleri	17
Şekil 2.4. Gerilim Altında Fiberlerin Yük Davranışı	18
Şekil 2.5. Tabakalı Kompozit	22
Şekil 2.6. Uçak Kanadında Uygulanan Yükler İçin Fiberlerin Yönlenmesi	22
Şekil 2.7. Matris Yapısına Göre Kompozitler [31].	26
Şekil 2.8. Vakum Torbalama Tekniği Şematik Gösterimi [41].	31
Şekil 4.1. Eğme testi için hazırlanan numunelerin şematik görüntüsü.	38
Şekil 5.1. Döküm kumunda kullanılan silis kumunun XRD paterni.	40
Şekil 5.2. Döküm kumunda kullanılan bentonit hammaddesinin XRD paterni.	41
Şekil 5.3. Döküm kumunda kullanılan kömürün XRD paterni.	41
Şekil 5.4. işlem görmüş döküm kumunun tane boyut dağılımı.	42
Şekil 5.5. 100 mesh boyutundaki elekenmiş işlem görmüş döküm kumunun tane boyut dağılımı.	43
Şekil 5.6. işlem görmüş döküm kumunun elek öncesi ve sonrası xrd paternleri.	45
Şekil 5.7. Farklı tane boyutlarındaki kuvars hammaddelerinin xrd paternleri.	46
Şekil 5.8. Cam Fiber Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerinn SEM Görüntüleri	48
Şekil 5.9. Cam Fiber + 33µ altı Boyutlu Kuvars Takviyeli Polimer Kompozitlerin SEM Görüntüleri	48
Şekil 5.10. Cam Fiber + 63-100µ Kuvars Tozu Takviyeli Polimer Kompozitlerin SEM Görüntüleri	50
Şekil 6.1. Tüm Numunelerin Deney Sonuçları	63
Şekil 6.2. Cam Fiber+Kuvars Katkılı Nuunelerin Deney Sonuçları	64
Şekil 6.3. Cam Fiber+Atık Döküm Kumu Katkılı Nuunelerin Deney Sonuçları	66

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

XRF	: X-ray Fluorescence (X-ışını Floresansı)
XRD	: X-ray Diffraction (X-ışını Kırınımı)
SEM	: Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
σ_f	: Eğilme dayanımı
μm	: Mikrometre (milimetrenin binde biri)
E	: Elastisite Modülü



1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan ve bileşenlerinin üstün özelliklerini tek bir malzemede birleştiren yapılar olarak tanımlanır. Bu malzemeler, yüksek mukavemet, düşük ağırlık, korozyon direnci ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi avantajlar sunar. Bu özellikler, kompozitlerin havacılık, otomotiv, denizcilik ve savunma sanayii gibi ileri teknoloji gerektiren sektörlerde yaygın bir şekilde kullanılmasını sağlar. Özellikle havacılık sektöründe, yakıt verimliliğini artırmak ve uçakların ağırlığını azaltmak amacıyla kompozit malzemeler büyük bir öneme sahiptir. Bu malzemeler, uçak gövdelerinden kanatlarına, motor bileşenlerinden iç yapısal elemanlara kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, kuvars ve atık döküm kumunun kompozit cam fiber/epoksi kompozitlerinin mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Kuvars, yüksek sertlik ve kimyasal stabilite gibi özelliklere sahip olup, kompozitlerde mukavemeti artırıcı bir katkı maddesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Atık döküm kumu ise, dökümhanelerde yaygın olarak bulunan ve geri dönüştürülebilir bir malzeme olup, maliyet etkinliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önem arz etmektedir. Bu çalışmada, farklı tane boyutlarına sahip kuvars ve atık döküm kumu ilavelerinin kompozit malzemelerin yoğunluk, sertlik, çekme mukavemeti ve elastik modül gibi mekanik özelliklerine olan etkileri incelenmiştir.

Bu çalışma, kuvars ve atık döküm kumunun kompozit malzemelerdeki potansiyel kullanımını ve bu malzemelerin mekanik performansını iyileştirme potansiyelini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Hedef, kuvars ve atık döküm kumunun katkı maddesi olarak kullanılmasıyla elde edilen kompozitlerin mekanik özelliklerindeki değişimleri analiz etmek ve bu malzemelerin ileri teknoloji gerektiren uygulamalardaki kullanım potansiyelini ortaya koymaktır. Bu bağlamda, elde edilen sonuçlar, kompozit malzeme tasarımı ve optimizasyonu açısından önemli bilgiler sunarak, endüstriyel uygulamalarda daha dayanıklı, hafif ve maliyet etkin malzemelerin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır.

2020 yılında önerilen ve 2021 temmuz ayında yayımlanan Avrupa İklim kanunu ile 2030 yılında, 1990 yılına kıyasla net emisyonların %55 azaltılması, 2050 yılında iklim-nötr olma, 2050 ve sonrası için ise negatif emisyon taahhüdünü ortaya koymak artık siyasi bir taahhüt olmaktan çıkıp yasal bir taahhüt haline gelmiştir.

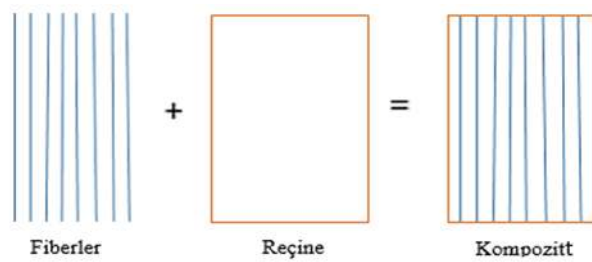
İklim değişikliği, biyolojik çeşitlilik kaybı, ozon tabakasının incilmesi, su kirliliği, kentsel stres, atık etimi ve daha fazlası gibi çevresel sorunlar bu kanunlara uymayı zorunlu kılmaktadır. Avrupa Yeşil Mutabakatı; temiz, dsel bir ekonomiye geçerek ve iklim değişikliğini durdurarak, biyolojik çeşitlilik kaybını geri döndürerek ve kirliliği azaltarak kaynakların verimli kullanımını artırmayı amaçlamaktadır. Emisyonların azaltılmasında ilk aşamada hedeflenen sektörler arasında ilk sıralarda yerini alan Demir-elik Sektörü bulunmaktadır.

Döngüsel Ekonomi Eylem Planları incelendiğinde satın al, kullan, at mantığına son verip yeniden kullan, tamir et ve dönüştür döngüsünü gerçekleştirmek amaçlanmaktadır. Bu sebeple atıkları değerlendirmek ve özellikle demir-elik sektöründe kalıplarda kullanılan tonlarca silis kumunun işlem görüp de atık olarak ayrılmış olanlarına yeni bir bakış açısı kazandırmak bu çalışmanın hedefleri arasındadır.

2. HAVA ARAÇLARINDA KULLANILAN KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, ikiden fazla bileşenin sistematik biçimde bir araya getirilmesi ile oluşturulan ve kendisini oluşturan bileşenlerinden çok daha üstün özelliklere sahip olan malzemelerdir [1]. Kompozit bir yapının bileşen parçaları bir çekirdek malzemedir, bir takviye malzemesinden ve bir reçine bağlayıcıdan yapılır. Tek başına çok az mukavemeti olan ve birbiri içerisinde çözünmeyen bu yapılar, doğru bir şekilde bir araya geldiklerinde oldukça güçlü bir yapıya dönüşürler. Çekirdek malzemesi takviye liflerini ayırır. Bunun için maksimum çekme (gerilme veya esneme) mukavemetini elde edebilirler [2]. Takviye elemanlar yani lifler yükü taşıma görevi üstlenirler [3]. Malzemenin mukavemeti genellikle lifli yapısından gelir. Örneğin bir çekme kuvveti uygulandığında, kompozit içindeki lifler uygulanan kuvvetin yönüne göre sıralanarak çekme mukavemetini verir [4]. Heterojen ve anizotropik yapıda olan kompozitlerin mekanik ve fiziksel özellikleri, materyal içindeki liflerin farklı yönelmesi ile değişir [5]. Bu sebeple yükü taşıyan liflerin maksimum potansiyellerine ulaşmak için doğru yönlendirmeye ihtiyaç vardır. Reçine, liflerin düzlüğünü koruyabilmesi ve maksimum mukavemetini sağlayabilmesi için lifleri yerinde tutar ve koruyucu faz olarak görev yapar [6]. Aynı zamanda reçine lifleri çekirdeğe bağlar ve liflerin düz sütunlar halinde kalmasını sağlar ve bükülmelerini önler [7].

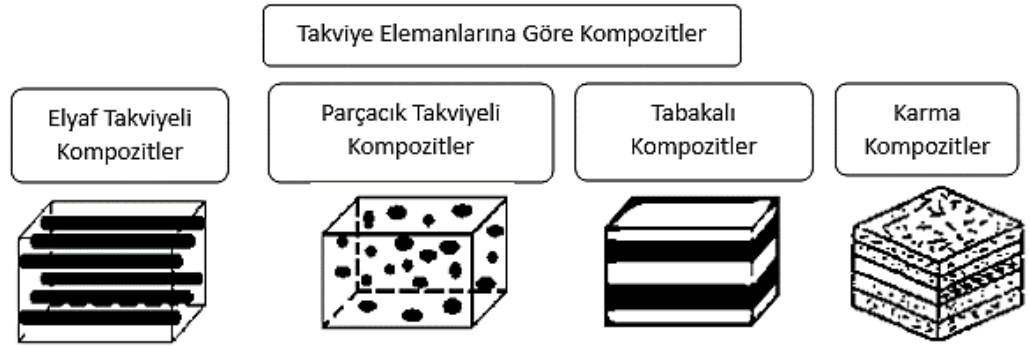
Tipik ve genel olarak kompozit malzeme, Şekil 1'de gösterildiği gibi fiberlerin bir matris reçinesinde güçlendirilmesiyle oluşturulur.



Şekil 2.1. Kompozit bileşenleri

2.1. Takviye Elemanlarına Göre Kompozit Malzemeler

Kompoziti oluşturan takviye edici malzemeye göre sınıflandırmaları Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Takviye Edicilere Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması

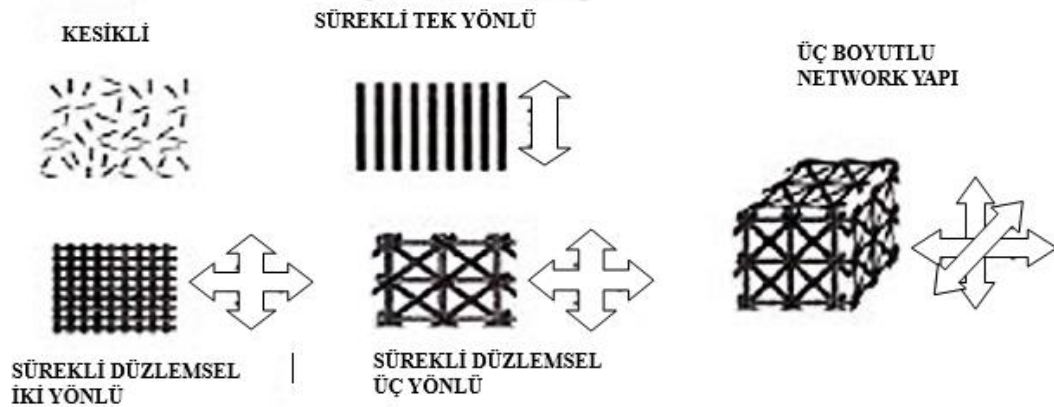
2.1.1. Elyaf takviyeli kompozitler

Piyasada en popüler kullanılan kompozitler fiber takviyeli olanlarıdır. En fazla kullanılan fiberler aramid, karbon, boron ve cam fiberlerdir. Takviye liflerinin değişik formları vardır (kısa, uzun, kalın, ince vb.) ve farklı formlar farklı özelliklerle sonuçlanmaktadır [8]. Liflerin temel fonksiyonları kullanılan fiberin türüne bağlı olarak; yükü taşımak ve sertlik, mukavemet, termal stabilite vb. yapısal özellikleri sağlamaktır. Aynı zamanda elektriksel iletkenlik veya yalıtkanlık gibi özellikleri de kazandırmak temel fonksiyonlarındandır. Fiber takviyeli malzemelerin en temel sınırlamaları; mukavemetlerinin ve performanslarının çoğunlukla hacim konsantrasyonları, yönlennmeleri ve element bileşimleri tarafından belirlenmesidir [9].

Tablo 2.1. *Fiberlerin Fiziksel Özellikleri [10]*

	Filament çapı (μm)	Yoğunluk (kg.m^{-3})	Boyuna elastikiyet modülü (MPa)	Kayma modülü (MPa)	Poisson oranı	Çekme (MPa)	Kopma uzaması (%)	Termal genleşme katsayısı ($^{\circ}\text{C}$)
	d	M_v	E	G	k	C_t	A	α
CAM E	16	2 600	74 000	30 000	0,25	2 500	3,5	$0,5 \times 10^{-3}$
CAM R	10	2 500	86 000		0,2	3 200	4	$0,3 \times 10^{-3}$
KARBON HM	6,5	1 800	390 000	20 000	0,35	2 500	0,6	$0,08 \times 10^{-3}$
KARBON HR	7	1 750	230 000	50 000	0,3	3 200	1,3	$0,02 \times 10^{-3}$
KEVLAR 46	12	1 450	130 000	12 000	0,4	2 900	2,3	$-0,2 \times 10^{-3}$
BORON	100	2 600	400 000			3 400	0,8	$0,4 \times 10^{-3}$
ALÜMİNA SİLİKAT	10	2 600	200 000			3 000	1,5	
POLİETİLEN		960	100 000			3 000		

Takviye malzemesi olarak kullanılan fiberler yerleşim konfigürasyonlarına göre farklı yüklemelerde farklı dayanımlar sergilerler. Çarpma, vurma, ısı iletkenlik, genleşme gibi davranışlar yönlendirme eksenine bağlıdır [11]. Aşağıda elyafların yerleşim tipleri verilmiştir ve mukavemet değerlerinin en iyi olduğu yönler oklarla gösterilmiştir [12].

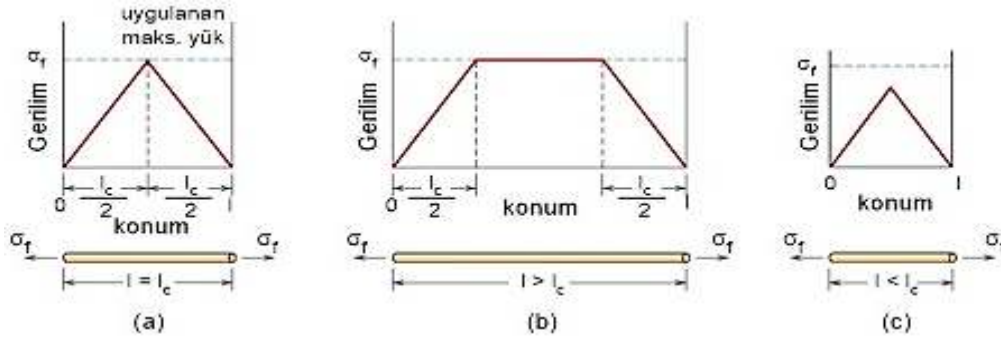
**Şekil 2.3.** *Elyafların Kompozit İçerisindeki Yerleşim Biçimleri*

Fiberli takviyeli kompozitlerde, kritik fiber uzunluğu (IC) mukavemeti etkilemektedir. Bu sebeple elyaf malzemenin uzunluğu (I) uygun olmalıdır.

σ_f fiberi gerdirme kuvveti, d fiberin çapı, τ_c : fiber-matris arayüzün kayma veya kesilme (shear) kuvvetini gösterdiğinde kritik fiber uzunluğu l_c , aşağıdaki eşitlik ile verilir.

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_c}$$

Aşağıdaki şekil 4'te görüldüğü üzere; şekil a'da kritik uzunluğun fiber uzunluğa eşitlik durumu söz konusudur. Burada maksimum fiber yüküne, sadece fiberin merkezinde ulaşılır. Şekil b'de fiber malzemenin boyu (l) artırıldığında takviye etkisinin de arttığı ($l > l_c$), şekil c'deki gibi kısaltıldığında ise ($l < l_c$) elyafın taşıyabildiği yükün gerilme kuvvetine gelemediği görülmektedir. $l > l_c$, fiberlerin sürekli olduğu durumlarda gözlemlenir. $l < l_c$ durumunu süresiz veya kısa fiberlerde gözlemlenir. Kritik uzunluk değerinden daha az uzunlukta olan elyaflar yükü taşıyamayacağı için yerleştiği matriste hasar görülür [http-1].



Şekil 2.4. Gerilim Altında Fiberlerin Yük Davranışı

2.1.1.1. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler

Oksitlerle eritilmiş silika (SiO_2) bazlı cam elyafları, yüksek mukavemetleri ve düşük maliyetleri nedeniyle polimer matrisli kompozitlerin temel dayanağıdır. Piyasada farklı çeşitlerde cam fiberler bulunmaktadır. Aşağıdaki tabloda cam fiberlerin çeşitleri ve bazı spesifik özellikleri ve bileşenleri verilmiştir [13].

Tablo 2.2. *Epoksi/Cam Elyafların Özellikleri*

	Epoksi/ S-cam Elyaf	Epoksi /E-cam Elyaf
Çekme Dayanımı [N/mm²]	1751	1103
Elastiklik Modülü [GPa]	59	52
Yoğunluk [g/cm³]	1,99	1,99

Tablo 2.3. *E Cam ve S Cam (% ağırlıkça) kimyasal içeriği*

	E-cam (%)	S-cam (%)
SiO₂	52,4	64,4
Al₂O₃.Fe₂O₃	14,4	25
CaO	17,2	-
MgO	4,6	10,3
Na₂O.K₂O	0,8	0,3
Ba₂O₃	10,6	-

PMC'ler için elyaf haline getirilen cam bileşimleri Tablo 3' de listelenmiştir. Yapısal uygulamalar için kullanılan iki tip cam elyafı vardır: "E", bir kalsiyum alümino-borosilikat cam ve "S" bir magnezyum alümino-silikat camıdır. S camı; E cam fiberlere göre daha sert ve mukavimdir. Ve daha yüksek sıcaklıklara dayanabilmektedir. Ayrıca korozyon direncinin gerekli olduğu yerlerde kullanılır. E cama göre daha pahalıdır ve daha çok askeri ve havacılık uygulamalarında yerini alır. Cam fiberler sahip oldukları dielektrik özellik sayesinde elektromanyetik radyasyona karşı şeffaflığın gerektiği uygulamalarda da kullanılmaktadır [14].

2.1.1.2. Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler

Karbon fiberler son derece yüksek mukavemet/ağırlık ve sertlik/ağırlık oranları nedeniyle çok yönlüdür ve elyaf türleri arasında en iyi mukavemeti ve modülüsü verir. Hiçbir madde ile reaksiyona girmezler, iletkenlerdir ve de eritilemezler. [15]

Karbon lifleri farklı hammaddelerden üretilmişlerdir. Bu hammaddelerin ve mekanik özelliklerinin gösterimi tablo 4 üzerinde verilmiştir [16].

Tablo 2.4. Farklı hammaddelerden elde edilmiş karbon elyafların mekanik özellikleri.

KARBON ELYAFLAR	Tip	Yoğunluk (Mg/M ³)	Germe Dayanımı (Gpa)	Uzama (%)	Elektriksel Özdirenç (Mohm*M)
Rayon	50S	1,67	1,9	0,5	10
	75S	1,82	2,5	0,5	'-
PAN	T800	1,80	5,6	1,9	13
	M50	1,91	2,4	0,4	7,6
İZOTROPİK KATRAN	T101F	1,65	0,8	2,4	150
	T201F	1,57	0,7	2,1	50
MEZOFAZ KATRAN	P25	1,90	1,4	0,9	13
	P120	2,18	2,2	0,3	2,2
TEK KRİSTAL GRAFİT	-	2,25	-	-	0,4

Karbon elyaflar aynı zamanda elastisite modüllerine göre birbirinden ayrılmaktadırlar. Bu ayrımı elyafın yapısı ve matris içerisindeki oryantasyonu sağlamaktadır. Tablo 5’te farklı türlere ait mekanik davranışlar incelenmektedir [17].

Tablo 2.5. Karbon elyaf ürünleri mekanik özellikleri

	UHM (Ultra Yüksek)	HM (Yüksek)	IM (Orta)	HT (Standart)	LM (Düşük)
Çekme Elastik Modülü (GPa)	600	350-600	280-350	200-2820	200
Gerilme Direnci (MPa)	2.500	2.500	3.500	2.500	3.500

Karbon fiberler; uçak frenleri, roketler, yakıt tankları gibi yüksek sıcaklıklara dayanıklı yerlerde, x-ray cihazları, bataryalar, otomobiller, ziraat, değirmenler, gemi, spor vb. birçok alanda yerini almıştır [18].

2.1.1.3. Aramid elyaf takviyeli kompozit malzemeler

Aramid elyafli kompozitlerin mukavemet, sertlik, elastikiyet modülü, ısı direnci, enerji emme kapasitesi gibi mekanik özellikleri çok güçlüdür. Nemi soğurma özelliği konusunda da oldukça başarılı bir malzemedir. Para-aramid ve Meta-aramid olmak üzere iki türü vardır. Kevlar olarak bilinen malzeme para-aramid malzemedir. Güçlü bir yapıya

sahiptir. Meta-aramid ısıya ve kimyasallara karşı yüksek dirençli malzemedir ve Nomex malzemesi metaramid yapıya örnektir [19].

Aramid elyaflar; askeri, uzay, havacılık gibi birçok ileri teknoloji alanında yaygın kullanılmaktadır. Bununla birlikte, malzemenin zayıf UV direnci ve yüzey inertliği sebebiyle zorlu ortamlarda kullanımlarını engellemektedir [20].

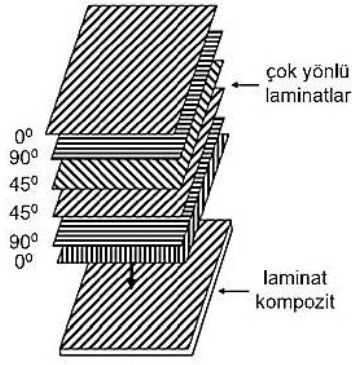
2.1.2. Partikül takviyeli kompozitler

İstenen özelliklere sahip parçacıklar birbiri arasında ve bulunduğu matriste çözünmeden, mikro veya makro ölçekte bir araya gelerek partikül ilaveli kompoziti oluştururlar. Partiküllerin şekli, boyutu, dağılımı ve oranları malzemenin performansını etkiler. Matrise ilave edilen bu parçacıklar malzemenin sertlik, aşınma direnci gibi mekanik özelliklerine katkı sağlarlar [21]. Partikül takviyesi ile malzemeye elektriksel iletkenlik, yüksek sıcaklığa dayanım gibi özellikler kazandırılır. Parçacık ilaveli kompozitler neredeyse izotropiktir yani yöne bağlı olarak özellikleri değişmez ve bu durum malzemeye avantaj sağlar. Üretimi ve karıştırılması fiber takviyeli malzemelere nazaran daha kolaydır. Ancak partiküller daha çok sertlikte iyileşme gösterirler [22]. Mukavemet takviye edilen malzemenin sertliğine göre değişir. Partikül takviyesi birçok malzeme olabilir. Genel olarak tozlar, kumlar, cam, karbon, silisyum karbür, alüminyum karbür, bor karbür, whisker, kısa fiberler vs. gibi malzemeler sayılabilir.

2.1.3. Tabakalı kompozitler

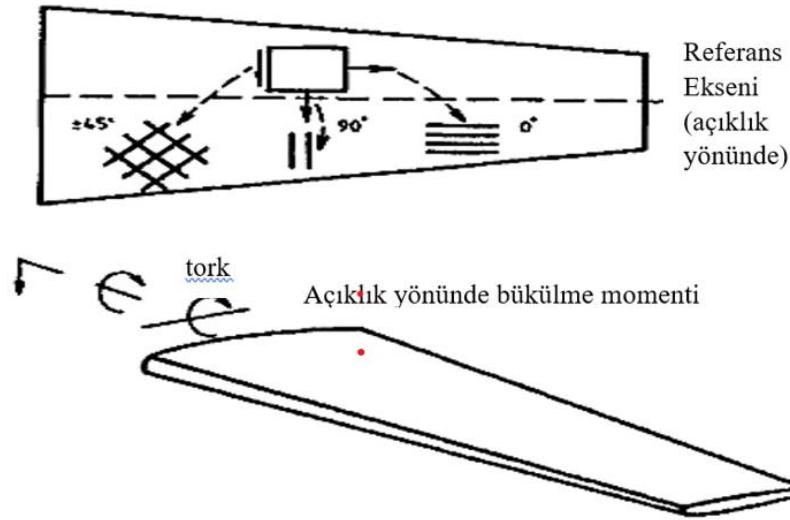
İstenen özelliklere uygun ikiden fazla katmanın birleştirilmesi ile oluşurlar. Dayanımları yüksek ve hafif malzemelerdir. Dayanımı sağlayan ve yükü taşıyan genellikle fiberlerdir. Isıl genleşme özellikleri oldukça iyidir.

Tabakalı kompozitlerde geometrik dizayn önemlidir ve farklı yönlerde katmanlama yaparak malzemeye istenen özellikler kazandırılır [23]. Aşağıda belirli açılarda istiflenmiş tabakalı kompozit malzeme örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Tabakalı Kompozit

Tabakalı yapı, bileşenin imalatı sırasında ihtiyaç duyulan dayanım ve sertliğe ulaşmak için belirli konsantrasyonlarda Tek yönlü veya çift yönlü yönlendirilmiş fiberlerin katmanlarından veya katlarından oluşan lamine veya kontrplak tipi bir yapıdır. Bu tip bir kompozit yapı aşağıdaki şekilde gösterilen uçak kanadı üzerinde gösterilmiştir [24].



Şekil 2.6. Uçak Kanadında Uygulanan Yükler İçin Fiberlerin Yönlenmesi

Alternatif olarak elyaflar, dokuma, örgü veya filaman sarma gibi çeşitli gelişmiş tekstil teknikleriyle düzenlenebilir. Böylece istenen mekanik özellikleri elde etmek için, bir laminattaki fiber katmanları veya katları, 0°'lik birincil yükleme yönüne göre 0° ile 90°'lik açılarda düzenlenir. Katlar çoğunlukla 0°, $\pm 45^\circ$ ve 90° yönelimlerin kombinasyonlarına dayanmaktadır. Laminat, 0° fiberlerin en yüksek konsantrasyonuna sahip yönde en sert ve en güçlüdür (düzlem içi), 0°, $\pm 45^\circ$ ve 90° yönelim kombinasyonları.

Laminat en sert ve 0° liflerin en yüksek konsantrasyonuna sahip yönde en güçlü (düzlem içi), ancak diğer yönlerde mukavemeti ve sertliği çok daha düşük olacaktır; bu durumda laminatın ortotropik olduğu söylenir. Kat konfigürasyonu 0° , $\pm 45^\circ$ ve 90° 'de eşit sayıda kattan oluştuğunda, düzlem içi mekanik özellikler yükleme yönüne göre değişmez ve bu durumda kompozitin yarı izotropik olduğu söylenir. 0° 60° kat konfigürasyonunda da benzer bir durum ortaya çıkar. Düzlem içi yükleme iki yönlü olduğunda yarı izotropik kat konfigürasyonu kullanılır. Yarı-izotropik konfigürasyon bir gerilim konsantrasyon faktörüne (izotropik bir malzemeninkine benzer) sahip olduğundan, mekanik bağlantı gibi yerel gerilimlerin yüksek olduğu yerlerde de kullanılır. Ancak çoğu durumda yarı-izotropik konfigürasyon, kompozit malzemenin verimsiz bir kullanımıdır.

Karma kompozitler; aynı kompozit yapıda iki ya da daha fazla takviye elemanı çeşidinin bulunması olasıdır. Bu tip kompozitlere “hibrit kompozitler” denir. Hibrit kompozitler oluşturulurken farklı türdeki elyafların farklı katmanlarda istenilen takviyeli kompozitin dizilim modeline göre hazırlanarak üretilir. Karma kompozitlerde amaç; farklı türdeki fiberlerin farklı özelliklerini bir araya getirerek kompoziti güçlendirmektir. Bu alan yeni tip kompozitlerin geliştirilmesine uygun bir alandır. Örneğin, kevlar ucuz bir elyafdır ancak basma mukavemeti düşüktür. Grafit ise; düşük tokluğa sahip, pahalı ancak iyi basma mukavemeti olan bir elyafıdır. Bu iki elyaf kullanılarak tasarlanan hibrit kompozitin tokluğu grafit kompozitten iyi, maliyeti düşük ve basma mukavemeti de kevlar elyafı kompozitten daha yüksek olmaktadır. [25]

Tez çalışmamda cam elyaf takviyeli polimer matrisli hibrit kompozit üretiminde elyafın yanı sıra kuvars tozu da eklenmiştir. Yani birden fazla takviye malzemesi ile yapılan karışım hibrit olma özelliğini taşımaktadır. Eklenen kuvars ve cam elyafların kompozit malzeme üzerinde kendi özelliklerinin bir kısmını kompozit malzemede gösterip göstermedikleri yapılan deneysel çalışmalar ile incelenmiştir. Aşağıda bazı kompozitlerin ve geleneksel özelliklerin gösterildiği tablo yer almaktadır. Buna ek olarak çalışmamda kullanılan kuvarsın özelliklerinden de bu tablodan sonra bahsedilmiştir.

Aşağıdaki bazı kompozitlerin ve geleneksel malzemelerin özellikleri, aralarında karşılaştırma yapmak amacı ile genel hatları ile Tablo 1'de ele alınmıştır. (Not: Kompozit özellikler uzunlamasına yöndedir).[26]

Tablo 2.6. Bazı kompozitlerin ve geleneksel malzemelerin özellikleri

	Nihai çekme [MPa]	Çekme Modülü [GPa]	Termal genleşme katsayısı [$10^{-6}K^{-1}$]	Isı İletkenliği [W/m.K]	Yoğunluk [g/cm ³]
Epoksi	27.5-90	2.4	35	0.34	1.15
Polyester	40-90	2-4.5	50-110	0.2	1.2-1.5
Naylon 6/6	75.9-91.5	1.58-3.79	50	0.17	1.1-1.15
Polipropilen	25-38	1-1.4	110	0.2	0.9
Polikarbonat	45-70	2.2-2.4	70	0.2	1.06-1.02
Odun	5	11	-	0.1-0.2	0.4-0.75
Çelik	"	210	-	-	7.8
Aluminyum	75-700	75	20-25	2.37	2.8
E-cam elyaf	3450	72.5	1.3	5	2.5
Karbon Fiber	2760-5170	210-290	7-8.5	7-10	1.76-2.15
Grafit Elyaf	1725-2070	345-517	-	-	1.67-2.02
Kevlar	3600-4100	131	-	60	1.44
E-cam/epoksi (vf=0,55)	1080	39	7	-	2.1
Karbon/epoksi (vf=0,63)	760-2139	145-220	(-0.79) - (-0.54)	-	1.6-1.7
SiC matrisi	2280	142	-0.9	-	1.58
Al ₂ O ₃ matrisi	1280	87	-2	-	1.38
ZrO ₂ matrisi	>276	>69	1.1	11.5	<2.99

2.2. Kuvarsın Genel Özellikleri ve Kompozit Malzemelerde Kullanımı

Polimerler malzemelerin özelliklerinin iyileştirilmesi için farklı dolgu malzemeleri ilave edilir. Bu malzemeler organik veya inorganik olabilir. Bu dolgu malzemeleri mekanik, termal gibi özellikleri iyileştirmenin yanında maliyeti de azaltmak için kullanılırlar. Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan bazı dolgu maddeleri; Kalsiyum karbonat, talk, mika, silika, baryum sülfat, magnezyum hidroksit, alüminyum trihidroksit, karbon siyahı, titanyum dioksit, metal tozu olup bu çalışmada silika kullanılmıştır.

Dolgu maddeleri, kimyasal bileşimlerine göre organik veya inorganik, parçacık şekillerine göre küresel, kübik, düzensiz, blok, plaka, pul, lif ve bunların karışımları, parçacık boyutuna göre nano, mikro ve makro, termal özelliklerine göre termal iletken olarak tanımlanabilir. Isıl genleşme katsayısına, elektriksel özelliklerine göre iletken veya yalıtkan olarak ayrılırlar.

Kompozit malzemelerde dolgu-matris ara yüzeyinin yapısı kompozitin özelliklerinde önemli rol oynar. Özellikle mekanik özellikler söz konusu olduğunda polimerik kompozitlerde en önemli olaylardan biri dolgu malzemesi ile polimer matris arasındaki etkileşimdir. Etkileşim polimerik kompozitlerin mekanik özelliklerini belirler. Genel olarak daha iyi bir matris-doldurucu arayüzü, yüksek modül, çekme mukavemeti ve sertlik özelliklerinin yanı sıra yorulma, çatlama ve korozyon direnci de sağlayacaktır [27].

Bu çalışmada dolgu malzemesi olarak kuvars kullanılmıştır. Dolayısıyla aşağıda kuvarsın özellikleri incelenecektir. Aşağıdaki tablolarda kuvarsın termal, mekanik ve elektriksel özellikleri ve sıcaklık değişiklikleri gösterilmektedir [http-2].

Tablo 2.7. *Kuvarsın Termal Özellikleri*

Termal	Sıcaklık °C	100	300	500	700	900	1100
Genleşme Katsayısı	Thermal Expansion Coefficient x 10⁻⁷	5.11	5.92	5.65	5.73	5.52	5.48
Isı İletimi	Sıcaklık °C	20	100	200	300	400	950
W/m°C	Isı İletkenlik Katsayısı	1.38	1.47	1.55	1.67	1.84	2.68
Termal Enerji Oranı J/Kg°C	Sıcaklık °C	20	100	500	900		
	Termal Enerji Oranı	690	772	964	1052		

Tablo 2.8. *Kuvarsın Elektriksel Özellikleri*

Elektrik Performansı	Dielektrik Sabiti (E)	20°C	23°C	28°C
	(Tgδ)	1 kHz	1-1000 MHz	3 x 10 ⁻⁴ MHz
		0.0005	0.0001	0.0004
	Direnç Faktörü (Ω cm)	20°C	400°C	800°C
		10 ¹⁶	10 ¹⁰	6.3 x 10 ⁶
				1.3 x 10 ⁵

Tablo 2.9. Kuvarsın Mekanik Özellikleri

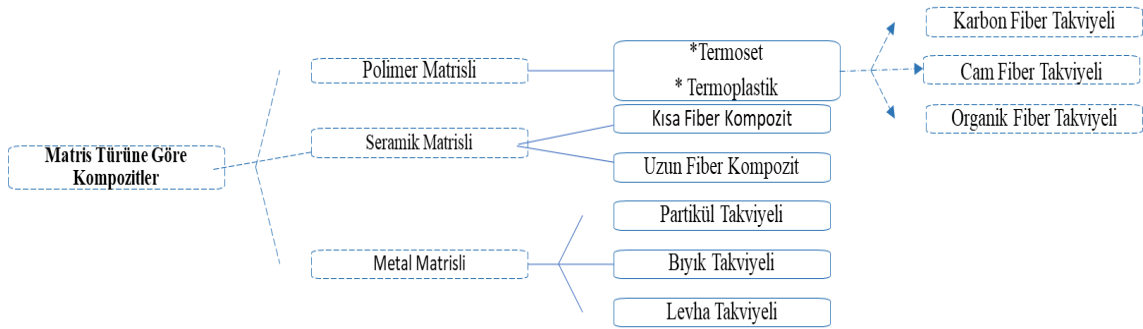
Yoğunluk	Sıkıştırma dayanımı	Uzatma dayanımı	Tork kuvveti	Mohs sertliği	Tork katsayısı	Bükülme dayanımı
2.21 g/cm ³	6000N/mm ² 160000psi	50 N/mm ²	30 N/mm	5.5 - 6.5 N/mm ²	3.1 x 10 ⁴ N/mm ²	67 N/mm ²

Tablo 2.10. Kuvarsın Sıcaklık karşısındaki davranışı

Gerilme Noktası	1000-1125°C
Uzun vadeli kullanım	1100°C'nin altında
Yumuşatma noktası	1180°C
Kısa vadeli kullanım	1450°C
Yumuşama noktası	1600-1710°C
Eritme	1730°C

2.3. Matris Türüne Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Mükemmel bir kompozit elde etmek için, takviyenin mukavemeti ile matrisin tokluğu mükemmel bir şekilde birleştirilir, böylece kompozitlerde tek bir malzemede görülemeyen arzu edilen özellikler elde edilir [28]. Takviyeli kompozitlerin mekanik davranışı fiber mukavemetine ve young modülüne, stabiliteye ve matris mukavemetine bağlıdır [29]. Matris malzemeleri kompozitin üretim yöntemine ve kullanım amacına göre farklı malzemelerden oluşurlar [30]. Şekil 6'da sınıflandırılmıştır.

**Şekil 2.7.** Matris Yapısına Göre Kompozitler [31].

Kompozit malzemelerde matris, çoğu yapının tatmin edici performansı için hayati önem taşıyan bazı işlevleri yerine getirir. Matrisin önemli işlevleri aşağıdakileri içerir:

- Matris malzemesi elyafları birbirine bağlar ve yükü liflere aktarır. Yapıya sağlamlık kazandırırken şekil de verir.

- Matris, lifleri izole ederek liflerin ayrı ayrı hareket edebilmesini sağlar. Bu, çatlağın yayılmasını yavaşlatır veya engeller.

- Matris iyi bir yüzey kalitesi sağlar ve net şekilli veya net şekle yakın parçaların üretimini gerçekleştirmeye yardımcı olur.

- Matris, takviye elyaflarına kimyasal saldırılara ve mekanik hasarlara (aşınma) karşı koruma sağlar.

- Hata modu, kompozitte kullanılan matris malzemesinin türünden ve bunun fiberle uyumluluğundan büyük ölçüde etkilenir.

- Seçilen matris malzemesine bağlı olarak süneklik, darbe dayanımı vb. performans özellikleri de etkilenir.

Bu çalışmada polimer matris malzemesi kullanılmasından dolayı sonraki kısımlarında polimer matris malzemeleri ve bu malzemeyi güçlendirmek için ne gibi katkılar kullanılacağı hakkında ayrıntılı bilgi verilmektedir [32].

Polimer matrisli kompozit malzemeler, günümüzde otomobil, havacılık ve denizcilik ve daha bir çok sektörde çok sayıda kullanım alanı olan petrokimya esaslı malzemelerdir. Bu malzemeler uzun süreli kullanıma elverişli olmalarının yanı sıra korozyon dayanımına sahip, şekillendirilmesi ve işlenmesi kolay, birim kütle başına yük kapasitesi yüksek özelliklere sahiptir. Termoplastik ve termoset olmak üzere iki ana gruba ayrılan polimer kompozit malzemeler, endüstride geniş bir uygulama alanına sahiptir [33].

Termoplastikler; düşük sıcaklıklarda sert halde bulunurlar ısıtıldıklarında yumuşarlar. Oda sıcaklığında katı halde bulunan termoplastik, soğutucu içinde bekletilmeden depolanabilir. Termoplastiklerin kompozit malzemelerde matris olarak yaygın kullanılmamasının başlıca nedeni üretimindeki zorluklar ve yüksek maliyetidir. En yaygın termoplastikler Polipropilen, Poliamid, Polietilen'dir. Termoset reçineler ise; kimyasal etkenler altında çözülmeyen, olağan üstü hava koşullarında bile çok dayanıklı olan ve en yaygın kullanılan matris malzemeleridir. Yüksek sıcaklıklarda dahi yumuşamazlar. Termoset matris malzemelerin üretiminde kullanılan yaygın malzeme tipleri; Epoksi Reçine, Polyester Reçine, Vinilester Reçinelerdir [34]. Aşağıda bazı yaygın termoset polimer reçinelerin özelliklerini gösteren tablo yer almaktadır.

Tablo 2.11. Bazı Termoset Malzemelerin Özellikleri [http-3].

ÖZELLİK	Vinyl Ester	Epoxy	Phenolic
YOĞUNLUK g cm ⁻³	1.2	1.2-1.3	1.3
ÇEKME MODULÜ GPa	3.3	4..5	3.0
ÇEKME MUKAVEMETİ Mpa	75	130	70
KOMPA UZAMASI %	4	2-6	2.5
KÜRLEME BÜZÜLMESİ%	5.4-10.3	1-5	-
CTE (10-6 °C-1)	50	110	10
Tg°C	80	180	-
SERVİS SICAKLIĞI °C	100	90-200	120-200

Polimer matris malzemesinin seçiminde camsı geçiş sıcaklığı, yüksek elastisite modülü, çekme dayanımı gerektiren yerlerde yüksek çekme dayanımına sahip polimerler seçilmelidir. İyi tokluk özelliğine sahip bir matris malzemesi çatlak ilerlemesini ve delaminasyonu kontrol etmekte daha avantajlıdır. Reçinelerin raf ömrü, vizkozite, kürleme süresi, nem ve solvent dayanımı gibi özellikler de malzemeyi seçmek için önemli kriterler arasındadır. Bazı polimerler lifleri daha iyi ıslatır ve daha iyi yapıştır. Bu nedenle kimyasal ve/veya mekanik bağlar oluştururken diğerleri bunu yapamaz. Bu, yükün matristen fibere aktarılmasında son derece önemlidir. Genel olarak viskozite azaldıkça ıslanabilirlik artar ve işlenmesi kolaylaşır [http-4]. Bu kriterler dikkate alındığında; termoset reçinelerin sıvı formundan dolayı işlenme zorluğu olmaması, lifleri kolay ıslatabildiği için yapıdaki gözeneklerin çok az olması, basınç gereksinimin az olmasından dolayı enerjiden tasarruf sağlanması, ekonomik olması gibi avantajları termoplastik kompozitlerin kullanımından uzaklaştırmaktadır [35].

Epoksi Reçineli Matrisler; Fiberlerle olan bağ mukavemeti ve kopma mukavemetinin yüksek olması, kimyasallara ve aşınmaya olan yüksek dirençleri, düşük veya yüksek sıcaklıklarda sertleşebilme özelliklerinden dolayı avantajlı malzemelerdir. Polyester reçineye göre viskozite yüksek olması ve biraz daha pahalı olması dezavantajları arasındadır ancak polyester reçinelerin zayıf bağ mukavemeti ve düşük kimyasal direnci epoksi reçineyi daha üstün kılmaktadır [36].

2.4. Polimer Esaslı Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Seçilecek üretim yöntemi; Takviye malzemesine (lif), matris malzemesine (reçine), parçanın şekline, istenen mekanik ve fiziksel özelliklere, maliyete ve üretim hızına bağlı olarak değişiklik gösterir. Bir parçayı üretmek için genel olarak; Hammaddeye, kalıba, ısıya ve basınca ihtiyacınız var. Kullanılan reçine ve takviye malzemesinin yanı sıra üretim yöntemi de kompozit yapının nihai özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynar. Polimer bazlı kompozitler için birçok üretim yöntemi vardır. En popüler olanlardan bazıları aşağıda açıklanmıştır ve çalışmamızda kullandığımız vakum torbalama yöntemidir. [37].

❖ Açık Kalıplama

Ham maddeler (reçineler ve elyaf takviyeleri) sertleşirken veya sertleştirirken havaya maruz kalır. Açık kalıplama, el yatırması, püskürtme, döküm ve filament sarma gibi farklı süreçleri kullanır.

a) El Yatırması Yöntemi:

En eski, en ekonomik ve en az ekipman gerektiren üretim yöntemidir. Hazırlanmış olan elyaf takviye kumaşları, kalıp üzerine yatırılarak katmanalara sıvı reçine emdirilir. Kumaşları yatırmadan önce kalıp iyice temizlenir ve jelkot sürülür ve sertleşmesi beklenir ve sonrasında işleme başlanır. Reçine ise kompozit malzemenin hazır olması için en son sürülür. Reçinede meydana gelen kimyasal reaksiyonlar malzemeyi yüksek dayanımlı hale getirir. Bu işlemde elyaf kumaşına reçinenin iyi nüfuz etmesi önemlidir. Bu teknikte; polyester, epoksi, fenolik ve vinyil ester reçineler tercih edilir [http-5].

b) Püskürtme Yöntemi:

Bu teknik, elle yatırma tekniğine çok benzer ancak aletler kullanılarak yapılır. Elle yatırma tekniğine göre daha hızlı ve pratiktir. Bu teknikte, sertleştiricisi katılmış reçineyi ve lifleri kalıba püskürtmek için özel tabanca kullanılır. Elyaf tabancadaki kesici sayesinde kırılır. Matris malzemesi ve takviyeyi aynı anda veya ayrı ayrı püskürtülebilir. Parçanın kalıptan kolayca ayrılması için ayırma jeli uygulanır. Havanın sıkışmasına engel olmak veya sıkışan havayı çıkarmak için rulo yapılır. Ürünün kürlenmesi oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilir [38].

c) Elyaf Sarma (Filament Sarım Yöntemi):

Reçine ile ıslatılmış veya kuru haldeki elyafın dönen bir kalıba veya makine kontrollü mandreller üzerine, istenilen geometriye göre tasarlanıp sarılması yöntemidir. Mandrel sabit bir hızla dönerken lif dağıtım ünitesi ileri-geri hareketi yaparak istenen

açıda sarım gerçekleştirilir Bu teknik ile mükemmel yüzey kaliteleri elde edilmektedir. Operatörler, boru çapları, mandrel hızı, basınç oranı, bant genişliği, lif açısı vs. gibi değişkenler elyaf sarımın kalitesini etkiler. Roket motor ve kovan kaplamaları, tank ve borular, kavisli şekiller, şişeler, tren vagonları, taşıyıcı elemanlar vb. alanlarda kullanılırlar. Cam, karbon ve kevlar elyaflar bu teknikte kullanılabilir. Bisfenol, Vinil esterler, epoksi reçineler bu teknikte tercih edilirler [39].

❖ **Kapalı Kalıplama**

Kapalı kalıplamada, ham maddeler (elyaflar ve reçine) iki taraflı bir kalıp içinde veya bir vakum torbası (havadan kapalı) içinde kürlenir. Kapalı kalıplama prosesleri genellikle otomatiktir ve özel ekipman gerektirir. Bu nedenle çoğunlukla yılda 500.000 parçaya kadar büyük hacimlerde malzeme üreten büyük tesislerde kullanılır.

a) Vakum Torbalama:

Vakum torbalama üretim tekniği elle yatırma metodunun devamı gibi düşünülebilir. Ancak elle yatırmadaki dezavantajları ortadan kaldırarak daha sağlam ve hafif yapılar elde edilir çünkü vakum ile reçine çekilerek yapıdaki lif-reçine oranının yüksek olması sağlanır. Bu sayede reçine tam olarak emilir ve yayılır. Malzemenin bir kalıp içine elle yatırılması ve reçinenin kalıpta el ile dağıtılması sürecinden sonra devreye alınan bir uygulamadır [http-6].

Kullanılan Ekipmanlar;

Sızdırmazlık bandı: Temiz bir alana, parçanın etrafına vakum naylonunu sabitleyeceğimiz sızdırmazlık sağlayan bant yerleştirilir.

Ayırıcı Kat (Peel Ply): Naylon veya polyester malzemelidir. Yüzeyin zımpara ihtiyacını ortadan kaldıracak pürüzsüzlükte malzeme üretme imkanı tanır.

Ayırıcı Film: Delikli naylon da denilebilir. Fazla reçinenin parçadan reçine emici battaniyeye (Breather fabric) nasıl hareket ettiğini kontrol eder. Bu, vakumlu torbalama işleminde isteğe bağlı bir katmandır.

Polyster Battaniye (Reçine emici kat): Fazla reçineyi çeker ve vakum naylonu içinde hava geçişi sağlayan bir çeşit polyester malzemedir.

Vakum Deliği: Vakum portu, torbanın altındaki malzemeler ile vakum hattı arasında geçiş noktası olarak kullanılan bir bağlantı elemanıdır.

Vakum Torbası: Plastik bir fiildir. Parça bu torba içerisinde sıkıştırılır.

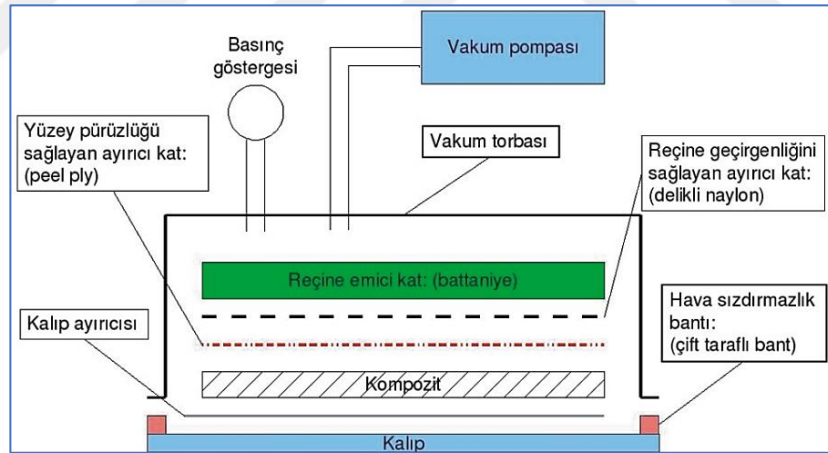
Kalıp Ayırıcı: Kimyasal bir malzemedir. Parçanın kalıba veya masaya yapışmasını engeller.

Vakum Hattı: Vakum portunu vakuma bağlayan hava geçirmez esnek bir hortumdur.

Vakum Pompası: Gerekli basıncın sağlandığı parçadır [http-7].

Üretimin nasıl yapılacağını adım adım inceleyelim [40]:

- Üretimin yapılacağı kalıp iyice temizlenir.
- Kalıbın etrafına sızdırmazlık bandı çekilir.
- Üretimin yapılacağı kalıba kolay ayrılması için kalıptan ayırıcı yağ sürülür.
- Kumaş yerleştirilir ve üzerine reçinesi sürülür.
- Malzeme üzeri ayırıcı kumaş ve delikli naylon ile örtülür.
- Reçine emici battaniye yerleştirilir.
- Sonra sızdırmazlık bant üzerine vakum naylonu yapıştırılır.
- Vakum torbasına, vakum pompasının hortumu takılır. Vakum pompası hortumu dik şekilde tutularak vakum pompası çalıştırılır.
- Vakum altında birleşme sağlandıktan sonra vakum kapatılır.
- Bekleme süresinden sonra parça çıkartılır.



Şekil 2.8. Vakum Torbalama Tekniği Şematik Gösterimi [41].

b) Vakum İnfüzyon İşlemi:

Sıkıştırılmış kompozit malzeme içerisine reçinenin verildiği vakumlu torbalama çeşididir. İnfüzyon yöntemi dört bölümden oluşur; Vakum pompası, vakum tankı, kalıp ve reçine kovasıdır. Büyük parçaların bu yöntem ile rahat üretilmesi, üretim yönteminin diğer yöntemlere göre temiz olması, reçine/ elyaf karışım oranı düşük olması bu yöntemi avantajlı kılmaktadır. Ancak reçine/kumaş oranı düşüklüğü bazen mekanik

özellikleri kötü etkileyebilir ve ıslanmamış bölgeler de kalabilir. Bu durum da yöntemi dezavantajlı kılar.

Bu yöntem; karmaşık şekilli parçaların ve yat, tren ve kamyon gövdeleri, rüzgâr türbin kanatları gibi büyük parçaların yapımında kullanılır. [42]

c) Reçine Transferi ile Kalıplama (RTM):

RTM'de, kompozit malzeme parçasını elde etmek amacıyla, kuru elyaf katmanlarının kapatmadan önce konumlandırıldığı ve daha sonra elyafları ıslatmak için belirli bir basınçta reçinenin enjekte edildiği kapalı bir sert kalıp kullanılır. Kurlama işlemi, parça çıkarılmadan önce kalıbın önceden tanımlanmış bir döngüde ısıtılmasıyla gerçekleştirilebilir. Karmaşık yapıları parçaların üretilmesini sağlar. Yüksek mekanik performans, yüksek yüzey kalitesi, yanmazlık gibi avantajlara sahiptir [43].

d) Sıkıştırma Yöntemi ile Kalıplama:

Sıkıştırma kalıplama, karmaşık, fiberglas takviyeli polimer parçaların hızlı bir döngü süresinde kalıplanması için uygun, yüksek hacimli, yüksek basınçlı bir yöntemdir. Hazırlanmış olan kompozit malzeme belirli bir sıcaklık ve basınç altında çelik kalıplarda preslenerek üretilir. Karmaşık şekillerin üretilebilmesi, metal parçaların bünye içine gömülebilmesi, farklı cidar kalınlıkları gibi avantajları bulunmaktadır. Ayrıca ürünün iki yüzü de kalıp ile şekillenmektedir. Kalıp maliyetleri yüksek olduğu için ekonomik bir yöntem değildir. Ancak hızlı ve çok sayıda ürünler üretilir.

e) Reaksiyon Enjeksiyonlu Kalıplama (RRIM):

Enjeksiyon makinalarına beslenen kalıplama bileşikleri, boyları 3-6 m arasında değişen granüller halinde ön karışımlardır. Enjeksiyonla kalıplama tekniğinde genellikle palet şeklindeki ön karışımlar kullanılır. Polimerlerin içerisinde bulunan çeşitli kimyasallar sayesinde polimerler, ısıtılmış kalıba enjekte edilince genişler, sertleşir ve kalınlaşırlar. Bu yöntem diğer klasik enjeksiyon yöntemlerine göre çok daha komplike tasarımlara sahiptir [44].

3. AMAÇ VE ÖNEM

Literatürde yapılan araştırmaların sonucunda İnsansız Hava Araçlarında, üreticilerin kaygısı mukavemet, ağırlık ve ekonomidir. Bu sebeple kompozit malzemelerin kullanımı hızla önem kazanmıştır. Kompozit bileşenlerin özellikleri aşağıdakileri içerir:

- Ağırlık tasarrufu, yakıt tasarrufuna, taşıma kapasitesinde artışa veya menzilde artışa yol açarak performansı artırır.
- İyi yorulma direnci, ürünün uzun vadeli maliyetinden tasarruf etmeyi de içeren ömrünün uzamasına yol açar.
- İyi korozyon direnci, daha az denetim gereksinimi anlamına gelir ve bu da bakım maliyetinden tasarruf sağlar.
- Ayrıca kompozit çözümün geleneksel çözüme göre maliyeti de dikkate alındığında kompozitlerin uçak üreticilerinin talebine uygun olduğu söylenebilir.
- Tasarım Esnekliği
- Parça Konsolidasyonu (yapıları benzer durumda olan nesnelerin birleştirilmesi)
- Boyutsal Stabilité

Yukarıda sıralanan avantajlı özelliklerinden dolayı Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin kullanımı giderek artmakta ve gelişmektedir. Yapılan araştırmalarda polimer matris olarak Epoksi Reçineli Matrisler; Fiberlerle olan bağ mukavemeti, kimyasallara ve aşınmaya olan yüksek dirençleri, düşük veya yüksek sıcaklıklarda sertleşebilme özelliklerinden dolayı avantajlı malzemelerdir. Ancak epoksi reçine sistemine cam fiberlerin yanında kuvars tozların da eklenmesi ile mukavemetlerin daha da arttığı ve daha rijit bir yapı elde edilebildiği araştırılmıştır. Bu sebeple, bu çalışmada, çok düşük miktarlarda ve mikron seviyelerinde kuvars tozu kullanarak polimer matris olan epoksi reçinenin mukavemetinde ve rijitliğinde artış gözlemlenmiştir.

Ayrıca, Avrupa Yeşil Mutabakatı; kaynakların verimli kullanımını artırmayı amaçlamaktadır. Dolayısıyla doğaya salınan sera gazlarının azaltılması gerekliliğine dikkat çekmiştir. Karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), nitroz oksit (N₂O), hidrofloro karbonlar (HFC'ler) ve kükürt hekzaflorür (SF₆) gibi birçok sera gazı vardır. Bunlar arasında CO₂, emisyon oranı diğer gazlardan daha yüksek olduğu için baskın katkıda bulunandır. En fazla CO₂ salınımı yapan sektörler arasında da demir-

elik sektörü bulunmektedir. Bu sebeple buradaki atıkları değerlendermek de çalışmanın amaçları arasındadır. Döküm fabrikasında kullanılan tonlarca atık silis kumlarının elementel analizi sonucunda hala yüksek oranda var olan kuvarsı yeni bir enerji açığa çıkarmadan doğrudan polimer matrise katkılayarak matris malzemesinin geliştirilmesi sağlanmıştır. Böylece kaynakların verimli kullanılması, geri dönüşüm, iklim sorunları gibi konulara fayda sağlanması amaçlanmıştır.



4. MATERYAL VE YÖNTEM

Epoksi reçine ve sertleştirici için Resinin Norm Hard A+B Extra Sert Kompozit ve Laminasyon reçinesi kullanılmıştır. Cam elyaf olarak Polser marka E Tipi cam elyaf kullanılmıştır. Kompozit endüstrisi için üretilen E tipi cam elyafları, S Tipi cam elyaflar kadar olmasa da malzemeye mukavemet ve basınç dayanımı, sıcaklık dayanımı ve darbe dayanımı gibi fiziksel özellikler sunar. Polimer matrisli hibrit yapılı kompozit malzeme üretilirken polimeri güçlendirmek amacı ile cam fiberlere ek olarak işlem görmüş döküm kumu ve kuvars temin edilmiştir. Deneysel çalışmalarda takviye malzemesi olan işlem görmüş döküm kumu Elba Basınçlı Döküm Sanayi A.Ş. Odöksen Osmaneli Şubesi'nden, kuvars hammaddesi ise Seramik Araştırma Merkezi A.Ş.'den tedarik edilmiştir.

4.1. Kompozitlerin Plakaların Hazırlanması

Eskişehir Teknik Üniversitesi'nde Proje Takımı olan Anatolia Aero Design takımından temin edilen kumaşlar, 86 g/m²' lik elyaflardan dokunmuş, özellikle ileri kompozit imalatlarında kullanılan, epoksi reçine ile uyumlu, çok kolay emprenye olan, özellikle havacılık, modelcilik, IHA, drone, laminasyon için ideal olarak kullanılacak olan cam elyaftır. Ve reçine ile birleşmeden önce örgü yapısı bozulmadan eni 30 boyu 20 olacak şekilde kesilerek hazırlanmıştır.

Daha sonra hazırlanan Cam Elyafıya uygun ayırıcı kumaş, delikli naylon, epoksi emici yorgan ve vakum naylonu kesilmiş ve öncesinde provası yapılmıştır.

Daha sonra plakaların üretimi yapılacak olan masa temizlenerek kalıp ayırıcı sürülmüş ve plakaları üretmeye hazır hale getirilmiştir. Daha sonra hassas terazide tüm kumaşlar tartılarak reçine miktarı hesaplanmıştır ve reçine miktarına göre ağırlıkça %3 kadar toz ilave edilmiştir. Hesaplanan bu değer literatür araştırmaları sonucundaki en optimum değer olarak alınmıştır.

Karıştırıcıda homojen hale gelen toz ve epoksi karışımına sertleştirici eklenerek karışıma karıştırıcı kullanarak devam edilmiştir.

Ardından daha önce hazırlanan cam elyaflar toz karışımı epoksi reçine ile birleştirilerek 5 katlı hibrit yapılı plakalar hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler aşağıdaki gibidir:

- Katkısız (Sadece epoksi reçine ve cam fiber)
- Epoksi reçine+ Cam fiber+33 µ altı tane boyutunda kuvars
- Epoksi reçine+ Cam fiber+ 33-45 µ boyutunda kuvars

- Epoksi reçine+ Cam fiber+ 45-63 µ boyutunda kuvars
- Epoksi reçine+ Cam fiber+ 63-100 µ boyutunda kuvars
- Epoksi reçine+ Cam fiber+33 µ altında atık döküm kumu
- Epoksi reçine+ Cam fiber+33-45 µ boyutunda atık döküm kumu
- Epoksi reçine+ Cam fiber+45-63 µ boyutunda atık döküm kumu
- Epoksi reçine+ Cam fiber+63-100 µ boyutunda atık döküm kumu

Hazırlanan plakalar kürlenmek üzere vakuma alınarak 24 saat bekletilmiş daha sonra da 48 saat dışarıda kürlenmiş ve testleri yapmak için kesilerek hazır hale getirilmiştir.

4.2. X-ışını Floresans Spektrometresi (XRF) Kimyasal Analizi

XRF sistemleri, çeşitli formlardaki numunelerde bor ve uranyum gibi elementlerin analizini, numune matrisine bağlı olarak, ppt-% konsantrasyon aralığında gerçekleştirir. Gelen numune, tungsten halkalı bir öğütücü ile yaklaşık 63µm altına indirilecek şekilde öğütülür. Ardından numune, yaklaşık 105±5°C sıcaklıkta etüvde 4 saat boyunca kurutulur. Son olarak, ham numunelerin yaklaşık 1000°C'deki kızdırma kaybı ölçülür.

4.3. X-ışını Kırınımı Spektrometresi (XRD) Mineralojik Analizi

Hammaddelerin mineralojik yapıları, X-ışını difraktometresi (XRD Rigaku-MiniFlex 600) kullanılarak belirlenmiştir. Cu-Kα radyasyonu ile yapılan bu tarama, 2 derece/dakikalık bir hızla 5° ile 70° arasında gerçekleştirilmiştir.

4.4. Yoğunluk Ölçümü

Numunelerin yığmsal yoğunluğu, Archimed prensibine dayanarak Denklem (4.1) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yoğunluk, numunenin kütesinin yığmsal hacmine bölünmesiyle elde edilir.

$$Yoğunluk = \left(\frac{W_K}{W_D - W_A} \right) \times \rho_{su} \quad (4.1)$$

Burada;

W_K : Kuru numunenin havadaki ağırlığı (g)

W_A : Su emdirilmiş numunenin su içindeki asılı ağırlığı (g)

W_D : Su emdirilmiş (doymuş) numunenin havadaki ağırlığı (g)

ρ_{su} : Su yoğunluğu

4.5. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Young Modülü ve Hesaplama Yöntemi

Bu değer malzemenin bileşenlerinin elastik özelliklerine ve bu bileşenlerin birbirleriyle olan etkileşimlerine bağlı olarak belirlenir. Bu tür kompozitlerde, genellikle bir polimer matris içerisine yerleştirilen takviye malzemeleri bulunur. Kompozitin elastik özellikleri, hem matrisin hem de takviye malzemelerinin özelliklerinden etkilenir. Genellikle iki temel model ile hesaplanır: paralel (serbest) model ve dikey (serbest) model. Bu modeller, kompozitteki bileşenlerin yerleşim düzenine bağlı olarak seçilir.

Paralel Model: Takviye malzemesi ve matris, yük yönü paralel olacak şekilde yerleştirildiğinde, kompozit malzemenin Young Modülü şu şekilde hesaplanır:

$$E_c = V_f E_f + V_m E_m$$

Burada V_f ve V_m sırasıyla takviye ve matris malzemelerinin hacim oranlarını, E_f ve E_m ise bu malzemelerin Young Modüllerini ifade eder. Bu model, fiberlerin paralel yerleştirildiği durumlar için uygundur.

Dikey Model: Takviye ve matris malzemeleri, yük yönüne dik olacak şekilde düzenlendiğinde, Young Modülü şu formülle hesaplanır:

$$1/E_c = V_f 1/E_f + V_m 1/E_m$$

Bu model, fiberlerin yük yönüne dik yerleştirildiği ya da farklı yönlere yönlendirilmiş olduğu durumlarda kullanılır. Tez kapsamında Young modülü ölçümleri Eskişehir Teknik Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği laboratuvarında bulunan Instron markalı 5581 test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4.6. Üç Noktada Eğme Testi

Üç noktada eğilme testleri Eskişehir Teknik Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği laboratuvarında bulunan Instron markalı 5581 test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kompozit numunelerin boyutları kesici disk tarafından kesilerek ASTM D7264 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1’de gösterilen üç nokta eğilme testi uygulanan numuneler eni 25 mm, uzunluğu 150 mm olacak şekilde kesilerek hazırlanmıştır. Standarda göre üç nokta eğme düzeneğindeki spanlar arası mesafe (L) kompozit numunenin kalınlığına (d)’ye göre hesaplanmıştır. Destek mesafesinin (L)’nin kompozitin kalınlığına (d) oranı 32:1 olarak alınmıştır. Kompozitlerin

kalınlık değerleri 1.80 ± 0.05 mm olmaktadır. Bu sistem, eğme testi cihazı Instron 5581, malzemelerin eğme s¼reci ve verileri kaydedip kontrol eden yazılımı i¼eren bir masa¼st¼ bilgisayarlıdır. Deney ¼rnekleri, eğme testinde hazırlanan numunelerin iki ucunun test cihazındaki ¼enelerin ¼zerine bırakılması ile başlar. Malzeme, standartlara uygun olan ve belirli a¼ıklıęa sahip spanların ¼zerine u¼ları iki taraftan da eşit olacak şekilde yerleştirilir ve belirli bir hızla yukarıdan y¼k uygulayarak b¼kme işlemi başlatılır. Bu s¼re¼te, malzemenin eğilme miktarı artan kuvvet altında ¼l¼¼l¼r. Araştırmada, malzemelerin b¼k¼lmeye karşı dayanımı incelenmiştir. Bu testte her bir numune i¼in 3 ¼rnek hazırlanmış, değerler bu 3 ¼rneęin ortalaması olarak verilmiştir. Teste hazır numunelerin şematik g¼r¼nt¼leri şekil 4.1'de g¼sterilmektedir.

Eğilme dayanımı şu form¼lle bulunur:

$$\sigma_f = 3FL / 2bd^2$$

Burada:

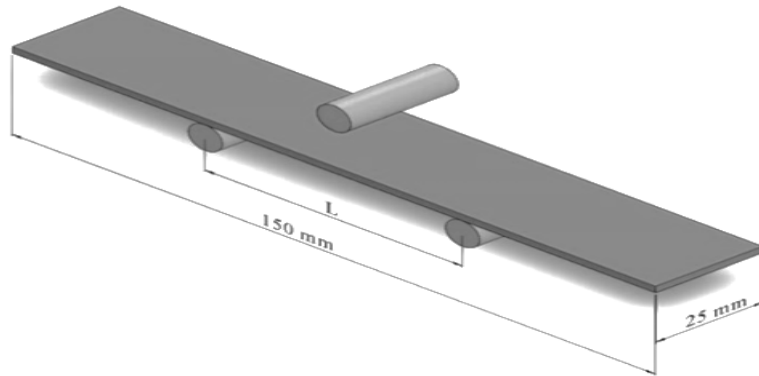
σ_f : Eğilme dayanımı (MPa),

F : Maksimum y¼k (N),

L : Destekler arasındaki mesafe (mm),

b : Numune genişliği (mm),

d : Numune kalınlığı (mm)



şekil 4.1. Eğme testi i¼in hazırlanan numunelerin şematik g¼r¼nt¼s¼.

4.7. Shore Sertlik ¼l¼¼m¼

Shore sertlik testleri i¼in farklı dalma u¼ları ve yay ¼zellikleri bulunmaktadır. Bunların hepsi farklı ama¼lar i¼in tasarlanmış olup en bilindikleri Shore A ve Shore D dir. Shore A yumuşak kau¼uk, elastomerler ve doğal kau¼uk i¼in kullanılırken Shore D Sert elastomerler, plastikler ve katı termoplastikler i¼in kullanılmaktadır.

Bu çalışmada hazırlanan numunelerin sertliği Shore D ile ölçülmüştür. Her bir numune için farklı noktalardan 20şer ölçüm alınmıştır. Ölçümler batma derinliği üzerinden hesaplanmıştır. Numuneye nüfuz eden yay yüklü sertleştirilmiş elik bir girinti ile ölçülür. Girinti derinliği, Shore (2,5 milimetre girinti derinliği) ile 100 Shore (0 milimetre girinti derinliği) arasında bir ölçekte ölçülür. Bu lm ASTM D2240 standardına göre yapılmıştır.

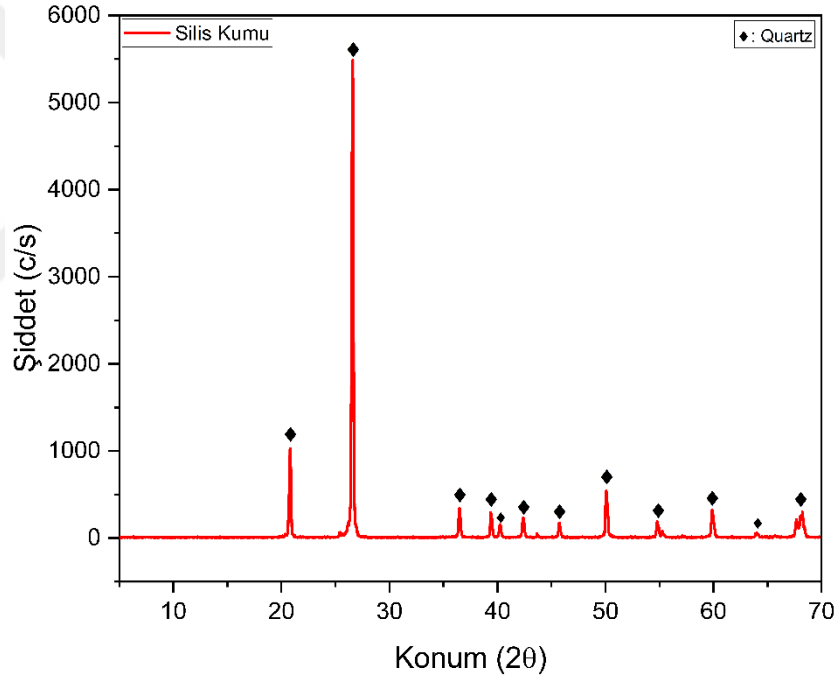
4.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

5. SONUÇLAR

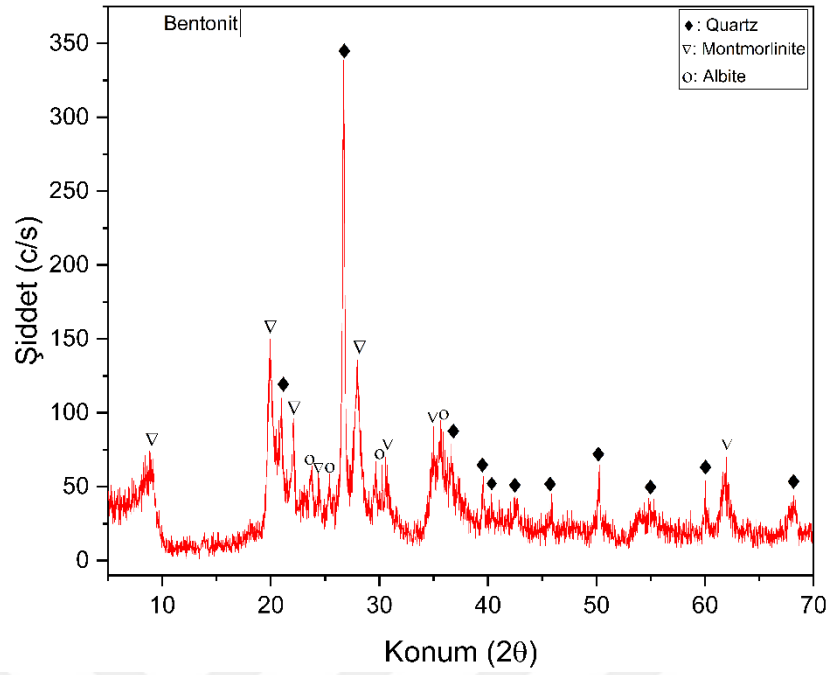
5.1. Kullanılan Takviye Hammaddeleri ve Hammadde Analizi

5.1.1. İşlem görmüş döküm kumu

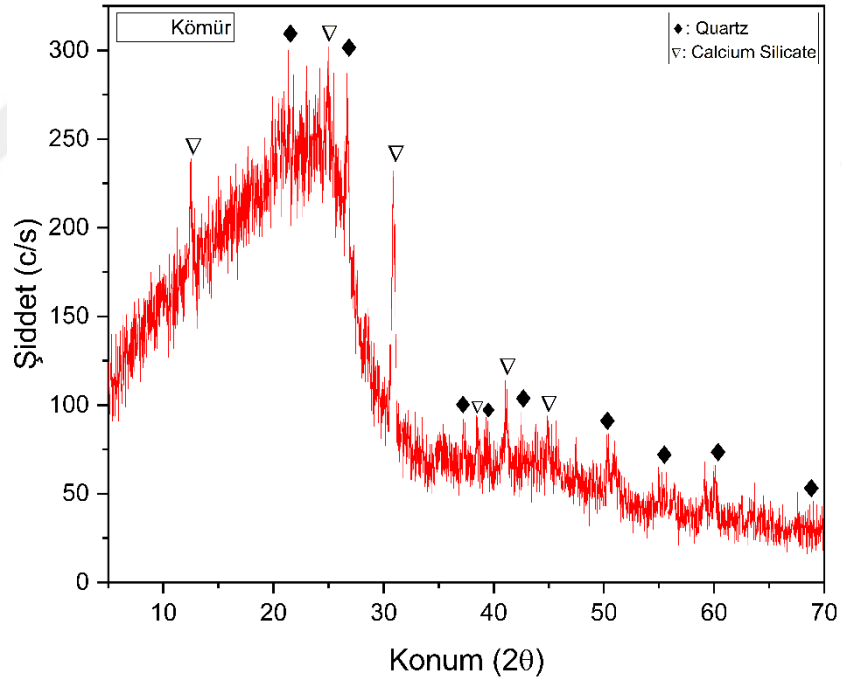
Metal ergitme ve döküm işlemlerinde kullanılan kalıp kumu, esas olarak silis kumundan oluşur. Bunun yanı sıra, yaklaşık %1 oranında bentonit ve %0,5 oranında kömür ilave edilir. Bentonit, kalıp kumuna mukavemet ve bağlayıcılık özellikleri kazandırarak, döküm esnasında kalıbın şeklini korumasını sağlar. Kömür ise, kalıp yüzeyinde gaz geçişini artırarak ve kalıbın termal dayanıklılığını iyileştirerek, döküm yüzey kalitesini artırır ve döküm kusurlarını azaltır. Bu bileşenlerin eklenmesi, döküm işleminin verimliliğini ve döküm parçalarının kalitesini yükseltir. Şekil 5.1-5.3'te döküm kumunun bileşenlerinin XRD paternleri verilmiştir.



Şekil 5.1. Döküm kumunda kullanılan silis kumunun XRD paterni.

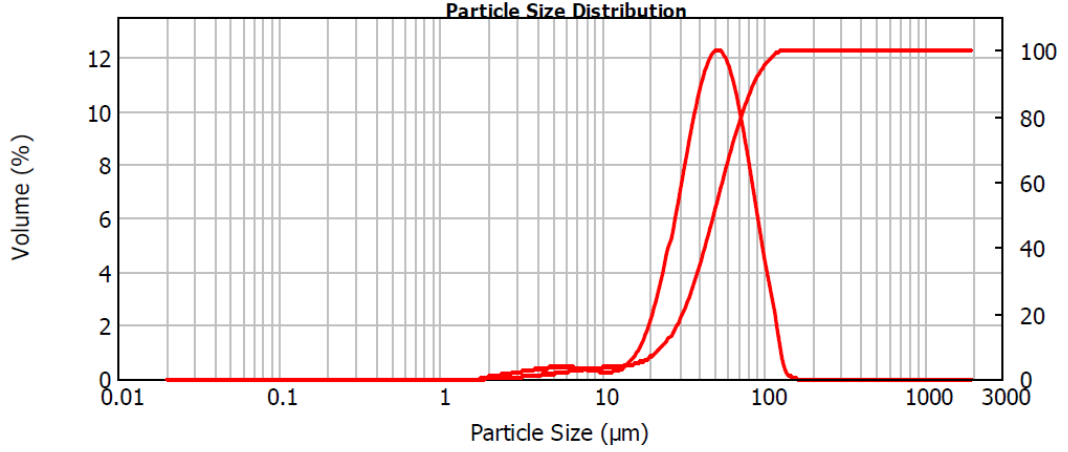


Şekil 5.2. Döküm kumunda kullanılan bentonit hammaddesinin XRD paterni.



Şekil 5.3. Döküm kumunda kullanılan kömürün XRD paterni.

Bu tezde, döküm işlemi sonrasında atık olarak elde edilen kalıp kumu incelenmiştir. İşlem görmüş döküm kumunun tane boyut analizi gerçekleştirilmiş sonuç Şekil 5.4 ve Tablo 5.1’de verilmiştir.

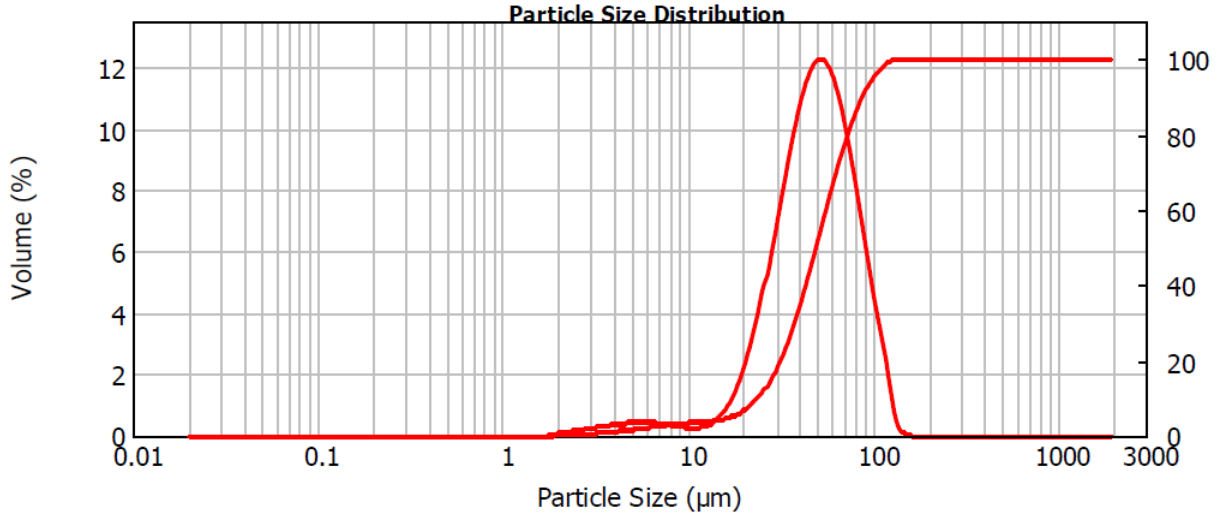


Şekil 5.4. işlem görmüş döküm kumunun tane boyut dağılımı.

Tablo 5.1. İşlem görmüş döküm kumunun lazer difraksiyon tekniği ile ölçülen tane boyut analiz sonucu (%hacimce)

Numune	d10	d50	d90	d97	d100
<i>işlem görmüş döküm kumu</i>	48,3	279,8	529,8	656,8	805,2

İşlem görmüş döküm kumunun tane boyutunun büyük olması ve yüksek demir içeriği nedeniyle, elde edilen atık manyetik ayırıcıdan geçirilerek öncelikle demirden arındırılmaya çalışılmıştır. Bu işlem, kum içindeki demir bileşenlerinin uzaklaştırılması ve daha saf bir kum elde edilmesi amacıyla yapılmıştır. Demirden arındırma işleminin ardından, kum 100 mesh boyutundaki bir elekten geçirilerek daha uygun tane boyutlarına getirilmiştir. Bu işlem, kumun daha homojen bir yapıya kavuşmasını ve daha iyi döküm özelliklerine sahip olmasını sağlamıştır. İşlem sonrası elde edilen tane boyut dağılımı, Şekil 5.5'te grafiksel olarak sunulmuştur.



Şekil 5.5. 100 mesh boyutundaki elekenmiş işlem görmüş döküm kumunun tane boyut dağılımı.

Tane boyutlarının detaylı dağılımı ise Tablo 5.2'de verilmiştir. Tablo 5.2, kumun farklı işlemlerden önce ve sonra tane boyutlarının nasıl değiştiğini görsel olarak ortaya koymaktadır.

Tablo 5.2. İşlem görmüş döküm kumunun elek öncesi ve sonrası lazer difraksiyon tekniği ile ölçülen tane boyut analiz sonucu (%hacimce)

Numune	d10	d50	d90	d97	d100
<i>işlem görmüş döküm kumu</i> (elek öncesi)	48,3	279,8	529,8	656,8	805,2
<i>işlem görmüş döküm kumu</i> (elek sonrası)	24,1	49,2	88,1	108,5	150,2

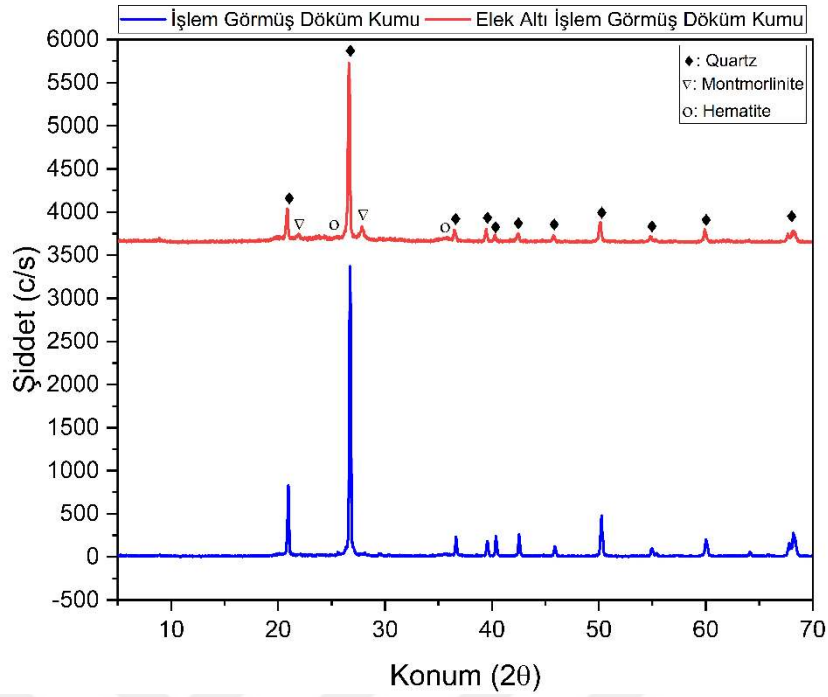
Kimyasal ve mineralojik karşılaştırmalı analizler, kumun işlem öncesi ve sonrası bileşimindeki değişiklikleri ortaya koymak amacıyla yapılmıştır. Kimyasal bileşim analizleri, Tablo 5.3'te sunulmuştur. Bu tabloda, silisyum dioksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3), demir oksit (Fe_2O_3), kalsiyum oksit (CaO), magnezyum oksit (MgO), potasyum oksit (K_2O) gibi ana bileşenlerin yanı sıra iz elementlerin de yüzdesel oranları verilmiştir.

Tablo 5.3. *elek öncesi ve sonrası işlem görmüş döküm kumunun % ağırlıkça kimyasal analizleri*

Numune	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Diğer	Toplam
<i>işlem görmüş döküm kumu (elek öncesi)</i>	82,1	2,7	0,2	12,2	0,8	0,5	0,3	1,0	0,2	100
<i>işlem görmüş döküm kumu (elek sonrası)</i>	80,4	7,1	0,6	4,2	2,3	1,9	0,9	2,5	0,1	100

Tablo 5.3'te, işlem görmüş döküm kumunun elek öncesi ve sonrası kimyasal analiz sonuçları karşılaştırıldığında, belirgin değişiklikler gözlemlenmektedir. Numunelerin kimyasal analizi, ateş zayıyatı dahil edilmeden sunulmuştur. Numunenin elek öncesi ve sonrası ateş zayıyatı sırasıyla %1,8 ve %3,4 olarak belirlenmiştir. Elek öncesi numunede SiO₂ oranı %82,1 iken, elek sonrası bu değer %80,4'e düşmüştür; bu azalma, elek işlemi sırasında kuvars tanelerinin genelde daha büyük tane boyutuna sahip olması ve kumun içeriğindeki silis oranının belirli bir miktarda kaybı (yani elek üstü kalması) ile ilişkili olabilir. Al₂O₃ oranı ise elek öncesinde %2,7 iken, elek sonrası %7,1'e yükselmiştir; bu artış, muhtemelen bentonitin kumun eleme işlemi sırasında daha fazla oranda kalmasıyla açıklanabilir. Demir Oksit (Fe₂O₃) oranı ise elek öncesinde %12,2 iken, elek sonrası %4,2'ye düşmüştür; bu önemli azalma, uygulanan manyetik ayırma işlemiyle demir bileşenlerinin büyük bir kısmının uzaklaştırıldığını göstermektedir. Genel olarak, elek işlemi sonrası kumun kimyasal bileşimi, silika içeriğinde bir miktar azalma, alüminyum oksit oranında belirgin bir artış ve demir oksit içeriğinde önemli bir azalma ile açıklanmaktadır.

Mineralojik analizler ise, Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Bu şekil, XRD analizleri sonucunda belirlenen mineral fazların görsel temsilini içermektedir. Mineralojik analizler, kumun kristal yapısındaki değişiklikleri ve içerdiği mineral fazların çeşitliliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 5.6. işlem görmüş döküm kumunun elek öncesi ve sonrası xrd paternleri.

XRD analizi sonucunda, elde edilen XRD paterni, her iki numune de ana faz olarak kuvarsın baskın olduğunu göstermektedir. Ancak, elek sonrası analizde hematit fazına ait piklerin şiddetinde belirgin bir azalma gözlemlenirken, bentonit fazına ait piklerin şiddetinde bir artış kaydedilmiştir. Bu durum, elek işlemi ve manyetik ayırma sürecinin, hematit bileşenlerinin kumdan uzaklaştırılması üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan, bentonitin piklerinde gözlemlenen artış, eleme işlemi sırasında bentonit gibi bağlayıcı özelliklere sahip bileşenlerin daha fazla oranda kumda kalmasıyla ilişkilidir.

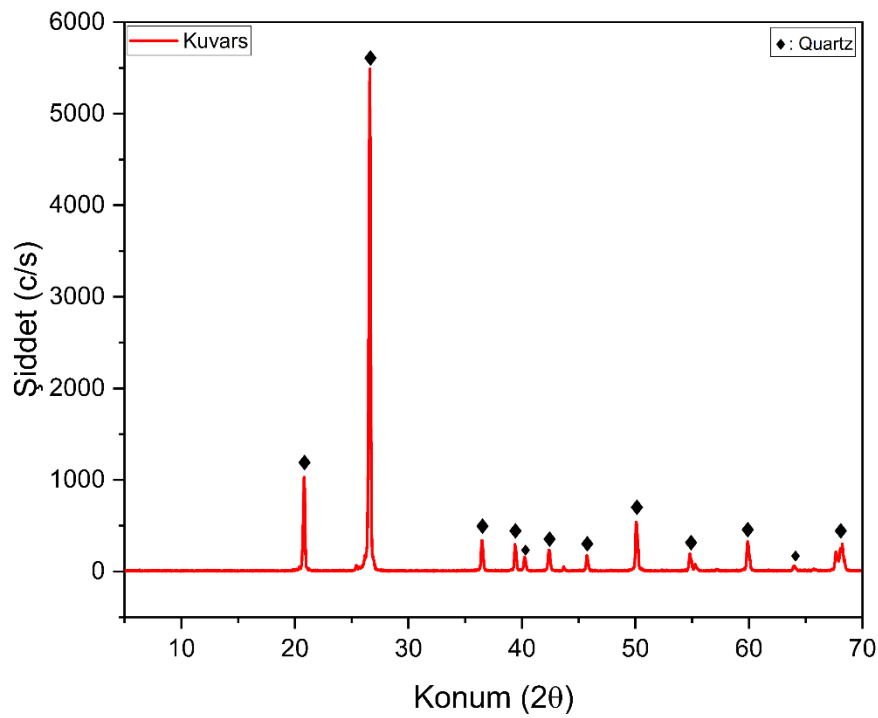
Daha sonra, işlem görmüş döküm kumu, 63, 45 ve 33 mikron boyutlarındaki eleklerden geçirilerek dört farklı tane boyutunda (63-100 mikron, 45-63 mikron, 33-45 mikron arası ve 33 mikron altı) elde edilmiştir. Bu işlem, kumun daha homojen ve ince partiküllere ayrılmasını sağlamıştır. Eleme işlemi tamamlandıktan sonra, bu farklı boyutlardaki döküm kumu, epoksi reçineye ilave edilmek üzere hazır hale getirilmiştir. Bu hazırlık aşaması, epoksi reçineye ilave edilecek kumun uygun tane boyutunda olmasını ve reçine içerisinde homojen bir dağılım göstermesini sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

5.1.2. Kuvars

Tezde kullanılan kuvars hammaddesi farklı boyutlarda kullanılmıştır. Kuvarsın XRF (X-ışını floresans) ve XRD (X-ışını difraksiyonu) analizleri, bu hammaddenin kimyasal ve mineralojik bileşimini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Tezde kullanılan farklı kuvarsın XRF analiz sonuçları Tablo 5.4'te, XRD analiz sonuçları ise Şekil 5.7'de sunulmuştur.

Tablo 5.4. Kullanılan kuvars hammaddesinin % ağırlıkça kimyasal analizleri

Numune	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Diğer	Toplam
<i>Kuvars</i>	99,0	0,6	0,0	0,15	0,0	0,0	0,05	0,0	0,1	100



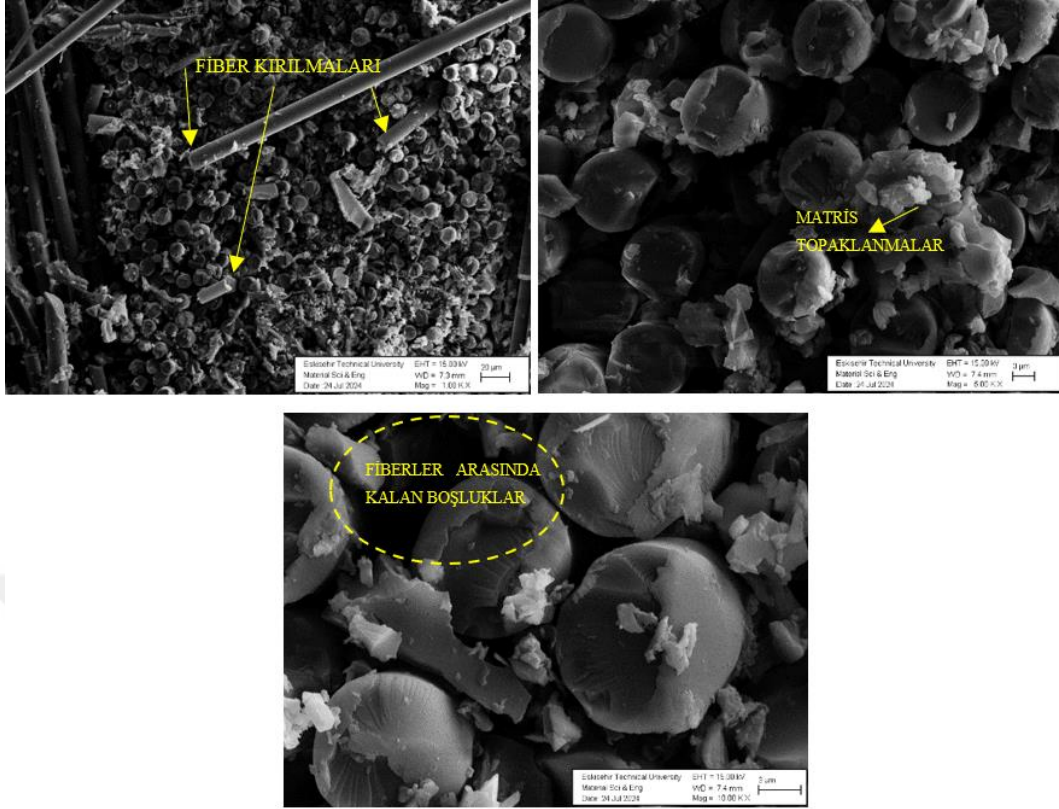
Şekil 5.7. Farklı tane boyutlarındaki kuvars hammaddelerinin xrd paternleri.

Elde edilen sonuçlar, kullanılan kuvarsın saflık derecesi ve mineralojik bileşimi açısından değerlendirilerek, kompozit malzemelerin üretiminde optimal hammadde seçimi için temel teşkil etmiştir.

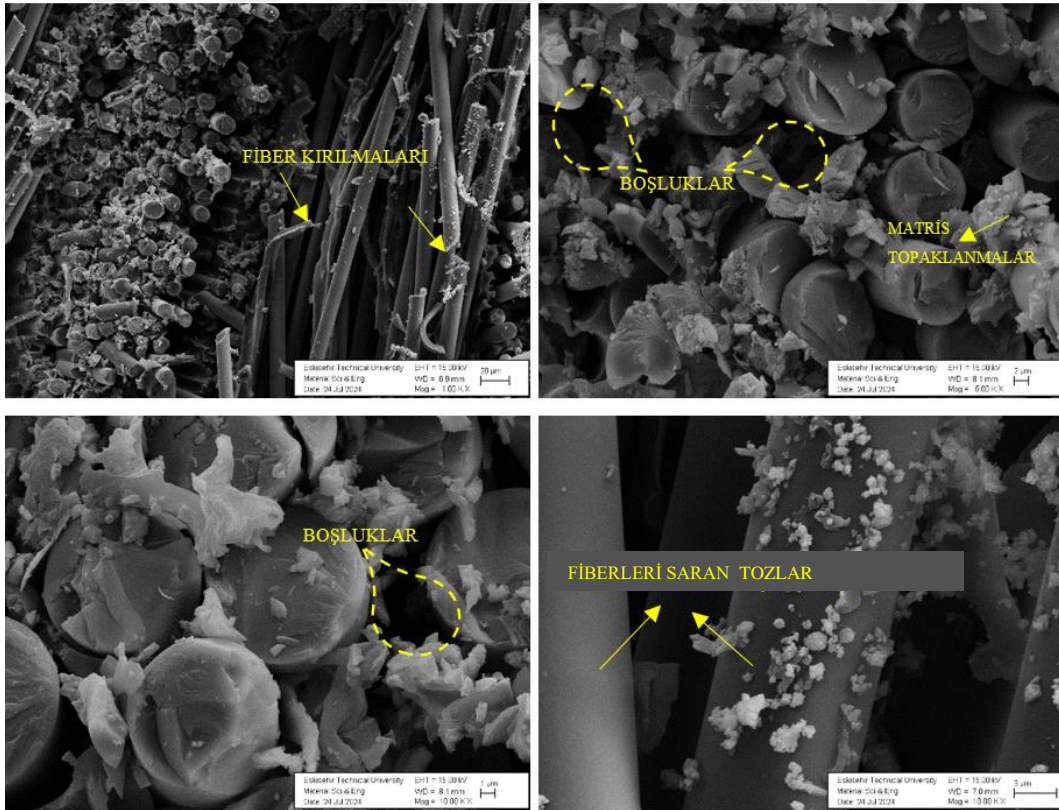
Daha sonra, 63 mikron boyutundaki kuvars, 63, 45 ve 33 mikron boyutlarındaki eleklerden geçirilerek üç farklı numune elde edilmiştir. Bu işlem sonucunda, toplamda dört farklı boyutta kuvars numunesi (63-100 mikron, 45-63 mikron, 33-45 mikron arası ve 33 mikron altı) epoksi reçineye ilave edilmek üzere hazır hale getirilmiştir. Bu hazırlık aşaması, farklı tane boyutlarındaki kuvarsın epoksi reçineye etkilerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

5.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile Mikroyapı Analizi

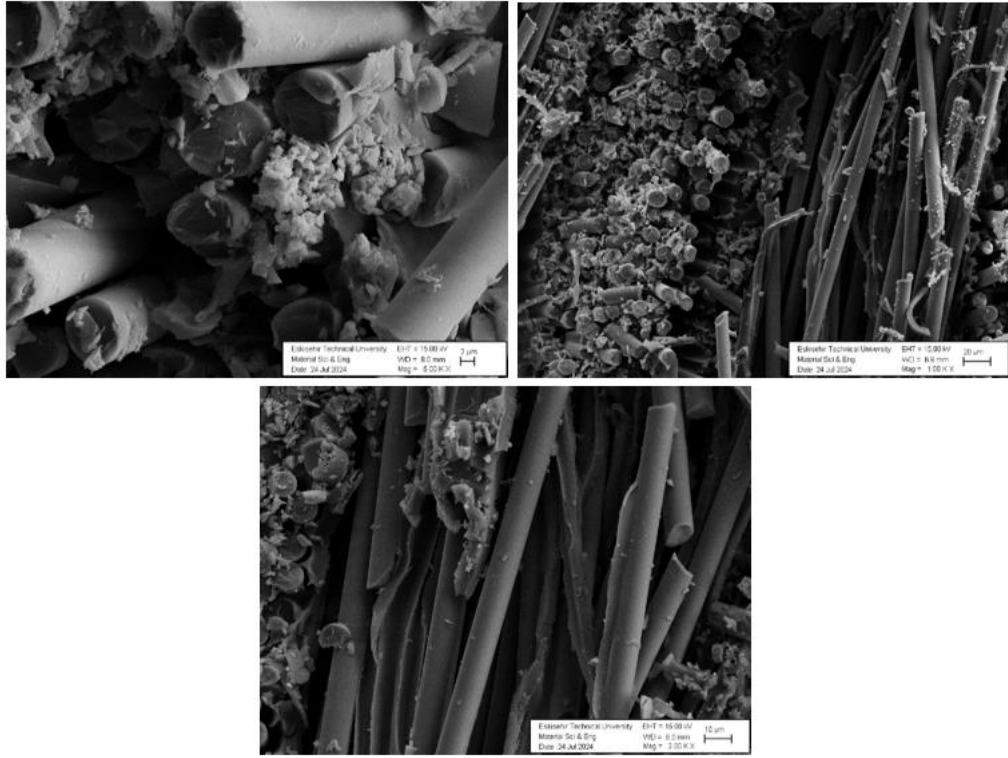
Öncesinde altın tozu ile yüzeyleri kaplanan numunelerin yüzeyleri elektron ışınları ile taranarak SEM ile incelenmiştir. Epoksi matris içine cam fiberlerin, farklı boyutlardaki kuvars tozlarının ve döküm tozlarının katkılanması ile elde edilen hibrit kompozitler kırılarak numune tutuculara yerleştirilmiştir. Kırılan yüzeylerde fiberlerin durumu, matris yapısı ve epoksi matris içerisine katkılanan kuvars ve döküm tozlarının dağılımları hakkında bilgi edinmek amaçlanmıştır. Ayrıca çekme, shore sertlik testi, elastisite modülü gibi mekanik testlerde çıkan sonuçlarla mikroyapıları birleştirerek yorumlayabilmek amaçlanmıştır. Aşağıda tüm numunelere ait farklı büyütme ölçeklerinde fotoğraflar elde edilmiştir.



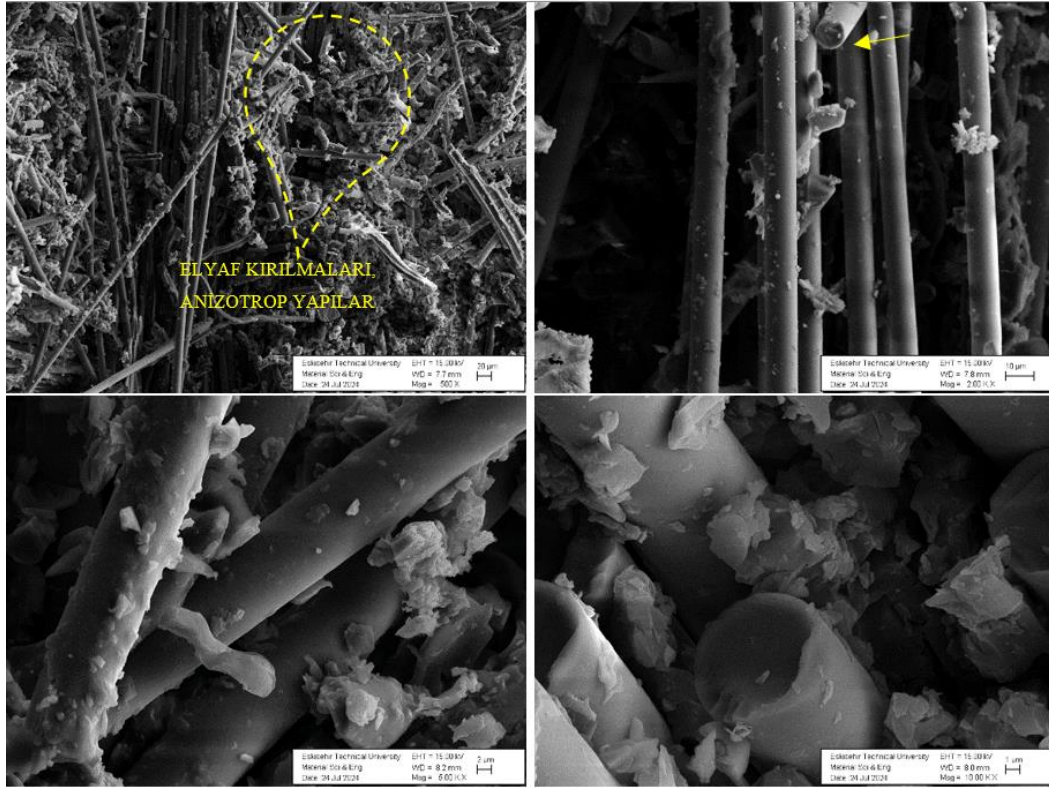
Şekil 5.8. Cam Fiber Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin SEM Görüntüleri



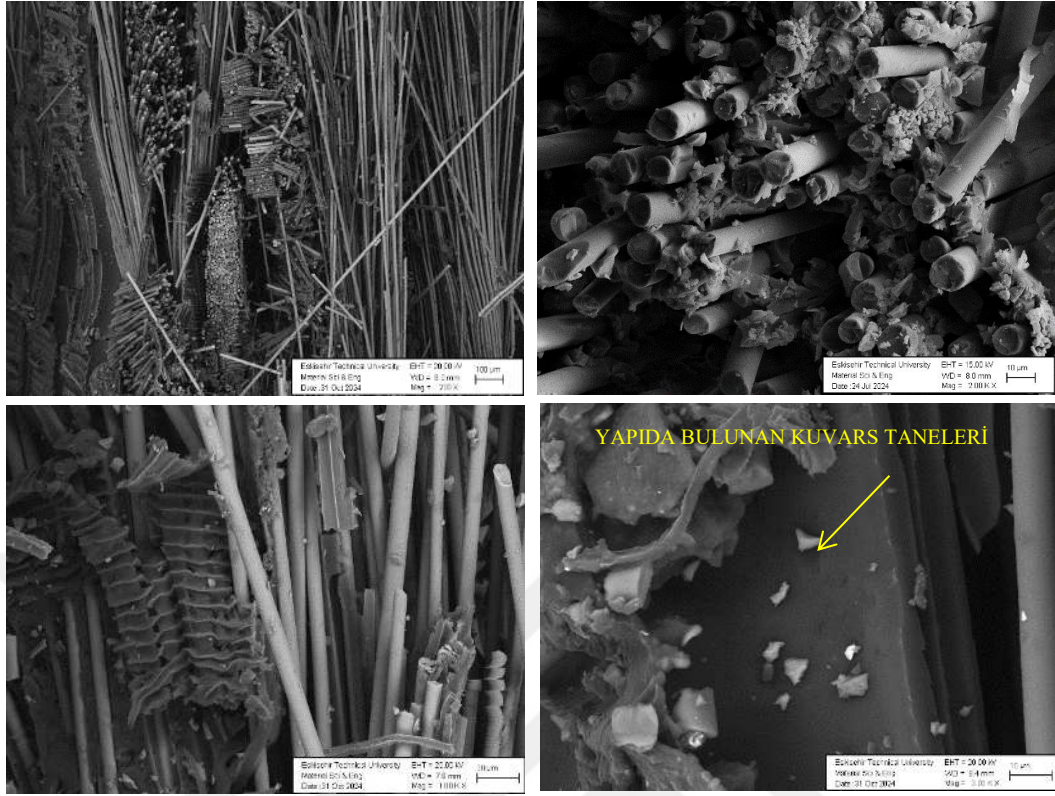
Şekil 5.9. Cam Fiber + 33µm 3D Boyutlu Kuvars Takviyeli Polimer Kompozitlerin SEM Görüntüleri



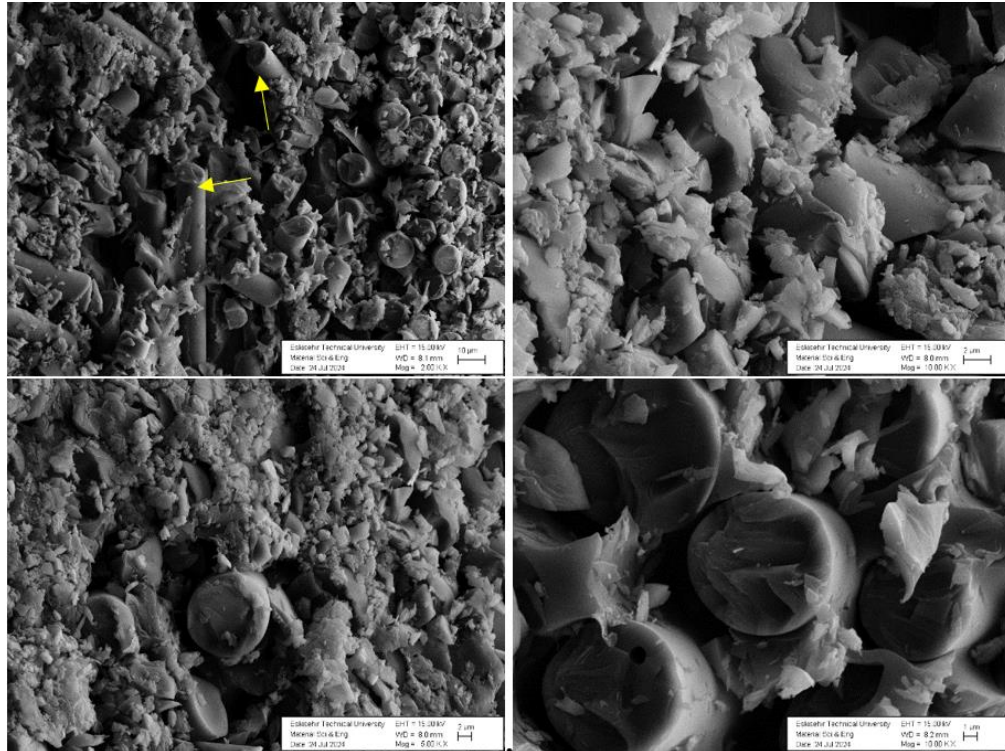
Şekil 5.10. Cam Fiber + 33-45 μ Boyutlu Kuvars Takviyeli Polimer Kompozitlerin SEM Görüntüleri



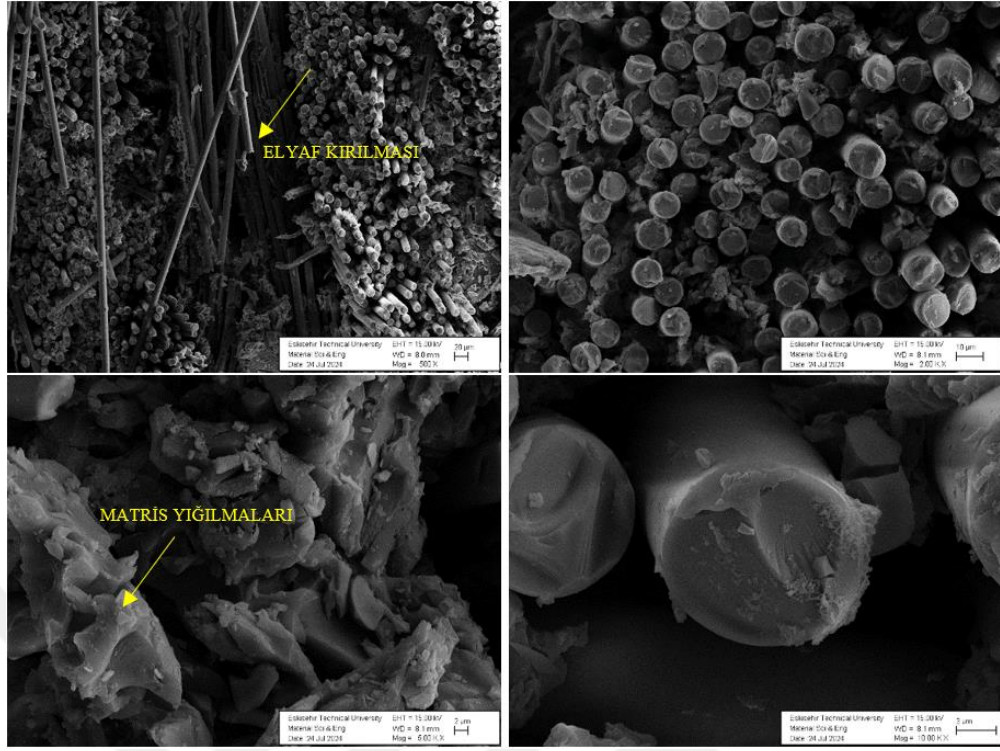
Şekil 5.11. Cam Fiber + 45-63 μ Kuvars Tozu Takviyeli Polimer Kompozitlerin SEM Görüntüleri



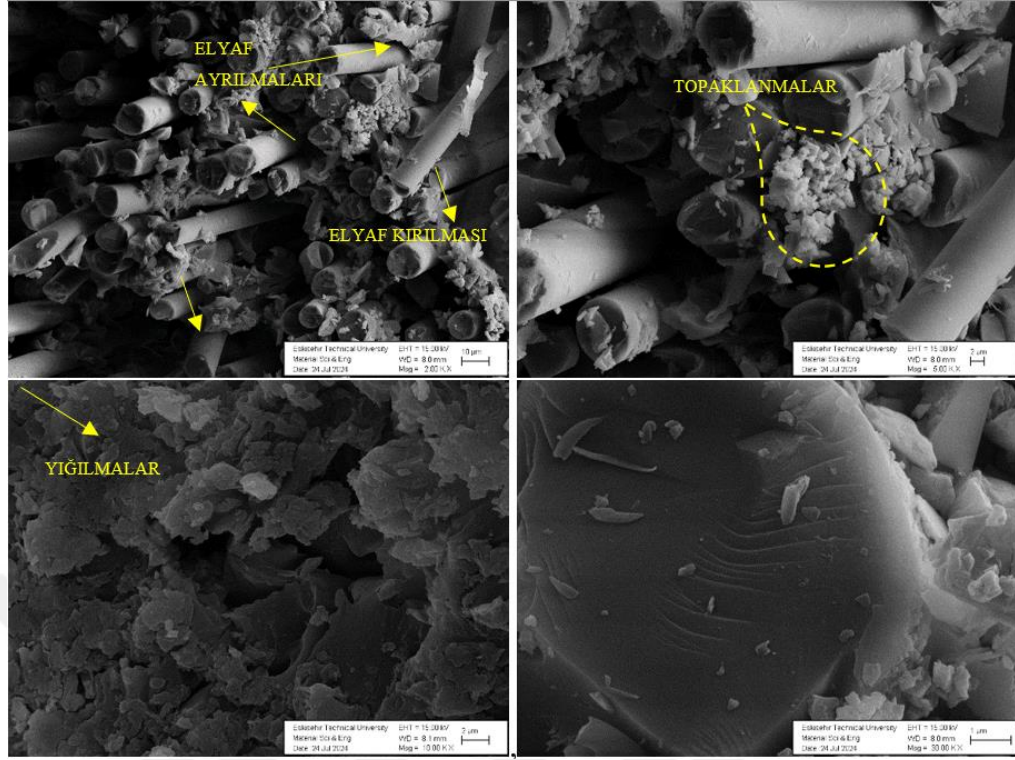
Şekil 5.10. Cam Fiber + 63-100μ Kuvars Tozu Takviyeli Polimer Kompozitlerin SEM Görüntüleri



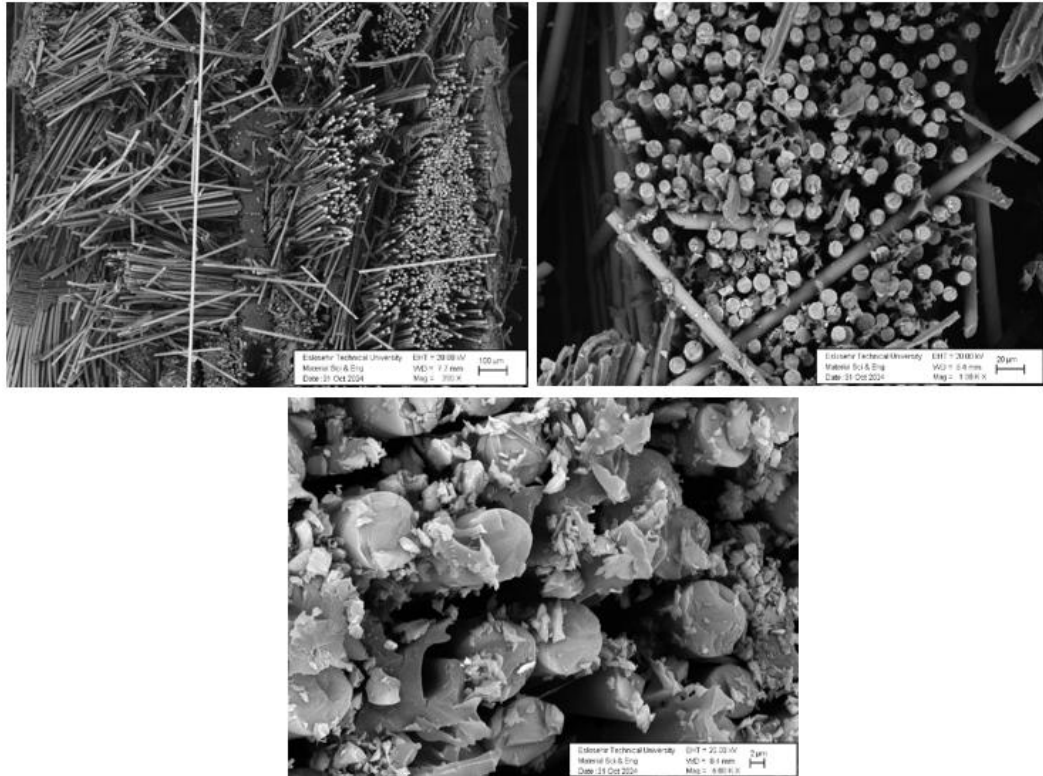
Şekil 5.13. Cam Fiber + 33 μ altında Atık Döküm Kumu Takviyeli Kompozitlerin SEM Görüntüleri



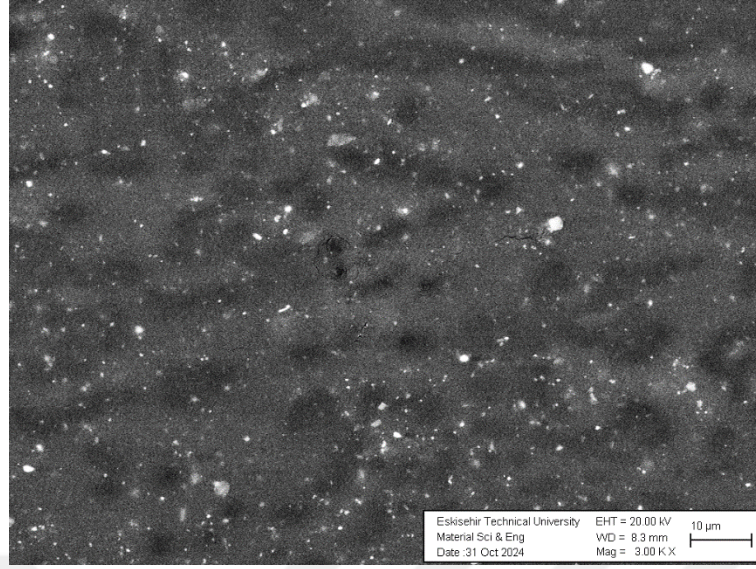
Ŗekil 5.14. Cam Fiber + 33-45 μ Atık Döküm Kumu Takviyeli Polimer Kompozitlerin SEM Götüntüleri



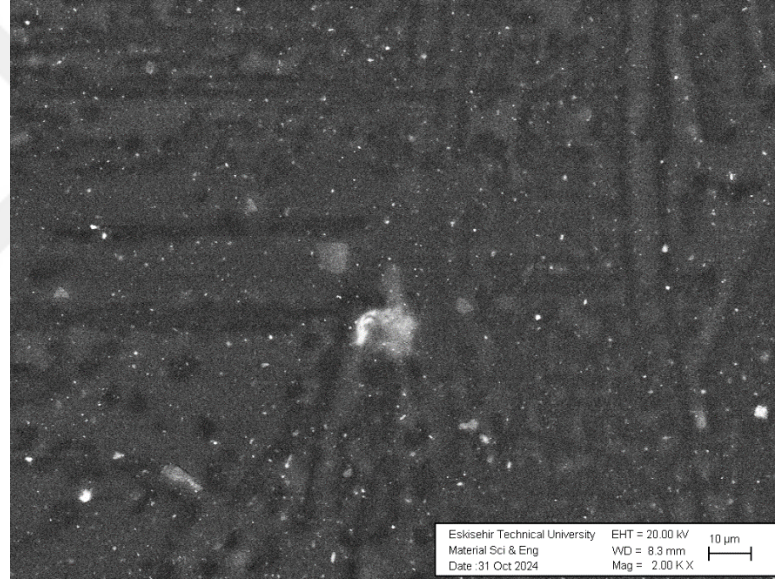
Şekil 5.15. Cam Fiber + 45-63 μ Atık Döküm Kumu Takviyeli Polimer Kompozitlerin SEM Görüntüleri



Şekil 5.16. Cam Fiber + 63-100 μ Atık Döküm Kumu Takviyeli Kompozitlerin SEM Görüntüleri



Şekil 5.17. Atık döküm kumnun epoksi matris içerisindeki dağılımı SEM Görüntüleri



Şekil 5.18. Kuvarsın epoksi matris içerisindeki dağılımı SEM Görüntüleri

Taramalı elektron mikroskobunda alınan görüntülere bakıldığında epoksi matris kalıntısının/artığının cam elyaf yüzeylerine tutunduğu açıkça görülmektedir. Daha homojen bir şekilde dağılırsa, matris kalıntılarının cam elyaf yüzeylerine ve kuvars tozlarına daha iyi yapışma sağlaması, bunun da güçlü elyaf/toz/matris bağlanmasına ve dayanımda artışa neden olması beklenir. Yani; Matris/toz/fiber bağlanması güçlü olduğunda ve matris fazı dış kaynaklardan gelen gerilimleri takviye elemanlarına aktarabildiğinde, daha iyi mekanik özellikler elde edilir.

SEM analiz görüntülerine göre, vakum torbalama tekniği ile üretilen hibrit kompozit malzemelerin yüzeyleri epoksi-cam fiber ve epoksi-toz etkileşimleri gözlemlenmiştir. Yapıda kütleme aşamalarında oluşan boşluklar gözlemlenmektedir. Cam elyafları ve epoksi matris arasındaki arayüzün her yerde güçlü olmadığı, bazı bölgelerde elyafların epoksiden ayrı olduğu iyi bağlanmadığı gözlemlenmektedir. İncelenen numunelerin heterojen ve anizotrop bir yapıda olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada kullanılan vakum torbalama tekniği elle yatırma işleminin devamıdır. Ve elle yatırma işlemi, malzemede elyafların düzenli bir şekilde yayılmasında zorluklar çıkartmaktadır. Ancak Şekil 5.17 ve 5.18’de tozların reçinede dağılımını gösteren görüntüler yer almaktadır. Çalışma esnasında tozların reçineyle birleştirilmesi ve sertleştiricinin de bu toz ve reçine karışımına eklenip karıştırılması esnasında karıştırıcı kullanılmıştır. Bu sebeple tozların epoksi içerisinde homojen yayıldığı anlaşılmaktadır.

5.3. Numunelerin Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Numunelerin yoğunluk ölçümleri, Denklem 4.1’e uygun olarak Archimedes yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.5’te sunulmuştur. Bu tablo, farklı boyutlardaki kuvars numunelerinin yoğunluk değerlerini kantitatif olarak göstermektedir. Her bir numunenin yığinsal yoğunluğu belirlenmiş ve bu değerler, kompozit malzemelerin performans özelliklerini değerlendirmek amacıyla analiz edilmiştir.

Tablo 5.5. Numunelerin yoğunluk değerleri.

Numune Kodu	Kuru Ağırlık(g)	Yaş Ağırlık(g)	Askıdaki Ağırlık(g)	Su Emme %	Yoğunluk (gr/cm ³)
Toz Katkısız	1.000	1.000	0,2600	0,00	1,35
33 µm altı Kuvars	1,1285	1,1285	0,3268	0,00	1,41
33-45 µm Kuvars	1,1575	1,1575	0,3212	0,00	1,38
45-63 µm Kuvars	1,1471	1,1471	0,3200	0,00	1,39
63-100 µm Kuvars	1,3060	1,3060	0,3701	0,00	1,40
33 µm altı A. Döküm Kumu	1,1274	1,1274	0,3250	0,00	1,41
33-45 µm A. Döküm Kumu	1,0573	1,0573	0,3460	0,00	1,49
45-63 µm A. Döküm Kumu	1,1435	1,1435	0,3160	0,00	1,38
63-100 µm A. Döküm Kumu	1,1270	1,1270	0,3640	0,00	1,48

Tablo 5.5'teki veriler, numunelerin farklı tane boyutlarına sahip olmasının yoğunluk üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır. Kuvars ve atık döküm kumu numunelerinin yoğunluk değerleri karşılaştırıldığında, atık döküm kumu içerikli numunelerin genel olarak daha yüksek yoğunluk değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin, 33-45 μm atık döküm kumu katkılı numunenin yoğunluk değeri 1,49 g/cm³ iken 63-100 μm atık döküm kumu katkılı numune 1,48 g/cm³ yoğunluk değerine sahiptir. Buna karşılık, 33 μm altında kuvars katkılı numune 1,41 g/cm³ ve, 33-45 μm kuvars katkılı numuneler 1,38 g/cm³ yoğunluk değerlerine sahiptir. Bu veriler, işlem görmüş döküm kumunun yoğunluğunun, kuvarsın yoğunluğundan daha yüksek olduğunu ve bu durumun beklenen bir sonuç olduğunu göstermektedir.

Daha küçük tane boyutlu toz katkılı numunelerin yoğunluğunun daha düşük olduğu görülmektedir. Bu daha düşük yoğunluk değerleri, daha küçük tane boyutlarının daha fazla aglomerasyon oluşturma eğiliminde olabileceğini ve yapıda boşlukların kalmasına neden olabileceğini düşündürmektedir. Aglomerasyon, partiküllerin birbirine yapışarak daha büyük yapılar oluşturmaları ve bu yapılar arasında boşluklar kalması anlamına gelir. Bu boşluklar, malzemenin genel yoğunluğunu azaltır. E. Ateş ve Kadir Aztekin'in yapmış olduğu çalışmada polyester reçineye farklı hacimlerde kuvars parçacıkları ve cam elyaf katkısı ile çapı 50 mm ve yüksekliği 100 mm olan silindirik polimer kompozitler üzerinde deney yapmışlar ve polimer reçine içerisindeki kırpıntı şeklindeki elyaf hacmi %55 iken yoğunluk 1.142 g/cm³ olmuştur. Elyaf hacmi arttıkça yoğunlukta azalma gözlemlenirken basma mukavemetinde artış gözlemlenmiştir. Çünkü elyaf hacmi arttıkça matris ile birleşen elyaflar daha da güçlendirmiş malzemeyi. %5 kuvars hacim miktarında ise yoğunluğu 1,259 g/cm³ bulmuşlardır ve kuvars miktarı arttıkça yoğunluk artmış ve basma dayanımları düşmüştür. Burada basma dayanımındaki düşüşün sebebi artan kuvars tanelerini sarmayan matris yapı olduğu gözlemlenmiştir. Burada basma dayanımını iyileştirmek için çalışan E. Ateş ve arkadaşı takviye elemanlarını yüksek kullanmıştır. Ancak kullanılan bu takviye malzeme hacimlerinden özellikle kuvarsın fazla olması sertliğin artmasına bağlı olarak çekme ve eğme mukavemetlerini düşürebilir. Bu bilgiler ışığında kendi tez çalışmamızda yoğunluğun düşük olması önemli olduğu için daha az miktarda kuvars ve daha fazla miktarda elyaf kullanılmıştır [45].

5.4. Numunelerin Shore Sertlik Deney Sonuçları

Shore sertlik deneyi, malzemelerin sertliğini belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu test, bir malzemenin yüzeyine belirli bir kuvvetle uygulanan bir indenterin (girici) ne kadar derine nüfuz ettiğini ölçer. Shore sertliği, elastomerler ve yumuşak plastikler gibi malzemelerin sertliğini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılır. Numunelere gerçekleşen shore sertlik test sonuçları Tablo 5.6’da verilmiştir.

Tablo 5.6. Shore Sertlik Deneyi Sonuçları (μm)

Deney	Katkısız	KUVARS (μm)				ATIK (μm)			
		33 altı	33-45	45-63	63-100	33 altı	33-45	45-63	63-100
1	70	57	70	69	78	60	65	70	75
2	65	60	60	70	72	70	60	70	76
3	63	60	75	72	70	60	66	65	70
4	72	78	67	60	82	75	62	65	78
5	55	70	66	70	80	65	70	75	75
6	70	70	60	70	68	70	65	80	76
7	65	65	80	65	75	72	66	75	70
8	66	60	65	65	66	70	65	75	70
9	60	65	70	65	60	64	60	65	65
10	65	68	58	60	65	60	64	83	80
11	50	78	65	70	63	66	75	60	70
12	63	70	63	60	66	65	63	75	65
13	60	72	65	67	60	65	60	82	62
14	65	55	75	66	60	60	70	70	70
15	70	60	65	70	70	67	78	75	80
16	63	69	70	65	78	65	72	70	70
17	65	65	73	66	72	70	70	72	80
18	72	80	70	65	63	72	65	75	66
19	60	70	65	65	70	67	70	65	80
20	65	53	73	70	75	70	74	70	75
Ortalama	64,2	66,25	67,75	66,5	69,65	66,65	67	71,85	72,65
Std. Sapma	5,49	7,66	5,66	3,63	6,83	4,46	5,18	6,06	5,62

Yukarıdaki sonuçlar incelendiğinde, kuvars ve atık döküm kumunun Shore sertlik değerlerine etkisi belirgin bir şekilde görülmektedir. Ortalama sertlik değerleri açısından, toz katkısız numunelerin (64,2) tüm diğer numunelere kıyasla daha düşük shore sertlik değerine sahip olduğu görülmektedir.

Değerler birbirine yakın olmakla birlikte 45 mikronun üzerinde atık döküm kumu ilave edilen numuneler diğer numunelere göre daha yüksek bir sertlik değerine sahiptir. 45-63 μ atık döküm kumu ilaveli (71,85) ve 63-100 μ atık döküm kumu ilaveli (72,65) ilave edilen numuneler en yüksek ortalama değerlere sahipken kuvars katkılı numunelerde 63-100 μ kuvars katkılı numune (69,65) en yüksek ortalama sertlik değerine ulaşmıştır. Bu, atık döküm kumu ve kuvars ilavesinin genel olarak sertliği artırdığını göstermektedir.

Bu bulgular, kuvars ve atık döküm kumu ilavesinin malzeme sertliğini artırdığı, ancak partikül boyutunun bu artış üzerinde bir etkisi olduğunu göstermektedir. Özellikle, daha büyük partikül boyutları (45 μ ve üzerinde) ile elde edilen numunelerde daha yüksek sertlik değerleri gözlemlenmiştir. Küçük partiküllerin daha düşük sertlikte olması bu partiküllerin aglomerasyon eğilimi göstermesi ile yapı içinde boşluklar oluşturması ile açıklanabilir.

5.5. Numunelerin Young Modülü ve Üç Noktada Eğme Testi Sonuçları

Malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen deneylerde, genellikle malzemenin üç ana doğrultusu dikkate alınır: X, Y ve Z yönleri. X yönü, malzemenin uzunlamasına (boyuna) yönelimini ifade eder ve çekme testlerinde genellikle bu yönde numune uzanır. Y yönü, malzemenin genişlemesine veya daralmasına izin veren enine yönelimini ifade eder ve çoğu çekme testi numunesi, Y yönü boyunca daralmaya maruz kalır. Z yönü ise, malzemenin kalınlık yönünü ifade eder ve bu yönde numunenin genişlemesi veya sıkışması gözlemlenir. Bu doğrultular, malzemenin davranışını ve özelliklerini kapsamlı bir şekilde analiz etmek için önemlidir. Bu çalışmada, malzemeler partikül ilavesi yapıldığı için Z doğrultularındaki Young modülü değerleri ve eğilme test sonuçları birlikte Tablo 5.7'de sunulmuştur.

Tablo 5.7. Numunelerin Z doğrultularında ölçülen Eğilme Dayanımları ve Young Modülleri

Numune	Maksimum Eğilme Yüğü (kN)	Maksimum Eğilme Yüğündeki Eğilme Gerilimi (MPa)	Young Modülü (GPa)
Toz Katkısız-1	0,007	20,204	4,64
Toz Katkısız-2	0,009	25,500	4,91
Toz Katkısız-3	0,007	20,057	3,94
Ortalama	0,008	21,9	4,49
33 µm altı Kuvars-1	0,019	57,055	9,66
33 µm altı Kuvars-2	0,019	57,227	10,15
33 µm altı Kuvars-3	0,018	51,847	8,51
Ortalama	0,0186	55,4	9,44
33-45 µm Kuvars-1	0,016	47,044	9,49
33-45 µm Kuvars-2	0,016	51,934	8,75
33-45 µm Kuvars-3	0,013	42,423	8,39
Ortalama	0,015	47,13	8,87
45-63 µm Kuvars-1	0,014	41,195	7,01
45-63 µm Kuvars-2	0,015	45,208	7,75
45-63 µm Kuvars-3	0,013	40,006	7,88
Ortalama	0,014	42,14	7,55
63-100 µm Kuvars-1	0,025	71,797	12,68
63-100 µm Kuvars-2	0,023	68,292	11,62
63-100 µm Kuvars-3	0,029	83,765	13,02
Ortalama	0,026	74,6	12,44
33 µm altı A. Döküm Kumu-1	0,025	72,556	11,08
33 µm altı A. Döküm Kumu-2	0,023	68,526	10,88
33 µm altı A. Döküm Kumu-3	0,022	63,665	11,43
Ortalama	0,023	68,25	11,13
33-45 µm A. Döküm Kumu-1	0,030	88,753	12,52
33-45 µm A. Döküm Kumu-2	0,029	85,310	12,59
33-45 µm A. Döküm Kumu-3	0,030	86,575	13,54
Ortalama	0,029	86,88	12,9
45-63 µm A. Döküm Kumu-1	0,034	100,324	13,74
45-63 µm A. Döküm Kumu-2	0,039	113,343	14,10
45-63 µm A. Döküm Kumu-3	0,033	96,161	13,27
Ortalama	0,035	103,28	13,7
63-100 µm A. Döküm Kumu-1	0,024	64,792	11,40
63-100 µm A. Döküm Kumu-2	0,018	56,295	11,62
63-100 µm A. Döküm Kumu-3	0,022	64,304	11,41
Ortalama	0,021	61,8	11,48

Tablo 5.8. *Testlerin Ortalama Standart Sapma Değerleri*

Numune	Maksimum Eğilme yükü (kN)	Maksimum Eğilme Yükündeki Eğilme Gerilimi (MPa)	Young Modülü (GPa)
Standart Sapma	0,01	23,89	2,86
Değişim Katsayısı	39,54	38,30	27,94
Ortalama	0,029	86,266	13,08

Tablodaki veriler incelendiğinde, Katkısız numunenin Young modülü ortalama 4,94 GPa iken, 45-63 μm atık döküm kumu içeren kompozitin Young modülü 13,7 GPa olarak ölçülmüştür ve bu elde edilen en yüksek değerdir. Bu, atık döküm kumu katkısının malzemenin esnekliğini azaltıp rijitliğini artırdığını göstermektedir. Kuvars katkılı numunelerde ise 63-100 μm kuvars içeren numunenin Young modülü 12,44 GPa olup, bu numune de benzer şekilde yüksek rijitlik ve dayanım sergilemektedir. Bu değerler, hem kuvars hem de atık döküm kumu katkılı numunelerin katkısız numunelere kıyasla daha rijit bir yapıya ulaştığını göstermektedir. Ancak atık döküm kumu içeren numunelerin Young modülü değerleri, rijitlik açısından kuvars içeren numunelerden biraz daha yüksek olduğunu göstermektedir. Yani atık döküm kumu katkılı numunelerin daha rijit olduğunu ortaya koymaktadır.

Üç Noktada Eğme Testi, malzemelerin mekanik davranışlarını incelemek için yaygın olarak kullanılan bir deneysel yöntemdir. Bu test ile tez çalışmasında kompozit malzemelerin eğilme dayanımı, elastik özellikleri ve kırılma davranışları değerlendirilmiştir.

Üç noktada eğme mukavemeti açısından bakıldığında, katkısız numunenin eğme mukavemeti 21,9 MPa iken, 33 μ altında boyuta sahip toz katkılı numune 55,4 MPa, 33-45 μ boyutunda toz katkılı numune 47,15 MPa, 45-63 μ kuvars içeren numunelerde 42,14 MPa ve 63-100 μ boyutunda kuvars içeren numune ise 74,6 MPa olarak ölçülmüştür. Kuvars tane boyutunun artışı, eğme mukavemetini olumlu yönde etkilemiş ve malzeme eğme kuvvetlerine karşı daha dayanıklı hale gelmiştir. Atık döküm kumu katkılı numunelere üç noktada eğme mukavemeti açısından bakıldığında, katkısız numunenin eğme mukavemeti 21,9 MPa iken, 33 μ altında boyuta sahip atık döküm kumu katkılı numune 68,25 MPa, 33-45 μ boyutunda toz katkılı numune 86,88 MPa, 45-63 μ atık döküm kumu içeren numunelerde 103,28 MPa ve 63-100 μ boyutunda kuvars içeren

numune ise 61,8 MPa olarak ölçülmüştür. Bu artış, atık döküm kumu taneciklerinin malzemenin iç yapısına katkıda bulunarak, malzemenin mekanik dayanımını artırdığını ve bu sayede eğme mukavemetini önemli oranda yükselttiğini göstermektedir. Farklı boyutlara sahip atık döküm kumu katkılı numunelerde kuvars ilavesi ile tüm numunelerde sağlanan dayanım artışından daha fazla artış sağlanmıştır. Ancak en iyi dayanımlar 45-63 μ boyuta sahip atık döküm kumu katkılı numunelerde gözlenmiştir.

Przemysław Paczkowski ve arkadaşları [46], farklı kuvars tozu miktarları (%5, 10, 20 ve 40 ağırlık oranında) ve doymamış polyester reçineden oluşan 4 mm kalınlığında hibrit kompozitler elde etmişler. Malzemeye katılan kuvars tozunun tane boyutunu lazer parçacık boyut analizör cihazını 0,2 ila 200 μ m arasında çalıştırarak küçültmüşler. Daha sonra bu kompoziti; yapıları ve termal, mekanik ve morfolojik özellikleri açısından incelemişler. Ve bunun sonucunda sertlik ve eğilme modülünün kuvars eklenmesiyle arttığını gözlemlemişler. Kuvarsın az miktarda eklenmesi polyester kompozitlerin mekanik özelliklerinde iyileşmeye yol açarken, yüksek dolgu içeriğiyle, aglomerasyonundan ve parçacıkların stres yoğunlaştırıcı rolünden kaynaklanan bozulma meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Sertlik değerleri saf polyester için 72,1 Shore D iken, maksimum dolgu miktarına sahip hibrit kompozit için 75,3 Shore D arasında değişmiştir. Kuvars dolgusunun sertliği polyester matrisin sertliğinden daha büyük olduğundan, kuvars-reçine kompozitleri saf polyesterden daha sert olduğu tespit edilmiştir.

Walter Salgueiro ve arkadaşları [47], parçacıklı epoksi kompozitlerde Young modülünü incelemişler. Epoksi matrise 106–125 μ m boyutlarına sahip kuvars parçacıkları eklemişler. Saf epoksinin modülü $E = 3.8 \pm 0.2$ GPa iken kuvars ile $E \approx 70$ GPa olmuş ve kuvars içeriği arttıkça young modülünde artış gözlemlemişlerdir.

Gerardo H Rubiolo ve arkadaşları [48], farklı miktarlarda kuvars tozu ile güçlendirmiş epoksi reçine üretmişler ve bu malzeme 12 mm çapında ve 100 mm uzunluğunda boru şeklinde bir kalıbın içerisinde oluşturulmuştur. Dolgu hacimleri sırasıyla 0, 0,05, 0,10, 0,20, 0,25 ve 0,30 olan numuneler hazırlamışlardır. Arşimet prensibi uygulayarak yoğunluk ölçülmüş ve kuvars içeriği arttıkça yoğunluk da artmıştır. Aynı zamanda Young modülü incelenmiş ve yine kuvars arttıkça artmış ve en yüksek değeri kuvars hacmi 0,30 olanda elde etmişlerdir.

Değerlendirme genelinde, atık döküm kumu katkılı numunelerin daha yüksek eğme mukavemeti ve Young modülü sergilediği, dolayısıyla daha fazla rijitlik ve dayanım

sağladığı görülmektedir. Katkısız numunelere nispetle, özellikle 63-100 µm atık döküm kumu katkılı numuneler, eğme mukavemetinde en yüksek artışı göstermektedir.

J. Edwin Raja Dhas ve arkadaşlarının [49], termoset ve termoplastik polimerlerin çekme dayanımlarını kıyaslamışlardır ve bulguları, termoset plastik malzemelerin termoplastik plastik polimerlere göre daha üstün mukavemet özelliklerine sahip olduğunu göstermiştir. Hatta çalışmada elle yatırma üretim tekniği kullanarak 5 mm kalınlığında cam fiber takviyeli, termoset polimer matrisli plaka incelenmiş ve çekme dayanımının termoplastiklere göre önemli ölçüde arttığını gözlemlemişler. Literatür araştırmalarında bu durum gözlemlendiği için kendi çalışmamızda da termoset reçine olan epoksi tercih edilmiştir.

W. Zurowski ve arkadaşları [50], kuvars tozunun emülsiyon bağlayıcılı iki katmanlı cam elyaf takviyeli polimer kompozitin performansına etkisini incelemişler. Sürtünme dayanımına bakılmış ve ayrıca eğilme, katmanlar arası kayma, çekme, kesme ve darbe dayanımları incelenmiş. Deneylerinde 300 g/m² E Tipi cam elyaf takviyesi, epoksi reçine ve 0,1 ve 0,3 mm boyutlarındaki silika tozu kullanmışlar ve bu tozu %1, %3, %6, %10 olacak şekilde farklı miktarlarda ilave etmişlerdir. %1 kuvars ilavesi ile en iyi mukavemetleri gözlemlemişler ve %1 kuvars katkısından sonra dayanımlar için dezavantaj oluştuğunu tespit etmişlerdir. Kendi çalışmamızda reçine miktarı ve elyafların yapısı ve katman sayısına göre hesaplama yapıldığında en optimum değer olan %3 kuvars tozu ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Çünkü çalışmamızda kullanılan cam elyaflar 5 katlı idi. Burada Zurowski ve arkadaşları 2 katlı cam elyaf kullanmışlardır. Tüm bunlar göz önüne alınarak %3 kullanılmasının en uygun olacağı kanaatine varılmıştır ve toz miktarının %3 kullanılması yoğunlukta da fazla artış sağlanmaması açısından avantaj olmuştur.

Milad Bazli ve arkadaşları [51], elyaf takviyeli polimer kompozitlerin çekme mukavemeti ile ilgili meta-analiz incelemesi yapmışlardır. Ve burada çekme dayanımını reçinenin türünün önemli ölçüde etkilediğini camsı geçiş sıcaklığı (T_g) yüksek reçinenin yüksek sıcaklıklarda bile dayanımını koruyabildiğini gözlemlemişlerdir ve bu bilgiler ışığında epoksi reçinenin T_g değeri en iyi reçine olduğu tespit edilerek kendi çalışmamızda kullanımı uygun görülmüştür. Ayrıca M.Bazli ve arkadaşları yüksek sıcaklıklarda, sürekli lifli elyaf takviyeli polimerler, rastgele dağılmış elyaflı kompozitlere göre mukavemetini daha iyi koruyabildiğini tespit etmişlerdir. Çekme dayanımını ve eğme dayanımı da birbiriyle ilişkilidir çoğu zaman. Bu sebeple bu

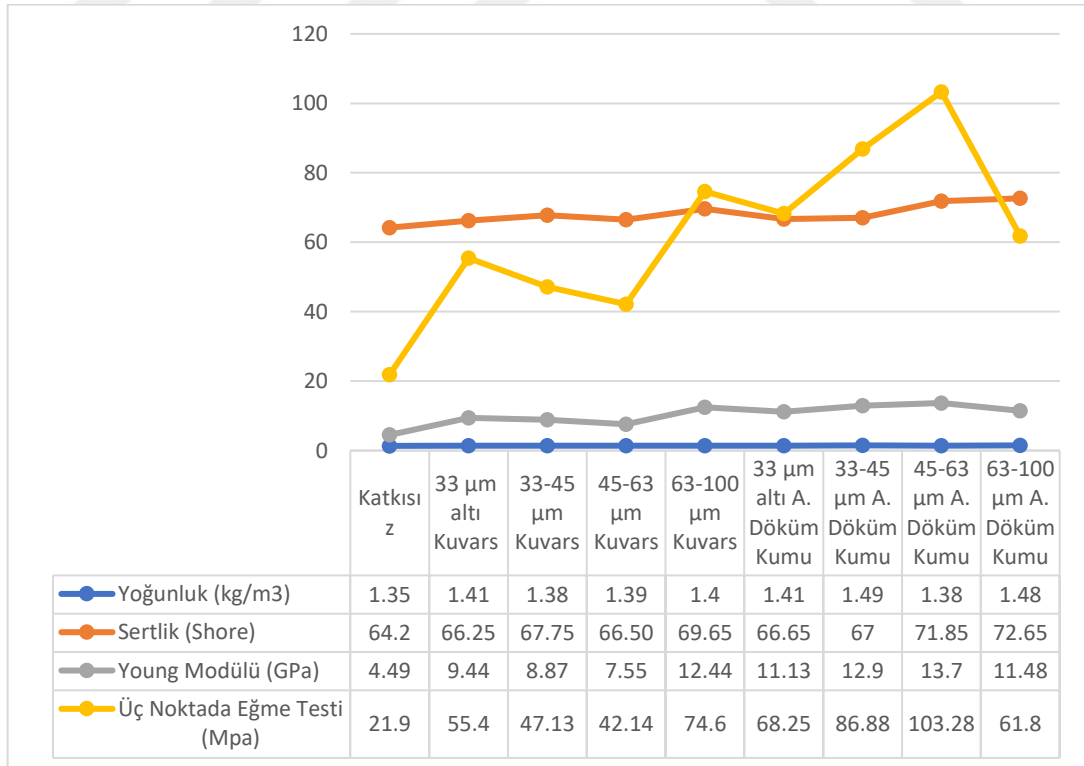
çalışmadaki kıymetli bilgiler ışığında daya iyi eğme dayanımı için, daha iyi mukavemet için epoksi reçine ve sürekli fiberlerle çalışma yapılmıştır.

P.V. Chandrasekhara Rao yapmış olduğu çalışmada [52], kompozite çeşitli yüzdelerde kuvars ilavesi ile ve reçine ağırlığına göre %0'dan %2'ye kadar cam fiber eklenmesi ile kompozitin mekanik dayanımını incelemiş ve kompozitteki mikro çatlakların köprülenmesinden dolayı fiber yükünün artması ile birlikte malzemenin dayanımında artış gözlenmiştir.



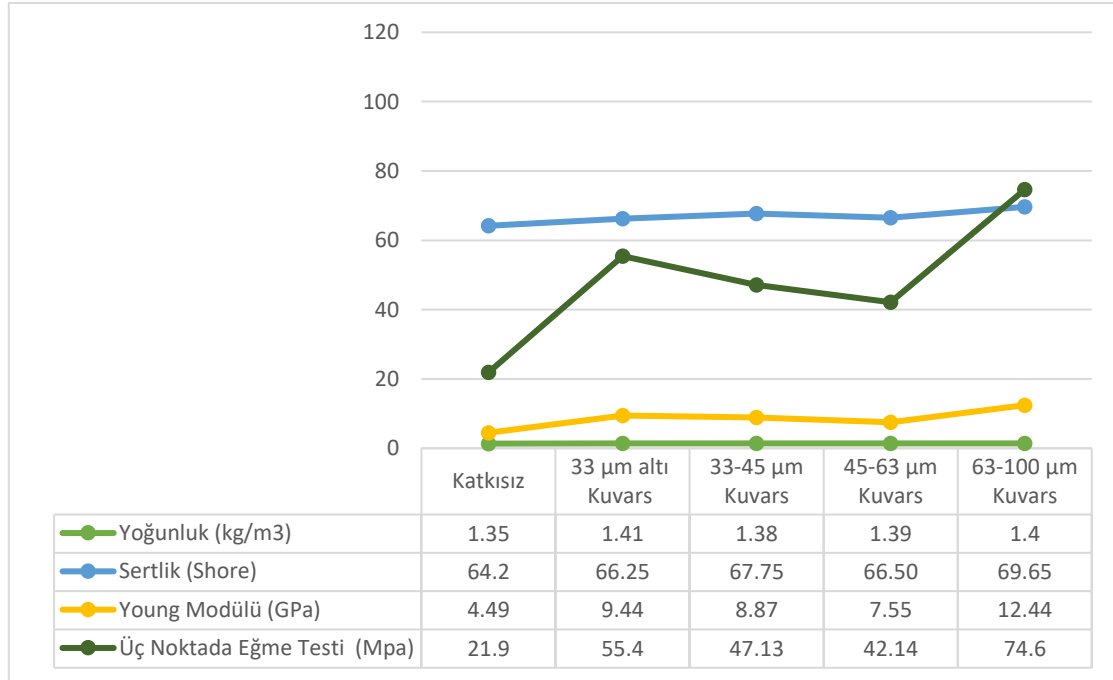
6. TARTIŞMA

Bu çalışmada polimer matrisli malzemelere cam fiber katkısına ek olarak kuvars ve atık döküm kumu ilave edilmiştir. Farklı boyutlarda ilave edilen bu tozların cam elyaf takviyeli polimer kompozitteki bazı fiziksel özellikleri incelenmiştir. Literatürde yapılan araştırmalarda kuvarsın mekanik dayanıma ve malzemenin sertliğine olumlu etkisi olduğu araştırılmış ve atık döküm kumunda da yüksek miktarda kuvars bulunmasından dolayı malzemenin dayanımında ve sertliğinde olumlu etkiler görülmesi beklenmiştir. Ve sonuç olarak aşağıda Şekil 6.1’de tüm numunelere yapılan testlere ait ortalama değerlerin yer aldığı grafikte de görüldüğü üzere reçinede toz katkısı olmayan malzemelere nazaran, mikron seviyesinde kuvars ve atık döküm kumu kullanılan kompozit malzemelerde sertlik ve mukavemette artış gözlemlenmiştir. Bu da malzememize kuvars ve atık döküm kumu katkısının malzemeyi sertlik ve mekanik anlamda iyileştirdiğini göstermektedir. Sonuçlara genel olarak bakıldığında atık döküm kumu katkılı malzemeler kuvars katkılı malzemelerden daha iyi dayanımlar sergilemiştir. Aşağıda hem kuvars hem de atık döküm kumu için tüm sonuçlar ayrı ayrı ele alınıp incelenerek birbiri ile ilişkilendirilmiştir.



Şekil 6.1. Tüm Numunelerin Deney Sonuçları

Şekil 6.2’de cam fiber takviyeli polimer matrise ilave edilen farklı boyutta kuvarslara ait deney sonuçları yer almaktadır. Sonuçlara bakıldığında sertlik, young modülü ve eğme gerilmesi en yüksek olan sonuçlar 63-100 µm kuvars katkılı numunede görülmektedir.



Şekil 6.2. Cam Fiber+Kuvars Katkılı Numunelerin Deney Sonuçları

Kuvars tane boyutunun malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek için, sonuçlar 33µ altı, 33-45µ, 45-63 µ ve 63-100 µ kuvars tanecik boyutları arasındaki farklılıkları ve bu değişikliklerin nedenlerini ele alarak incelemek faydalı olacaktır.

Toz katkısı olmayan kompozit numunesi ile kuvars eklenmiş numuneler arasında yapılan karşılaştırmalar, kuvarsın malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Katkısız numunenin sertliği 64,2 Shore iken, 33 µ altında boyuta sahip toz katkılı numune 66,25 Shore, 33-45 µ boyutunda toz katkılı numune 67,75, 45-63 µ kuvars içeren numunelerde sertlik 66,50 Shore ve 63-100 µ boyutunda kuvars içeren numune ise 69,65 Shore olarak ölçülmüştür. Bu artış, kuvars taneciklerinin cam fiber ile birlikte epoksi matrisin sertliğini artırdığını ve malzemenin dış etkilere karşı daha dirençli hale geldiğini göstermektedir. Özellikle 63-100 µ kuvarsın, sertlikte en yüksek artışı sağlamakta ve malzemenin dayanıklılığını artırmakta olduğu gözlenmiştir. Bu durum,

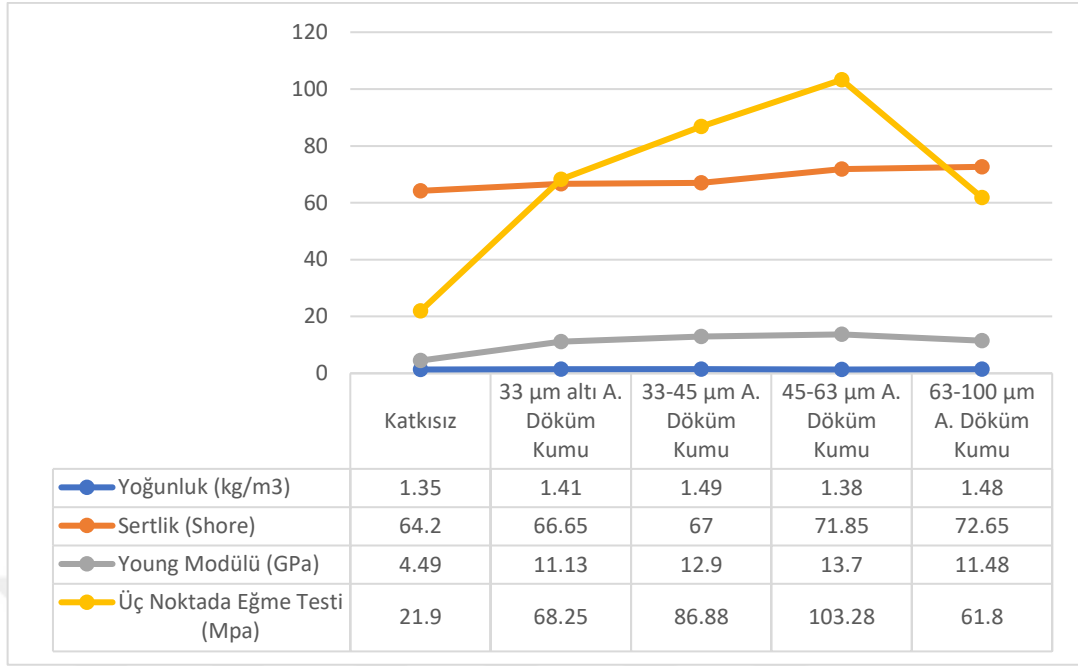
tane boyutu büyük olan malzemelerde ortalama sertliğin daha yüksek olduğunu bizlere göstermektedir.

Üç noktada eğme mukavemeti açısından bakıldığında, katkısız numunenin eğme mukavemeti 21,9 MPa iken, 33 μ altında boyuta sahip toz katkılı numune 55,4 MPa, 33-45 μ boyutunda toz katkılı numune 47,15 MPa, 45-63 μ kuvars içeren numunelerde 42,14 MPa ve 63-100 μ boyutunda kuvars içeren numune ise 74,6 MPa olarak ölçülmüştür. Kuvars tane boyutunun artışı, eğme mukavemetini olumlu yönde etkilemiş ve malzeme eğme kuvvetlerine karşı daha dayanıklı hale gelmiştir. Bu artış, kuvars taneciklerinin malzemenin iç yapıya katkıda bulunarak, malzemenin mekanik dayanımını artırdığını ve bu sayede eğme mukavemetinin yükseldiğini göstermektedir. Burada kuvars ilavesi ile tüm numunelerde dayanım artışı sağlanmıştır ancak tane boyutunun artması ile üç noktada eğme dayanımında net bir artış gözlenmiştir. Dolayısıyla küçük tanecik katkılı numuneler matriste daha fazla topaklanma, boşluk ve düzensizlik yaratabilir, bu da dayanımın, büyük tane katkılı numunelere nazaran daha düşük olmasına sebep olabilir.

Young modülü, diğer mekanik özelliklerde de benzer eğilimler gözlemlenmiştir. Katkısız numunenin Young modülü 4,49 GPa iken, 33 μ altında boyuta sahip toz katkılı numune 9,44 GPa, 33-45 μ boyutunda toz katkılı numune 8,87 GPa, 45-63 μ kuvars içeren numunelerde 7,55 GPa ve 63-100 μ boyutunda kuvars içeren numune ise 12,44 GPa olarak ölçülmüştür. Yine büyük tane boyutundaki kuvarsın malzemeye katılması ile daha rijit malzeme elde edilebilmektedir. Tane boyutunun artması malzemede daha homojen bir yayılım gösterebilir ve bu da malzeme özelliklerini daha iyi hale getirebilir.

Sonuç olarak, kuvars tane boyutunun malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde belirgin bir etkisi vardır. 63-100 μ boyutundaki kuvars katkısı ile malzemenin sertlik, eğme mukavemeti, Young modülü olumlu yönde artırmış ve bu boyutta kuvars katkısı ile malzemenin en iyi performansı gösterdiği anlaşılmaktadır. Küçük taneciklerin büyük taneciklere nazaran daha düşük dayanıma sahip olması tozların topaklanarak malzemenin iç yapısındaki dengesizliklerin ortaya çıkması ile açıklanabilir. Dolayısıyla, 63-100 μ arasında kuvars tanecik boyutunun, polimer matrise ilavesi, en iyi fiziksel ve mekanik özellikleri sağlayan ideal boyut olarak değerlendirilmektedir.

Şekil 6.3'te farklı boyutlardaki atık döküm kumlarının cam fiber takviyeli polimer matrise katkısı incelenmiş ve tüm deney sonuçları birbiri ile kıyaslanmıştır.



Şekil 6.3. Cam Fiber+Atık Döküm Kumu Katkılı Numunelerin Deney Sonuçları

Farklı tane boyutlarında döküm kumu atığı içeren numunelerde, katkısız numuneye kıyasla sertlik, Young modülü ve eğme gerilmesinde belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Katkısız numunenin sertliği 64,2 Shore iken, 33 µ altında boyuta sahip toz katkılı numune 66,65 Shore, 33-45 µ boyutunda toz katkılı numune 67, 45-63 µ kuvars içeren numunelerde sertlik 71,85 Shore ve 63-100 µ boyutunda kuvars içeren numune ise 72,65 Shore olarak ölçülmüştür. Bu artış, malzemenin dış etkilere karşı daha dayanıklı hale geldiğini göstermektedir.

Benzer şekilde, katkısız numunenin Young modülü 4,49 GPa iken, 33 µ altında boyuta sahip atık döküm kumu katkılı numune 11,13 GPa, 33-45 µ boyutunda atık döküm kumu katkılı numune 12,9 GPa, 45-63 µ boyutunda atık döküm kumu içeren numunelerde 13,7 GPa ve 63-100 µ boyutunda atık döküm kumu içeren numune ise 11,48 GPa olarak ölçülmüştür. Bu iyileşmeler, döküm kumu atığının malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediğini ve daha rijit bir malzeme elde edildiğini göstermektedir. Ancak en iyi rijitlik 45-63 µ boyutuna sahip atık döküm kumu katkısı ile elde edilebilmiştir.

Üç noktada eğme mukavemeti açısından bakıldığında, katkısız numunenin eğme mukavemeti 21,9 MPa iken, 33 µ altında boyuta sahip atık döküm kumu katkılı numune 68,25 MPa, 33-45 µ boyutunda toz katkılı numune 86,88 MPa, 45-63 µ atık döküm kumu içeren numunelerde 103,28 MPa ve 63-100 µ boyutunda kuvars içeren numune ise 61,8

MPa olarak ölçülmüştür. Bu artış, atık döküm kumu taneciklerinin malzemenin iç yapısına katkıda bulunarak, malzemenin mekanik dayanımını artırdığını ve bu sayede eğme mukavemetini önemli oranda yükselttiğini göstermektedir. Farklı boyutlara sahip atık döküm kumu katkılı numunelerde kuvars ilavesi ile tüm numunelerde sağlanan dayanım artışından daha fazla artış sağlanmıştır. Ancak en iyi dayanımlar 45-63 μ boyuta sahip atık döküm kumu katkılı numunelerde gözlenmiştir. En küçük yani 33 μ altındaki atık döküm kumu katkılı numune ve en büyük yani 63-100 μ toz katkılı numunelerde daha düşük dayanımlar elde edilmiştir. Bunun sebebi küçük tanelerdeki tozların topaklanması ile boşluklu bir yapıya ve büyük taneli toz katkısı olan malzemelerde tane boyutunun büyümesi ile yine boşlukların daha fazla oluşmasına bağlanabilir.

Tüm numunelerde, katkısız numuneye kıyasla sertlik, Young modülü, elastisite modülü ve eğme gerilmesinde artışlar yaşanmıştır. Ancak 63-100 μ tane boyutunda kuvars içeren numunelerde sertlik 69,65 Shore iken, Young modülü 12,44 GPa ve eğme gerilmesi 74,6 MPa ile en iyi sonuçları vermektedir. Ancak, bu artışlar, 45-63 μ döküm atığı içeren numunelere kıyasla daha düşüktür. Sertlik 71,85 Shore'a, Young modülü 13,7 GPa'ya ve eğme gerilmesi 103,28 MPa'ya çıkmıştır. Yani en iyi sonuçlar tüm numuneler arasında 45-63 μ boyutunda atık döküm kumu ilave edilen numunelerde görülmüştür. Yalnızca shore sertliğinde değerlerin çok yakın olması ile beraber en iyi ortalama sertlik, en büyük tane boyutu katkısında yani 63-100 μ tane boyutundaki atık döküm kumu katkılı numunelerde görülmüştür. Bu beklenen bir durumdur çünkü büyük tanelere sertlik ucunun daha fazla teması sonucunda bu durum gözlemlenebilir.

Genel olarak, tez kapsamında deneyde takviye malzemesi olarak cam fiberin yanında kullanılan atık döküm kumu ve kuvars katkılarının epoksi matrisli malzemenin dayanımında önemli bir artış sağladığını bizlere göstermektedir. Ancak tane boyutunun fiziksel ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir ve yapılan analizler; epoksi matrise cam fiberin yanında, 45-63 μ boyutunda döküm kumu atığı ve 63-100 μ boyutunda kuvars tozu katkısının kompozitlerde fiziksel ve mekanik özellikleri açısından en yüksek iyileşmeyi sağladığını ortaya koymuştur. Bu katkılar malzemenin sertlik, Young modülü ve üç noktada eğme mukavemetinde belirgin iyileşmelere neden olmuş ve bu özelliklerin her birinde katkısız numuneye göre önemli artışlar sağlamıştır.

7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİ

Bu çalışmada, epoksi matrise takviye elemanı olarak cam fiberin yanında kuvars ve atık döküm kumu ilavesinin, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Kuvarsın literatürde epoksi matrise ilavesi ile mekanik özelliklerinin iyileştiği bilinmektedir. Ancak farklı tane boyutlarına sahip kuvars ve atık döküm kumu kullanılarak yapılan deneyler sonucunda, atık döküm kumunun kuvarstan daha yüksek yoğunluk ve mekanik dayanım sağladığı tespit edilmiştir.

Özellikle, Shore sertlik testlerinde kuvars ve atık döküm kumu ilavelerinin malzeme sertliğini artırdığı gözlemlenmiştir. Atık döküm kumu ilaveli numuneler, katkısız numunelere kıyasla daha yüksek ortalama sertlik değerlerine ulaşmıştır. 33 µm altı, 33-45 µm ve 45-63 µm ve 63-100 µm tane boyutlarına sahip kuvars numunelerinin ortalama sertlik değerleri sırasıyla 66,25, 67,75, 66,50 ve 69,65 olarak kaydedilmiştir. Atık döküm kumu ilaveli numunelerde ise numunelerin ortalama sertlik değerleri sırasıyla 66,65, 67, 71,85 ve 72,65 olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, kuvarsın özellikle 63-100 µm tane boyutunda en yüksek sertlik artışını sağladığını, atık döküm kumunun ise özellikle 45-63 µm tane boyutunda önemli bir sertlik artışı sağladığını göstermektedir.

Yoğunluk değerlerine bakıldığında, tüm numunelerde, toz katkısız numunelere nazaran artış gözlemlenmiştir. Katkısız numunede yoğunluk 1,35 g/cm³ iken atık döküm kumunda bu değer en yüksek 1,49 g/cm³, kuvarsta ise 1,41 g/cm³ değerlerine kadar yükselmektedir. Yani atık döküm kumunda en fazla %10,37 kadar, kuvars katkısı ile en fazla %4,44 kadar yoğunlukta artış gözlenmiştir. Atık döküm kumunda bulunan az miktardaki metal tozunun malzeme yoğunluğunda daha fazla artışa sebep olduğu düşünülmektedir. Yoğunluğun artması havacılık sektöründe dezavantaj olarak görülebilir ancak malzemenin mekanik dayanımlarının, toz katkısı olmayan numunelere nazaran büyük miktarda artış göstermesi malzemeyi önemli bir noktaya taşımaktadır.

Mekanik dayanım açısından, eğme gerilmesi ve Young modülü verileri de atık döküm kumunun üstün performansını ortaya koymaktadır. En yüksek mukavemeti gözlemlediğimiz, 45-63 µm boyutundaki atık döküm kumu katkılı numunelerde ve 63-100 µm boyutuna sahip kuvars katkılı numunelerde, üç noktada eğme mukavemeti sırasıyla %100'ün üzerinde ve %70'in üzerinde artış göstermiştir. Young modülü değerinde ise %10 üzerinde artışlar gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma, kuvars ve atık döküm kumu katkılarının malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmede etkili olduğunu göstermiştir. Literatürde kuvarsın

epoksi matriste dayanımları artırdığı bilinirken atık döküm kumu katkısının kuvarstan daha yüksek performans sağladığı ve özellikle 45-63 µm tane boyutundaki atık döküm kumu katkısı ile en iyi sonuçların elde edildiği belirlenmiştir. Böylece miktarı ağırlıkça %3 ile sabit tutulan farklı boyutlardaki tozların ve yine katman sayısı ve yönleri örgü yapı ile sabit tutulan cam fiberlerin epoksi matris ile birleşmesiyle tane boyut etkisi incelenerek dayanımlardaki farklılıklar da ortaya konmuştur. Gelecekteki çalışmalar, farklı oranlarda ve farklı tane boyutlarında kuvars ve atık döküm kumu katkılarının etkilerini daha detaylı inceleyebilir ve bu bulgulara dayanarak optimize edilmiş kompozit malzemeler geliştirilebilir. Ayrıca, aglomerasyonun azaltılması ve yapısal boşlukların minimize edilmesi için vakum torbalama tekniğinden daha farklı, insan müdahalesinin daha az olduğu yeni yöntemler araştırılarak kompozit malzemede yer alan matris ve takviye elemanları arasında daha güçlü bağlanmalar oluşturulabilir ve daha iyi dayanımlar ortaya çıkabilir. Bu çalışmalar, malzeme mühendisliği ve kompozit malzeme geliştirme alanında önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., & Elharfi, A. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. In Composite Structures (Vol. 262), 2-5.
- [2] Baker, A., Dutton, S., Kelly, D., (2004). Composite materials for aircraft structures, (second edition). Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [3] Vaggar, G. B. Kamate, S. C. (2020). Thermal property characterization for enhancement of thermal conductivity of hybrid polymer composites. Materials Today: Proceedings, 20, 208–212.
- [4] Baker, A. Dutton S. Kelly D. (2004). Composite materials for aircraft structures, (second edition). Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [5] Gay, D. Hoa, S. V. Tsai, S. W. (2003). Composite materials: design and applications. Paris: CRC Press.
- [6] Vaggar, G. B. Kamate, S. C. (2020). Thermal property characterization for enhancement of thermal conductivity of hybrid polymer composites. Materials Today: Proceedings, 20, 208–212.
- [7] Baker, A. Dutton, S. Kelly, D. (2004). Composite materials for aircraft structures, (second edition). Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [8] Kaya, A.İ. (2016). Kompozit Malzemeler ve Özellikleri. Putech & Composites, 38-39.
- [9] Selvan, S.S. and Vedaraj, I.S.R. (2023). Effects of nanoparticles on the mechanical and thermal behavior of fiber reinforced polymer composites – A review. Materials Today: Proceedings, 1-4.
- [10] Nedelcu, R. and Redon, P. (2012). Composites Materials For Aviation Industry. AFASES 2012’de sunulan bildiri. https://www.afahc.ro/ro/afases/2012/air_force/Nedelcu_Redon.pdf (Erişim tarihi: 24.11.2024)
- [11] Yastımoğlu, F.ve Özkan, A. (2017) Tekrarlanan Yükler Altında Kompozit Malzemelerin Yapılarının İncelenmesini Amaçlayan Deney Aygıtı Tasarımı. Bilim ve Teknoloji Dergisi, 5(1), 57-59.
- [12] Demirel, A. (2007). Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Ankara: Gazi Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü.
- [13] Öztürk, Ö. (2015). Poliüre matris malzemesi ve cam, aramid, karbon elyaf kumaş takviyeleri kullanılarak üretilen kompozit malzemelerin mekanik davranışlarının

incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Tekirdağ: Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- [14] Garam, K. Yuwei, H. Swapneel, K. Ronald, S. (2021). The influence of aircraft fluid ingress on tensile properties of aramid fiber composites. *Advanced Composite Materials*, 30, 365-379
- [15] Yaman, N. Öktem, T. Seventekin, N. (2007). Karbon liflerinin özellikleri ve kullanım olanakları. *Tekstil Ve Konfeksiyon*, 2, 90-94.
- [16] Yaman, N. Öktem, T. Seventekin N. (2007). Karbon liflerinin özellikleri ve kullanım olanakları. *Tekstil Ve Konfeksiyon*, 2, 90-94.
- [17] Prashanth, S. Subbaya, K.M. Nithin, K. Sachhidananda S. (2017). Fiber Takviyeli Kompozitler - Bir İnceleme. *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Dergisi*, 6 (3), 1-6.
- [18] Yaman, N. Öktem, T. Seventekin N. (2007). Karbon liflerinin özellikleri ve kullanım olanakları. *Tekstil Ve Konfeksiyon*, 2, 90-94.
- [19] Kim, G. He, Y. Kulkarni, S. Sterkenburg, R. (2020). The influence of aircraft fluid ingress on tensile properties of aramid fiber composites. *Advanced Composite Materials*, 30(9), 1-3.
- [20] Chen, F. Zhai, L. Yang, H. Zhao, S. Wang, Z. Gao, C. Zhou, J. Liu, X. Yu, Z. Qin, Y. Xu, W. (2021). Unparalleled Armour for Aramid Fiber with Excellent UV Resistance in Extreme Environment. *Advanced Science*, 8(12), 1-5.
- [21] Kaya, A.İ. (2016). Kompozit Malzemeler ve Özellikleri. *Putech & Composites*, 38-39.
- [22] Şanlı, F. (2021). Nanopartikül katkılı elyaf takviyeli tabakalı kompozitlerin mekanik ve dinamik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [23] Uçan, C. (2023). Hava araçlarında kullanılabilecek yeni nesil fiber metal tabakalı kompozit malzemelerin metal/prepreg arayüzey dayanımının belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [24] Baker, A. Dutton S. Kelly D. (2004). *Composite materials for aircraft structures*, (second edition). Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [25] Saylık, A. (2022). Polimer matrisli hibrit kompozitlerin farklı ortam şartlarındaki mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [26] Seçkin, E. ve Kingsley S. (2017). In *Fiber Technology for Fiber-Renforced Composites*. *Composites Science and Engineering*, 57-63.

- [27] Akyüz, O. (2020). Surface Modification Of Micronized Quartz Powders And Investigation Of Additives As Filling Material In Polymer Matrix Composite Materials. Doktora Tezi. İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Fen Bilimleri Ve Uygulamalı Bilimler Enstitüsü.
- [28] Gautam, Y. K. Somani, N. Kumar, M. Sharma, S. K. (2018). A review on fabrication and characterization of copper metal matrix composite (CMMC). AIP Conference Proceedings, 1-4.
- [29] Morampudi, P. Namala, K. K. Gajjela, Y. K. Barath, M. Prudhvi, G. (2020). Review on glass fiber reinforced polymer composites. Materials Today: Proceedings, 43, 314–319.
- [30] Kaya, A.İ. (2016). Kompozit Malzemeler ve Özellikleri. Putech & Composites, 38-39.
- [31] Singh, B. Kumar, R. Chohan, J. S. (2019). Polymer matrix composites in 3D printing: A state of art review. Materials Today: Proceedings, 33, 1562–1567.
- [32] Mzumdar, K.S. (2002) Composites Manufacturing Materials, Product, and Process Engineering. (1). Amerika: CRC Press.
- [33] Güngör İ.T. (2023). Bor Minerali Dolgulu Termoplastik Matrisli Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Termal Özelliklerinin İncelenmesi.Yüksek Lisans Tezi. İzmir Katip Çelebi Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [34] Gülmez, S. (2018). Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler. Tezsiz Yüksek Lisans Projesi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [35] Örs, S. (2014). Farklı Karbon Tekstilleriyle Ve Reçinelerle Oluşturulan Karbon Kompozitlerin Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [36] Gülmez S. (2018). Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler. Tezsiz Yüksek Lisans Projesi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [37] Borazan, S.K. (2018). Takviyeli Kompozitlerin Kırılma Tokluğunun Belirlenmesi. Yüksek Lisan Tezi. Uşak Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [38] Can, O. S. (2017). Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri. Bitirme Çalışması. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi.
- [39] Işık. A. (2008). Kompozit Malzemeden İmal Edilmiş Bir Takviye Elemanının Eğilme Ve Burulma Yükü Altında Deneysel Ve Sayısal Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- [40] Turgut, T. Kayran, A. Alemderoğlu, N. Ceylan, M. (2007). Vakum Torbalama Yöntemi ile Kompozit Malzemeden Yapı Üretimi. *Mühendis ve Makine*, 48(566), 14-18.
- [41] Turgut, T. Kayran, A. Alemderoğlu, N. Ceylan, M. (2007). Vakum Torbalama Yöntemi ile Kompozit Malzemeden Yapı Üretimi. *Mühendis ve Makine*, 48(566), 14-18.
- [42] Durgun, İ. (2013). Vakum İnfüzyon Yöntemi İle Kompozit Parça Üretimi. 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresinde Sunulan Bildiri. https://www.researchgate.net/publication/279981900_production_of_carbon_wit_h_vacuum_infusion_method (Erişim tarihi: 09.07.2024)
- [43] Poodts, E. Minak, G. Mazzocchetti, L. Giorgini, L. (2014). Fabrication, process simulation and testing of a thick CFRP component using the RTM process. *Composites Part B: Engineering*, 56, 674-680.
- [44] Can, O. S. (2017). Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri. Bitirme Çalışması. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi.
- [45] Ateş, E. Aztekin, K. (2011). Parçacık Ve Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Yoğunluk Ve Basma Dayanımı Özellikleri. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 26, 479-480.
- [46] Paçzkowski, P. And Głogowska, K. (2024). Preparation and Characterization of Quartz-Reinforced Hybrid Composites Based on Unsaturated Polyester Resin from Post-Consumer PET Recyclate. *Materials*, 17(5), 10-13.
- [47] Tognana, S. Salgueiro, W. Somoza, A. Marzocca, A. (2010). Measurement of the Young's modulus in particulate epoxy composites using the impulse excitation technique. *Materials Science and Engineering*, 527 (18–19), 4619–4623.
- [48] Rubiolo, G. H. Marconi, J. D. Goyanes, S. N. (2002). Yield stress of epoxy composites filled with quartz powder. *Polymer International*, 51(11), 1290–1294.
- [49] Retnam, B.S.J. Benin, M. A. Dhas, J.E.R. Samuel, G.D. Prasad, A. Veeranjanyulu, K. (2023). Comparative analysis of tensile properties on thermoplastic & thermosetting polymer composites. *Materials Today: Proceedings*, 10, 1-4.
- [50] Zurowski, W. Zepchlo, J. Krzyzak, A. Gevorkyan, E. Rucki, M. (2022). Effect of the quartz powder on the performance of the two layers glass fiber reinforced polymer composite with emulsion binder. *Composite Structures*, 298, 1-4.
- [51] Machello, C. Bazli, M. Santos, J. Rajabipour, A. Arashpour, M. Hassanli, R. (2024). Tensile strength retention of fibre-reinforced polymer composites exposed to elevated temperatures: A meta-analysis review. In *Construction and Building Materials*, 438, 2-8.

[52] Rao, P.V.C. (2020). Effects of matrix modification on mechanical and durability characteristics of polymer composites through variations in micro fillers, macro fillers and fibers. Construction and Building Materials, 235, 2-7.

http-1: https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_82. (Erişim Tarihi: 20.06.2024)

http-2: https://www.touchdown.com.tw/tr/material-property/material-property_quartz.html (Erişim Tarihi: 18.05.2024)

http 3: <https://cdn.bartın.edu.tr/metalurji/KompozitMalzemelerSunum> (Erişim Tarihi: 10.04.2024)

http 4: <https://cdn.bartın.edu.tr/metalurji/KompozitMalzemelerSunum> (Erişim Tarihi: 10.04.2024)

http 5: <https://tekstilteknik.blogspot.com/p/kompozit-uretim-yontemleri.html> (Erişim Tarihi 09.06.2024)

http 6: <https://www.muhendisbeyinler.net/vakum-torbalama-yontemi> (Erişim Tarihi: 15.03.2024)

http: 7: <https://avdesodrone.com/kompozit-malzemeler-nedir-kompozit-uretim-yontemleri-nelerdir> (Erişim Tarihi: 18.03.2024)

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0009-0009-9551-5536

Ad Soyad : Betül Özcan

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2019, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- Yıl, Yayınn/Faaliyetin Türü, Adı ve Bilgileri, Yeri
- Yazarın Soyadı, Adının ilk harfi. (Yayın yılı). Makale adı. Dergi Adı, Cilt (sayı), Sayfa numaraları.

Ödülleri:

- Yıl, Derece, Ödül Adı, Yeri

Mesleki Birlik/Dernek/Kuruluş Üyelikleri:

- Yıl, Birlik/Dernek/Kuruluş Adı, Yeri.