



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÖRGÜLÜ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÇEŞİTLİ
PARAMETRELERDE YORULMA DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Raşit Koray ERGÜN

Danışman
Prof.Dr. Hamit ADİN

Kasım - 2022
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Raşit Koray ERGÜN tarafından hazırlanan “Örgülı Kompozit Malzemelerin Çeşitli Parametrelerde Yorulma Davranışlarının İncelenmesi” adlı tez çalışması 04/11/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliğı ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliğı Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof.Dr. Murat Yavuz SOLMAZ

Danışman

Prof. Dr. Hamit ADİN

Üye

Prof. Dr. Bahattin İşCAN

Üye

Prof. Dr. Erol KILIÇKAP

Üye

Doç. Dr. Mehmet Emin DENİZ

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Osman PAKMA
LEE Müdür V.

* Bu tez çalışması Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BTÜBAP) tarafından .18.007 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Raşıit Koray ERGÜN

04/11/2022

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ÖRGÜLÜ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÇEŞİTLİ PARAMETRELERDE YORULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Raşit Koray ERGÜN

**BATMAN ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Danışman: Prof. Dr. Hamit ADİN

2022, 157 Sayfa

Jüri

Danışman Prof. Dr. Hamit ADİN

Prof. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ

Prof. Dr. Bahattin İŞCAN

Prof. Dr. Erol KILIÇKAP

Doç. Dr. Mehmet Emin DENİZ

Son yıllarda ileri teknoloji ürünü olan nanopartiküllerin önemi giderek artmaktadır. Nanopartiküller birçok alanda kullanıldığı gibi kompozit malzemeler alanında da kullanılmaktadır. Konstrüksiyon sektörü de kompozit malzemeler için yeni bir alan olarak ortaya çıkmıştır. Konstrüksiyon sektöründeki özel ihtiyaçlar birçok fırsat doğurmaktadır.

Bu çalışmada, 5 farklı katman yapısında nanopartikül takviyesiz ve kütlece farklı oranlarda (%0.5, %1 ve %3) Al₂O₃, CuO ve MgO nanopartikül takviyeli olarak üretilen dokuma tip kompozit malzemeler yorulma testlerine tabi tutulmuştur. Yorulma testlerine başlamadan önce, numunelerin sadece çekme-basma yönündeki yüklere maruz kalması ve eğilme momentinden etkilenmemesi için kompozit malzemelerin uçlarına 40x25mm ölçülerinde parçalar yapıştırılmıştır. Yorulma testleri Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda bulunan Shimadzu marka 100 kN'lık yük hücresine sahip Servo-Hidrolik Yorulma test cihazı ile yapılmıştır. Numunelerin yorulma limitlerini belirlemek için R=-0.1 yük oranı, 6 Hz frekans ve sinüs dalgası şeklinde yük uygulanarak yorulma testleri yapılmıştır. Yorulma deneyleri sonrasında nanopartikül takviyeli ve takviyesiz olarak üretilen dokuma tip kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) diyagramları, sönümleme oranları ve histerezis eğrileri incelenmiş, elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Ayrıca dokuma tip kompozit malzemelerde oluşan hasar mekanizmalarının SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) analizleri yapılmıştır. En yüksek yorulma ömürleri ve sönümleme oranları KM-3 katman yapısına sahip nanopartikül takviyeli ve takviyesiz olarak üretilen kompozit malzemelerde tespit edilmiştir. Üretim açısından tavsiye edilen dokuma kompozit malzemeler KM-3 katman yapılı numunelerdir. Nanopartikül takviyeli ve takviyesiz üretilen dokuma kompozit malzemelerde genel olarak simetrik histerezis eğrileri olduğundan deformasyon davranışlarının lineer elastik olduğu anlaşılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dokuma Kompozit, Hasar Mekanizmaları, Histerezis Eğrileri, Nanopartikül, SEM Analizleri, Sönümleme Oranları, Yorulma Testi

ABSTRACT

Ph.D THESIS

INVESTIGATION OF FATIGUE BEHAVIOR OF WOVEN COMPOSITE MATERIALS IN VARIOUS PARAMETERS

Raşit Koray ERGÜN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Hamit ADİN

2022, 157 Pages

Jury

Advisor Prof. Dr. Hamit ADİN

Prof. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ

Prof. Dr. Bahattin İŞCAN

Prof. Dr. Erol KILIÇKAP

Assoc. Prof. Dr. Mehmet Emin DENİZ

In recent years, the importance of nanoparticles, which are high-tech products, has been increasing. Nanoparticles are used in many fields as well as in the field of composite materials. One of the new application areas for composites in recent years is the construction sector. The special requirements in this industry offer many opportunities. The most important feature of composites consisting of a combination of glass and carbon fiber resin is the capacity to produce endless new materials according to the quality of the selected material.

In this study, woven type composite materials produced with 5 different layer structures without nanoparticle reinforcement and with different ratios by mass (0.5%, 1% and 3%) with Al₂O₃, CuO and MgO nanoparticle reinforcement were subjected to fatigue tests. Before starting the fatigue tests, pieces of 40x25mm were attached to the ends of the composite materials so that the samples were only subjected to loads in the tensile and compression direction and not affected by bending moment. Fatigue tests were carried out with a Shimadzu Servo-Hydraulic Fatigue Tester with 100 kN load cell in the Laboratory of the Mechanical Engineering Department of Batman University. In order to determine the fatigue limits of the samples, fatigue tests were carried out by applying R=-0.1 load ratio, 6 Hz frequency and sine wave load. After fatigue tests, Load level (%) – Cycle number (N) diagrams, damping ratios and hysteresis loops of woven type composite materials produced with and without nanoparticle reinforcement were examined and the results were interpreted. In addition, SEM (Scanning Electron Microscope) analyzes of damage mechanisms in woven composite materials were investigated. The highest fatigue cycles and damping ratios were determined in woven composites with KM-3 stacking sequence. Woven composites recommended for production were samples with KM-3 stacking sequence. Since generally symmetrical hysteresis curves occurred in woven composite materials produced with and without nanoparticle reinforcement, the deformation behavior was thought to be linear elastic.

Keywords: Damping Ratios, Failure Mechanisms, Fatigue Test, Hysteresis Curves, Nanoparticle, SEM Analysis, Woven Composite

ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmalarımın her aşamasında katkılarını asla esirgemeyen, her türlü imkanı sunan ve rehberlik eden danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hamit ADİN'e,

Doktora çalışmalarına her türlü desteği veren Sayın Dr. Öğr. Üyesi Tolga TOPKAYA'ya

Doktora çalışmalarına maddi destek olan Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BTÜBAP) Koordinatörlüğü'ne,

Eğitim hayatım boyunca her türlü fedakârlığı yapan, sevgileriyle bana destek olan ve moral veren, başta anne ve babam olmak üzere eşim ve sevgili kızım,

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Raşit Koray ERGÜN
BATMAN-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
TABLolar LİSTESİ	xv
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Kompozit Malzemeler	1
1.2. Dokuma Kompozit Malzemeler	3
1.3. Nanopartiküller	3
1.3.1. Metaloksit nanopartiküller	4
1.3.2. Nanopartikül üretim yöntemleri	6
1.4. Yorulma	7
1.4.1. Yorulmaya etki eden faktörler	8
1.4.2. Yorulmaya karşı tasarım	9
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	11
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	25
3.1. Dokuma Tip Kompozit Malzemelerin Hazırlanması.....	25
3.2. Deneysel Çekme Hasar Yüklerinin Belirlenmesi	29
3.3. Yorulma Testleri	32
3.4. SEM Analiz Cihazı	33
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	34
4.1. Yorulma Test Sonuçları	34
4.1.2. KM-1 katman yapısında takviyesiz, %0.5, %1 ve %3 Al ₂ O ₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışları	38
4.1.3. KM-1 katman yapısında takviyesiz, %0.5, %1 ve %3 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışları	40
4.1.4. KM-2 katman yapısında takviyesiz, %0.5, %1 ve %3 Al ₂ O ₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışları	42
4.1.5. KM-3 katman yapısında takviyesiz, %0.5, %1 ve %3 Al ₂ O ₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışları	44
4.1.6. KM-3 katman yapısında takviyesiz, %0.5, %1 ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışları	46
4.1.7. KM-5 katman yapısında takviyesiz, %0.5, %1 ve %3 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışları	48

4.1.8. KM-5 katman yapısında takviyesiz, %0.5, %1 ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışları	49
4.1.9. KM-3 katman yapısında ve %1 Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışları	51
4.1.10. KM-4 katman yapısında ve %3 Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışları	53
4.1.11. KM-5 katman yapısında ve %0.5 Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışları	55
4.2. Sönümlleme oranları	57
4.2.1. Farklı katman yapılarında nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin sönümlleme oranları.....	58
4.2.2. Farklı katman yapılarında %0.5 Al ₂ O ₃ takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları.....	60
4.2.3. Farklı katman yapılarında %1 Al ₂ O ₃ takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları.....	62
4.2.4. Farklı katman yapılarında %3 Al ₂ O ₃ takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları.....	64
4.2.5. Farklı katman yapılarında %0.5 CuO takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları.....	66
4.2.6. Farklı katman yapılarında %1 CuO takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları.....	68
4.2.7. Farklı katman yapılarında %3 CuO takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları.....	70
4.2.8. Farklı katman yapılarında %0.5 MgO takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları.....	72
4.2.9. Farklı katman yapılarında %1 MgO takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları.....	74
4.2.10. Farklı katman yapılarında %3 MgO takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları.....	76
4.2.11. KM-1 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları.....	78
4.2.12. KM-2 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları.....	79
4.2.13. KM-3 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları.....	81
4.2.14. KM-4 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları.....	82
4.2.15. KM-5 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları.....	84
4.2.16. KM-1 katman yapısında ve %0.5 Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları.....	85
4.2.17. KM-2 katman yapısında ve %0.5 Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları.....	86
4.2.18. KM-3 katman yapısında ve %0.5 Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları.....	87
4.2.19. KM-3 katman yapısında ve %1 Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları.....	88
4.2.20. KM-3 katman yapısında ve %3 Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları.....	89

4.2.21. KM-4 katman yapısında ve %0.5 Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlenme oranları.....	90
4.2.22. KM-5 katman yapısında ve %3 Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlenme oranları.....	91
4.3. Histerezis eğrileri.....	93
4.3.1. KM-1 katman yapısında ve nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin histerezis eğrileri.....	94
4.3.2. KM-5 katman yapısında ve nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin histerezis eğrileri.....	96
4.3.3. KM-1 katman yapısında ve %0.5 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri.....	98
4.3.4. KM-1 katman yapısında ve %1 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri.....	101
4.3.5. KM-1 katman yapısında ve %1 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri.....	103
4.3.6. KM-1 katman yapısında ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri.....	105
4.3.7. KM-1 katman yapısında ve %0.5 Al ₂ O ₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri.....	107
4.3.8. KM-2 katman yapısında ve %0.5 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri.....	109
4.3.9. KM-2 katman yapısında ve %1 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri.....	111
4.3.10. KM-2 katman yapısında ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri.....	113
4.3.11. KM-3 katman yapısında ve %3 Al ₂ O ₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri.....	115
4.3.12. KM-3 katman yapısında ve %0.5 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri.....	117
4.3.13. KM-3 katman yapısında ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri.....	120
4.3.14. KM-3 katman yapısında ve %0.5 Al ₂ O ₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri.....	122
4.3.15. KM-3 katman yapısında ve %1 Al ₂ O ₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri.....	124
4.3.16. KM-4 katman yapısında ve %0.5 Al ₂ O ₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri.....	127
4.3.17. KM-5 katman yapısında ve %0.5 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri.....	129
4.3.18. KM-5 katman yapısında ve %1 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri.....	131
4.3.19. KM-5 katman yapısında ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri.....	133
4.3.20. KM-5 katman yapısında ve %0.5 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri.....	135
4.3.21. KM-5 katman yapısında ve %1 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri.....	137
4.4. SEM Analiz Sonuçları.....	139
4.4.1. Al ₂ O ₃ nanopartikül takviyeli yorulma numuneleri SEM analizleri.....	139
4.4.2. CuO nanopartikül takviyeli yorulma numuneleri SEM analizleri.....	146

4.4.3. MgO nanopartikül takviyeli yorulma numuneleri SEM analizleri	151
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	155
5.1 Sonuçlar	155
5.1.1. Yorulma Sonuçları	155
5.2 Öneriler	157
6. KAYNAKLAR	158
ÖZGEÇMİŞ	167

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Nanopartikül üretiminde kullanılan yaklaşımlar	6
Şekil 1.2. Sinüs dalgası formu (Kılıç, 2008)	7
Şekil 3.1. Cam elyaf dokuma tip kumaş malzemeler	25
Şekil 3.2. Nanopartikül malzemeler	26
Şekil 3.3. a) Epoksi ve sertleştirici malzeme, yardımcı ekipmanlar b) Elle yatırma yöntemi ile nanopartikül takviyeli ve takviyesiz kompozit malzeme üretim işlemi	27
Şekil 3.4. Kesimi yapılan nanopartikül takviyeli ve takviyesiz dokuma tip kompozit malzemeler a) Takviyesiz b) Al_2O_3 takviyeli c) CuO takviyeli d) MgO takviyeli	28
Şekil 3.5. KM-1 katman yapılı dokuma kompozit malzemelerin Kopma yükü (kN) - Şekil değişimi (mm) grafikleri	29
Şekil 3.6. Yorulma test cihazı	32
Şekil 3.7. Quanta 650 Field Emission SEM analiz cihazı ve teknik özellikleri	33
Şekil 4.1. Farklı katman yapılarında %50 yük seviyesinde nanopartikül takviyeli ve takviyesiz kompozit malzemelerin ortalama çevrim sayıları	36
Şekil 4.2. KM-1 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği	38
Şekil 4.3. KM-1 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği	40
Şekil 4.4. KM-2 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği	42
Şekil 4.5. KM-3 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği	44
Şekil 4.6. KM-3 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği	46
Şekil 4.7. KM-5 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği	48
Şekil 4.8. KM-5 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği	49
Şekil 4.9. KM-3 katman yapısında takviyesiz ve %1 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği	51
Şekil 4.10. KM-4 katman yapısında takviyesiz ve %3 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği	53
Şekil 4.11. KM-5 katman yapısında takviyesiz ve %0.5 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği	55
Şekil 4.12. Farklı katman yapılarında nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği	58

Şekil 4.13. Farklı katman yapılarında %0.5 Al ₂ O ₃ takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği.....	60
Şekil 4.14. Farklı katman yapılarında %1 Al ₂ O ₃ takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği	62
Şekil 4.15. Farklı katman yapılarında %3 Al ₂ O ₃ takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği	64
Şekil 4.16. Farklı katman yapılarında %0.5 CuO takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği	66
Şekil 4.17. Farklı katman yapılarında %1 CuO takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği	68
Şekil 4.18. Farklı katman yapılarında %3 CuO takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği	70
Şekil 4.19. Farklı katman yapılarında %0.5 MgO takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği.....	72
Şekil 4.20. Farklı katman yapılarında %1 MgO takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği	74
Şekil 4.21. Farklı katman yapılarında %3 MgO takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği	76
Şekil 4.22. KM-1 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği	78
Şekil 4.23. KM-2 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği	79
Şekil 4.24. KM-3 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği	81
Şekil 4.25. KM-4 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği	82
Şekil 4.26. KM-5 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği	84
Şekil 4.27. KM-1 katman yapısında %0.5 Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği.....	85
Şekil 4.28. KM-2 katman yapısında %0.5 Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği.....	86
Şekil 4.29. KM-3 katman yapısında %0.5 Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği.....	87
Şekil 4.30. KM-3 katman yapısında %1 Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği.....	88
Şekil 4.31. KM-3 katman yapısında %3 Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği.....	89
Şekil 4.32. KM-4 katman yapısında %0.5 Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği.....	90
Şekil 4.33. KM-5 katman yapısında %3 Al ₂ O ₃ , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği.....	91
Şekil 4.34. KM-1 katman yapısında nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	94

Şekil 4.35. KM-5 katman yapısında nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	96
Şekil 4.36. KM-1 katman yapısında %0.5 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	98
Şekil 4.37. KM-2 katman yapısında %1 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	101
Şekil 4.38. KM-1 katman yapısında %1 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	103
Şekil 4.39. KM-1 katman yapısında %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	105
Şekil 4.40. KM-1 katman yapısında %0.5 Al ₂ O ₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	107
Şekil 4.41. KM-2 katman yapısında %0.5 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	109
Şekil 4.42. KM-2 katman yapısında %1 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	111
Şekil 4.43. KM-2 katman yapısında %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	113
Şekil 4.44. KM-3 katman yapısında %3 Al ₂ O ₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	115
Şekil 4.45. KM-3 katman yapısında %0.5 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	117
Şekil 4.46. KM-3 katman yapısında %0.5 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	118
Şekil 4.47. KM-3 katman yapısında %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	120
Şekil 4.48. KM-3 katman yapısında %0.5 Al ₂ O ₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	122
Şekil 4.49. KM-3 katman yapısında %1 Al ₂ O ₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	124
Şekil 4.50. KM-3 katman yapısında %1 Al ₂ O ₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	125
Şekil 4.51. KM-4 katman yapısında %0.5 Al ₂ O ₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	127
Şekil 4.52. KM-5 katman yapısında %0.5 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	129
Şekil 4.53. KM-5 katman yapısında %1 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	131
Şekil 4.54. KM-5 katman yapısında %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	133
Şekil 4.55. KM-5 katman yapısında %0.5 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	135
Şekil 4.56. KM-5 katman yapısında %1 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri.....	137
Şekil 4.57. SEM analizi ile elde edilen Al ₂ O ₃ nanopartikül boyutları	140
Şekil 4.58. Al ₂ O ₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerde fiber yüzeyleri hasar mekanizmaları.....	140
Şekil 4.59. Al ₂ O ₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerde fiber hasar mekanizmaları.....	141

Şekil 4.60. Al ₂ O ₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerde fiber demetlerinin matris hasar mekanizmasına etkisi	142
Şekil 4.61. Al ₂ O ₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerde matris hasar mekanizmaları.....	144
Şekil 4.62. SEM analizi ile elde edilen CuO nanopartikül boyutları	146
Şekil 4.63. CuO nanopartikül takviyeli kompozit fiber yüzeyleri hasar mekanizmaları	147
Şekil 4.64. CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerde fiber hasar mekanizmaları.....	148
Şekil 4.65. CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerde matris hasar mekanizmaları.....	150
Şekil 4.66. SEM analizi ile elde edilen MgO nanopartikül boyutları.....	151
Şekil 4.67. MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerde fiber hasar mekanizmaları.....	152
Şekil 4.68. MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerde matris ve fiber hasar mekanizmaları.....	153
Şekil 4.69. MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerde matris hasar mekanizmaları.....	154

TABLolar LİSTESİ

Tablo	Sayfa
Tablo 1. Cam elyaf dokuma tip kumaşların kodları ve özellikleri.....	26
Tablo 2. Kompozit malzeme bileşenleri	26
Tablo 3. Üretilen kompozit malzeme katmanları.....	26
Tablo 4. Çekme numuneleri hasar yükleri	29
Tablo 5. Nanopartikül takviyeli dokuma tip kompozit malzeme hasar yükleri	31
Tablo 6. Nanopartikül takviyeli ve takviyesiz dokuma tip kompozit malzeme ortalama çevrim sayıları.....	35

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

Semboller

Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
CuO	: Bakır Oksit
MgO	: Magnezyum Oksit

Kısaltmalar

ASTM	: American Society for Texting and Material
CET	: Karbon/Epoksi Dokuma
DIC	: Dijital Görüntü Korelasyonu
GFRP	: Cam Elyaf Takviyeli Polimer
KM	: Kompozit Malzeme
MFC	: Mikro Fibrillenmiş Selüloz
P	: Düz Dokuma
R	: Gerilme Oranı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
T	: Açılı Dokuma
TSA	: Termoelastik Stres Analizi
XNBR	: Karboksillenmiş Nitril-bütadien Kauçuk
σ_{min}	: Malzemeye Etki Eden Minimum Gerilme (MPa)
σ_{max}	: Malzemeye Etki Eden Maksimum Gerilme (MPa)

1. GİRİŞ

Yorulma olayının malzeme içindeki birtakım kusurlar ve süreksizlikler sebebiyle oluştuğu ve malzemelerde yorulma hasarlarına yol açtığı bilinmektedir. Bu sebepten dolayı farklı parametrelerle üretilen dokuma kompozit malzemelerde mikro çatlakların oluşma ve yayılma ihtimali her zaman vardır. Dolayısıyla dokuma kompozit malzemelerin değişken yükler altında yorulma davranışlarının belirlenmesi, her zaman emniyetli bölgede çalışmak isteyen mühendisler açısından hayati önem taşımaktadır. Üretilen dokuma kompozit malzemelerin yorulma davranışları laboratuvar şartlarında uzun süreli testlerle incelenmelidir. Bu tez çalışmasının önemi, dokuma kompozit malzemelerde en iyi yorulma dayanımlarının tespit edilmesidir.

1.1. Kompozit Malzemeler

Kompozitler genel olarak iki ya da fazla mühendislik malzemesinin daha güçlü özellikler gösterecek şekilde birleşimiyle oluşan malzemelerdir. Farklı kompozit malzemelerin üretimiyle mukavemet, yorulma, aşınma ve korozyon dirençleri gibi birçok mekanik özellikler geliştirilebilir.

Kompozit malzemelerin kullanım alanları oldukça geniştir. Örnek verecek olursak makine, inşaat, taşıtlar, spor araç ve gereçleri, sağlık, uzay, konstrüksiyon şeklinde birçok sektörü sayabiliriz.

Kompozit malzemeler, matris ve fiber takviye elemanlarından oluşurlar.

Matris malzemenin temel görevleri aşağıda belirtilmiştir;

- Fiberlerin kompozit malzeme içinde sabit durmasını sağlayarak dağılmalarını engeller.
- Kompozit malzemeye uygulanan yüklerin fiberlere aktarılmasını sağlar.
- Kompozit malzemelerin şeklini oluşturur.
- Fiberleri çevresel ve dış etkilere muhafaza eder.

Takviye fazları (fiberler), genel olarak matris malzemelere kıyasla daha rijit ve mukavemetlidirler. Takviye elemanlarının en önemli özellikleri, kompozit malzemenin matris yapısına destek vermeleri, kompozit malzemelere uygulanan yüklerin büyük

yüzdesini taşımaları ve kompozit malzeme hacimlerini arttırmalarıdır. Matris malzemesine devamlı ya da dağınık olarak karıştırılabilen takviye elemanlarının kompozit malzeme içindeki formları, çeşitleri, yüzdesel ve hacimsel oranları, dağılımları ve yönleri gibi özellikleri kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkiler.

1.2. Dokuma Kompozit Malzemeler

Dokuma kompozit malzemeler endüstride çeşitli alanlarda özellikle iki boyutlu dokuma yöntemi ile üretilen kompozitlerde tercih edilirler. Dokuma tip kompozit malzemeler endüstride kompozit özellik taşımayan malzemelere kıyasla yüksek mekanik özellikler ve hafiflik gibi üstün performanslar sunarlar.

E-cam elyafları dokunarak üretilen cam dokuma fiber kumaşlar özellik olarak, iki-yönlü ve düz tip kumaşlardandır. Cam dokuma fiber kumaşlar kalıp malzemelere uyum sağlayarak kolay yatırılır, reçine ilavesi ile çabuk ıslanır, düşük oranlarda reçine tüketir ve düz yatırıldıklarında ve fiber yönlerinde kesilip kompozit malzeme üretiminde kullanıldıklarında çok üstün mekanik özellikler sergilerler. Bütün bu özellikler baz alındığında çok geniş kullanım alanlarına sahip olurlar. Cam dokuma fiber kumaşlar depolama tankerleri, kara, deniz ve hava taşıt ve parçaları, mobilyacılık ve sportif araç ve gereçler gibi sektörlerde kompozit malzeme imalatında özellikle elde yatırma, kalıpcılık gibi yöntemlerde sıklıkla kullanılırlar.

1.3. Nanopartiküller

Nanobilim ilk defa 1959'da Nobel Fizik Ödülü alan Richard Feynman'ın bilim felsefesiyle alakalı sunumu sırasında gündeme gelmiştir. Drexler ise 1986'da moleküler boyutlardaki nanoteknolojinin henüz o zamanlarda keşfedilmeyen yönlerini tartışmıştır. İlerleyen yıllarda nanoteknoloji alanındaki gelişmeler, bütün ihtiyaç duyulan teknolojik alanlarda yaşandığı gibi, insanlar ve çevre açısından önemli faydaları olduğu kadar zararlarının da olması beklenildiği fikirlerini gündeme getirmiştir. Son zamanlarda yaşanan bu alandaki hızlı gelişmeler nanoteknoloji ürünlerinin gündelik hayatımıza sıklıkla girmesine sebep olmuştur. Günümüz itibarıyla birçok çeşit nanoteknoloji ürünü her gün kullandığımız ürünler şeklinde yerlerini almıştır. Kir, leke tutmayan elbiseler ve örtüler, su tutmayan, ıslanmayan ve kirlenmeyen boyalar, hastalık teşhisi ve tedavisinde kullanılan ilaçlar ve bazı sağlık uygulamaları bunlara dahil edilebilir. Böylece nanoteknoloji alanındaki hızlı gelişmeler nanopartikül malzeme araştırmalarına ilgiyi arttırmıştır.

Boyutları 100 nanometreden (nm) küçük olan nanopartiküllerin, hacimsel yapıları malzemelerden farklı ve üstün mekanik özellikler sergiledikleri gözlemlenmiştir. Nanopartiküller, gösterdikleri yüksek mekanik özellikler sayesinde endüstride çeşitli sektörlerde kullanım alanlarına sahip olmuşlardır.

Nanopartiküller, üzerinde yürütülen çalışmalar sayesinde son zamanlarda başlı başına önemli bir inceleme alanı olma yolunda büyük gelişmeler göstermişlerdir. Nanoboyutlu malzeme şeklinde tanımlanan bu nanopartiküller farklı sınıflara ayrılırlar. Bunlardan bazıları nano boyutlarda tel, çubuk, tüp ve ince filmler olurken, bazıları ise nanokristaller olarak tanımlanırlar. Bu konular üzerinde artan araştırmaların en önemli sebebi nano boyutlu malzemelerin belirli boyutsal aralıklarda sıradışı mekanik özellikler ve işlevsellik göstermeleridir.

1.3.1. Metaloksit nanopartiküller

Metaloksit nanopartiküller, malzeme bilimine ait alanlarda çok önemli roller oynamaktadır. Metaller elementer düzeylerde çeşitli oksit bileşenleri meydana getirebilirler. Endüstriyel alanlarda, metaloksit nanopartiküller, mikro ve makro düzeyde devre ve sensörlerin, yakıt hücrelerinin ve bunlara ek olarak bazı yüzeylerin kaplamalarında ve katalizör imalatlarında kullanılırlar. Metaloksit nanopartiküller belirli limitlerde olan boyutlarıyla beraber, yüzey alanlarının yoğunluk fazlalığından kaynaklı mükemmel mekanik özellikler gösterebilirler.

Al_2O_3 nanopartikülleri yüksek sertliğe ve boyutsal stabiliteye sahiptirler. Tokluk, ısı yorulma ömrü, yoğunluk ve aşınma direnci gibi malzeme özelliklerini arttırmak için plastik ve seramik malzemelerde kullanılırlar. Ayrıca kesici alet imalatında, saflıkları yüksek olan ergitme potalarında ve fırın tüpü yapımında da kullanılırlar. Fiber kumaşlar dokunarak üretilen kompozit malzemelerde, kızılötesi emisyon sağlayan ve ısı yalıtım özelliği gösteren yüksek basınçlarda çalışabilen sodyum lambalarda takviye edilirler. Bunlara ilaveten, katalizör malzeme ya da taşıyıcısı şeklinde kullanılabilirler.

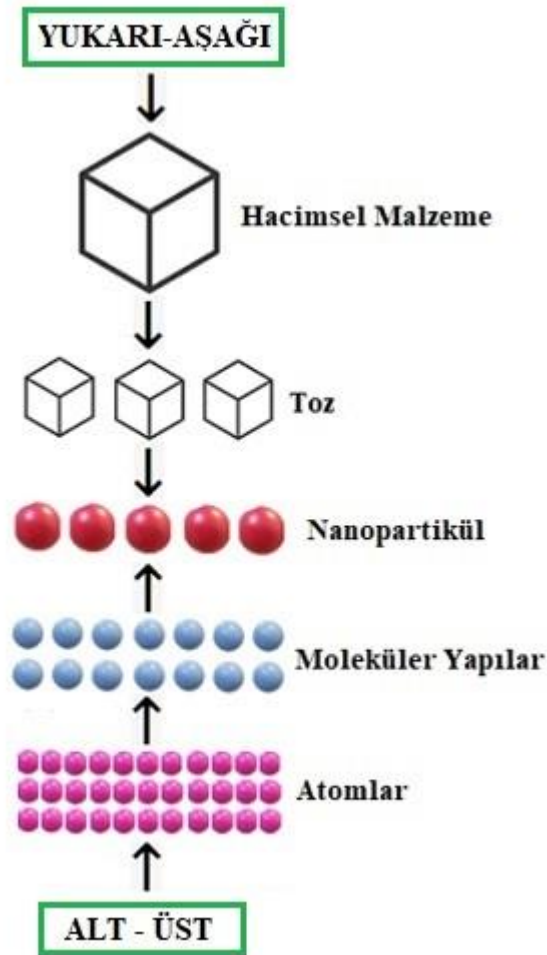
Nanoyapıdaki seramikler, yüksek ve düşük sıcaklıklarda iyi derecede ısı, kimyasal ve mekanik dayanım özelliklerine ve yüksek sertliğe sahiptirler. Sinterleme işlemlerine ve oksitlerle reaksiyona uyum sağlarlar. Nano boyutta olan bu seramik malzemeler, biyoteknoloji ve genetik gibi farklı alanlarda çalışan bilim adamlarının dikkatini çekmiştir.

CuO nanopartiküller, birçok sektörde geniş uygulama alanlarına sahiptir. Özellikle termoelektrik malzemelerde, süper iletken özellik gösteren malzemelerde, katalizör olarak kullanılacak malzemelerde, seramik malzemelerde ve cam esaslı malzemelerde uygulama alanları bulurlar. Roket yakıtlarında yanma katalizörü olarak kullanılırlar.

MgO nanopartiküller, katalizör, seramik malzemeler, elektronik devreler, kaplamalar ve petrokimya alanındaki ürünlerde geniş uygulama alanlarına sahiptirler. Yangın geciktirici malzeme olarak plastik ve elyaflara eklenip kullanılabilirler. MgO nanopartikülleri aynı zamanda iyi bir yalıtıcıdır. Yalıtım borusu, eritme potaları, elektrotlar ve levhaların üretimi için de kullanılırlar. Elektronik sektöründe MgO nanopartikülleri radyo endüstrisinde kullanılmaktadır. Yüksek frekanslarda hassasiyet göstermesi istenen manyetik çubuk antenleri, manyetik cihaz dolguları ve yalıtkan dolgular üretmek için ideal malzemelerdir. MgO nanopartikülleri bazı yakıtlarda katkı, temizleme malzemesi ve korozyon direncini arttırıcı malzeme olarak kullanılırlar.

1.3.2. Nanopartikül üretim yöntemleri

Literatür araştırmalarına bakıldığında, farklı şekiller ve boyutlarda olan nanopartiküllerin imalat aşamalarında birden fazla teknolojinin uygulandığını görmekteyiz. Nanopartikül imalatında temel yaklaşımlar ‘Yukarı-Aşağı’ ve ‘Alt-Üst’ olarak Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Nanopartikül üretiminde kullanılan yaklaşımlar

‘Yukarı-Aşağı’ imalat yönteminde, hacimli malzemelere bazı prosesler uygulanarak nanoyapıya indirgenmeleri sağlanır. ‘Yukarı-Aşağı’ imalat yöntemine örnek olarak mekanik ve yüksek enerjili yöntemler verilebilir.

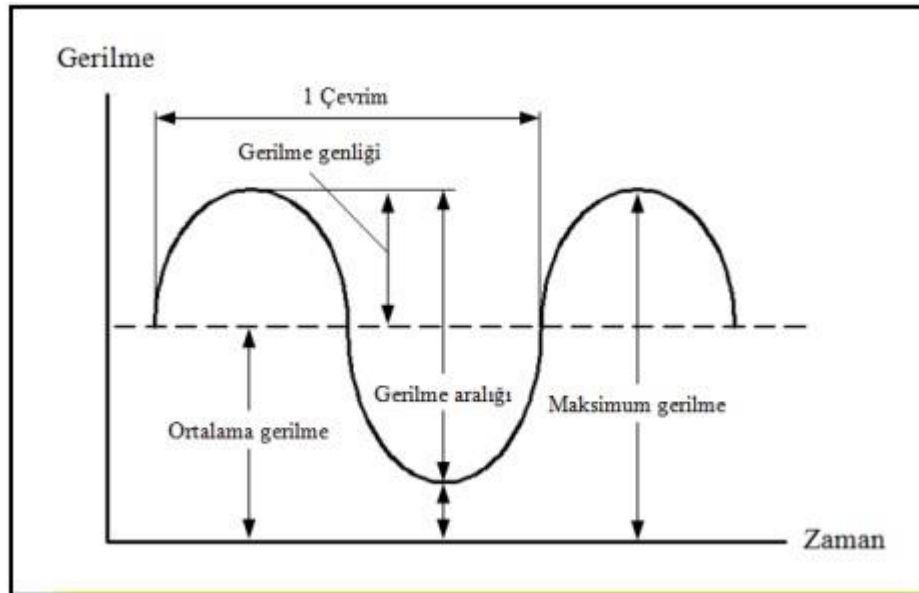
‘Alt-Üst’ imalat yönteminde, nanopartikül üretmek için bazı atom ve moleküllerin bir araya getirilmesi gerekmektedir. Bu üretim yöntemi reaksiyon fazıyla alakalı olarak üçe ayrılır. Bunlar sırasıyla katı, sıvı ve gaz faz metotları olarak adlandırılırlar.

1.4. Yorulma

Yorulma, dinamik ya da değişken yüklerle maruz makina eleman ve parçalarında meydana gelen bir hasar türüdür. Dinamik ya da değişken yükler altında, malzemelerin akma dayanımlarının çok altında maruz kaldığı gerilmelerde yorulmadan dolayı kopmaları mümkündür. Yorulma olayı sırasında dinamik ya da değişken yükler malzemeye uzun süre ve tekrarlı olarak etki ederler. Bu yükler sebebiyle zamanla malzemelerde çatlaklar oluşur. Daha sonra çatlaklar büyür ve malzeme koparak yorulma hasarına uğrar.

Malzemelerde yorulma ömürlerini tespit edebilmek için yorulma testleri laboratuvar ortamında yapılır. Malzemelere aynı genlikte değişken yükler uygulanırken gerilme oranı sabit tutulur. Gerilme oranı genellikle “R” ile gösterilir ve malzemeye etki eden en küçük gerilme değerinin en büyük gerilme değerine oranıdır. $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ şeklinde tanımlanır.

Yorulma testleri, genel olarak sinüs dalgası formunda yük uygulanarak yapılır. Sinüs formundaki dalgalar, seçilen frekanslarda tekrar eden ve belirlenen yorulma yükleri arasında gidip gelen dalga formlarıdır. Yorulma testlerinde genel olarak uygulanan sinüs dalgası formu Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Sinüs dalgası formu (Kılıç, 2008)

Yorulma deneyleri sonucunda malzemelerin yorulma ömürlerini gösteren S-N diyagramları elde edilir. Bu diyagramlar, uygulanan yorulma yüklerine karşı malzemelerin dayanabileceği çevrim sayılarını verirler.

Yorulma olayının safhaları üçe ayrılır:

1. Çatlak oluşumu

Gevrek malzeme içyapılarında mikro çatlaklar bulunmaktadır. Bu mikro çatlakların uçlarındaki gerilme yığılmaları yüksek seviyelerde olduğunda çatlaklar ilerleyerek malzemenin kopmasına sebep olur.

2. Çatlak ilerlemesi

Uygulanan yorulma yükleri, çatlakların büyümesi için yeterli olmuyorsa malzeme hasara uğramaz. Uygulanan yorulma yükleri çatlakları ilerletecek kadar büyüdüğünde çatlaklar ilerlemeye başlar. Çatlakların büyümesi ve malzemenin kopması süreçlerinde kırılma tokluğu önemli rol oynar.

3. Kırılma

Çatlaklar ilerledikçe malzemenin bazı bölgelerinde daralan kesitler uygulanan yorulma yükünü taşıyamayacak hale gelirse aniden malzeme kopar. Oluşan mekanik hasarların en büyük sebeplerinden biri olarak yorulma hasarları gösterilebilir.

1.4.1. Yorulmaya etki eden faktörler

1.4.1.1. Parça geometrisi

Birçok yükleme durumunda maksimum gerilmeler, yapıların veya yapıları meydana getiren parçaların yüzeyinde oluşur. Yorulmada hasara sebep olan çatlaklar, gerilme yığılmalarının meydana geldikleri alanlarda başladığından yorulma ömürleri yüzey durumuna ve kalitesine bağlıdır. Çentikler ya da geometrik süreksizlikler gerilme yığılmalarına yol açtıkları için çatlakların başlangıç bölgesi şeklinde davranış gösterebilirler. Parça tasarımlarında bulunan yivler, delikler, yuvalar ve dişler başlıca çatlak başlangıç bölgeleri olabilirler. Kaynaklar ve birleştirmeler geometrik süreksizlik oluşturarak gerilme yığılmalarına neden olurlar ve çatlakların başlamasında etkindirler. Malzeme kalınlıkları da yorulma ömürlerine etki eder.

1.4.1.2. Üretim süreci

Parça üretiminden sonra, yüzeylerde bulunan küçük çizikler, yivler şeklinde izler çentik etkisi yaparak parçanın yorulma ömrünü azaltır. Parlatma işleminde parça yüzey kalitesi iyileştirilerek yorulma ömürlerini artırma imkânı vardır. Üretim aşamasında uygulanan soğuk şekil verme tekniklerinde, meydana gelen tane yönlenmesi sebebiyle, malzemelerde yöne bağımlı özellikler ortaya çıkar. Aynı yönde uygulanan yorulma yüklerinde malzemelerin yorulma ömürleri daha fazla olur.

1.4.1.3. Yük dağılımı

Yorulma yükleri uygulanırken parçalar genelde değişken gerilmelere maruz kaldığından yapıların yorulma ömürlerini belirlemek için uygulanan yorulma testlerinde gerilme türü etkisi önemli rol oynar. Eksenel gerilme ve düzlemsel eğme gerilmesi uygulanan durumlarda yorulma ömürleri birbirine yakınsaklık gösterip, burma gerilmesi uygulanan durumlarda sonuçlar farklılık gösterirler. Aynı türde uygulanan gerilmelerde ortalama gerilme, genlik ve gerilme oranı etkileri önem kazanır. Ortalama gerilmeler arttıkça malzemenin belirli çevrim sayılarında mukavemet gösterebileceği gerilme genlikleri azalır. Gerilme oranları arttıkça malzemenin belirli çevrim sayılarında mukavemet gösterebileceği gerilim genliği azalır.

Yorulma deneylerinde frekansın sonuçlara etkisi kesin olarak bulunamamıştır. Fakat yorulma test cihazlarının büyük bir kısmında uygulanan 200-10.000 çevrim/dakika frekansların yorulma test sonuçlarını fazla değiştirmedeği öngörülmektedir. Düşük test hızlarında ise çevre etkisi fazla olacağından yorulma ömürlerinin azalacağı öngörülmektedir.

1.4.2. Yorulmaya karşı tasarım

Yorulmaya karşı tasarım prensipleri aşağıda verilmiştir:

1. Sonsuz Ömür Tasarımı: Bu tasarıma göre uygulanan gerilme yükleri malzemenin yorulma limitinin altında olduğunda bu tasarım türü kabul görür. Bu tasarım durumunda çatlaklar asla ilerlemez çatlaklar ilerlese bile önemli olmaz. Bu tasarımlara üniform yorulma yüklemelerinde milyonlarca tekrarlı yorulma yüküne maruz kalan makine parçalarında rastlanır.

2. Güvenli Ömür Tasarımı: Bu tasarıma göre parça veya yapıların yorulma ömürleri sınırlıdır. Yuvarlanmalı ve kaymalı yataklar bu tasarıma örnek olabilir. Bu parçalar tasarlanırken yorulma ömürleri bilinmektedir. Bu tasarıma göre malzemenin kullanımı boyunca sıfır hasar olayı olmalıdır. Emniyet katsayılarının çok büyük olması gerekmektedir. Köprü ve binalar bu tasarım yapılarına örnek olabilir.

3. Emniyetli Hasar Tasarımı: Bu tasarım şekli özellikle uçak ve uzay sektörleri için geliştirilmiştir. Çünkü bu sektörlerde amaç can güvenliğinden taviz vermeden çok yüksek emniyet katsayılı yüklerden kaçınmaktır. Bu tasarımda asıl hedef muhtemel hasarları tespit ederek bütün yapının hasara uğramadan tamir edilmesi ve kullanıma devam edilmesidir. Bu tasarımda düzenli kontroller şarttır. Düzenli kontrollerle kritik bölgelerde oluşan çatlakların yayılmasına izin verilmemelidir.

4. Hasara Toleranslı Tasarım: Bu tasarımla beraber daha da ileri gidilmiştir. Çatlakların düzenli kontroller sonucunda tespit edilmesinden önce hasarların başlayacağı prensibi esas alınır. Ayrıca bu tasarım türünde kırılma mekaniği prensipleri de uygulanır.

Yorulmaya karşı tasarım, makine mühendisliği ve malzeme biliminde eğitim ve deneyimli bir mühendisliği gerektirir. Ayrıca makine parçalarında yorulmaya karşı tasarım aşağıdaki üç temel bakış açısına ihtiyaç duyar.

1. Parçaya gelen gerilmeyi yorulma limitinin altında tutmak (sonsuz ömür kavramı).

2. Parçaları belirli bir ömre göre tasarlayıp, bu süre sonunda parçanın yenisi ile değişmesini öngörmek (sınırlı ömür veya emniyetli ömür kavramı).

3. Kritik parçaları periyodik olarak kontrol ettirerek çatlağın kritik uzunluğu aşması durumunda o parçanın değişmesini sağlamak.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kompozitleri kısaca tarif etmek gerekirse, iki ya da daha fazla malzemenin güçlü özellikler göstermek için birleştirilmesiyle üretilen mühendislik malzemeleri şeklinde tanımlayabiliriz. Dokuma kompozit malzemelerin de önemi giderek artmış ve birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Endüstride yaygın olarak kullanılan dokuma kompozit malzemeler sadece statik yüklere maruz kalmazlar. Bu kompozit malzemelerin büyük çoğunluğu değişken ve tekrarlı yüklere maruz kalırlar. Sonuç olarak bu yükler kompozit malzeme içerisinde gerilmelere sebep olmakta ve bu gerilmelerden kaynaklanan yorulma hasarları ile kompozit malzemelerin kırıldığı bilinmektedir.

Singh ve arkadaşları (2021), farklı açılı dokuma cam elyaf takviyeli polimer kompozit laminatların yorulma davranışlarını ve bağlantı bölgelerinde başlayan hasarlar ile hasar gelişimlerini incelemişlerdir. Gerilme-gerinim eğrisi, wöhler eğrisi, delaminasyon büyümesi, toplam dağılan enerji, dinamik modül ve sürünme gerinimi gibi verileri sunmuşlardır. Sonuç olarak uygulanan yüke göre, yüksek açılı kompozit laminatlarda gerinim kayması ve histerezis alanların daha belirgin olduğunu gözlemlemişlerdir.

Zamani ve arkadaşları (2021), ticari amaçlarla üretilen yapıştırıcıları incelemişlerdir. Ticari amaçlarla üretilen yapıştırıcıların genel olarak farklı boyutlarda ve farklı mineral parçacıkları içerdiklerini bulmuşlardır. Buna ek olarak, çatlakların çoğu parçacıkların keskin kenarlarında başlamaktadır. Ayrıca, ticari yapıştırıcılarda, dolgu nanopartiküllerinin epoksi malzemedan ayrılması ortak bir hasar mekanizması olarak düşünülebilir.

Longbiao Li (2021), fiber takviyeli seramik matrisli kompozitlerin mikromekanik çekme-basma yorulması histerezis döngülerini belirleyebilmek için bir model geliştirmiştir. Sonuç olarak çekme yorulması tepe gerilimi arttığında, çekme-basma histerezis döngülerinin yorulma tepe gerilimi, ara yüzey bağlarının ayrılma oranı ve yeniden yükleme üzerine geçiş gerilimi arttığını ve matris çatlak kapanma gerilimi, basma geçiş gerilimi ve tam basma gerilimi azaldığını gözlemlemiştir. Buna ek olarak arayüz bağ çözme enerjisi arttığında, çekme-basma histerezis döngülerinin yorulma tepe gerilimi, ara yüzey bağ çözme oranı ve yeniden yükleme üzerine geçiş gerilimi azaldığını ve boşaltma üzerindeki geçiş gerilimi, matris çatlak kapanma gerilimi, basma geçiş gerilimi ve tam basma gerilim artışlarını da gözlemlemişlerdir.

Alam ve arkadaşları (2020), biri $\text{CaCO}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-TiO}_2$ ve diğeri $\text{CaCO}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CuO}$ olmak üzere dört farklı tip dolgu malzemesi ile güçlendirilmiş, farklı ağırlık oranlarında TiO_2 ve CuO ile takviye edilmiş dokuma cam elyaf ve epoksi içeren iki farklı tipte kompozit malzeme kullanmışlardır. Matriks, dolgu partikülleri ve arayüz moleküllerinin esnekliği arasındaki yapışmanın gücünün, ek enerjinin dağılmasına neden olduğunu, böylece CuO dolgu malzemeleri içeren kompozitlerde daha yüksek verimlilikle erken çatlak oluşumlarının önüne geçildiğini keşfetmişlerdir. Malzemelerin morfolojisini görselleştirmek, dağılım verimliliğini (dolgu malzemelerinin düzgün dağılımı) anlamak ve cam elyafın sürekliliğini belirlemek için ürettikleri kompozit malzemelerin SEM analizlerini yapmışlardır. Hazırlanan kompozitler arasında mikroyapı ve numune hacmindeki dolgu maddelerinin dağılımında önemli farklılıklar görülmüştür. Kompozit malzeme içerisine eklenen TiO_2 ve CuO partiküllerinin malzeme hacmi boyunca homojen olarak dağıldığını ve cam elyafların sürekliliğini göstermişlerdir. CuO partikülleri ile takviyelendirilen kompozit malzemelerin mikro yapısında önemli değişiklikler gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak CuO ile üretilen kompozit malzemelerde, TiO_2 ile üretilen kompozit malzemelere göre fiber, matris ve dolgu maddeleri arasında iyi bir yapışma sağlandığı SEM görüntülerinde açıkça belli olmaktadır.

Maragoni ve arkadaşları (2020), farklı alan ağırlıklarına sahip iki dokuma karbon/epoksi laminat kompozit malzemeyi, ($R=-1$) ve ($R=-\infty$) yük oranlarında yorulma yüklemeleri altında test etmişlerdir. Mikro ölçekte hasar gelişimini belirlemek için yorulma testleri sırasında düzenli aralıklarla mikroskopik gözlemler yapılmıştır. Sonuç olarak fiber demeti dalgalanmalarının, hem çekme-basma hem de basma-basma yüklemeleri için laminatların hasar mekanizmaları ve yorulma ömrü üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu ve sertlik kaybının son kırılmaya kadar küçük kaldığını gözlemlemişlerdir.

Yadav ve Thapa (2020), dokuma cam kumaş kompozit malzeme ile ilgili gerinim tabanlı teorik yorulma hasarı modeli geliştirmişlerdir. Modeli doğrulamak için farklı literatürlere ait çekme yorulma testinden elde edilen araştırma verilerini kullanmışlar ve sonuç olarak, modelin dokuma cam kumaş epoksi kompozit malzemenin gerinim bazlı teorik yorulma hasarını tanımlayabildiğini ispatlamışlardır.

Xi ve arkadaşları (2020), UV ve termal kürleme altında 2D&3D dokuma kompozit yama ile birleştirilerek tamir edilmiş alüminyum alaşımlı plakaların yorulma performanslarını değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak, tamir edilmemiş sisteme göre yorulma performanslarının arttığını gözlemlemişlerdir. Tamir edilen numuneler, çatlak yayılma yolundaki değişikliklere ve farklı onarım sistemlerinin stres dağılımına uygun olarak çeşitli kırık morfolojileri göstermiştir. Kompozit malzemelerin kırılma yüzeyleri, optimum onarım etkisi veren sünek kırılma özelliklerini ortaya çıkarmıştır.

Saraç ve arkadaşları (2018), farklı parçacıklar içeren epoksi yapıştırıcı ile bağlanan yapıştırıcı bağlantıların statik ve yorulma dayanımlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Yorulma testleri 10 Hz frekansında ve ($R=0.1$) yükleme oranında yapılmıştır. Sonuç olarak yapıştırıcıya nano- Al_2O_3 ve nano- SiO_2 takviyesi, yapıştırıcı bağlantı noktalarının yorulma dayanımını arttırdığını, nano- TiO_2 takviyesi ise yapıştırıcı bağlantıların yorulma dayanımını azalttığını gözlemlemişlerdir.

Naseri ve arkadaşları (2017), Nano- CuO içeren polipropilen elyaf takviyeli kendiliğinden yerleşen kompozitlerin mekanik özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak beton matris içine CuO nanopartikül takviyesinin gözenek yapılarını sağlamlaştırdığını ve çatlaklar arasında köprü kurarak beton matrisinin mekanik özelliklerini arttırdığını tespit etmişlerdir.

Kumar ve arkadaşları (2017), SiC ve MgO ile güçlendirilmiş AA430 alüminyum malzemesinin mekanik ve aşınma özelliklerini araştırmışlardır. SiC ve MgO nanopartiküllerini %2.5, %5 ve %7.5 oranlarında matris içine ekleyerek deneyler yapmışlardır. SiC ve MgO nanopartikül yüzdeleri arttıkça, artan bir sertlik ve çekme dayanımı eğilimi ile karşılaşmışlardır.

Adam ve Horst (2017), çok yüksek devirli yorulma yükü altında (çevrim sayısı 10^7 'den fazla) test edilen bir cam elyaf takviyeli polimer açılı-katlı laminatın yorulma hasarı ve yorulma limitlerini incelemişlerdir. Sonuç olarak çok düşük yüklerde hafif kenar katman ayrımları numune genişliği boyunca yayılmadığı ve delaminasyon daha az ilerlediği için, beklenen aralıkta hasar oluşmadığı görülmüştür.

Longbiao (2017), farklı iki boyutlu elyaf takviyeli seramik-matris kompozit malzemelerin oda koşullarında ve yükseltilmiş sıcaklıklarda hasar gelişimini ve ömür tahminlerini incelemiştir. Ayrıca yorulma histerezisinin evrimini, kompozit malzeme tarafından absorbe edilen enerji miktarlarını ve arayüz kayma gerilmesi ile döngü sayısı

eğrilerini karşılaştırarak analiz etmiştir. Yorulma ömrünü tahmin ederek, S-N eğrilerini ve çevrim sayılarına bağlı oluşan elyaf kırıklarını gözlemlemiştir. Sonuç olarak iki boyutlu C/SiC kompozit malzemeler için, bozunum/yükselme hızı enerji tüketimi ve aradaki kayma gerilmesinin bozunma hızı, 550°C'de oda sıcaklığındaki bozunma hızından daha yüksek olduğunu tespit etmiştir.

Song ve arkadaşları (2017), yorulma özelliklerini ve ilgili hasar mekanizmasını araştırmak için dokuma kompozitler üzerinde çevre sıcaklığında ve ortam sıcaklığında olmayan bir sıcaklıkta yorulma testleri gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, ortam sıcaklığında olmayan bu malzemenin yorulma ömründe ani bir artışla beraber, artık kuvvette var olan anormal bir davranış göstermiştir. Ayrıca, test verilerine göre, sıcaklık dikkate alındığında yorulma ömrü ve kalıcı rijitlik modelleri oluşturulmuştur.

Saxena ve arkadaşları (2017), çekme-basma yorulma çatlak büyüme testi için tek kenarlı çatlak gerilme numuneleri üzerinde çalışmışlardır. Sonuç olarak deneylerin, numunenin yüksekliği (2H) - genişlik (W) oranına duyarlı olduğunu gözlemlemiştir.

Rama ve arkadaşları (2017), karıştırma tekniği kullanılarak üretilen Al₂O₃ / Al₂O₃ partikül nano kompozitlerin yorulma ömrünü incelemiştir. Sonuç olarak Al₂O₃ ve Al₂O₃ malzemeler için S-N eğrisi arasındaki karşılaştırmalarda, kompozit malzemelerde yorulma davranışının Al₂O₃ matris materyalinden biraz daha üstün olduğunu belirtmişlerdir.

Lanser ve arkadaşları (2016), yüksek sıcaklıklarda bir oksit / oksit seramik kompozitin çekme-çekme yorulmasını araştırmışlardır. Ayrıca bileşik mikroyapı gibi hasar ve arıza mekanizmalarını da incelemiştir. Sonuç olarak bütün yorulma hasarlarının yorulma döngüsünün basma kısmında oluştuğunu keşfetmişlerdir.

Zhou ve arkadaşları (2016), gerilme ve basmada tek aşırı yükün kısa çatlakların yorulma çatlaması yayılım davranışına etkisini araştırmışlardır. Gerilme aşırı yüklemesinden sonra, çatlak yayılımına karşı malzeme direncinin önemli ölçüde arttığını gözlemlemiştir.

Turner ve arkadaşları (2016), düzlemsel basma-çekme ve düzlem dışı eğilme altında üç boyutlu ortogonal dokunmuş karbon fiber kompozitlerin hasara uğramasını iki farklı dokuma fiber mimarisi oluşturarak araştırmışlardır. Yorulma ile hasar gören yüzeyleri tarama elektron mikroskobu (SEM) ile incelemiştir. Sonuç olarak üç boyutlu

dokuma kompozitlerin takviyesi uzun dirsekli bükme testleriyle delaminasyonu engellediğini ve kısa kiriş testleriyle pik sonrası tepkisine sınırlayıcı değişiklikler getirdiğini belirtmişlerdir.

Mostafa ve arkadaşları (2016), dokuma E-cam / polyester kompozitleri, farklı eksenli kumaş öngerilme seviyeleri ile hazırlamışlardır. Sonuç olarak S-N grafikleri, orta ve düşük gerilimli bölgelerdeki kompozitlerin yorulma ömrünü uzatmak için kumaş öngerilme yönteminin kullanılabileceğini göstermiştir.

Stegschuster ve arkadaşları (2016), ince kesitli üç boyutlu dokuma kompozit malzemelerin delaminasyon kırılma dayanıklılığı ve yorulma mukavemetini deneysel olarak belirlemek için bir araştırma yapmışlardır. Deneysel testler, kırılma tokluğunun ve yorulma direncinin z-bağlayıcıların hacim içeriğiyle kademeli olarak arttığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, dik açılı z-birleştirici ipliklerin delaminasyon çatlağını köprülemesine neden olduğunu ve kayma geriliminde başarısız olduğunu tespit etmişlerdir.

Malpot ve arkadaşları (2016), dokuma cam elyaf takviyeli poliamid 6,6 kompozitin yorulma ömrü üzerindeki nem koşullarının etkisini araştırmıştır. Yorulma testleri başlangıç sonuçlarını destekler nitelikte olup, düşük stres için nem etkisinin azalma eğiliminde olduğunu teyit etmiştir. Buna ek olarak, bu çalışma herhangi bir nem içeriği ve lif oryantasyonu için bu malzemenin yorulma ömrünü doğru bir şekilde tahmin etmek için geliştirilmiş bir yorulma ömrü modeli önermektedir.

Xu ve arkadaşları (2016), iki tip örgü karbon / epoksi kompozit malzemenin çekme-çekme yorulma özelliklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Yorulma yükü / yüklenme çevrimi sayısını, dijital görüntü korelasyon (DIC) yardımıyla hesaplamışlardır. Çekme-çekme yorulma testleri, 18°C sıcaklığa sahip klimalı bir odada ve 3 Hz frekansında gerçekleştirilmiştir. Yükleme sıklığı, uç sekmelerin yakınında oluşan arızayı önlemek için 3 Hz'den daha az veya eşit olmalıdır. %75 yorulma sıklığı altında ise 3 Hz frekansında çalışılabilir. Statik mukavemetin %70, %75, %80 ve %85'i olmak üzere dört yükleme seviyesi önceden tanımlanmıştır. Sonuç olarak CET12K, CET3K'ya kıyasla daha yüksek (%18 daha yüksek) yorulma mukavemetlerine ve statik mukavemetine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca katastrofik başarısızlıktan hemen önce CET12K modülü saf modülün %75'ine düşmüştür ve CET3K için bu değerin %85 olduğu görülmüştür.

Yu ve arkadaşları (2016), çekme-çekme yüklemesine maruz kalmış üç boyutlu dokuma cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin yorulma testleri uygulanırken oluşan hasarları incelemişlerdir. Sonuç olarak yorulma ömrünün yarısında, çapraz çatlakların sayısının bağlayıcı iplikler ve ara yüzey boyunca yayılan çatlaklarla birlikte arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca bu çalışma ile hasarın eşit olarak dağıldığını, kompozit birim hücre ile ilişkilendirilebilen bir periyodikliğe sahip olduğu gösterilmiştir.

Carvelli ve arkadaşları (2016), selüloz mikrofibriller ve kauçuk nanopartiküller ile modifiye edilmiş karbon düz örgü tekstil takviyeli epoksi liflerinin yorulma ve izod darbe performansını araştırmışlardır. Sonuç olarak MFC (mikro fibrillenmiş selüloz) ve XNBR (karboksillenmiş nitril-bütadien kauçuk) içeriği yüksek olan hibrid matrisli kompozitler için sadece MFC'ye sahip kompozitlerde daha hızlı bir yorulma ömrü azalması gözlemlenmiştir.

Rajaneesh ve arkadaşları (2016), dokuma laminatların üç nokta eğilme yorulması altında uzun çevrimlerde ömür tahminlerini araştırmışlardır. S-N eğrilerinin farklı sıcaklıklarda oluşturulması için bir dizi yorulma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak varsayılan test parametrelerinde öngörülen yorulma davranışı, deney verileri ile uyumlu bulunmuştur.

Blackman ve arkadaşları (2016), ZnO nanopartikül takviyeli termoplastiklerin yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Sonuçta ZnO nano çubuklarının eklenmesiyle yorulma eşiğinin belirgin şekilde arttığını gözlemlemişlerdir.

Kothmann ve arkadaşları (2015), nano-SiO₂'nin bir anhidritle işleme alınmış epoksi reçinesinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini, yorulma çatlak ilerlemesi davranışı üzerinde özel bir dikkatle incelemişlerdir. Sonuç olarak yorulma çatlak ilerleme davranışı, üç yorgunluk çatlak yayılma rejiminin hepsinde de iyileştiğini belirtmişlerdir.

Olave ve arkadaşları (2015), mod I dokuma laminatların yorulma kırılma tokluğuna etkisini incelemişlerdir. Yorulma delaminasyonunun başlangıcı ve büyüme modunu, farklı bir çekme boyutuna sahip iki karbon fiber-epoksi takviyeli dokuma laminatlar için değerlendirmişlerdir. Çatlak yüzeyindeki tabakalara üç farklı iç içe geçme / kaydırma konfigürasyonu uygulamışlardır. Sonuç olarak çatlak cephesinde daha yüksek matris yüzdesi yorulmanın başlamasını geciktirebileceğini görmüşlerdir.

Montesano ve arkadaşları (2015), kritik hasar durumlarını değerlendirmek ve gelişen hasar süreçlerini, tek eksenli düzlem içi gerilimli yarı-statik ve yorulma yüklemesine tabi tutulan karbon elyaf / epoksi kompozit dokumalarını gözlemlemek için kızılötesi termografi kullanmayı amaçlamışlardır. Sonuç olarak yarı statik test sonuçlarında, baskın hasar mekanizmalarının atkı iplikleri içerisinde bulunduğunu, termal olarak tespit edilen malzeme termoelastik sınırdan başlatılan ve SEM gözlemleri ile doğrulanan matris çatlakları olduğunu keşfetmişlerdir.

Li ve arkadaşları (2015), üç boyutlu çok eksenli çözgülu örme kompozit malzemelerin yorulma davranışı ve hasar mekanizması üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır ve yorulma hasarını ve hasar mekanizmasını anlamak için makroskopik kırık morfolojisi ve SEM mikrograflarını incelemişlerdir. Sonuç olarak yorulma özelliklerini ve kompozit malzemelerin hasar mekanizmasının, fiber mimarisi ve malzeme boyutu tarafından önemli ölçüde etkilenebileceğini gözlemlemişlerdir. Küçük fiber yönlendirme açısına sahip A malzemesinin yorulma ömrü, malzeme B'nin ömründen oldukça uzun olduğunu ve malzeme A için, uzun kompozitin yorulma özellikleri kısa parçanın yorulma özelliklerinden daha fazla olduğunu da tespit etmişlerdir.

Bradley ve arkadaşları (2015), yorulma yükü altında kenetlenen ve modifiye edilmiş tabakalı üç boyutlu dokuma kompozitlerin hasar mekanizmalarını detaylı olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak açılı kilidi örneği, çapraz çatlakların atkı iplikleri içinde çok eşit dağılım gösterdiğini ve modifiye katman çekme örneğinden daha yüksek bir çatlak yoğunluğu gösterdiğini gözlemlemişlerdir.

Malpot ve arkadaşları (2015), poliamid 6,6 reçinesi ile cam elyaf takviyeli dokuma kompozit bir malzemenin gerilme direnci yorulma davranışı üzerine odaklanmışlardır. Bütün S-N eğrileri, ($R=0.1$) stres oranında oluşturulmuştur. Yorulma testleri, maksimum sıcaklık ve kümülatif olay sayısını belirlemek için kızılötesi kamera ve akustik emisyon izleme kullanılarak çoklu enstrümantasyona tabi tutulmuştur. Son olarak, yorulma testleri esnasında kompozit içinde oluşan hasar mekanizmalarını saptamak için SEM analizleri yapılmıştır.

Dai ve arkadaşları (2015), ortogonal ve açılı kilitlemeli üç boyutlu dokuma karbon / epoksi kompozitin açık delikli yarı statik çekme ve çekme-çekme yorulma davranışı üzerine kapsamlı bir çalışma sunmuşlardır. Yorulma numunelerine, nihai arıza gerilmesinin yaklaşık %60'ında maksimum stres yüklenmiştir ve 5.000.000 çevrimden sonra tam kırılma meydana gelmemiştir. Artık yorulma mukavemetinin, her iki örgü de yarı-statik gerilme mukavemetine benzer olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca yorulma yüklemesi sırasında yüzey çatlak başlatma ve ilerleme, termoelastik stres analizi kullanılarak tespit edilmiştir.

Vieille ve Albouy (2015), yüksek sıcaklıkta çentikli dokuma katlı termoplastik ve termoset laminatlarda yorulma hasarı birikimlerinin matris süneklik ve yorulma ömrü üzerine etkilerini araştırmışlardır. Hasar mekanizmaları ve deliğin yakınında aşırı gerilimleri, X-ışınları gözlemleri ve fraktürografi analizi ile tartışmışlardır. Sonuç olarak çentikli ve epoksi esaslı laminatlarda gözlenen hasar mekanizmaları, deliğin yakınındaki aşırı gerilmelerin spesifik olarak yeniden dağıtılması ile ilişkili olduğu gözlemlenmiştir.

Wang ve arkadaşları (2014), üç noktalı düşük devirli bükülme altında üç boyutlu ortogonal örgülü kompozitler için yorulma davranışında bir hesaplama şeması rapor etmek istemişlerdir. Üç nokta döngülü bükülme yorulma testlerine dayanarak, yorulma davranışlarını tahmin etmek için bir mikro yapı modeli oluşturmuşlardır. Sonuç olarak, stres yoğunlaşma alanı merkezi yükleme alanına, özellikle de çözgü ipliklerinde Z-ipliklerinin yanına ve kanallarına yakın konumda bulunmuştur.

Albouy ve arkadaşları (2014), yarı izotropik dokuma katlı termoplastik ve termoset laminatların yüksek sıcaklık yorulma davranışı üzerine matris sünekliğinin etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak hasarların, 45 derecedeki birkaç uzunlamasına ve enine iplik içi çatlaktan oluştuğunu, bu hasarların birkaç iç ve kat arası çatlaklarda birleştiğini ve numunenin kenarlarında bazı delaminasyon izleri bıraktığını tespit etmişlerdir.

Ishbir ve arkadaşları (2014), yorulma yüküne tabi tutulmuş çok yönlü dokuma kompozit numunelerinde delaminasyon yayılımını incelemişlerdir. Sonuç olarak incelenen ara yüzün kırılma tokluğu ve delaminasyon büyüme oranı verileri, kompozit malzemeyi içeren bir bileşenin yorulma ömrünün tahmin edilmesinde kullanılabildiğini bulmuşlardır. Buna ek olarak, bir delaminasyonun kritik uzunluğa ulaşmadan keşfedilmesi ve onarılması için denetim aralıkları oluşturulabilir kanaatine varmışlardır.

Shao ve arkadaşları (2014), düz dokuma karbon kumaş vinilester kompozitlerde matris özelliklerinin yorulma hasarının başlatılması ve büyümesine etkisini araştırmışlardır. TSA (termoelastik stres analizi) ve SEM (taramalı elektron mikroskopisi) gözlemlerine dayanarak, yorulmanın başlangıç aşamasında ürettikleri kompozit malzemelerde matris kırılma tokluğunun matris çatlaklarının başlamasına ve büyümesine olanak sağladığını belirtmişlerdir.

Lei ve arkadaşları (2014), iki eksenli çekme-basma yorulma yükleme koşulları altında iki eksenli ortalama gerilmenin kritik düzlem yönelimi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak çatlak başlatma düzlemleri ile uygulanan iki eksenli stres düzlemi arasındaki öngörülen kesişimlerin çok yönlü olduğu ve çift eksenli artık gerilmelerin, yüksek çevrimli termal yorulma çatlama yönlerine güçlü etkiler getirdiğini gözlemlemişlerdir.

Wang ve arkadaşları (2014), düşük devirli yorulma esnasında tek kristal nikel bazlı süper alaşım malzemelerinin çekme / basma asimetrisini çalışmışlardır. Sonuç olarak nikel esaslı süper alaşımın düşük devirsel yorulmasının döngüsel tepkisini doğru bir şekilde temsil edebilen viskoz yapısal formülasyon geliştirmişlerdir.

Jones ve arkadaşları (2013), çok katlı bir matris içeren oksit dışı seramik kompozit malzemenin çekme-basma yorulma davranışını 1200°C'de laboratuvar havasında ve buharda araştırmışlardır. Çekme-basma yorulma davranışlarını, 80 MPa'dan 200 MPa'a kadar olan yorulma gerilmeleri için 1.0 Hz'lik bir frekansta incelemişlerdir. Sonuç olarak kompozit malzemelerin hava ve buharlı ortamlarda 1200°C'de hasar görmesi ve bozulması oksitlenme zayıflamasından kaynaklandığını gözlemlemişlerdir.

Li ve arkadaşları (2013), kaba taneli bakırın yorulma hasarı ve kırılma davranışlarını, çevrimsel çekme-basma ve burulma yükleri altında araştırmışlardır. Ayrıca iki yorulma testi arasında kaba taneli bakırın çevrimsel stres tepkisi ve yer değiştirme şekilleri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak farklı çevrimsel torsiyon gerinim amplitüdleri altında, kaba taneli bakır belli bir gerinim sertleştirme davranışı sergilemekte olduğunu ve eşdeğer etkili normal gerinim amplitütlerinde hem çevrimsel stres tepki eğrisi hem de burulma yorulmasının sertleşme oranı, çekme-basma yorulmasından daha düşük olduğunu da görmüşlerdir.

Daggumati ve arkadaşları (2013), 5-katman saten dokuma karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin yorulma ve yorulma sonrası çekme-çekme davranışını incelemişlerdir ve boyuna gerininin gelişimi ve kompozit numunenin boyuna sertliği, çevrimsel yükleme işlemi boyunca izlenmiştir. Sonuç olarak daha yüksek yorulma stres seviyelerinin uygulanmasıyla, ASTM standardına göre hazırlanan test numunelerinin hasara uğradıklarını gözlemlemişlerdir.

Takeda ve arkadaşları (2013), karışık mod II / III yükleme koşullarında kriyojenik sıcaklıklarda dokuma cam / epoksi kompozit laminatlarda yorulma delaminasyon artışını incelemişlerdir. Yorulma delaminasyon büyüme mekanizmaları numune kırılma yüzeyleri SEM cihazı gözlemleri ile karakterize edilmiştir. Sonuç olarak kriyojenik sıcaklıklarda yorulma delaminasyonuna karşı direnç oda sıcaklığında olduğundan daha yüksek olduğunu ve kırılma yüzeylerinde matris sıkışmalarının varlığını tespit etmişlerdir.

Jin ve arkadaşları (2013), üç boyutlu açılı-interlok dokuma kompozit malzemelerin çekme-çekme yorulma davranışını, akustik yayma tekniği kullanarak araştırmışlardır. Tüm çözgü ve atkı ipliklerini cam elyaftan üretmişlerdir. Yarı statik gerilme ve yorulma testleri, INSTRON 8501 sistemi üzerinde 1 mm / dak hızında gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak hasar indeksi ve uzatma eğrileri, yorulma yüklemesi sırasında üç farklı aşamada yük taşıyıcı kabiliyette aşamalı bozulma göstermiştir.

Narasimhachary ve arkadaşları (2012), çekme-basma yorulma çatlak büyümesi testi için çift kenarlı çentik numunesi tasarımı yapmışlardır. Sonuç olarak bu araştırmalar, profil uzunluğunun, gerilme yoğunluğu ve yer değiştirmeler üzerine kuvvetli bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur.

Devendra ve Rangaswamy (2012), değişik oranlarda alüminyum oksit (Al_2O_3), magnezyum hidroksit ($Mg(OH)_2$) ve silisyum karbür (SiC) ile doldurulmuş E-cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Sonuç olarak %10 $Mg(OH)_2$ ile doldurulmuş kompozit malzemelerin, maksimum nihai gerilme mukavemetini ve SiC dolgulu kompozit malzemelerin, maksimum darbe mukavemeti, eğilme mukavemeti ve sertlik sergilediğini belirtmişlerdir.

Chawla ve arkadaşları (2012), fiber dokusunun yönlenmesinin iki boyutlu dokuma seramik matris bileşiklerinin eğilme ve yorulma davranışı üzerine etkisini incelemişlerdir. Eğilme yorulma testleri 0.33 Hz frekansta üçgen bir dalga formu kullanılarak yük kontrolünde yapılmıştır. Sonuç olarak S-N eğrileri, yatay yöndeki kesme deformasyonuna karşı daha büyük direnç nedeniyle, enine yönlenen fiber örneklerin daha mukavemetli olduğunu gözlemlemişlerdir.

Karahan ve arkadaşları (2011), kıvrımsız üç boyutlu ortogonal dokuma kumaş ile güçlendirilmiş karbon / epoksi kompozit malzemelerin yorulma gerilimi davranışını incelemişlerdir. Bu çalışma ön-yorulma yarı statik test verilerini, yorulma ömür diyagramlarını, yorulma hasar progresyonunu ve çözgü ve atkı yönlü yükleme durumları için yorulma sonrası kuasistatik test verilerini içermektedir. Sonuç olarak hasar görmeden en az 3.000.000 çevrim yorulma ömrüne karşılık gelen maksimum döngüsel gerilimin her iki yükleme yönü için de 412-450 MPa aralığında olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca yorulma yüklemesinin erken safhasında gözlemlenen hasar gelişimi, fiber demetlerinde çapraz çatlaklar, yük demetine çapraz lif demetleri yüzeyinde sınır kopuk çatlakları ve numune yüzeylerine paralel yerel kopuk çatlaklarının bir kombinasyonu şeklinde oluştuğunu da farketmişlerdir.

Bizeul ve arkadaşları (2011), ince çentikli dokuma cam kompozitlerde yorulma yükü altında yorulma çatlaklarının büyümesini araştırmışlardır. Helikopter yapıları üzerinde etkili olan gerçek yükleme koşullarına yaklaşmak için bir teknolojik test örneği geliştirmişlerdir. Sonuç olarak çözgü ve atkı laminatlarında, maksimum çatlak büyüme oranı seviyesi çatlama başlatma süresiyle ilişkili olduğu görülmüştür.

Shindo ve arkadaşları (2011), karışık mod I / II yorulma yükü altında dokuma cam/epoksi kompozit laminatlarda dondurucu soğuk şartlarda delaminasyon artışını incelemişlerdir. Sonuç olarak delaminasyon büyüme davranışı, fiber köprüleme etkisi ile ilişkili olabilecek mod I ve mod II'nin karışık mod oranı tarafından etkilendiğini bulmuşlardır.

Nazari ve Riahi (2011), kendiliğinden yerleşen betonların farklı miktarda CuO nanopartikülleri ile bölünmüş çekme dayanımlarını incelemişlerdir. Sonuç olarak CuO nanopartiküllerinin kendiliğinden yerleşen betonun çekme dayanımını iyileştirdiğini ve polikarboksilat süperplastikleştiricinin çekme dayanımı üzerindeki olumsuz etkilerini geri kazanabildiğini belirtmişlerdir.

Fruehmann ve arkadaşları (2010), dokuma kompozit malzemelerdeki yorulma hasar gelişimini kızıl ötesi teknikler kullanarak değerlendirmişlerdir. Çatlakların yerini ve boyutunu değerlendirmek için numuneleri optik mikroskop kullanarak incelemişlerdir. Çalışmanın odağı yorulma hasarının başlangıcı ve hasar birikimi oranlarıdır. Numuneler, 10 Hz'de sinüzoidal yük altında yorulma testlerine tabi tutulmuştur. Sonuç olarak bu çalışmada, dokuma kompozit malzemelerde, düşük stres seviyelerinde bile yorulma hasarının hızla birikme potansiyelini vurgulamışlardır.

Bizeul ve arkadaşları (2010), çekme yükü altındaki ince çentikli kompozitlerde dokuma katlı bozulmanın yorulma çatlak büyümesine etkisini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar, çatlak başlatma süresinin artmasıyla birlikte, çevrim başına çatlak büyüme oranının düştüğünü göstermiştir.

Carvelli ve arkadaşları (2010), tek katlı, kıvrımsız, üç boyutlu ortogonal örgü cam kompozit malzemelerin ve standart düz örgü kumaş dört katlı takviyeli lamine edilmiş kompozit malzemelerin çekme-çekme yorulma davranışını incelemişlerdir. Yorulma testlerini, sabit gerilme genliği, sinüzoidal dalga biçimli çekme-çekme yükü altında $R=0.1$ oranında gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, PW (düz dokuma) kumaşın doğal kıvrımı ve laminasyon sırasında kumaş katının düzensizlikleri, yerel yoğunluk dağılımlarına neden olduğu ve üç boyutlu kompozit ile karşılaştırıldığında yorulma yüklemesi esnasında PW laminatta erken hasar oluşumunu ve gelişimini kolaylaştırdığını gözlemlemişlerdir.

Li ve arkadaşları (2010), gerilme genliğinin $Mg_6Al_1Zn_4$ magnezyum alaşımının çekme-basma yorulma davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak gerinim ömrü yorulma eğrisinin, düşük devir yorulma bölgesinden, %0.5'lik bir gerinim amplitüdüne karşılık gelen çevredeki yüksek devirli yorulma bölgesine tespit edilebilir bir geçiş gösterdiğini keşfetmişlerdir.

Matsumoto ve arkadaşları (2010), tek eksenli çekme-basma yorulma davranışını ve lif sertleştirici fiber takviyeli çimentolu kompozit malzemelerin fiber köprüleme bozunmalarını araştırmışlardır. Sonuç olarak köprü stresi bozunmasının üç aşamada olduğunu tespit etmişlerdir. İlk olarak, 1 ila 100 devir arasında, köprüleme gerilmesi kabaca %90'a düştüğünü, ikincisi, 100 ila 1000 devir arasında köprü gerilmesi keskin bir şekilde yaklaşık %10'a kadar düştüğünü ve son olarak, keskin bir azalmadan sonra, köprüleme geriliminin kademeli olarak azalmaya devam ettiğini tespit etmişlerdir.

Sun ve arkadaşları (2009), dolgu bağlarının ayrılması, plastik boşluk büyümesi, matris deformasyonu ve fiber köprüleme gibi enerji absorpsiyon mekanizmalarının, çatlakların yayılmasına direnmek için matrisi sertleştirebileceği doğrulamışlardır.

Shindo ve arkadaşları (2009), Mod II yorulma yüklemesine tabi tutulan dokuma cam elyaf takviyeli polimer kompozit laminatlarda kriyojenik delaminasyon büyüme davranışını araştırmışlardır. Ayrıca numunelerin kesitlerinin ve kırık yüzeylerinin mikroskopik muayenelerini de gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak daha düşük sıcaklıklarda delaminasyon büyüme oranının azaldığını ve eşik enerjisi salınım oranı aralığının sıcaklık düşüşüyle birlikte daha büyük hale geldiğini gözlemlemişlerdir. Bununla beraber delaminasyon büyüme oranının sıcaklığa bağımlılığı, azalan sıcaklık ile çentik boşluğu arasındaki azalma ile açıklanabilmektedir.

Wen ve Yazdani (2008), çekme-çekme yorulma yüklemesi sırasında cam-epoksi kumaş kompozitleri için anizotropik bir hasar modeli sunmuşlardır. Sonuç olarak oluşturdukları modelin, hasar nedeniyle kalıcı deformasyonu yakalayabileceği ve deney sonuçlarının kontrol edilmesi için uygun olduğunu tespit etmişlerdir.

Clark ve Mouritz (2008), ince kalınlıkta takviye edici elyafların farklı hacimsel oranlarda belirli bir tipte üç boyutlu ortogonal dokuma kompozitlerin yorulma özelliklerini araştırmışlardır. Z-bağlarının yerleştirilmesiyle oluşan yorulmaya bağlı hasarın gelişmesi nedeniyle yorgunluk performansı düşmüştür.

Toubal ve arkadaşları (2006), kompozit malzemelerde hasar gelişimini tahmin etmek için kümülatif hasara dayanan bir analitik model kullanmışlardır. Numunelerin yorulma testleri kızılötesi termografi sistemi ile izlenmiştir. Sonuç olarak fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerin yorulma testlerinde en yaygın görülen hasar mekanizmalarının matris çatlaması olduğunu gözlemlemişlerdir.

Nishikawa ve arkadaşları (2006), yeni geliştirilen düz dokuma kompozit malzemelerde yorulma çatlaması kısıtlamalarını araştırmışlardır. Çekme-çekme yorulma testleri gerçekleştirilmiş ve optik mikroskop kullanılarak iç hasarlar gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlar, düz dokuma kompozit malzeme yorulma ömürlerinin geleneksel düz dokuma kompozit malzemelerden daha uzun olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca kompozit malzemelerde yorulma çatlak oluşumunun ve yayılma ölçütlerinin, çekme kalınlığından etkilendiği saptamışlardır.

Ceschini ve arkadaşları (2006), %10 hacimli Al_2O_3 partikül (W7A10A kompozit) ve %20 hacimli Al_2O_3 partikül (W6A20A kompozit) ile güçlendirilmiş 6061 alüminyum alaşım ile takviye edilmiş 7005 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerini ve düşük devirli yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Düşük devirli yorulma testlerinde, W7A10A kompozit malzemeler için izotropik sertleşme veya yumuşama kanıtı ve W6A20A kompozit malzemeler için hafif çevrimli yumuşama kanıtı göstermediğini belirtmişlerdir.

Bu tez çalışmasının temelini oluşturan cam elyaf dokuma kumaşlardan üretilen kompozit malzemeler literatürde sıklıkla kullanılmıştır. Ayrıca epoksi malzeme içine nanopartikül ilavesi de literatürde yoğun olarak karşımıza çıkmaktadır. Dokuma kompozit malzemelerde katman yapıları değişikçe üretilen malzemelerin yorulma özelliklerinde farklılıklar beklenmektedir. Bu tez çalışmasının literatüre katkısı; farklı katman yapılarında üretilen dokuma kompozit malzemelere farklı takviye oranlarında nanopartiküller ekleyerek yorulma davranışlarını incelemek ve en iyi yorulma ömrünü gösteren katman yapılarını ve nanopartikül takviye oranlarını tespit etmektir. Buna ek olarak hasara uğrayan dokuma kompozit malzemelerin mikro yapıları SEM cihazı ile incelenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Son yıllarda ileri teknoloji ürünü olan nanopartikül malzemelerin önemi giderek artmaktadır. Bu malzemeler birçok alanda kullanıldığı gibi kompozit malzemeler alanında da kullanılmaktadır. Bu çalışmada, 5 farklı katman yapısında nanopartikül takviyesiz ve kütlece farklı oranlarda (%0.5, %1 ve %3) Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli olarak üretilen dokuma tip kompozit malzemeler yorulma testlerine tabi tutulmuştur. Yorulma deneyleri sonrasında nanopartikül takviyeli ve takviyesiz olarak üretilen dokuma tip kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) diyagramları, sönümlleme oranları ve histerezis eğrileri incelenmiş, elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Ayrıca dokuma tip kompozit malzemelerde oluşan hasar mekanizmalarının SEM analizleri yapılmıştır.

3.1. Dokuma Tip Kompozit Malzemelerin Hazırlanması

SPM Kompozit İleri Malzeme Teknolojileri firmasından temin edilen ve ana malzeme olarak kullanılan cam elyaf dokuma tip kumaşlar Şekil 3.1’de ve Nanografi Nano Teknoloji firmasından temin edilen nanopartiküller ise Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Al_2O_3 , MgO nanopartikülleri ortalama 18 nm boyutlarında ve %99.5 saflıkta, CuO nanopartiküller ise ortalama 38 nm boyutlarında ve %99.99 saflıktadır. Dokuma tip kumaşların kodları ve özellikleri Tablo 1.’de verilmiştir. Tablo 1.’de “P” ile gösterilen dokuma tipi $[(0^0/90^0)]$ ’lik açılarla dokunmuş kumaşlardır. “T” ile gösterilen dokuma tipi ise $[(45^0/-45^0)]$ ’lik açılarla dokunmuş kumaşlardır.



Şekil 3.1. Cam elyaf dokuma tip kumaş malzemeler

Tablo 1. Cam elyaf dokuma tip kumaşların kodları ve özellikleri

Cam Elyaf Kumaş Kodları	Alansal yoğunluk (gr/m ²)	Fiber çapı (µm)	Atkı iplikleri (10cm/adet)	Çözüğü iplikleri (10cm/adet)	Dokuma açıları
SPM EGU 110P	110	9	144	160	[(0°/ 90°)] P(Düz)
SPM EGU 163T	163	9	114	120	[(45°/-45°)] T(Açılı)
SPM EGU 195T	195	13	60	80	[(45°/-45°)] T(Açılı)
SPM EGU 200P	200	9	128	160	[(0°/ 90°)] P(Düz)
SPM EGU 280T	280	11	60	80	[(45°/-45°)] T(Açılı)

**Şekil 3.2.** Nanopartikül malzemeler

Daha sonra bu cam elyaf dokuma kumaşlar 300mm-300mm boyutlarında kesilmiştir. Toplam epoksi ağırlığı 225 gr olarak ayarlanmıştır. Tablo 2’de epoksiye katılan Al₂O₃, CuO ve MgO nanopartikül malzemelerin ağırlıkları ve yüzdelik miktarları verilmiştir.

Tablo 2. Kompozit malzeme bileşenleri

	ARC-152 (gr)	W-152 (gr)	Partikül (gr)
Takviyesiz	180	45	0
%0.5 Al ₂ O ₃	179.1	44.78	1.12
%1 Al ₂ O ₃	178.2	44.55	2.25
%3 Al ₂ O ₃	174.6	43.65	6.75
%0.5 CuO	179.1	44.78	1.12
%1 CuO	178.2	44.55	2.25
%3 CuO	174.6	43.65	6.75
%0.5 MgO	179.1	44.78	1.12
%1 MgO	178.2	44.55	2.25
%3 MgO	174.6	43.65	6.75

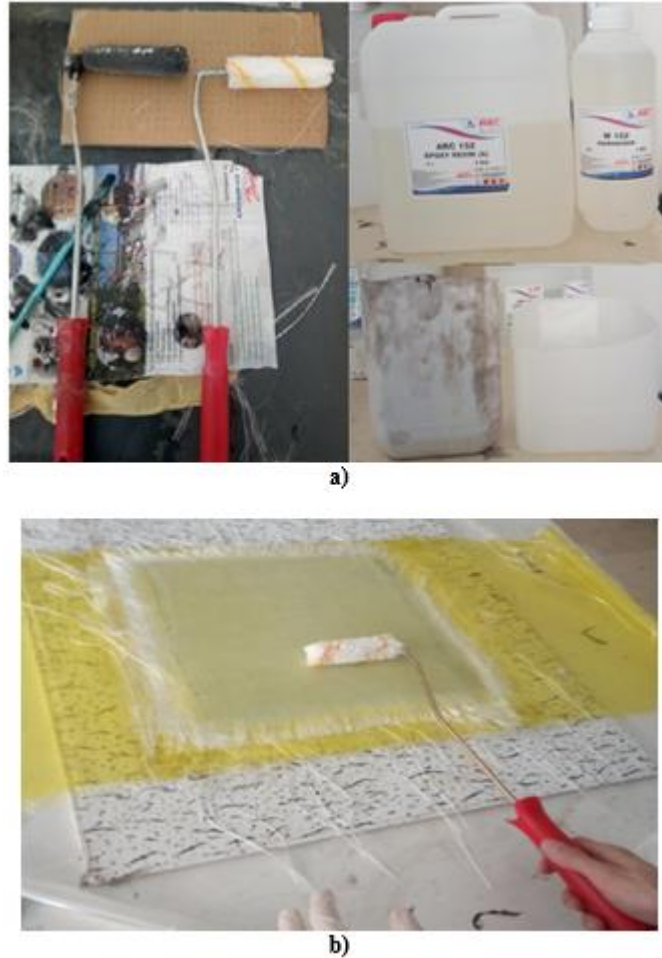
Tablo 3. Üretilen kompozit malzeme katmanları

Üretilen Kompozit Malzemeler (KM)	Katmanlar	Kalınlık (mm)
KM-1	[110P/163T/195T/200P ₂ /280T] _s	2.3
KM-2	[163T ₂ /280T/200P/110P ₂] _s	2.1
KM-3	[110P ₂ /280T/200P/195T/200P] _s	2.4
KM-4	[200P ₂ /280T/110P ₃] _s	2.1
KM-5	[110P/195T ₂ /280T/110P ₂] _s	2.2

KM: Kompozit Malzeme

Epoksi olarak ARC-152 ve sertleştirici olarak W-152 kullanılmıştır. Kütlesel olarak epoksi/sertleştirici oranı 4/1 olduğunda epoksi yüksek mukavemet değerleri göstermektedir. Cam elyaf ile mükemmel uyum sağlaması, geniş sertleştirici ağıyla uzun süreler çalışılabilmesi ve her türlü dokuma kumaşları yapıştırma uygun olması sebebiyle ARC-152 tipi epoksi seçilmiştir.

İmalat aşamasında kullanılan yardımcı ekipmanlar, ARC-152 epoksi ve W-152 sertleştirici malzeme Şekil 3.3a’da verilmiştir. Tablo 2’de verilen ağırlıklara göre epoksi, sertleştirici ve nanopartikül bir kaptaki uzun süre karıştırılarak hazırlanmıştır. Dokuma cam elyaflar nanopartikül takviyeli ve takviyesiz olarak Tablo 2’de verilen karışım oranlarına ve 12 katmanlı olacak şekilde Tablo 3’de verilen katman yapılarına göre, Şekil 3.3b’de gösterildiği gibi yapıştırılmıştır.

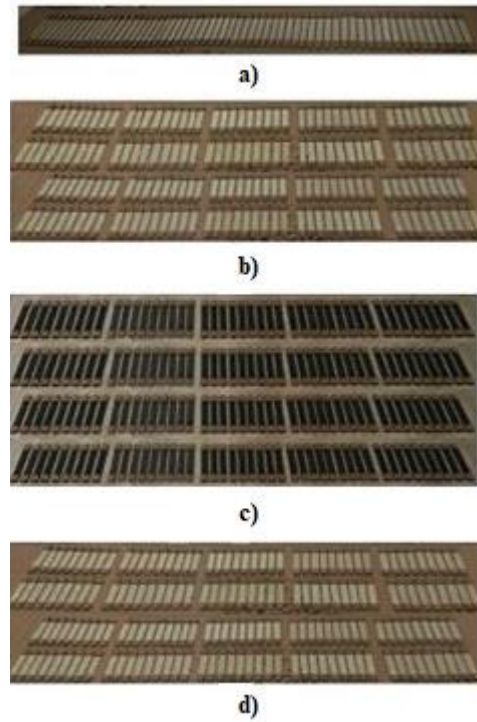


Şekil 3.3. a) Epoksi ve sertleştirici malzeme, yardımcı ekipmanlar **b)** Elle yatırma yöntemi ile nanopartikül takviyeli ve takviyesiz kompozit malzeme üretim işlemi

Epoksinin kürleşebilmesi için 12 katmanlı olarak üretilen nanopartikül takviyeli ve takviyesiz dokuma tip kompozit malzemeler bir kalıp içinde, üzerine ağırlık bırakılarak kompozit üretim laboratuvarında, oda şartlarında 24 saat bekletildikten sonra 250mm-25mm ölçülerinde ASTM 3039 standardına uygun olarak kesilmiştir. Kesim işlemleri 3 Eksen CNC MJT-W3-3020 Waterjet cihazı ile yapılmıştır.

Her parametre için 3 adet olmak üzere 15 adet takviyesiz, 45 adet Al_2O_3 , 45 adet CuO ve 45 adet MgO nanopartikül takviyeli toplamda 150 adet çekme test numunesi kesilmiştir. Ayrıca bu numunelere ek olarak her parametre için 12 adet olmak üzere 60 adet takviyesiz, 180 adet Al_2O_3 , 180 adet CuO ve 180 adet MgO nanopartikül takviyeli toplamda 600 adet yorulma test numunesi kesilmiştir.

Kesimi yapılan nanopartikül takviyeli ve takviyesiz dokuma tip kompozit malzemeler Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Kesimi yapılan nanopartikül takviyeli ve takviyesiz dokuma tip kompozit malzemeler a) Takviyesiz b) Al_2O_3 takviyeli c) CuO takviyeli d) MgO takviyeli

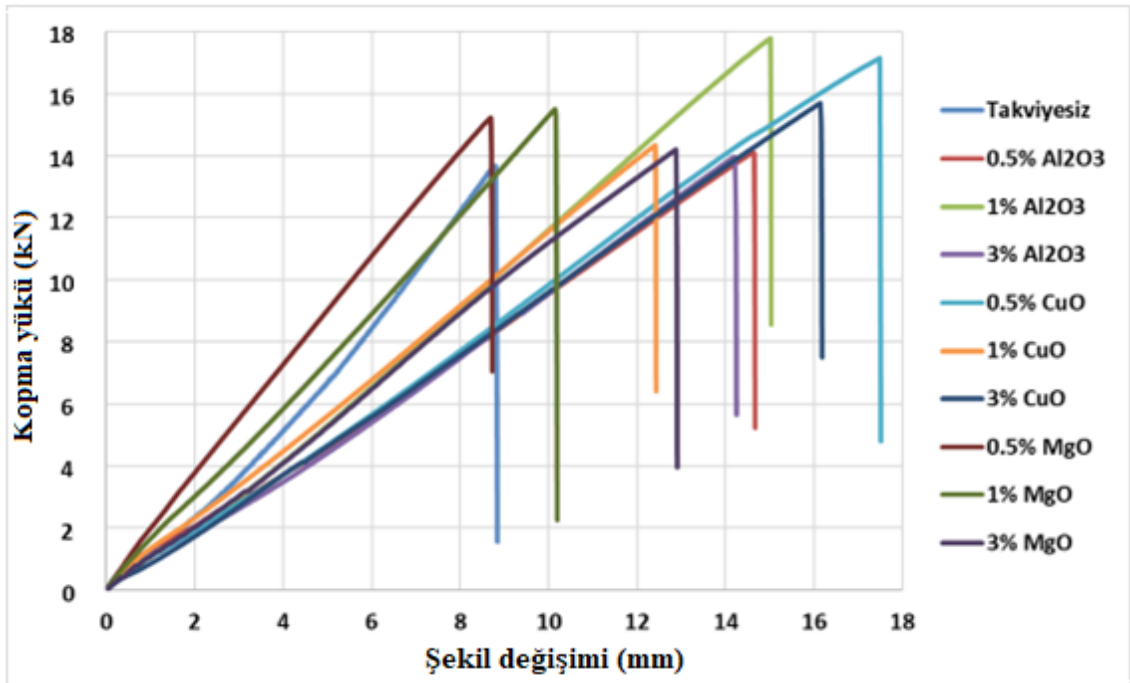
3.2. Deneysel Çekme Hasar Yüklerinin Belirlenmesi

Çekme testleri öncesinde, çeneye yakın bölgelerde erken kopmalar oluşabileceğinden, bu kopmaları engellemek için kompozit malzeme uçlarına 40x25mm boyutlarında parçalar yapıştırılmıştır. Bütün çekme testleri bilgisayar kontrollü Shimadzu AG-IC (250 kN) çekme cihazı ile 25⁰C oda sıcaklığında, %50 nem oranında ve 1 mm/dk sabit çekme hızında yapılmıştır. Her parametre için üç adet numune hazırlanmış ve çekme testlerine başlanmıştır. Nanopartikül takviyesiz olarak üretilen kompozit numunelerin hasar yükleri, ortalama hasar yükleri Tablo 4’te ve nanopartikül takviyeli olarak üretilen kompozit numunelerin hasar yükleri, ortalama hasar yükleri ise Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 4. Çekme numuneleri hasar yükleri

Üretilen Kompozit Malzemeler	Numune-1 Hasar Yükleri (kN)	Numune-2 Hasar Yükleri (kN)	Numune-3 Hasar Yükleri (kN)	Ortalama Hasar Yükleri (kN)
KM-1	13,545825	14,056125	13,43693	13,67963
KM-2	15,5595	16,18275	15,708	15,81675
KM-3	17,6625	17,23725	17,631	17,51025
KM-4	15,78825	15,62775	16,11525	15,84375
KM-5	16,986	16,314	16,66868	16,65623

KM : Kompozit Malzeme



Şekil 3.5. KM-1 katman yapılı dokuma kompozit malzemelerin Kopma yükü (kN) - Şekil değişimi (mm) grafikleri

KM-1 katman yapılı dokuma kompozit malzemelerin Kopma yükü (kN) - Şekil değişimi (mm) grafikleri Şekil 3.5'te verilmiştir. Kopma yükü (kN) - Şekil değişimi (mm) grafikleri incelendiğinde, epoksiye nanopartikül takviyesinin dokuma kompozit malzemelerde çekme mukavemetlerini arttırdığı gözlemlenmiştir. Nanopartikül takviyeli dokuma kompozit malzemelerin çekme mukavemetleri, nanopartikül takviyesiz dokuma kompozit malzemelere kıyasla önemli ölçülerde artış göstermiştir.

Tablo 5. Nanopartikül takviyeli dokuma tip kompozit malzeme hasar yükleri

	(kN)		(kN)		(kN)		(kN)		(kN)
KM-1-%0.5 Al ₂ O ₃	14,10938	KM-2-%0.5 Al ₂ O ₃	17,96093	KM-3-%0.5 Al ₂ O ₃	19,845	KM-4-%0.5 Al ₂ O ₃	17,89438	KM-5-%0.5 Al ₂ O ₃	19,96297
	14,475		17,99005		18,99562		15,53574		16,87515
	15,30938		14,17968		19,78906		16,80805		16,46398
Ortalama Hasar Yükleri	14,63125		16,71022		19,54323		16,74606		17,76737
KM-1-%1 Al ₂ O ₃	17,16719	KM-2-%1 Al ₂ O ₃	16,64604	KM-3-%1 Al ₂ O ₃	19,73984	KM-4-%1 Al ₂ O ₃	17,09006	KM-5-%1 Al ₂ O ₃	17,11892
	17,78906		17,13343		18,57453		16,94281		18,63305
	16,92031		15,12855		18,40265		16,18178		14,64985
Ortalama Hasar Yükleri	17,292,19		1630267		18,90567		16,73822		16,80061
KM-1-%3 Al ₂ O ₃	13,99275	KM-2-%3 Al ₂ O ₃	17,50207	KM-3-%3 Al ₂ O ₃	18,50249	KM-4-%3 Al ₂ O ₃	16,09470	KM-5-%3 Al ₂ O ₃	17,91068
	15,01725		16,94083		19,8575		16,52312		16,46137
	13,95659		16,61215		18,455		11,96538		16,35704
Ortalama Hasar Yükleri	14,322.20		17,01835		18,93833		16,30891		16,90970
KM-1-%0.5 CuO	17,15156	KM-2-%0.5 CuO	14,31682	KM-3-%0.5 CuO	19,50265	KM-4-%0.5 CuO	18,75479	KM-5-%0.5 CuO	18,0199
	18,50249		19,25380		20,35274		19,05394		17,96083
	18,455		18,72261		20,3005		19,31455		16,80767
Ortalama Hasar Yükleri	18,03635		17,43108		20,05196		19,04109		17,596.13
KM-1-%1 CuO	14,3375	KM-2-%1 CuO	11,24363	KM-3-%1 CuO	20,0725	KM-4-%1 CuO	15,90886	KM-5-%1 CuO	18,11166
	13,90313		16,78449		20,85469		16,23109		17,47455
	15,60938		14,90388		20,29219		16,49136		16,29934
Ortalama Hasar Yükleri	14,61667		15,84419		20,40646		16,21044		17,295.18
KM-1-%3 CuO	13,38438	KM-2-%3 CuO	14,50476	KM-3-%3 CuO	19,40735	KM-4-%3 CuO	18,36599	KM-5-%3 CuO	18,79866
	15,69688		18,01987		18,83625		17,76368		19,02978
	15,16719		17,74573		19,71734		17,82468		14,48468
Ortalama Hasar Yükleri	14,749.48		16,75679		19,32031		17,98478		17,43771
KM-1-%0.5 MgO	16,48876	KM-2-%0.5 MgO	17,20193	KM-3-%0.5 MgO	18,13781	KM-4-%0.5 MgO	16,45084	KM-5-%0.5 MgO	15,64861
	15,225		16,9095		16,85425		16,16499		17,66892
	15,34688		13,95757		19,78906		15,34128		16,34861
Ortalama Hasar Yükleri	15,68688		16,023		18,26037		15,98570		16,55538
KM-1-%1 MgO	15,50391	KM-2-%1 MgO	16,86262	KM-3-%1 MgO	19,37988	KM-4-%1 MgO	18,53468	KM-5-%1 MgO	19,46796
	15,53438		15,15669		19,41797		18,12759		19,36242
	15,87344		16,22715		19,8418		16,15788		16,04224
Ortalama Hasar Yükleri	15,63724		16,08215		19,54655		17,60672		18,290.87
KM-1-%3 MgO	15,71406	KM-2-%3 MgO	15,68516	KM-3-%3 MgO	20,42827	KM-4-%3 MgO	17,96082	KM-5-%3 MgO	17,47528
	14,98594		15,897		16,48453		16,80765		17,12126
	14,19688		17,72982		15,61656		17,9729		15,75718
Ortalama Hasar Yükleri	14,96562		16,43732		17,50978		17,58045		16,78457

3.3. Yorulma Testleri

Yorulma testlerine başlamadan önce, numunelerin sadece çekme-basma yönündeki yüklere maruz kalması ve eğilme momentinden etkilenmemesi için kompozit malzemelerin uçlarına 40x25mm ölçülerinde parçalar yapıştırılmıştır. Yorulma testleri Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda bulunan Shimadzu marka 100 kN yük hücresine sahip servo kontrollü yorulma test cihazı ile yapılmıştır. Numunelerin yorulma limitlerini belirlemek için $R=-0.1$ yük oranı, 6 Hz frekans ve sinüs dalgası şeklinde yük uygulanarak yorulma testleri yapılmıştır. Yorulma testlerinde sonsuz ömürlere (10^6 çevrim sayısına) çekme testleri neticesinde belirlenen kopma yükünün %30'unda ulaşılmıştır. Bu sebeple uygulanacak yorulma yük seviyeleri %30, %40, %50 ve %60 olarak belirlenmiştir. Yorulma test cihazı Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Yorulma test cihazı

3.4. SEM Analiz Cihazı

SEM analizleri, Çukurova Üniversitesi Mikroskobik Analiz Laboratuvarlarında bulunan Quanta 650 Field Emission SEM analiz cihazı kullanılarak yapılmıştır. Quanta 650 Field Emission SEM analiz cihazında metal ve plastik malzemeler, fiberler, polimerler ile içerisinde sıvı, çakıl, kum bulundurmayan biyolojik örnekler incelenebilmektedir. Yalıtkan numuneler ise çok ince iletken malzemelerle kaplandıktan sonra incelenebilmektedir. Quanta 650 Field Emission SEM analiz cihazı ve cihaza ait bazı teknik özellikler Şekil 3.7’de verilmiştir.



Mikroskobun çözüm gücü ;

Yüksek Vakumda; 30 kV'da 1.2 nm (SE)

1 kV'da 2.3 nm (SE)

1 kV'da 3.0 nm (Elektron yavaşlatma olmadan) (SE)

Düşük Vakumda; 30kV'da 2.0 nm (SE)

Yüksek vakum SE ve geri çağırılabilir 4 segmentli BSE dedektörü

Yüksek vakum InColumn SE ve BSE dedektörü

Enerji Dağılım X-Işını Spektrometresi (EDXS)

GSED (ESEM modu için) dedektörü

Geri çağırılabilen STEM dedektör

Düşük Vakumda çalışabilen BSE dedektörü

Hızlandırma voltajı ; 100V-30kV

Probe akımı 100nA

Büyütme ; 6-1.000.000 x

Şekil 3.7. Quanta 650 Field Emission SEM analiz cihazı ve teknik özellikleri

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, 5 farklı katman yapısında nanopartikül takviyesiz ve kütlece farklı oranlarda (%0.5, %1 ve %3) Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli olarak üretilen dokuma tip kompozit malzemelerin yorulma davranışları incelenmiştir. Elde edilen Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) diyagramları, sönümlleme oranları ve histerezis eğrileri karşılaştırılmıştır. Ayrıca nanopartikül takviyeli olarak üretilen kompozit malzemelerdeki Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül yapılarını ve kopma bölgelerindeki hasar mekanizmalarını araştırmak için SEM analizleri yapılmıştır.

4.1. Yorulma Test Sonuçları

Nanopartikül takviyeli ve takviyesiz olarak üretilen dokuma tip kompozit malzemeler, Shimadzu marka 100 kN yük hücresine sahip servo kontrollü yorulma test cihazı ile $R=-0.1$ yük oranı, 6 Hz frekans ve sinüs dalgası şeklinde yük uygulanarak çekme-basma yorulma testlerine tabi tutulmuşlardır. Farklı yük seviyelerinde malzemelerin yorulma ömürlerini bulabilmek için bir seride 6-10 adet numune kullanılmaktadır. Ayrıca, dokuma kompozitlerin yorulma çevrimleri, yorulma yük seviyeleri ile yakından ilişkilidir.

Üretilen kompozit numunelerin sonsuz ömürlerini bulabilmek için farklı yük seviyelerinde yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. %30 yük seviyesinden daha yüksek yük seviyelerinde yapılan yorulma testlerinde numunelerin 10^6 çevrim sayısından önce hasara uğradıkları gözlemlenmiştir. Yorulma testlerinde %30 yük seviyesinden daha düşük yük seviyeleri de denenmiştir. Numunelerin sonsuz ömürlerinin belirlenmesi açısından %30 yük seviyesinin en ideal yük seviyesi olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak yorulma testlerinde uygulanması gereken yük seviyeleri de %30, %40, %50 ve %60 olarak belirlenmiştir.

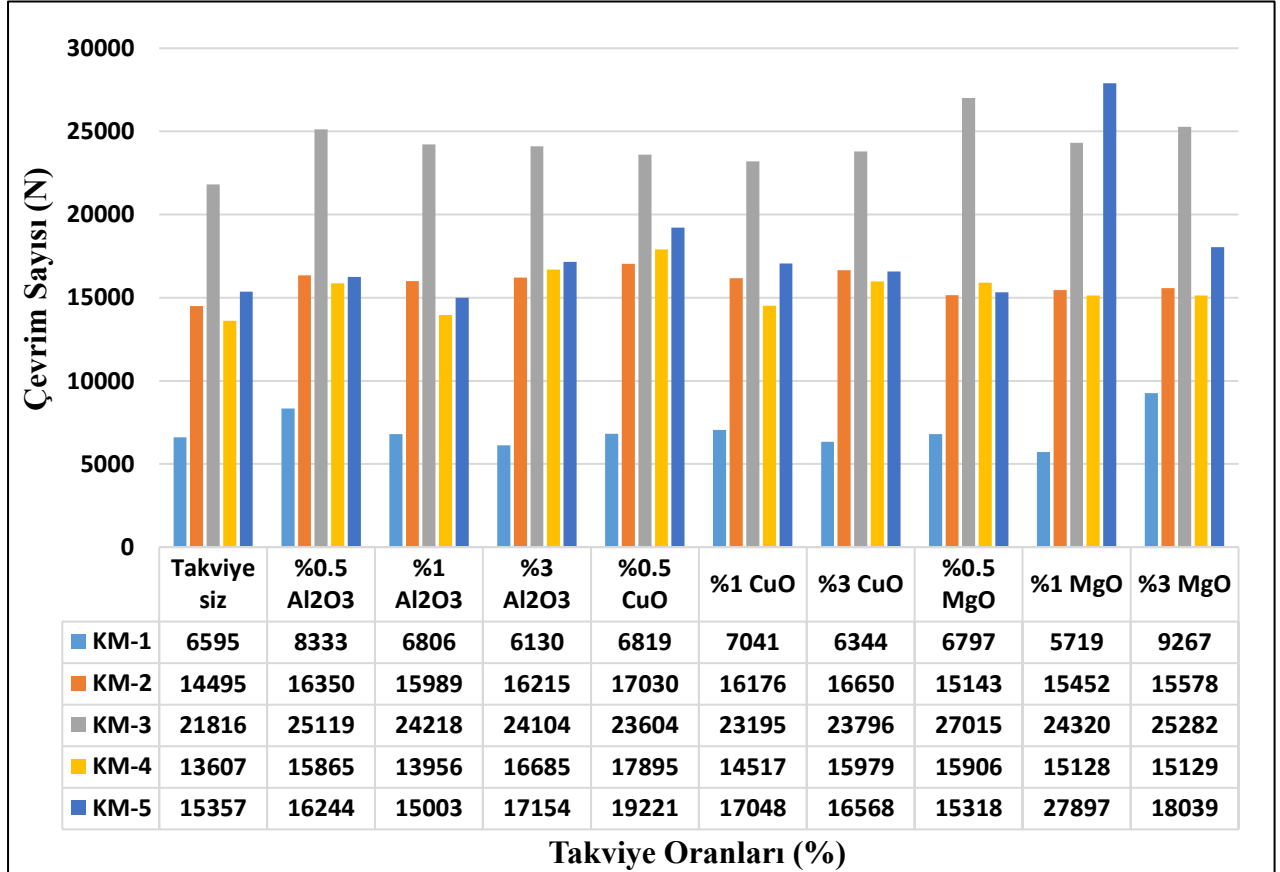
Çeşitli yük seviyelerinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde elde edilen ortalama çevrim sayıları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Nanopartikül takviyeli ve takviyesiz dokuma tip kompozit malzeme ortalama çevrim sayıları

Partikül ve Katkı Oranı	Yük Seviyesi (%)	Ortalama Çevrim Sayıları				
		Katman Yapıları				
		KM-1	KM-2	KM-3	KM-4	KM-5
Takviyesiz	30	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	40	20259	28532	57843	29920	35984
	50	6595	14495	21816	13607	15357
	60	1533	5271	12232	6238	5756
%0.5 Al ₂ O ₃	30	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	40	23841	30798	104377	30160	38289
	50	8333	16350	25119	15865	16244
	60	2382	6012	15986	6108	6704
%1 Al ₂ O ₃	30	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	40	31386	30418	128464	32559	35315
	50	6806	15989	24218	13956	15003
	60	2507	6013	15413	6521	5398
%3 Al ₂ O ₃	30	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	40	29008	36075	84211	36138	35657
	50	6130	16215	24104	16685	17154
	60	2438	4799	13753	6709	5867
%0.5 CuO	30	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	40	24524	48456	70821	50965	45393
	50	6819	17030	23604	17895	19221
	60	1919	5209	14729	5469	6633
%1 CuO	30	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	40	23033	30775	94388	30392	36014
	50	7041	16176	23195	14517	17048
	60	2565	5011	13818	6717	6484
%3 CuO	30	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	40	23672	36882	81984	41375	37488
	50	6344	16650	23796	15979	16568
	60	2689	5301	14055	7478	6285
%0.5 MgO	30	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	40	23950	28432	128232	31850	39577
	50	6797	15143	27015	15906	15318
	60	2809	5360	13811	5421	6208
%1 MgO	30	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	40	23759	27322	64090	32377	52089
	50	5719	15452	24320	15128	27897
	60	2812	5445	13740	6626	6461
%3 MgO	30	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	40	20890	27233	104244	29467	37647
	50	9267	15578	25282	15129	18039
	60	2554	5589	18022	7282	5734

4.1.1. Farklı katman yapılarında %50 yük seviyesinde nanopartikül takviyeli ve takviyesiz kompozit malzemelerin yorulma davranışları

Farklı katman yapılarında %50 yük seviyesinde nanopartikül takviyeli ve takviyesiz kompozit malzemelerin ortalama çevrim sayıları Şekil 4.1’de verilmiştir.



KM-1 - [110P/163T/195T/200P ₂ /280T] _s
KM-2 - [163T ₂ /280T/200P/110P ₂] _s
KM-3 - [110P ₂ /280T/200P/195T/200P] _s
KM-4 - [200P ₂ /280T/110P ₃] _s
KM-5 - [110P/195T ₂ /280T/110P ₂] _s

Şekil 4.1. Farklı katman yapılarında %50 yük seviyesinde nanopartikül takviyeli ve takviyesiz kompozit malzemelerin ortalama çevrim sayıları

Farklı katman yapılarının %50 yük seviyesinde yorulma ömürlerine etkisini belirleyebilmek için nanopartikül takviyeli ve takviyesiz numuneler aynı grafikte incelenmiştir. Şekil 4.1’de verilen değerlere göre %50 yük seviyesinde en düşük yorulma ömürleri KM-1 katman yapısına sahip nanopartikül takviyeli ve takviyesiz numunelerde gözlemlenmiştir.

KM-2, KM-3, KM-4 ve KM-5 katman yapılarına kıyasla KM-1 katman yapısına sahip nanopartikül takviyeli ve takviyesiz numunelerin çevrim sayılarında bariz bir azalma olmuştur. %50 yük seviyesinde en yüksek yorulma ömürleri genel olarak KM-3 katman yapısına sahip nanopartikül takviyeli ve takviyesiz numunelerde görülmüştür.

KM-3 katman yapısına sahip nanopartikül takviyesiz numunelerin yorulma çevrim sayıları, %50 yorulma yükü seviyelerinde KM-1 katman yapısına sahip nanopartikül takviyesiz numunelere kıyasla yaklaşık üç kat artmıştır.

%50 yük seviyesinde çoğunlukla en yüksek yorulma ömürlerini gösteren katman yapıları KM-3 ve KM-5 katman yapıları olmuştur. %50 yük seviyesinde en yüksek yorulma ömürleri KM-3 ve KM-5 katman yapılarına sahip %0.5 MgO nanopartikül takviyeli numunelerde gözlemlenmiş ve birbirine yakınsamıştır.

KM-3 katman yapısına sahip %0.5 MgO nanopartikül takviyeli numunelerin yorulma çevrim sayıları, %50 yorulma yükü seviyelerinde KM-1 katman yapısına sahip %0.5 MgO nanopartikül takviyeli numunelere kıyasla yaklaşık dört kat artmıştır.

KM-3 katman yapısına sahip %0.5 MgO nanopartikül takviyeli numunelerin yorulma çevrim sayıları, %50 yorulma yükü seviyelerinde KM-2, KM-4 ve KM-5 katman yapısına sahip %0.5 MgO nanopartikül takviyeli numunelere kıyasla yaklaşık iki kat artmıştır.

KM-2, KM-4 ve KM-5 katman yapısına sahip nanopartikül takviyeli ve takviyesiz numunelerin yorulma ömürlerinde yakın değerler oluşmuştur.

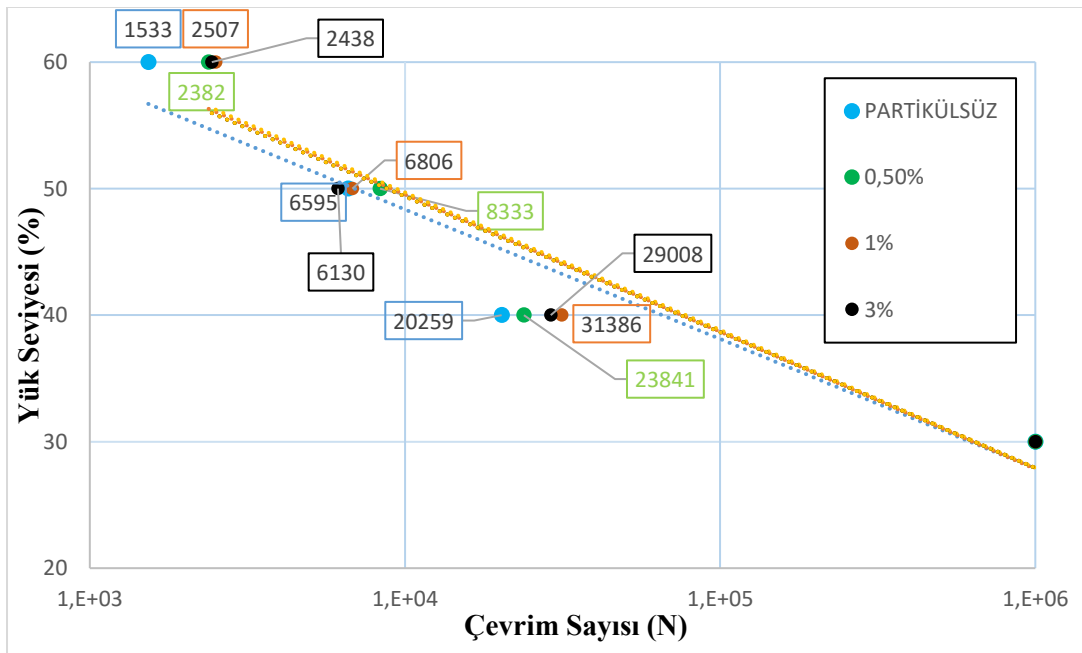
Katman yapılarındaki çeşitliliğe bağlı olarak, nanopartikül takviyeli ve takviyesiz kompozit malzemelerin yorulma ömürlerinde önemli farklılıklar meydana gelmiştir. Nanopartiküllerin epoksi içerisinde homojen dağılmaması, yorulma olayına etki eden birçok faktörün olması ve elle yatırma yönteminden kaynaklı sorunlardan dolayı yorulma ömürlerinde bazı düzensizlikler Şekil 4.1’de göze çarpmaktadır.

Carvelli ve arkadaşları (2021), çalışmalarında genelde çözgü ipliklerinin yüke paralel yönde olduğunu, atkı ipliklerinin ise yüke dik yönde yerleştirildiğini belirtmişlerdir.

Guo ve arkadaşları (2021), ise çalışmalarında yorulma yüklemesinin sonuna doğru çözgü ipliklerinin matrisi bir arada tutmakta zorlandığını ve atkı ipliklerinin ise çözgü iplikleri üzerindeki baskısını kaybettiğini belirtmişlerdir. Bu sebepten dolayı KM-3 katman yapılı nanopartikül takviyeli ve takviyesiz olarak üretilen bütün kompozit malzemelerde atkı ve çözgü ipliklerinin daha sıkı olması sebebiyle yorulma ömürlerinin yüksek çıktığı düşünülmektedir.

4.1.2. KM-1 katman yapısında takviyesiz, %0.5, %1 ve %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışları

KM-1 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. KM-1 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı oranlarda nanopartikül katkılarının yorulma ömürlerine etkisini belirleyebilmek için KM-1 katman yapılı, nanopartikül takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 Al_2O_3 takviyeli numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.2’de verilen değerlere göre %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde ve çevrim sayıları sırasıyla 31386, 6806 ve 2507 olacak şekilde en yüksek artışlar %1 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli numunelerde, en düşük artışlar ise %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde ve çevrim sayıları sırasıyla 23841, 8333 ve 2382 olacak şekilde %0.5 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir.

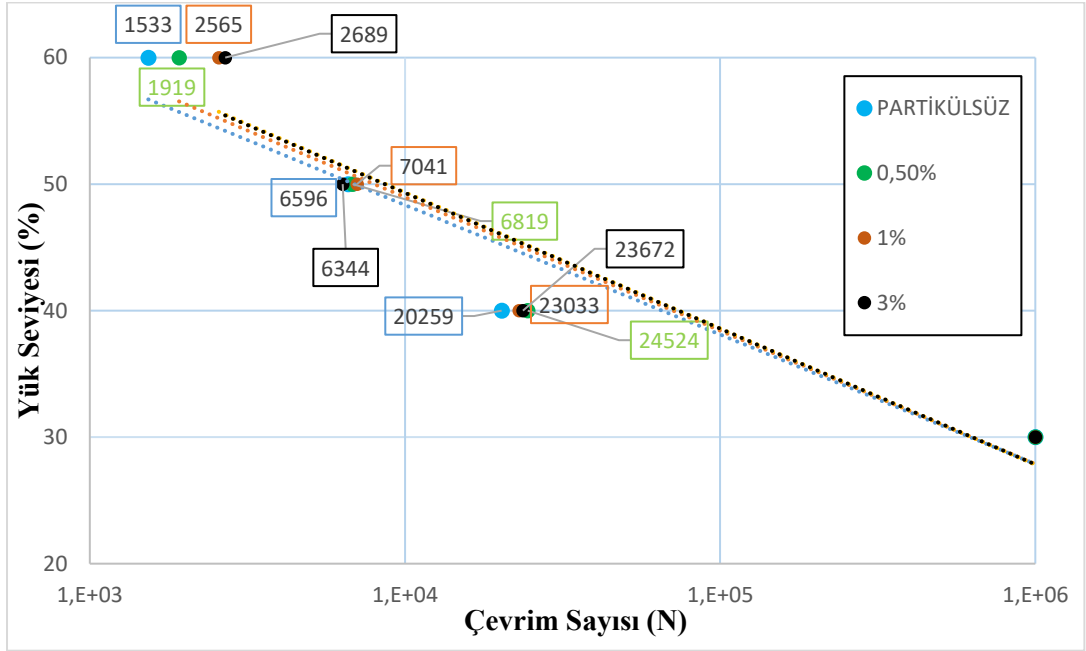
%0.5, %1 ve %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli numunelerde, yüzdesel olarak nanopartikül takviyesiz numune çevrim sayılarına göre en yüksek artışlar %40 yük seviyesinde sırasıyla %17, %55 ve %43 ve %60 yük seviyesinde ise sırasıyla %55, %63 ve %59 olarak gerçekleşmiştir.

Senthilkumar ve arkadaşları (2015), çalışmalarında üretmiş oldukları hibrit kompozitlere %2 oranında Al_2O_3 nanopartikül takviyesi yapmışlardır. Al_2O_3 nanopartiküllerinin küçük yüzdelerde ilavesinin bile yorulma ömürlerini çok büyük oranlarda arttırdığını kanıtlamışlardır.

Farklı nanopartikül takviye oranlarına bağlı olarak, KM-1 katman yapısında nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin çevrim sayıları düşük olmasına rağmen, KM-1 katman yapısında %0.5, %1 ve %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin çevrim sayıları %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde artış göstermiştir. Buna ek olarak KM-1 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma testlerinde yük seviyeleri arttıkça yorulma ömürlerinde düşüş gözlemlenmiştir.

4.1.3. KM-1 katman yapısında takviyesiz, %0.5, %1 ve %3 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışları

KM-1 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. KM-1 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı oranlarda nanopartikül katkılarının yorulma ömürlerine etkisini belirleyebilmek için KM-1 katman yapılı, nanopartikül takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 CuO takviyeli numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.3'te verilen değerlere göre %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde en yüksek artışlar %1 ve %3 CuO nanopartikül takviyeli numunelerde görülmüş ve yakınsaklık göstermiştir. En düşük artışlar ise %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde ve çevrim sayıları sırasıyla 24524, 6819 ve 1919 olacak şekilde %0.5 CuO nanopartikül takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir.

%0.5, %1 ve %3 CuO nanopartikül takviyeli numunelerde, yüzdesel olarak nanopartikül takviyesiz numune çevrim sayılarına göre en yüksek artışlar %40 yük seviyesinde sırasıyla %21, %14 ve %17 ve %60 yük seviyesinde ise sırasıyla %25, %67 ve %75 olarak gerçekleşmiştir.

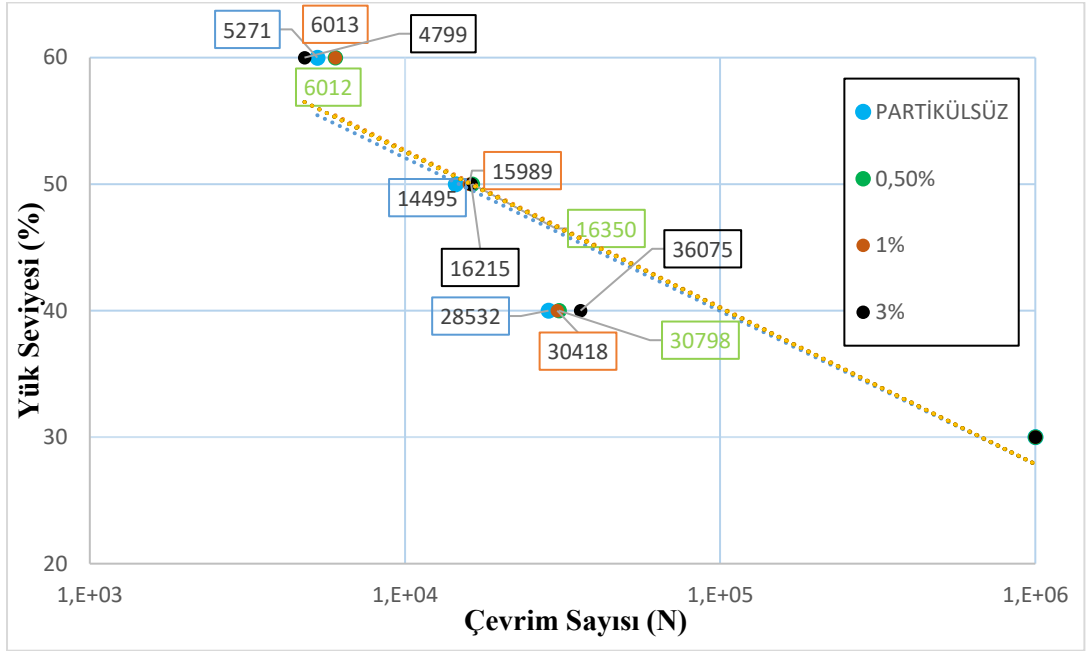
Nazari ve Riahi (2011), çalışmalarında ağırlıkça %4'e kadar CuO nanopartikül takviyesinin kompozit numunelerde mekanik ve fiziksel özellikleri iyileştirebileceğini belirtmişlerdir.

Farklı nanopartikül takviye oranlarına bağlı olarak, KM-1 katman yapısında nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin çevrim sayıları düşük olmasına rağmen, KM-1 katman yapısında %0.5, %1 ve %3 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin çevrim sayıları %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde artış göstermiştir.

Buna ek olarak KM-1 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma testlerinde yük seviyeleri arttıkça yorulma ömürlerinde düşüş gözlemlenmiştir.

4.1.4. KM-2 katman yapısında takviyesiz, %0.5, %1 ve %3 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışları

KM-2 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. KM-2 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı oranlarda nanopartikül katkılarının yorulma ömürlerine etkisini belirlemek için KM-2 katman yapılı, nanopartikül takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 Al_2O_3 takviyeli numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.4'te verilen değerlere göre %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde en yüksek artışlar %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli numunelerde ve çevrim sayıları sırasıyla 36075, 16215 ve 4799 olacak şekilde belirlenmiştir.

En düşük artışlar ise %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde ve çevrim sayıları sırasıyla 30418, 15989 ve 6013 olacak şekilde %1 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir.

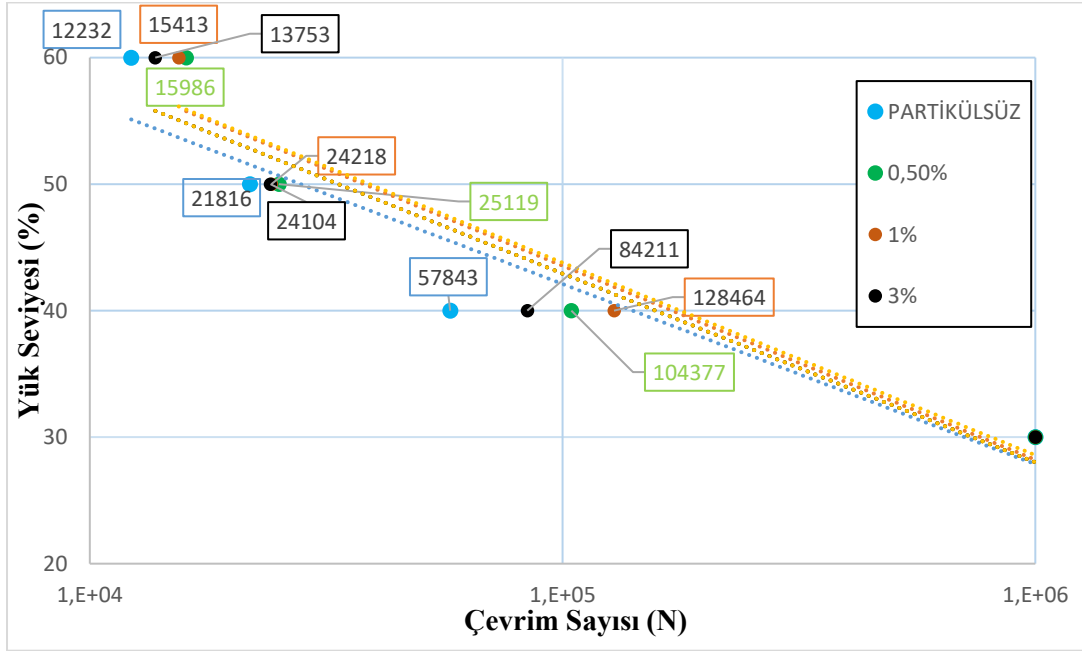
%0.5, %1 ve %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli numunelerde, yüzdesel artış değerleri nanopartikül takviyesiz numune çevrim sayılarına göre yakınsaklık göstermiştir.

Farklı nanopartikül takviye oranlarına bağlı olarak, KM-2 katman yapısında nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin çevrim sayıları düşük olmasına rağmen, KM-2 katman yapısında %0.5, %1 ve %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin çevrim sayılarında %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde artış meydana gelmiştir.

Buna ek olarak KM-2 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma testlerinde yük seviyeleri arttıkça yorulma ömürlerinde düşüş gözlemlenmiştir.

4.1.5. KM-3 katman yapısında takviyesiz, %0.5, %1 ve %3 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışları

KM-3 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. KM-3 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı oranlarda nanopartikül katkılarının yorulma ömürlerine etkisini belirleyebilmek için KM-3 katman yapılı, nanopartikül takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 Al₂O₃ takviyeli numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.5'te verilen değerlere göre %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde ve çevrim sayıları sırasıyla 104377, 25119 ve 15986 olacak şekilde en yüksek artışlar %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli numunelerde, en düşük artışlar ise %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde ve çevrim sayıları sırasıyla 84211, 24104 ve 13753 olacak şekilde %3 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir.

%0.5, %1 ve %3 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli numunelerde, yüzdesel olarak nanopartikül takviyesiz numune çevrim sayılarına göre en yüksek artışlar %40 yük seviyesinde sırasıyla %80, %122 ve %45 ve %60 yük seviyesinde ise sırasıyla %30, %26 ve %12 olarak gerçekleşmiştir.

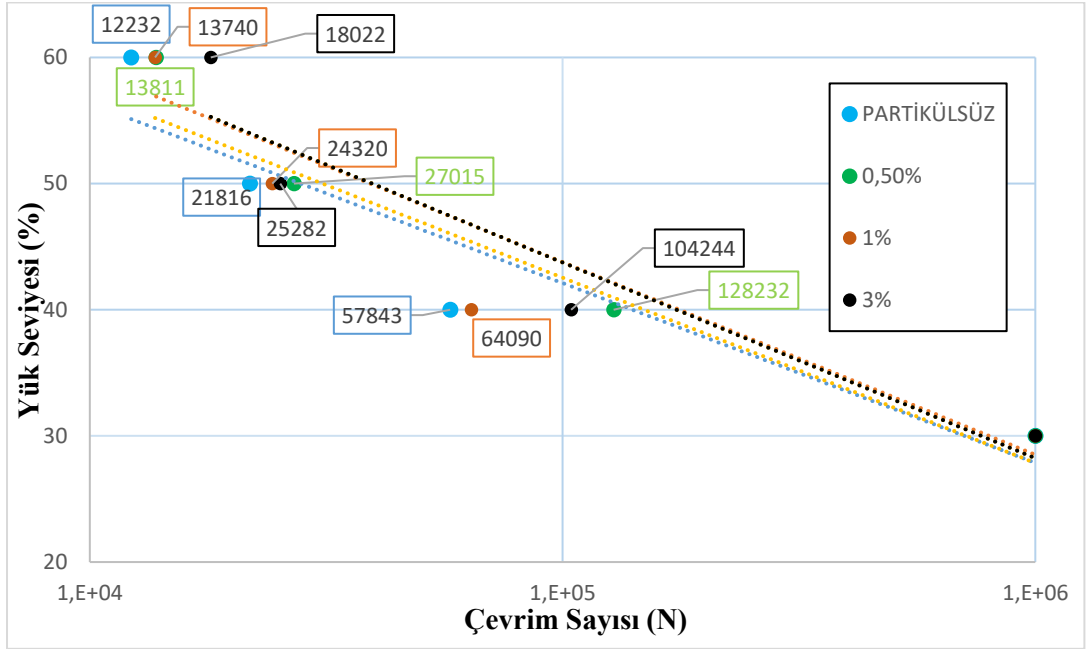
Senthilkumar ve arkadaşları (2015), çalışmalarında üretmiş oldukları hibrit kompozitlere %2 oranında Al_2O_3 nanopartikül takviyesi yapmışlardır. Al_2O_3 nanopartiküllerinin küçük yüzdelerde ilavesinin bile yorulma ömürlerini çok büyük oranlarda arttırdığını kanıtlamışlardır.

Farklı nanopartikül takviye oranlarına bağlı olarak, KM-3 katman yapısında nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin çevrim sayıları düşük olmasına rağmen, KM-3 katman yapısında %0.5, %1 ve %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin çevrim sayıları %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde artış göstermiştir.

Buna ek olarak KM-3 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma testlerinde yük seviyeleri arttıkça yorulma ömürlerinde düşüş gözlemlenmiştir.

4.1.6. KM-3 katman yapısında takviyesiz, %0.5, %1 ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışları

KM-3 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6. KM-3 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı oranlarda nanopartikül katkılarının yorulma ömürlerine etkisini belirleyebilmek için KM-3 katman yapılı, nanopartikül takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 MgO takviyeli numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.6’da verilen değerlere göre %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde ve çevrim sayıları sırasıyla 128232, 27015 ve 13811 olacak şekilde en yüksek artışlar %0.5 MgO nanopartikül takviyeli numunelerde, en düşük artışlar ise %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde ve çevrim sayıları sırasıyla 64090, 24320 ve 13740 olacak şekilde %1 MgO nanopartikül takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir.

%0.5, %1 ve %3 MgO nanopartikül takviyeli numunelerde, yüzdesel olarak nanopartikül takviyesiz numune çevrim sayılarına göre en yüksek artışlar %40 yük

seviyesinde sırasıyla %121, %11 ve %80 ve %60 yük seviyesinde ise sırasıyla %80, %16 ve %47 olarak gerçekleşmiştir.

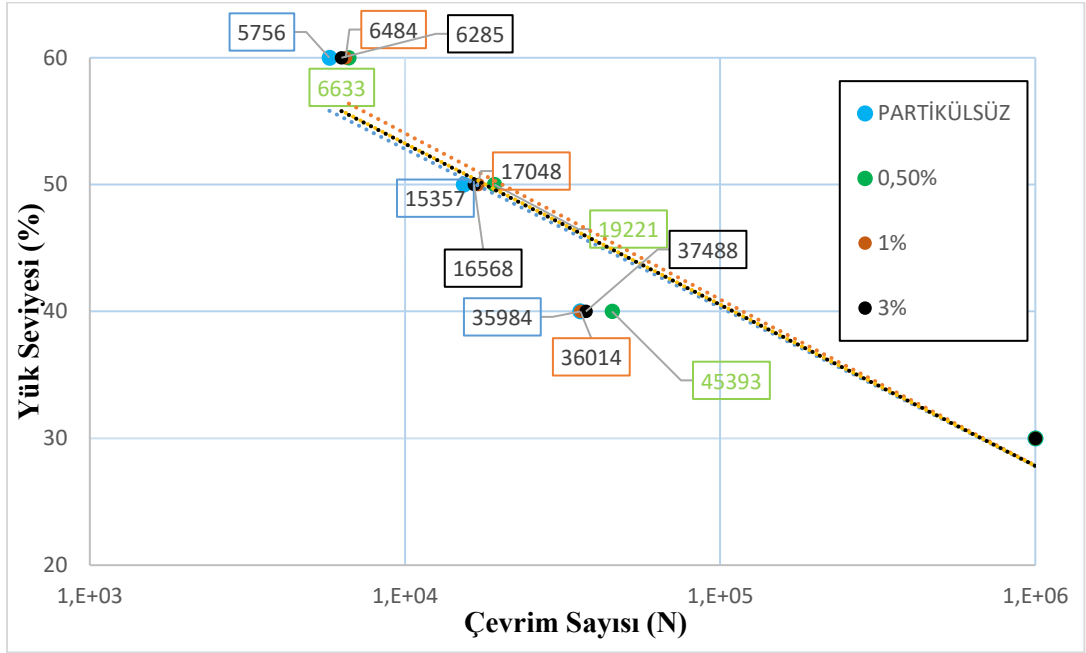
Farklı nanopartikül takviye oranlarına bağlı olarak, KM-3 katman yapısında nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin çevrim sayıları düşük olmasına rağmen, KM-3 katman yapısında %0.5, %1 ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin çevrim sayıları %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde artış göstermiştir.

Buna ek olarak KM-3 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma testlerinde yük seviyeleri arttıkça yorulma ömürlerinde düşüş gözlemlenmiştir.

Rouway ve arkadaşları (2020), çalışmalarında kompozit malzemeye nanopartikül takviyesinin mekanik özellikleri arttırdığını fakat bu artışların malzemenin verimliliği, hacim, en-boy oranları ve geometrik yapısı gibi çeşitli özelliklere bağlı olduğunu vurgulamışlardır.

4.1.7. KM-5 katman yapısında takviyesiz, %0.5, %1 ve %3 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışları

KM-5 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. KM-5 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı oranlarda nanopartikül katkılarının yorulma ömürlerine etkisini belirleyebilmek için KM-5 katman yapılı, nanopartikül takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 CuO takviyeli numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.7’de verilen değerlere göre %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde ve çevrim sayıları sırasıyla 45393, 19221 ve 6633 olacak şekilde en yüksek artışlar %0.5 CuO nanopartikül takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir. En düşük artışlar ise %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde ve çevrim sayıları sırasıyla 37488, 16568 ve 6285 olacak şekilde %3 CuO nanopartikül takviyeli numunelerde görülmüştür.

%0.5, %1 ve %3 CuO nanopartikül takviyeli numunelerde, yüzdesel olarak nanopartikül takviyesiz numune çevrim sayılarına göre en yüksek artışlar %40 yük seviyesinde sırasıyla %26, %25 ve %15 olarak gerçekleşmiştir.

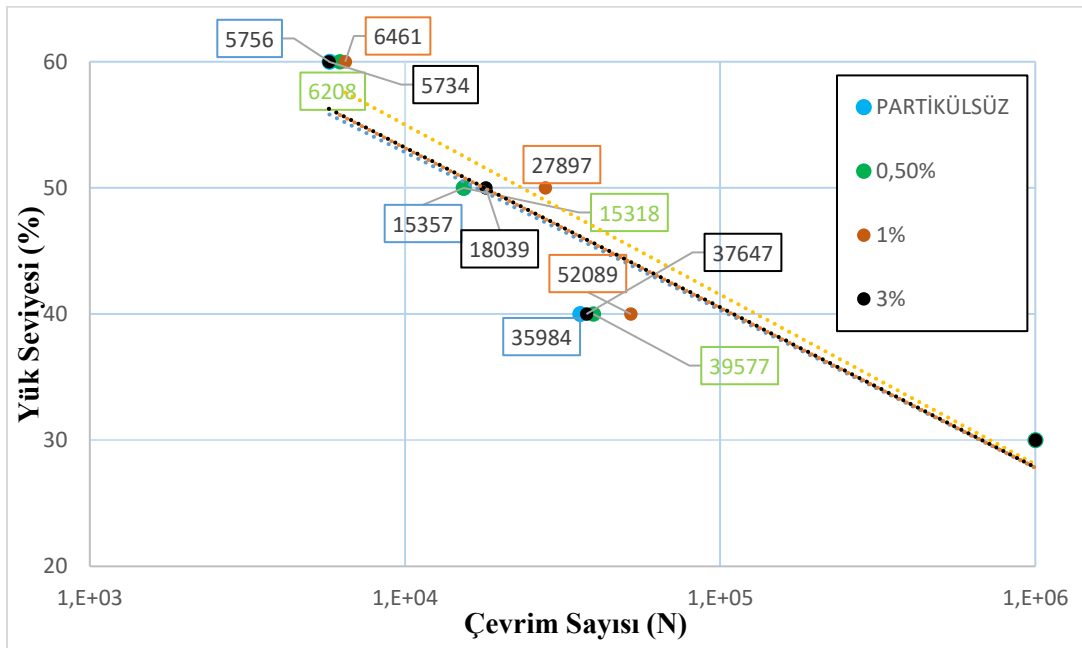
Nazari ve Riahi (2011), çalışmalarında ağırlıkça %4'e kadar CuO nanopartikül takviyesinin kompozit numunelerde mekanik ve fiziksel özellikleri iyileştirebileceğini belirtmişlerdir.

Farklı nanopartikül takviye oranlarına bağlı olarak, KM-5 katman yapısında nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin çevrim sayıları düşük olmasına rağmen, KM-5 katman yapısında %0.5, %1 ve %3 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin çevrim sayıları %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde artış göstermiştir.

Buna ek olarak KM-5 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma testlerinde yük seviyeleri arttıkça yorulma ömürlerinde düşüş gözlemlenmiştir.

4.1.8. KM-5 katman yapısında takviyesiz, %0.5, %1 ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışları

KM-5 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. KM-5 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı oranlarda nanopartikül katkılarının yorulma ömürlerine etkisini belirleyebilmek için KM-5 katman yapılı, nanopartikül takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 MgO takviyeli numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.8’de verilen değerlere göre %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde ve çevrim sayıları sırasıyla 52089, 27897 ve 6461 olacak şekilde en yüksek artışlar %1 MgO nanopartikül takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir. En düşük artışlar ise çevrim sayıları sırasıyla 37647, 18039 ve 5734 olacak şekilde %3 MgO nanopartikül takviyeli numunelerde görülmüştür.

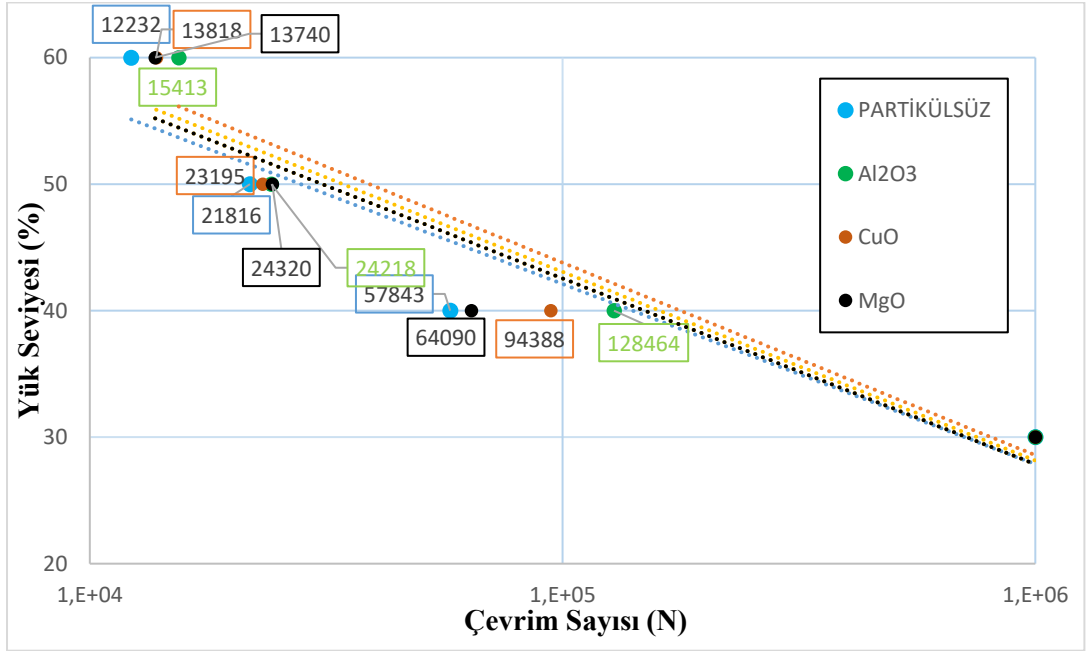
Farklı nanopartikül takviye oranlarına bağlı olarak, KM-5 katman yapısında nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin çevrim sayıları düşük olmasına rağmen, KM-5 katman yapısında %0.5, %1 ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin çevrim sayıları %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde artış göstermiştir.

Buna ek olarak KM-5 katman yapısında takviyesiz ve %0.5, %1 ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma testlerinde yük seviyeleri arttıkça yorulma ömürlerinde düşüş gözlemlenmiştir.

Rouway ve arkadaşları (2020), çalışmalarında kompozit malzemeye nanopartikül takviyesinin mekanik özellikleri arttırdığını fakat bu artışların malzemenin verimliliği, hacim, en-boy oranları ve geometrik yapısı gibi çeşitli özelliklere bağlı olduğunu vurgulamışlardır.

4.1.9. KM-3 katman yapısında ve %1 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışları

KM-3 katman yapısında ve %1 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9. KM-3 katman yapısında takviyesiz ve %1 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı nanopartikül katkılarının yorulma ömürlerine etkisini belirleyebilmek için KM-3 katman yapısında ve %1 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.9’da verilen değerlere göre %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde ve çevrim sayıları sırasıyla 128464, 24218 ve 15413 olacak şekilde en yüksek artışlar %1 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir. En düşük artışlar ise %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde ve çevrim sayıları sırasıyla 64090, 24320 ve 13740 olacak şekilde %1 MgO nanopartikül takviyeli numunelerde görülmüştür.

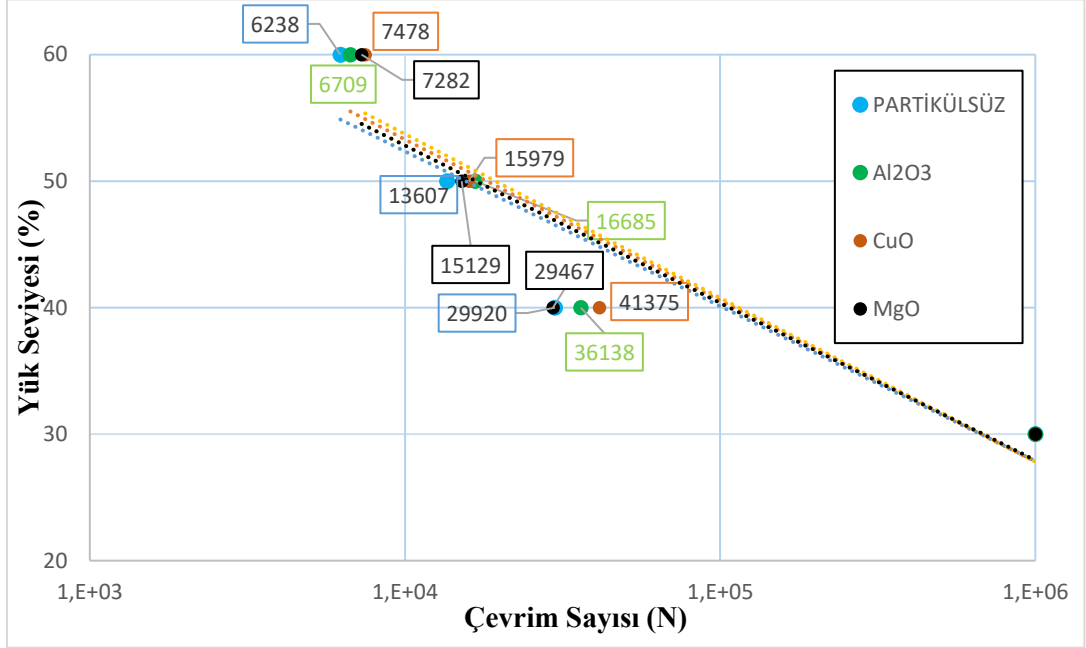
%1 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli numunelerde, yüzdesel olarak nanopartikül takviyesiz numune çevrim sayılarına göre en yüksek artışlar %40 yük seviyesinde sırasıyla %122, %63 ve %11 olarak gerçekleşmiştir. En düşük artışlar ise %50 yük seviyesinde sırasıyla %11, %6 ve %11 olmuştur.

Farklı nanopartikül takviyesine bağlı olarak, KM-3 katman yapısında nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin çevrim sayıları düşük olmasına rağmen, %1 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin çevrim sayıları %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde artış göstermiştir.

Ayrıca KM-3 katman yapısında takviyesiz ve %1 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma testlerinde yük seviyeleri arttıkça yorulma ömürlerinde düşüş gözlemlenmiştir.

4.1.10. KM-4 katman yapısında ve %3 Al₂O₃, CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışları

KM-4 katman yapısında ve %3 Al₂O₃, CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.10. KM-4 katman yapısında takviyesiz ve %3 Al₂O₃, CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı nanopartikül katkılarının yorulma ömürlerine etkisini belirleyebilmek için KM-4 katman yapısında ve %3 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

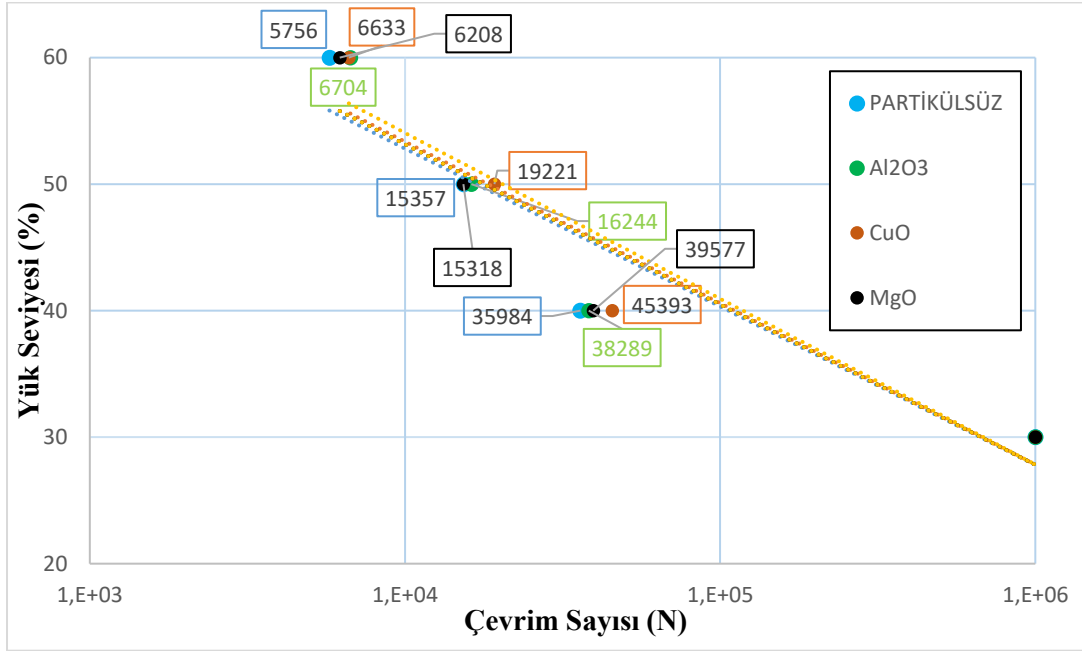
Şekil 4.10'da verilen değerlere göre %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde ve çevrim sayıları sırasıyla 41375, 15979 ve 7478 olacak şekilde en yüksek artışlar %3 CuO nanopartikül takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir. %3 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli numunelerde, yüzdesel olarak nanopartikül takviyesiz numune çevrim sayılarına göre artışlar %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde yakınsaklık göstermiştir.

Farklı nanopartikül takviyesine bağlı olarak, KM-4 katman yapısında nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin çevrim sayıları düşük olmasına rağmen, %3 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin çevrim sayıları %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde artış göstermiştir.

Ayrıca KM-4 katman yapısında takviyesiz ve %3 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma testlerinde yük seviyeleri arttıkça yorulma ömürlerinde düşüş gözlemlenmiştir.

4.1.11. KM-5 katman yapısında ve %0.5 Al₂O₃, CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışları

KM-5 katman yapısında ve %0.5 Al₂O₃, CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11. KM-5 katman yapısında takviyesiz ve %0.5 Al₂O₃, CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı nanopartikül katkılarının yorulma ömürlerine etkisini belirleyebilmek için KM-5 katman yapısında ve %0.5 Al₂O₃, CuO ve MgO nanopartikül takviyeli numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.11’de verilen değerlere göre %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde ve çevrim sayıları sırasıyla 45393, 19221 ve 6633 olacak şekilde en yüksek artışlar %0.5 CuO nanopartikül takviyeli numunelerde görülmüştür.

%0.5 Al₂O₃, CuO ve MgO nanopartikül takviyeli numunelerde, yüzdesel olarak nanopartikül takviyesiz numune çevrim sayılarına göre artışlar %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde yakınsaklık göstermiştir.

Farklı nanopartikül takviyesine bağlı olarak, KM-5 katman yapısında nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin çevrim sayıları düşük olmasına rağmen, %0.5 Al₂O₃, CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin çevrim sayıları %40, %50 ve %60 yük seviyelerinde artış göstermiştir.

Ayrıca KM-5 katman yapısında takviyesiz ve %0.5 Al₂O₃, CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin yorulma testlerinde yük seviyeleri arttıkça yorulma ömürlerinde düşüş gözlemlenmiştir.

4.2. Sönümleme oranları

Malzemelerde damping (sönümleme), çevrimsel yük altında mekanik enerji kaybı olarak tanımlanabilen bir malzeme özelliğidir. Damping genel olarak tüm mühendislik malzemelerinde çevrimsel deformasyon neticesinde mekanik enerji kaybından kaynaklanmaktadır.

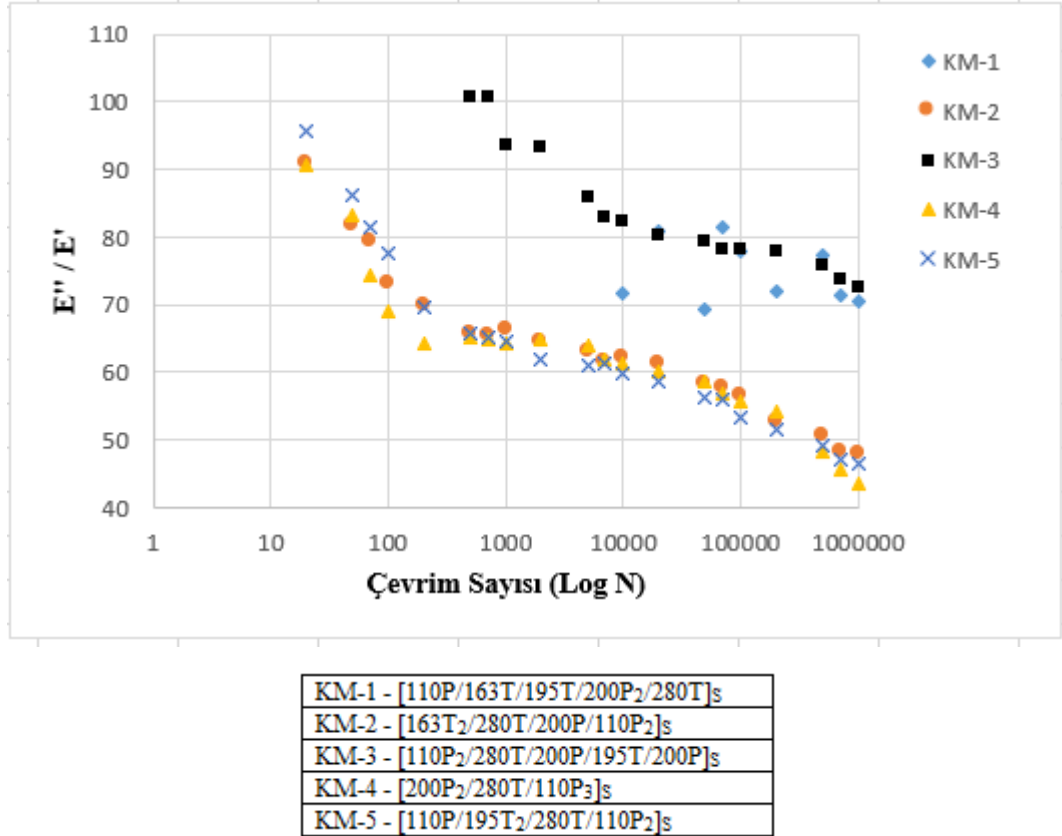
Damping (sönümleme), malzemelerde iç sürtünme sebebiyle moleküllerin yeniden dizilimi için gerekli enerji miktarı göstergesidir. Malzemelerde iç sürtünmeler ve hareketlerle harcanan enerjiye kayıp modülü (E'), malzemelerde uygulanan etkilere göre harcanan enerjiye de sönüm modülü (E'') denir.

Bu bölümde, yorulma testlerine tabi tutulan 5 farklı katman yapısında nanopartikül takviyesiz ve kütlece farklı oranlarda (%0.5, %1 ve %3) Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli olarak üretilen dokuma tip kompozit malzemelerin sönümleme oranları incelenmiştir.

Ayrıca yorulma deneyleri sonrasında nanopartikül takviyeli ve takviyesiz olarak üretilen dokuma tip kompozit malzemelerin $E''/E' - \text{Çevrim Sayısı (Log N)}$ karşılaştırmalı grafikleri verilerek, elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

4.2.1. Farklı katman yapılarında nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin sönümleme oranları

Farklı katman yapılarında nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. Farklı katman yapılarında nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı katman yapılarının sönümleme oranlarına etkisini belirleyebilmek için nanopartikül takviyesiz numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.12’de verilen değerlere göre en yüksek sönümleme oranları KM-3 katman yapısına sahip nanopartikül takviyesiz numunelerde, en düşük sönümleme oranları ise KM-1 katman yapısına sahip nanopartikül takviyesiz numunelerde görülmüştür.

KM-2 ve KM-4 katman yapısına sahip nanopartikül takviyesiz numunelerin sönümleme oranları yakınsaklık göstermektedir. İkinci en yüksek sönümleme oranları KM-5 katman yapısına sahip nanopartikül takviyesiz numunelerde bulunmuştur.

Katman yapılarındaki çeşitliliğe bağlı olarak, nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin sönümleme oranlarında farklılıklar meydana gelmiştir. Nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin sönümleme oranlarında görülen bu farklılıklar Tablo 6’da elde edilen çevrim sayıları ile uyumludur. Örneğin KM-3 katman yapısına sahip nanopartikül takviyesiz numunelerde rijitlik değerlerinin yüksek olmasına bağlı olarak hem yorulma ömürleri hem de sönümleme oranları yüksek çıkmıştır.

En yüksek sönümleme oranının KM-3 katman yapısına sahip nanopartikül takviyesiz numunelerde gözlemlenmesinin sebebi üretilen kompozit malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin az olmasıdır. En düşük sönümleme oranının KM-1 katman yapısına sahip nanopartikül takviyesiz numunelerde gözlemlenmesinin sebebi üretilen kompozit malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin fazla olmasıdır.

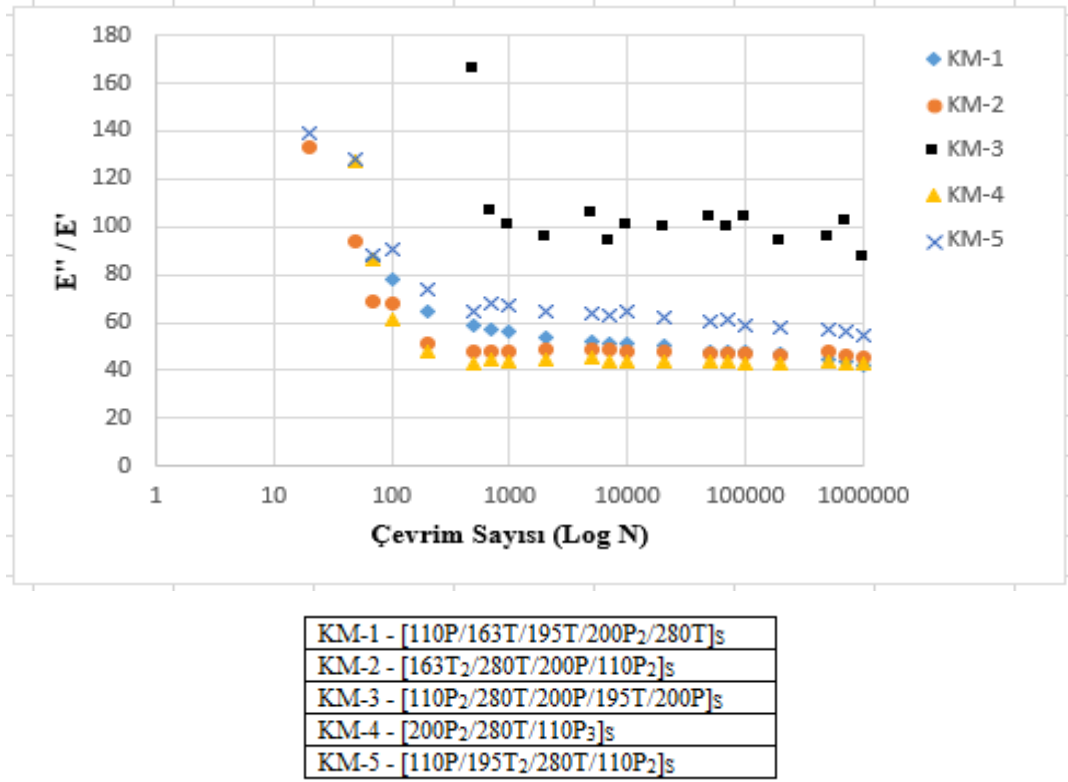
Çevrim sayıları sonsuz ömre doğru gittikçe sönümleme oranlarının devamlı olarak düşmesi, malzeme içinde hasarın devam ettiğini göstermektedir.

KM-1 katman yapısına sahip nanopartikül takviyesiz numunelerin sönümleme oranlarında gözlemlenen dalgalanmanın sebebi, üretilen kompozit malzemenin çekme-basma yorulma yükünden dolayı maruz kaldığı titreşimlerdir.

Sonuç olarak fazla hasara uğrayan yapılar, hasara uğramamış veya az hasara uğrayan yapılara kıyasla titreşimi daha az iletirler.

4.2.2. Farklı katman yapılarında %0.5 Al₂O₃ takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları

Farklı katman yapılarında %0.5 Al₂O₃ takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Farklı katman yapılarında %0.5 Al₂O₃ takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı katman yapılarının sönümleme oranlarına etkisini belirleyebilmek için %0.5 Al₂O₃ takviyeli numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.13'te verilen değerlere göre en yüksek sönümleme oranları KM-3 katman yapısına sahip %0.5 Al₂O₃ takviyeli numunelerde, en düşük sönümleme oranları ise KM-1 katman yapısına sahip %0.5 Al₂O₃ takviyeli numunelerde görülmüştür.

KM-2 ve KM-4 katman yapısına sahip %0.5 Al₂O₃ takviyeli numunelerin sönümleme oranları yakınsaklık göstermektedir. İkinci en yüksek sönümleme oranları KM-5 katman yapısına sahip %0.5 Al₂O₃ takviyeli numunelerde bulunmuştur.

Katman yapılarındaki çeşitliliğe bağlı olarak, %0.5 Al₂O₃ takviyeli kompozit malzemelerin sönümleme oranlarında farklılıklar meydana gelmiştir. %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümleme oranlarında görülen bu farklılıklar Tablo 6'da elde edilen çevrim sayıları ile uyumludur. Örneğin KM-3 katman yapısına sahip %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli numunelerde rijitlik değerlerinin yüksek olmasına bağlı olarak hem yorulma ömürleri hem de sönümleme oranları yüksek çıkmıştır.

En yüksek sönümleme oranının KM-3 katman yapısına sahip %0.5 Al₂O₃ takviyeli numunelerde gözlemlenmesinin sebebi üretilen kompozit malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin az olmasıdır. En düşük sönümleme oranının KM-1 katman yapısına sahip %0.5 Al₂O₃ takviyeli numunelerde gözlemlenmesinin sebebi üretilen kompozit malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin fazla olmasıdır.

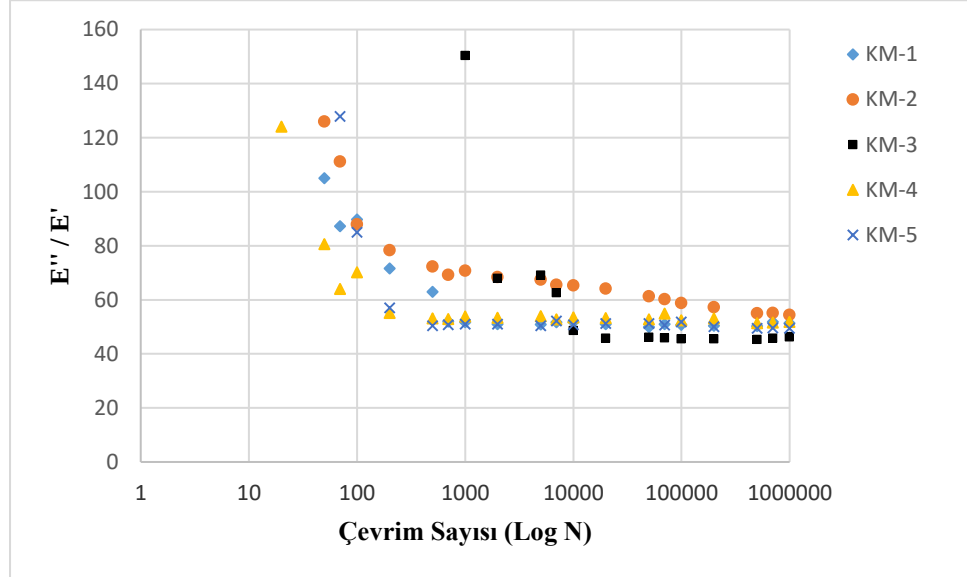
Çevrim sayıları sonsuz ömre doğru gittikçe sönümleme oranlarının yatay doğrultuda ilerlemesi, malzeme içinde hasarın devam etmediğini göstermektedir.

KM-3 katman yapısına sahip %0.5 Al₂O₃ takviyeli numunelerin sönümleme oranlarında gözlemlenen hafif dalgalanmaların sebebi, üretilen kompozit malzemenin çekme-basma yorulma yükünden dolayı maruz kaldığı titreşimlerdir.

Sonuç olarak fazla hasara uğrayan yapılar, hasara uğramamış veya az hasara uğrayan yapılara kıyasla titreşimi daha az iletirler.

4.2.3. Farklı katman yapılarında %1 Al₂O₃ takviyeli kompozit malzemelerin sönümleme oranları

Farklı katman yapılarında %1 Al₂O₃ takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.14'te verilmiştir.



KM-1 - [110P/163T/195T/200P ₂ /280T] _s
KM-2 - [163T ₂ /280T/200P/110P ₂] _s
KM-3 - [110P ₂ /280T/200P/195T/200P] _s
KM-4 - [200P ₂ /280T/110P ₃] _s
KM-5 - [110P/195T ₂ /280T/110P ₂] _s

Şekil 4.14. Farklı katman yapılarında %1 Al₂O₃ takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı katman yapılarının sönümlene oranlarına etkisini belirleyebilmek için %1 Al₂O₃ takviyeli numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.14'te verilen değerlere göre en yüksek sönümlene oranları KM-3 katman yapısına sahip %1 Al₂O₃ takviyeli numunelerde, en düşük sönümlene oranları ise KM-1 katman yapısına sahip %1 Al₂O₃ takviyeli numunelerde görülmüştür. KM-2, KM-4 ve KM-5 katman yapısına sahip %1 Al₂O₃ takviyeli numunelerin sönümlene oranları yakınsaklık göstermektedir.

Katman yapılarındaki çeşitliliğe bağlı olarak, %1 Al₂O₃ takviyeli kompozit malzemelerin sönümlene oranlarında farklılıklar meydana gelmiştir. %1 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlene oranlarında görülen bu farklılıklar Tablo 6'da elde edilen çevrim sayıları ile uyumludur. Örneğin KM-3 katman yapısına sahip %1 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli numunelerde rijitlik değerlerinin yüksek olmasına bağlı olarak hem yorulma ömürleri hem de sönümlene oranları yüksek çıkmıştır.

En yüksek sönümlene oranının KM-3 katman yapısına sahip %1 Al₂O₃ takviyeli numunelerde gözlemlenmesinin sebebi üretilen kompozit malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin az olmasıdır. En düşük sönümlene oranının KM-1 katman yapısına sahip %1 Al₂O₃ takviyeli numunelerde gözlemlenmesinin sebebi üretilen kompozit malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin fazla olmasıdır.

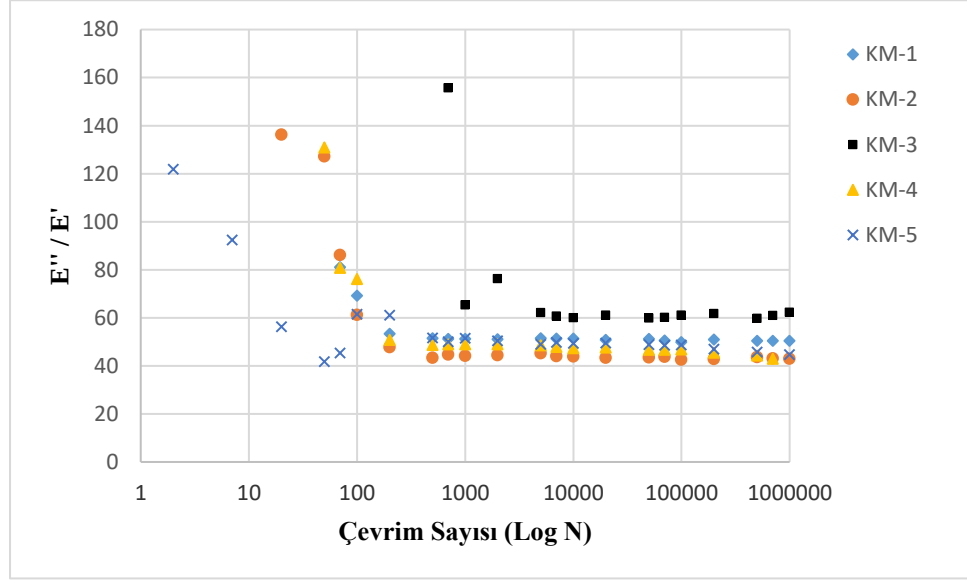
Çevrim sayıları sonsuz ömre doğru gittikçe sönümlene oranlarının yatay doğrultuda ilerlemesi, malzeme içinde hasarın devam etmediğini göstermektedir.

KM-3 katman yapısına sahip %1 Al₂O₃ takviyeli numunelerin sönümlene oranlarında gözlemlenen hafif dalgalanmaların sebebi, üretilen kompozit malzemenin çekme-basma yorulma yükünden dolayı maruz kaldığı titreşimlerdir.

Sonuç olarak fazla hasara uğrayan yapılar, hasara uğramamış veya az hasara uğrayan yapılara kıyasla titreşimi daha az iletirler.

4.2.4. Farklı katman yapılarında %3 Al₂O₃ takviyeli kompozit malzemelerin sönümlenme oranları

Farklı katman yapılarında %3 Al₂O₃ takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.15'te verilmiştir.



KM-1 - [110P/163T/195T/200P ₂ /280T] _s
KM-2 - [163T ₂ /280T/200P/110P ₂] _s
KM-3 - [110P ₂ /280T/200P/195T/200P] _s
KM-4 - [200P ₂ /280T/110P ₃] _s
KM-5 - [110P/195T ₂ /280T/110P ₂] _s

Şekil 4.15. Farklı katman yapılarında %3 Al₂O₃ takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı katman yapılarının sönümleme oranlarına etkisini belirleyebilmek için %3 Al₂O₃ takviyeli numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.15'te verilen değerlere göre en yüksek sönümleme oranları KM-3 katman yapısına sahip %3 Al₂O₃ takviyeli numunelerde, en düşük sönümleme oranları ise KM-1 katman yapısına sahip %3 Al₂O₃ takviyeli numunelerde görülmüştür.

KM-2, KM-4 katman yapısına sahip %3 Al₂O₃ takviyeli numunelerin sönümleme oranları yakınsaklık göstermektedir. İkinci en yüksek sönümleme oranları KM-5 katman yapısına sahip %3 Al₂O₃ takviyeli numunelerde bulunmuştur.

Katman yapılarındaki çeşitliliğe bağlı olarak, %3 Al₂O₃ takviyeli kompozit malzemelerin sönümleme oranlarında farklılıklar meydana gelmiştir. %3 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümleme oranlarında görülen bu farklılıklar Tablo 6'da elde edilen çevrim sayıları ile uyumludur. Örneğin KM-3 katman yapısına sahip %3 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli numunelerde rijitlik değerlerinin yüksek olmasına bağlı olarak hem yorulma ömürleri hem de sönümleme oranları yüksek çıkmıştır.

En yüksek sönümleme oranının KM-3 katman yapısına sahip %3 Al₂O₃ takviyeli numunelerde gözlemlenmesinin sebebi üretilen kompozit malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin az olmasıdır. En düşük sönümleme oranının KM-1 katman yapısına sahip %3 Al₂O₃ takviyeli numunelerde gözlemlenmesinin sebebi üretilen kompozit malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin fazla olmasıdır.

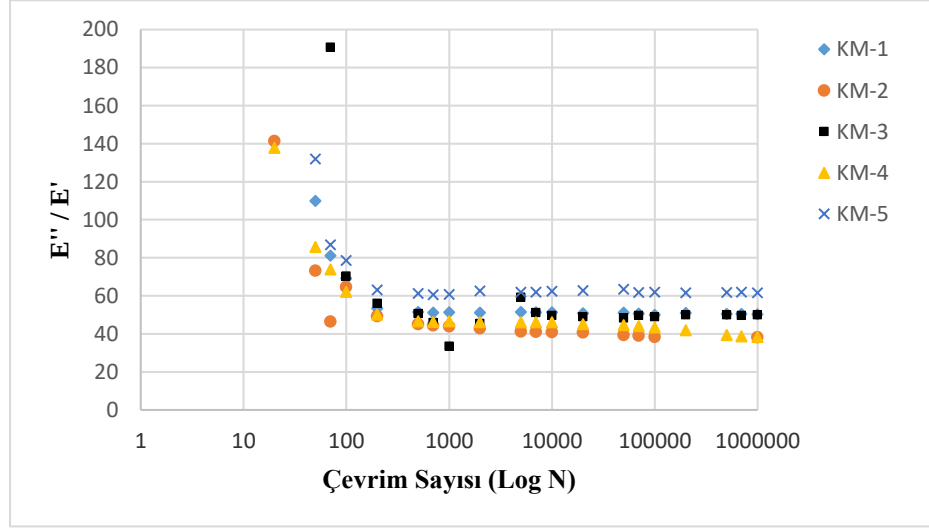
Çevrim sayıları sonsuz ömre doğru gittikçe sönümleme oranlarının yatay doğrultuda ilerlemesi, malzeme içinde hasarın devam etmediğini göstermektedir.

KM-3 katman yapısına sahip %3 Al₂O₃ takviyeli numunelerin sönümleme oranlarında gözlemlenen hafif dalgalanmaların sebebi, üretilen kompozit malzemenin çekme-basma yorulma yükünden dolayı maruz kaldığı titreşimlerdir.

Sonuç olarak fazla hasara uğrayan yapılar, hasara uğramamış veya az hasara uğrayan yapılara kıyasla titreşimi daha az iletirler.

4.2.5. Farklı katman yapılarında %0.5 CuO takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları

Farklı katman yapılarında %0.5 CuO takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.16’da verilmiştir.



KM-1 - [110P/163T/195T/200P ₂ /280T] _s
KM-2 - [163T ₂ /280T/200P/110P ₂] _s
KM-3 - [110P ₂ /280T/200P/195T/200P] _s
KM-4 - [200P ₂ /280T/110P ₃] _s
KM-5 - [110P/195T ₂ /280T/110P ₂] _s

Şekil 4.16. Farklı katman yapılarında %0.5 CuO takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı katman yapılarının sönümleme oranlarına etkisini belirleyebilmek için %0.5 CuO takviyeli numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.16’da verilen değerlere göre en yüksek sönümleme oranları KM-3 katman yapısına sahip %0.5 CuO takviyeli numunelerde, en düşük sönümleme oranları ise KM-1 katman yapısına sahip %0.5 CuO takviyeli numunelerde görülmüştür. KM-2, KM-4 ve KM-5 katman yapısına sahip %0.5 CuO takviyeli numunelerin sönümleme oranları yakınsaklık göstermektedir.

Katman yapılarındaki çeşitliliğe bağlı olarak, %0.5 CuO takviyeli kompozit malzemelerin sönümleme oranlarında farklılıklar meydana gelmiştir. %0.5 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümleme oranlarında görülen bu farklılıklar Tablo 6’da elde edilen çevrim sayıları ile uyumludur. Örneğin KM-3 katman yapısına sahip %0.5 CuO nanopartikül takviyeli numunelerde rijitlik değerlerinin yüksek olmasına bağlı olarak hem yorulma ömürleri hem de sönümleme oranları yüksek çıkmıştır.

En yüksek sönümleme oranının KM-3 katman yapısına sahip %0.5 CuO takviyeli numunelerde gözlemlenmesinin sebebi üretilen kompozit malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin az olmasıdır. En düşük sönümleme oranının KM-1 katman yapısına sahip %0.5 CuO takviyeli numunelerde gözlemlenmesinin sebebi üretilen kompozit malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin fazla olmasıdır.

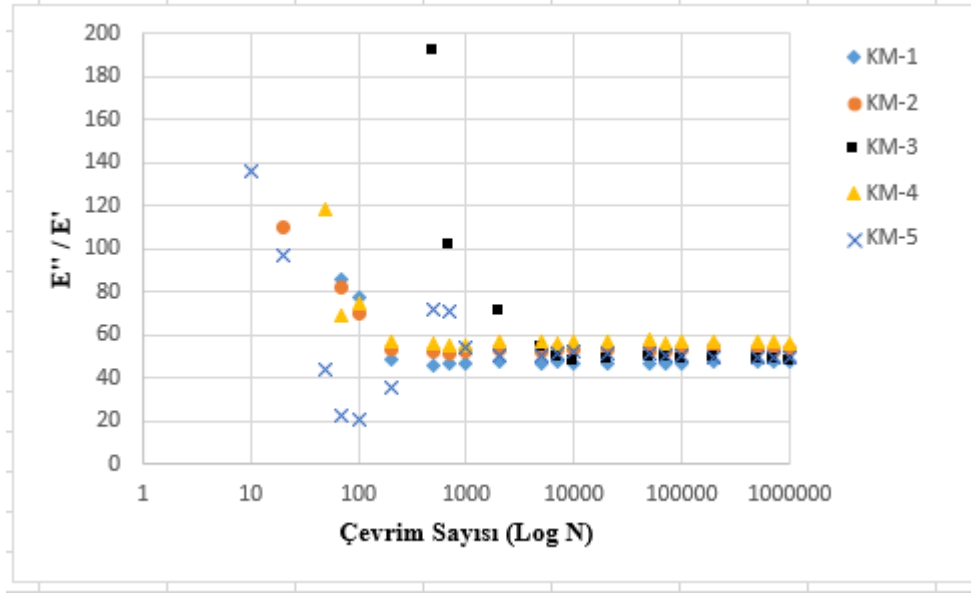
Çevrim sayıları sonsuz ömre doğru gittikçe sönümleme oranlarının yatay doğrultuda ilerlemesi, malzeme içinde hasarın devam etmediğini göstermektedir.

KM-3 katman yapısına sahip %0.5 CuO takviyeli numunelerin sönümleme oranlarında gözlemlenen hafif dalgalanmaların sebebi, üretilen kompozit malzemenin çekme-basma yorulma yükünden dolayı maruz kaldığı titreşimlerdir.

Sonuç olarak fazla hasara uğrayan yapılar, hasara uğramamış veya az hasara uğrayan yapılara kıyasla titreşimi daha az iletirler.

4.2.6. Farklı katman yapılarında %1 CuO takviyeli kompozit malzemelerin sönümlenme oranları

Farklı katman yapılarında %1 CuO takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.17’de verilmiştir.



KM-1 - [110P/163T/195T/200P ₂ /280T] _s
KM-2 - [163T ₂ /280T/200P/110P ₂] _s
KM-3 - [110P ₂ /280T/200P/195T/200P] _s
KM-4 - [200P ₂ /280T/110P ₃] _s
KM-5 - [110P/195T ₂ /280T/110P ₂] _s

Şekil 4.17. Farklı katman yapılarında %1 CuO takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı katman yapılarının sönümleme oranlarına etkisini belirleyebilmek için %1 CuO takviyeli numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.17’de verilen değerlere göre en yüksek sönümleme oranları KM-3 katman yapısına sahip %1 CuO takviyeli numunelerde, en düşük sönümleme oranları ise KM-1 katman yapısına sahip %1 CuO takviyeli numunelerde görülmüştür.

KM-2, KM-4 katman yapısına sahip %1 CuO takviyeli numunelerin sönümleme oranları yakınsaklık göstermektedir. İkinci en yüksek sönümleme oranları KM-5 katman yapısına sahip %1 CuO takviyeli numunelerde bulunmuştur.

Katman yapılarındaki çeşitliliğe bağlı olarak, %1 CuO takviyeli kompozit malzemelerin sönümleme oranlarında farklılıklar meydana gelmiştir. %1 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümleme oranlarında görülen bu farklılıklar Tablo 6’da elde edilen çevrim sayıları ile uyumludur. Örneğin KM-3 katman yapısına sahip %1 CuO nanopartikül takviyeli numunelerde rijitlik değerlerinin yüksek olmasına bağlı olarak hem yorulma ömürleri hem de sönümleme oranları yüksek çıkmıştır.

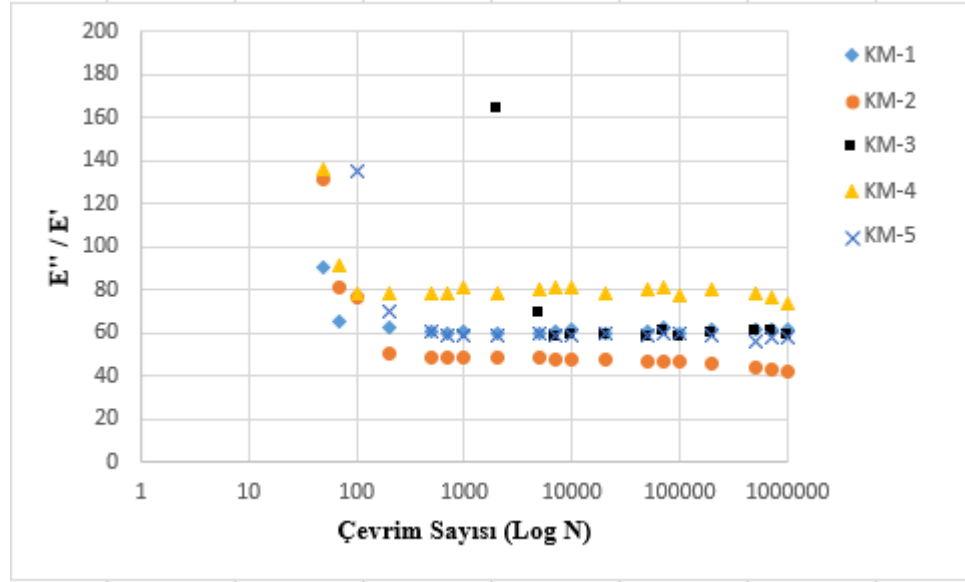
En yüksek sönümleme oranının KM-3 katman yapısına sahip %1 CuO takviyeli numunelerde gözlemlenmesinin sebebi üretilen kompozit malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin az olmasıdır. En düşük sönümleme oranının KM-1 katman yapısına sahip %1 CuO takviyeli numunelerde gözlemlenmesinin sebebi üretilen kompozit malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin fazla olmasıdır.

Çevrim sayıları sonsuz ömre doğru gittikçe sönümleme oranlarının yatay doğrultuda ilerlemesi, malzeme içinde hasarın devam etmediğini göstermektedir.

KM-5 katman yapısına sahip %1 CuO takviyeli numunelerin sönümleme oranlarında gözlemlenen dalgalanmaların sebebi, üretilen kompozit malzemenin çekme-basma yorulma yükünden dolayı maruz kaldığı titreşimlerdir.

4.2.7. Farklı katman yapılarında %3 CuO takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları

Farklı katman yapılarında %3 CuO takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.18’de verilmiştir.



KM-1 - [110P/163T/195T/200P ₂ /280T] _s
KM-2 - [163T ₂ /280T/200P/110P ₂] _s
KM-3 - [110P ₂ /280T/200P/195T/200P] _s
KM-4 - [200P ₂ /280T/110P ₃] _s
KM-5 - [110P/195T ₂ /280T/110P ₂] _s

Şekil 4.18. Farklı katman yapılarında %3 CuO takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı katman yapılarının sönümlene oranlarına etkisini belirleyebilmek için %3 CuO takviyeli numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.18’de verilen değerlere göre en yüksek sönümlene oranları KM-3 katman yapısına sahip %3 CuO takviyeli numunelerde, en düşük sönümlene oranları ise KM-1 katman yapısına sahip %3 CuO takviyeli numunelerde görülmüştür. KM-2, KM-4 ve KM-5 katman yapısına sahip %3 CuO takviyeli numunelerin sönümlene oranları yakınsaklık göstermektedir.

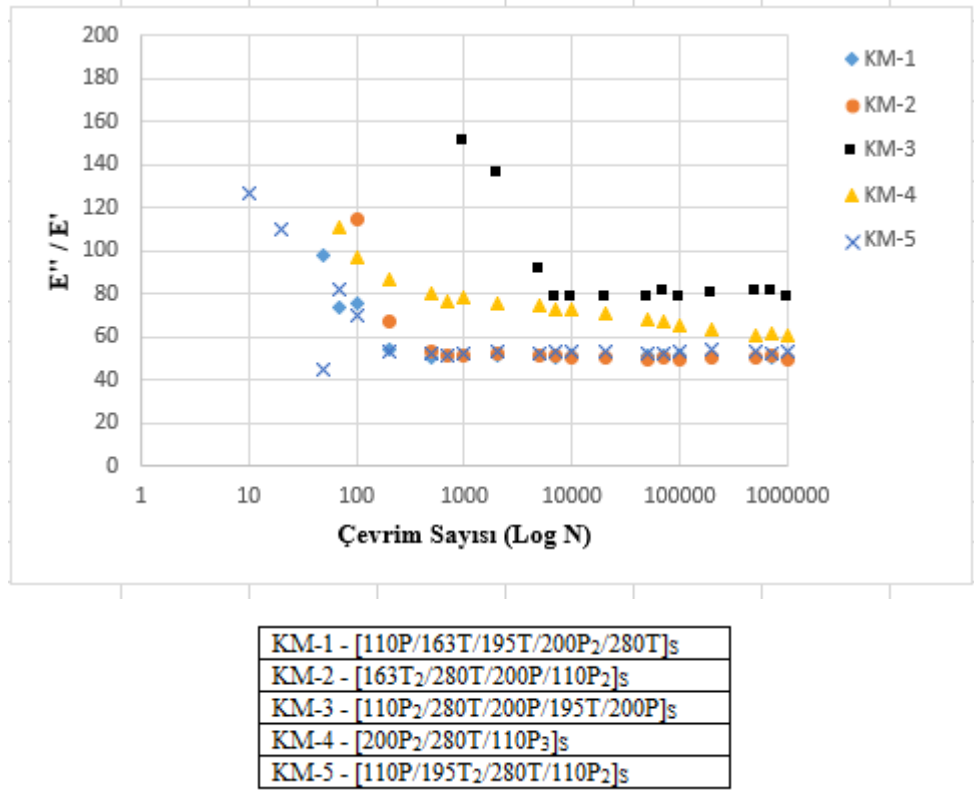
Katman yapılarındaki çeşitliliğe bağlı olarak, %3 CuO takviyeli kompozit malzemelerin sönümlene oranlarında farklılıklar meydana gelmiştir. %3 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlene oranlarında görülen bu farklılıklar Tablo 6’da elde edilen çevrim sayıları ile uyumludur. Örneğin KM-3 katman yapısına sahip %3 CuO nanopartikül takviyeli numunelerde rijitlik değerlerinin yüksek olmasına bağlı olarak hem yorulma ömürleri hem de sönümlene oranları yüksek çıkmıştır.

En yüksek sönümlene oranının KM-3 katman yapısına sahip %3 CuO takviyeli numunelerde gözlemlenmesinin sebebi üretilen kompozit malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin az olmasıdır. En düşük sönümlene oranının KM-1 katman yapısına sahip %3 CuO takviyeli numunelerde gözlemlenmesinin sebebi üretilen kompozit malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin fazla olmasıdır.

Çevrim sayıları sonsuz ömre doğru gittikçe sönümlene oranlarının yatay doğrultuda ilerlemesi, malzeme içinde hasarın devam etmediğini kanıtlamaktadır.

4.2.8. Farklı katman yapılarında %0.5 MgO takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları

Farklı katman yapılarında %0.5 MgO takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.19’da verilmiştir.



Şekil 4.19. Farklı katman yapılarında %0.5 MgO takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı katman yapılarının sönümlene oranlarına etkisini belirleyebilmek için %0.5 MgO takviyeli numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.19’da verilen değerlere göre en yüksek sönümlene oranları KM-3 katman yapısına sahip %0.5 MgO takviyeli numunelerde, en düşük sönümlene oranları ise KM-1 katman yapısına sahip %0.5 MgO takviyeli numunelerde görülmüştür.

KM-2 ve KM-4 katman yapısına sahip %0.5 MgO takviyeli numunelerin sönümlene oranları yakınsaklık göstermektedir. İkinci en yüksek sönümlene oranları KM-5 katman yapısına sahip %0.5 MgO takviyeli numunelerde bulunmuştur.

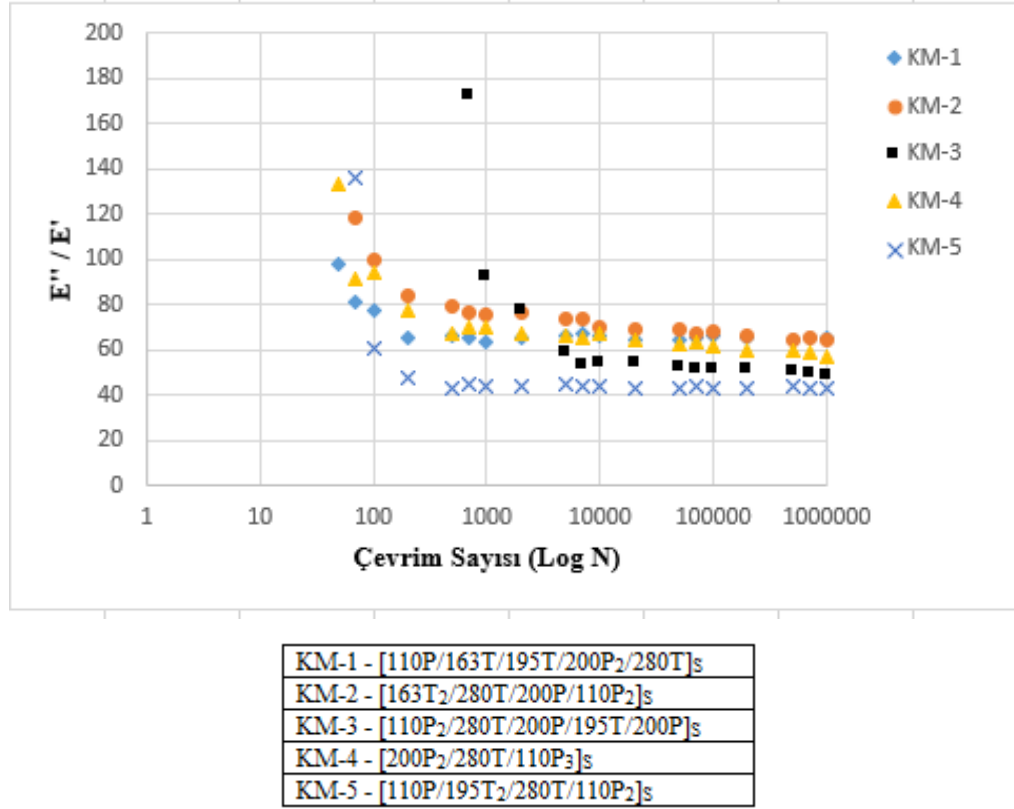
Katman yapılarındaki çeşitliliğe bağlı olarak, %0.5 MgO takviyeli kompozit malzemelerin sönümlene oranlarında farklılıklar meydana gelmiştir. %0.5 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlene oranlarında görülen bu farklılıklar Tablo 6’da elde edilen çevrim sayıları ile uyumludur. Örneğin KM-3 katman yapısına sahip %0.5 MgO nanopartikül takviyeli numunelerde rijitlik değerlerinin yüksek olmasına bağlı olarak hem yorulma ömürleri hem de sönümlene oranları yüksek çıkmıştır.

En yüksek sönümlene oranının KM-3 katman yapısına sahip %0.5 MgO takviyeli numunelerde gözlemlenmesinin sebebi üretilen kompozit malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin az olmasıdır. En düşük sönümlene oranının KM-1 katman yapısına sahip %0.5 MgO takviyeli numunelerde gözlemlenmesinin sebebi üretilen kompozit malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin fazla olmasıdır.

Çevrim sayıları sonsuz ömre doğru gittikçe sönümlene oranlarının yatay doğrultuda ilerlemesi, malzeme içinde hasarın devam etmediğini kanıtlamaktadır.

4.2.9. Farklı katman yapılarında %1 MgO takviyeli kompozit malzemelerin sönümlenme oranları

Farklı katman yapılarında %1 MgO takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.20’de verilmiştir.



Şekil 4.20. Farklı katman yapılarında %1 MgO takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı katman yapılarının sönümlene oranlarına etkisini belirleyebilmek için %1 MgO takviyeli numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.20’de verilen değerlere göre en yüksek sönümlene oranları KM-3 katman yapısına sahip %1 MgO takviyeli numunelerde, en düşük sönümlene oranları ise KM-1 katman yapısına sahip %1 MgO takviyeli numunelerde görülmüştür. KM-4, KM-5 katman yapısına sahip %1 MgO takviyeli numunelerin sönümlene oranları yakınsaklık göstermektedir.

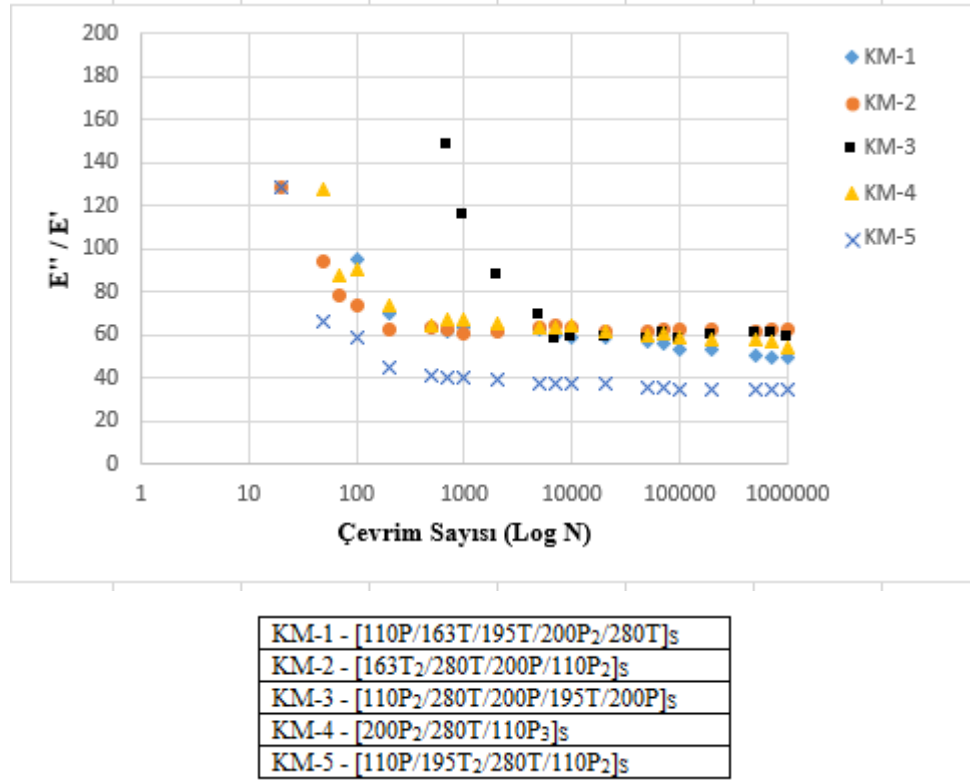
Katman yapılarındaki çeşitliliğe bağlı olarak, %1 MgO takviyeli kompozit malzemelerin sönümlene oranlarında farklılıklar meydana gelmiştir. %1 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlene oranlarında görülen bu farklılıklar Tablo 6’da elde edilen çevrim sayıları ile uyumludur. Örneğin KM-3 katman yapısına sahip %1 MgO nanopartikül takviyeli numunelerde rijitlik değerlerinin yüksek olmasına bağlı olarak hem yorulma ömürleri hem de sönümlene oranları yüksek çıkmıştır.

En yüksek sönümlene oranının KM-3 katman yapısına sahip %1 MgO takviyeli numunelerde gözlemlenmesinin sebebi üretilen kompozit malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin az olmasıdır. En düşük sönümlene oranının KM-1 katman yapısına sahip %1 MgO takviyeli numunelerde gözlemlenmesinin sebebi üretilen kompozit malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin fazla olmasıdır.

Çevrim sayıları sonsuz ömre doğru gittikçe sönümlene oranlarının yatay doğrultuda ilerlemesi, malzeme içinde hasarın devam etmediğini kanıtlamaktadır.

4.2.10. Farklı katman yapılarında %3 MgO takviyeli kompozit malzemelerin sönümleme oranları

Farklı katman yapılarında %3 MgO takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.21. Farklı katman yapılarında %3 MgO takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı katman yapılarının sönümlene oranlarına etkisini belirleyebilmek için %3 MgO takviyeli numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.21’de verilen değerlere göre en yüksek sönümlene oranları KM-3 katman yapısına sahip %1 MgO takviyeli numunelerde, en düşük sönümlene oranları ise KM-1 katman yapısına sahip %3 MgO takviyeli numunelerde görülmüştür. KM-2, KM-4 ve KM-5 katman yapısına sahip %3 MgO takviyeli numunelerin sönümlene oranları yakınsaklık göstermektedir.

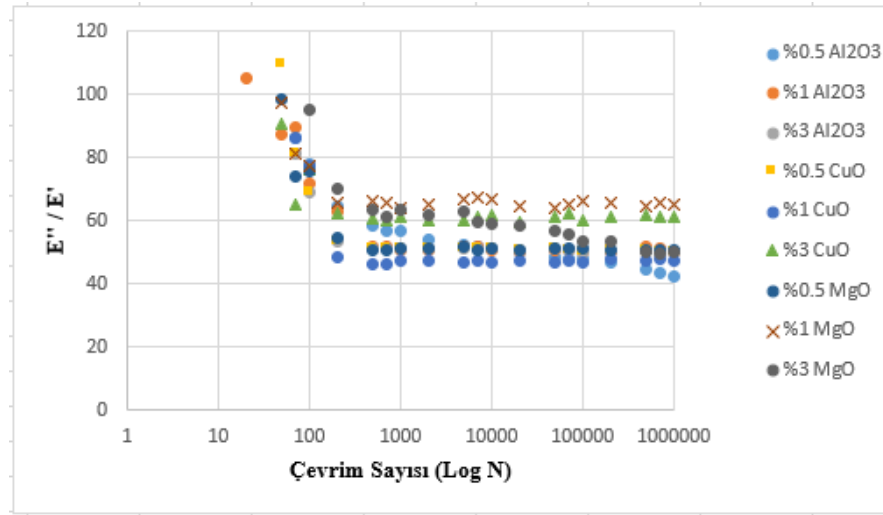
Katman yapılarındaki çeşitliliğe bağlı olarak, %3 MgO takviyeli kompozit malzemelerin sönümlene oranlarında farklılıklar meydana gelmiştir. %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlene oranlarında görülen bu farklılıklar Tablo 6’da elde edilen çevrim sayıları ile uyumludur. Örneğin KM-3 katman yapısına sahip %3 MgO nanopartikül takviyeli numunelerde rijitlik değerlerinin yüksek olmasına bağlı olarak hem yorulma ömürleri hem de sönümlene oranları yüksek çıkmıştır.

En yüksek sönümlene oranının KM-3 katman yapısına sahip %3 MgO takviyeli numunelerde gözlemlenmesinin sebebi üretilen kompozit malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin az olmasıdır. En düşük sönümlene oranının KM-1 katman yapısına sahip %3 MgO takviyeli numunelerde gözlemlenmesinin sebebi üretilen kompozit malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin fazla olmasıdır.

Çevrim sayıları sonsuz ömre doğru gittikçe sönümlene oranlarının yatay doğrultuda ilerlemesi, malzeme içinde hasarın devam etmediğini kanıtlamaktadır.

4.2.11. KM-1 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al_2O_3 , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları

KM-1 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al_2O_3 , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.22. KM-1 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al_2O_3 , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı oranlarda Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyesinin sönümlleme oranlarına etkisini belirleyebilmek için KM-1 katman yapılı numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.22’de verilen değerlere göre en yüksek sönümlleme oranları sırasıyla %0.5 CuO, %1 Al_2O_3 ve %0.5 MgO takviyeli numunelerde görülmüştür. %0.5 MgO ve %1 MgO takviyeli numunelerde sönümlleme oranları yakınsamıştır. En düşük sönümlleme oranı ise %3 Al_2O_3 takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir.

Hamzah ve arkadaşları (2015), çalışmalarında CuO nanopartiküllerinin kaliteli doldurucu malzemeler olduklarını keşfetmişlerdir.

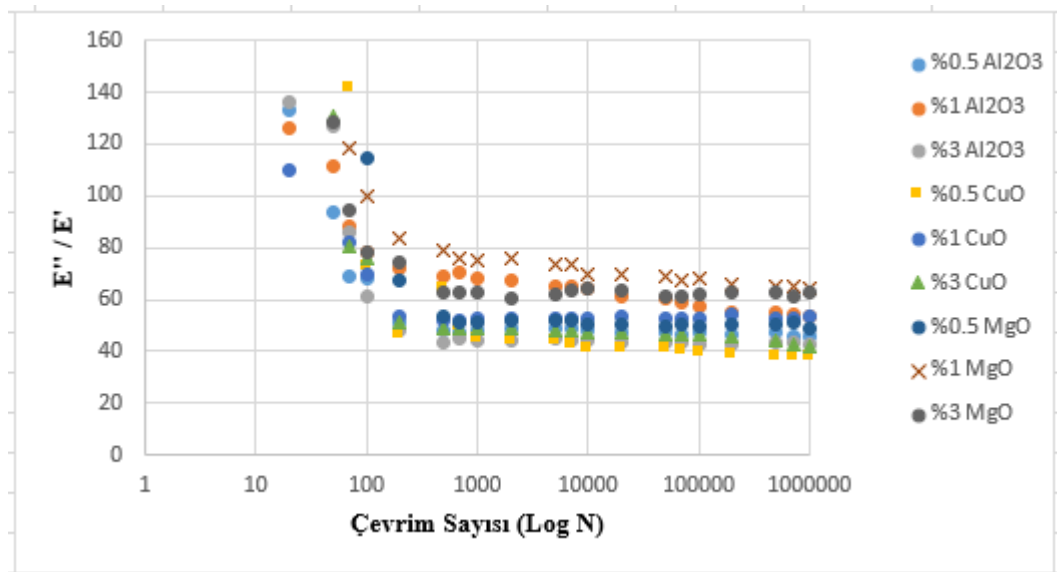
CuO nanopartikülleri kaliteli birer doldurucu malzeme olduklarından dolayı, matris ve arayüz arasında kuvvetli bağlar oluşturarak kompozit malzemelerde rijitliği arttırmıştır.

Sonuç olarak %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerde sönümlleme oranlarının yüksek çıktığı düşünülmektedir. Genel olarak nanopartikül takviye oranları arttıkça kompozit malzemelerin sönümlleme oranlarında azalmalar gözlemlenmiştir.

Çevrim sayıları sonsuz ömre doğru gittikçe sönümlleme oranlarının yatay doğrultuda ilerlemesi, malzeme içinde hasarın devam etmediğini kanıtlamaktadır.

4.2.12. KM-2 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al_2O_3 , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları

KM-2 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al_2O_3 , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.23'te verilmiştir.



Şekil 4.23. KM-2 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al_2O_3 , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı oranlarda Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyesinin sönümleme oranlarına etkisini belirleyebilmek için KM-2 katman yapılı numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.23'te verilen değerlere göre en yüksek sönümleme oranı sırasıyla %0.5 CuO takviyeli numunelerde görülmüştür. %3 CuO ve %0.5 Al_2O_3 takviyeli numunelerde sönümleme oranları yakınsamıştır. En düşük sönümleme oranları ise sırasıyla %0.5 MgO ve %1 MgO takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir. %0.5 MgO ve %1 MgO takviyeli numunelerde sönümleme oranları yakınsaklık göstermiştir.

Hamzah ve arkadaşları (2015), çalışmalarında CuO nanopartiküllerinin kaliteli doldurucu malzemeler olduklarını keşfetmişlerdir.

CuO nanopartikülleri kaliteli birer doldurucu malzeme olduklarından dolayı, matris ve arayüz arasında kuvvetli bağlar oluşturarak kompozit malzemelerde rijitliği arttırmıştır.

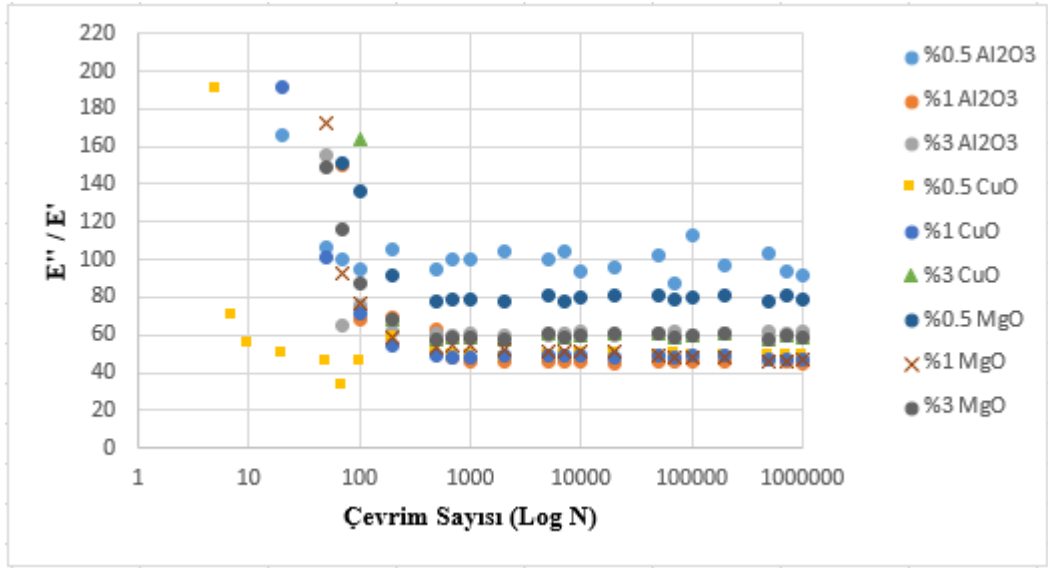
Sonuç olarak %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerde sönümleme oranlarının yüksek çıktığı düşünülmektedir.

Çevrim sayıları sonsuz ömre doğru gittikçe sönümleme oranlarının yatay doğrultuda ilerlemesi, malzeme içinde hasarın devam etmediğini kanıtlamaktadır.

4.2.13. KM-3 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al_2O_3 , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlenme oranları

KM-3 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al_2O_3 , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.24'te verilmiştir.

Farklı oranlarda Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyesinin sönümlenme oranlarına etkisini belirleyebilmek için KM-3 katman yapılı numuneler aynı grafikte incelenmiştir.



Şekil 4.24. KM-3 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al_2O_3 , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.24'te verilen değerlere göre en yüksek sönümlenme oranları sırasıyla %1 CuO, %0.5 CuO ve %1 MgO takviyeli numunelerde görülmüştür. %1 MgO ve %0.5 Al_2O_3 takviyeli numunelerde sönümlenme oranları yakınsamıştır. En düşük sönümlenme oranı ise %3 MgO takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir. %1 Al_2O_3 ve %3 Al_2O_3 takviyeli numunelerde sönümlenme oranları yakınsaklık göstermiştir.

Hamzah ve arkadaşları (2015), çalışmalarında CuO nanopartiküllerinin kaliteli doldurucu malzemeler olduklarını keşfetmişlerdir.

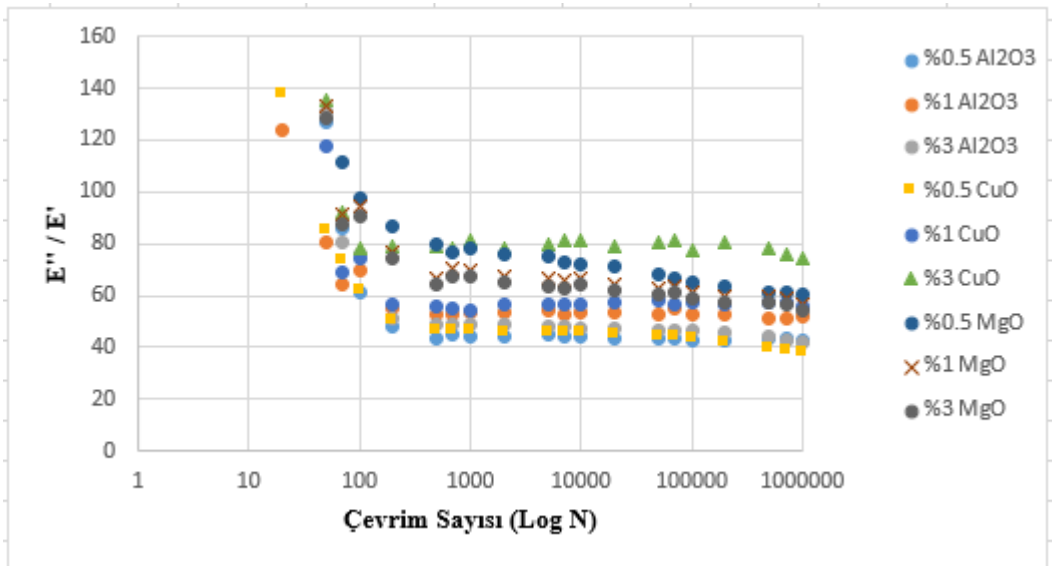
CuO nanopartikülleri kaliteli birer doldurucu malzeme olduklarından dolayı, matris ve arayüz arasında kuvvetli bağlar oluşturarak kompozit malzemelerde rijitliği arttırmıştır.

Sonuç olarak %0.5 ve %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerde sönümlenme oranlarının yüksek çıktığı düşünülmektedir. Genel olarak nanopartikül takviye oranları arttıkça kompozit malzemelerin sönümlenme oranlarında azalmalar gözlemlenmiştir.

Çevrim sayıları sonsuz ömre doğru gittikçe sönümlenme oranlarının yatay doğrultuda ilerlemesi, malzeme içinde hasarın devam etmediğini kanıtlamaktadır.

4.2.14. KM-4 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al_2O_3 , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlenme oranları

KM-4 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al_2O_3 , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.25'te verilmiştir.



Şekil 4.25. KM-4 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al_2O_3 , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı oranlarda Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyesinin sönümleme oranlarına etkisini belirleyebilmek için KM-4 katman yapılı numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.25'te verilen değerlere göre en yüksek sönümleme oranı %0.5 CuO takviyeli numunelerde görülmüştür. %1 MgO ve %3 MgO takviyeli numunelerde sönümleme oranları yakınsamıştır. En düşük sönümleme oranı ise %3 Al_2O_3 takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir. %3 Al_2O_3 ve %1 Al_2O_3 takviyeli numunelerde sönümleme oranları yakınsaklık göstermiştir.

Hamzah ve arkadaşları (2015), çalışmalarında CuO nanopartiküllerinin kaliteli doldurucu malzemeler olduklarını keşfetmişlerdir.

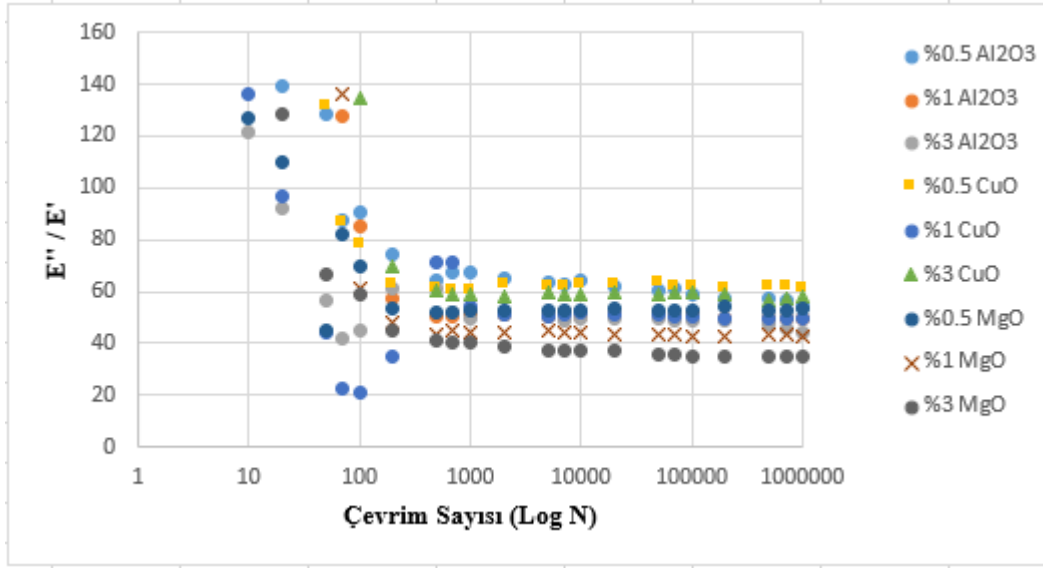
CuO nanopartikülleri kaliteli birer doldurucu malzeme olduklarından dolayı, matris ve arayüz arasında kuvvetli bağlar oluşturarak kompozit malzemelerde rijitliği arttırmıştır.

Sonuç olarak %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerde sönümleme oranlarının yüksek çıktığı düşünülmektedir. Genel olarak nanopartikül takviye oranları arttıkça kompozit malzemelerin sönümleme oranlarında azalmalar gözlemlenmiştir.

Çevrim sayıları sonsuz ömre doğru gittikçe sönümleme oranlarının yatay doğrultuda ilerlemesi, malzeme içinde hasarın devam etmediğini kanıtlamaktadır.

4.2.15. KM-5 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al_2O_3 , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları

KM-5 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al_2O_3 , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.26’da verilmiştir.



Şekil 4.26. KM-5 katman yapısında %0.5-%1-%3 (Al_2O_3 , CuO ve MgO) nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği

Farklı oranlarda Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyesinin sönümlleme oranlarına etkisini belirleyebilmek için KM-5 katman yapılı numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.26’da verilen değerlere göre en yüksek sönümlleme oranları sırasıyla %1 MgO, %0.5 Al_2O_3 ve %1 CuO takviyeli numunelerde görülmüştür. %1 CuO, %3 CuO ve %0.5 CuO takviyeli numunelerde sönümlleme oranları yakınsamıştır. En düşük sönümlleme oranı ise %3 MgO takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir. %3 MgO, %1 Al_2O_3 ve %3 Al_2O_3 takviyeli numunelerde sönümlleme oranları yakınsaklık göstermiştir.

Hamzah ve arkadaşları (2015), çalışmalarında CuO nanopartiküllerinin kaliteli doldurucu malzemeler olduklarını keşfetmişlerdir.

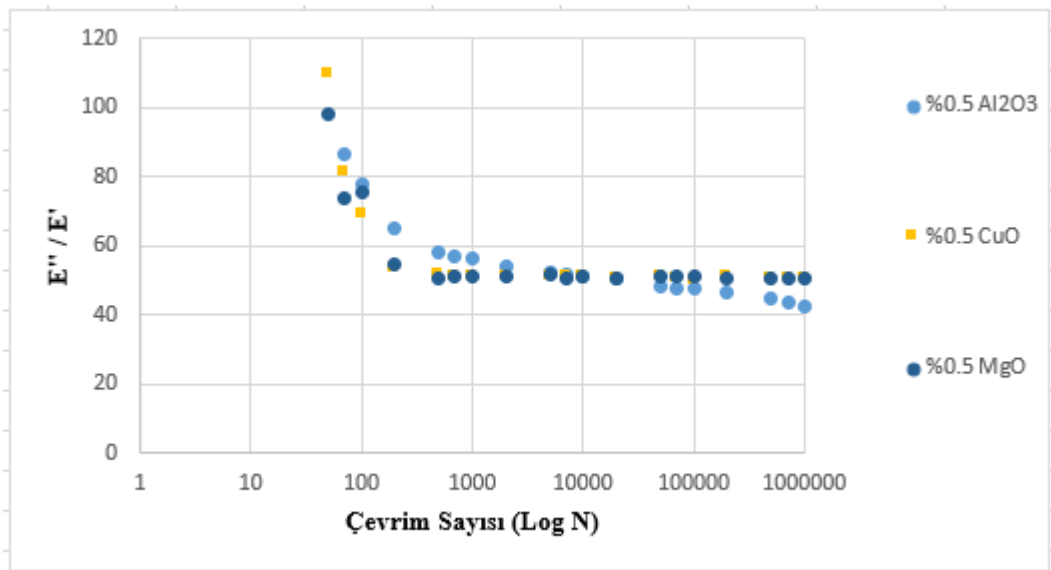
CuO nanopartikülleri kaliteli birer doldurucu malzeme olduklarından dolayı, matris ve arayüz arasında kuvvetli bağlar oluşturarak kompozit malzemelerde rijitliği arttırmıştır.

Sonuç olarak %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerde sönümlenme oranlarının yüksek çıktığı düşünülmektedir. Genel olarak nanopartikül takviye oranları arttıkça kompozit malzemelerin sönümlenme oranlarında azalmalar gözlemlenmiştir.

Çevrim sayıları sonsuz ömre doğru gittikçe sönümlenme oranlarının yatay doğrultuda ilerlemesi, malzeme içinde hasarın devam etmediğini kanıtlamaktadır.

4.2.16. KM-1 katman yapısında ve %0.5 Al₂O₃, CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlenme oranları

KM-1 katman yapısında ve %0.5 Al₂O₃, CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.27’de verilmiştir.



Şekil 4.27. KM-1 katman yapısında %0.5 Al₂O₃, CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği

KM-1 katman yapılı ve %0.5 takviye oranında farklı nanopartiküllerin (Al_2O_3 , CuO ve MgO) sönümlene oranlarına etkisini belirleyebilmek için numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

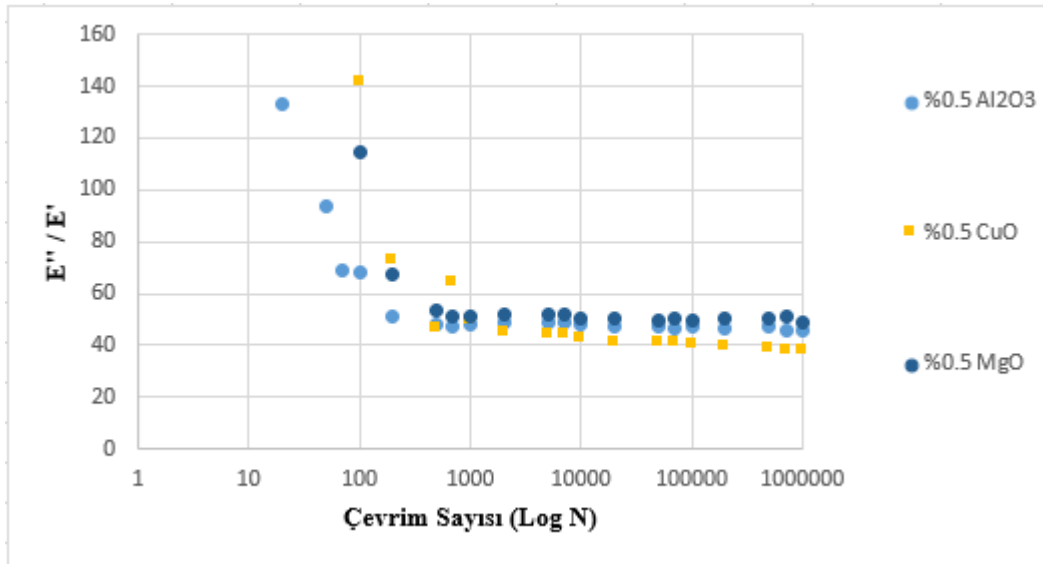
Şekil 4.27’de verilen değerlere göre en yüksek sönümlene oranı %0.5 CuO takviyeli numunelerde, en düşük sönümlene oranı ise %0.5 Al_2O_3 takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir.

Hamzah ve arkadaşları (2015), çalışmalarında CuO nanopartiküllerinin kaliteli doldurucu malzemeler olduklarını keşfetmişlerdir.

Ayrıca Şekil 4.27’de verilen değerlere göre en yüksek sönümlene oranının %0.5 CuO takviyeli numunelerde bulunması Hamzah ve arkadaşlarının çalışmalarına uygundur.

4.2.17. KM-2 katman yapısında ve %0.5 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlene oranları

KM-2 katman yapısında ve %0.5 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.28’de verilmiştir.



Şekil 4.28. KM-2 katman yapısında %0.5 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği

KM-2 katman yapılı ve %0.5 takviye oranında farklı nanopartiküllerin (Al_2O_3 , CuO ve MgO) sönümlleme oranlarına etkisini belirleyebilmek için numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

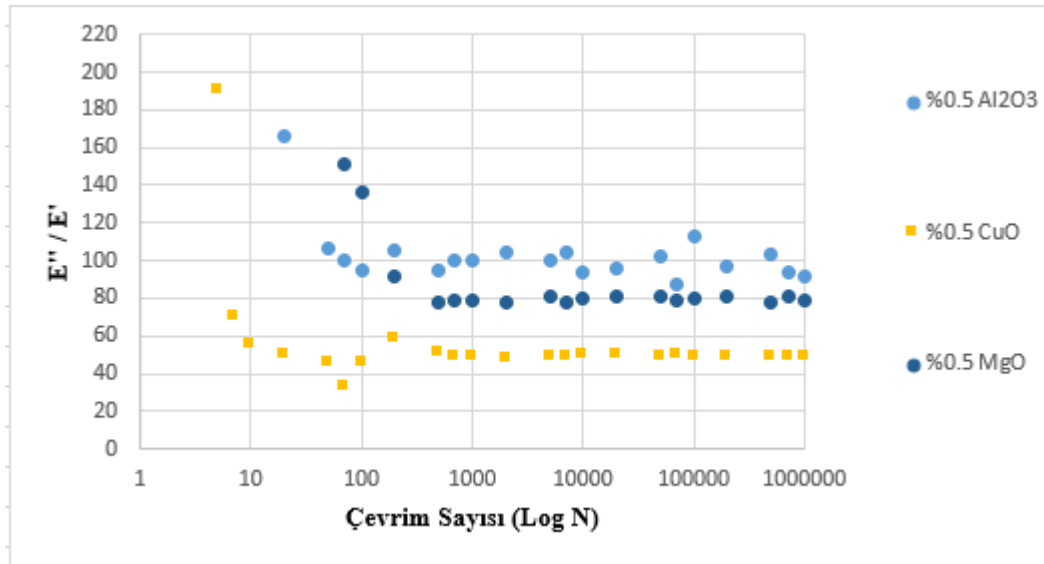
Şekil 4.28’de verilen değerlere göre en yüksek sönümlleme oranı %0.5 CuO takviyeli numunelerde, en düşük sönümlleme oranı ise %0.5 MgO takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir.

Hamzah ve arkadaşları (2015), çalışmalarında CuO nanopartiküllerinin kaliteli doldurucu malzemeler olduklarını keşfetmişlerdir.

Ayrıca Şekil 4.28’de verilen değerlere göre en yüksek sönümlleme oranının %0.5 CuO takviyeli numunelerde bulunması Hamzah ve arkadaşlarının çalışmalarına uygundur.

4.2.18. KM-3 katman yapısında ve %0.5 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları

KM-3 katman yapısında ve %0.5 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.29’da verilmiştir.



Şekil 4.29. KM-3 katman yapısında %0.5 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği

KM-3 katman yapılı ve %0.5 takviye oranında farklı nanopartiküllerin (Al_2O_3 , CuO ve MgO) sönümlenme oranlarına etkisini belirleyebilmek için numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

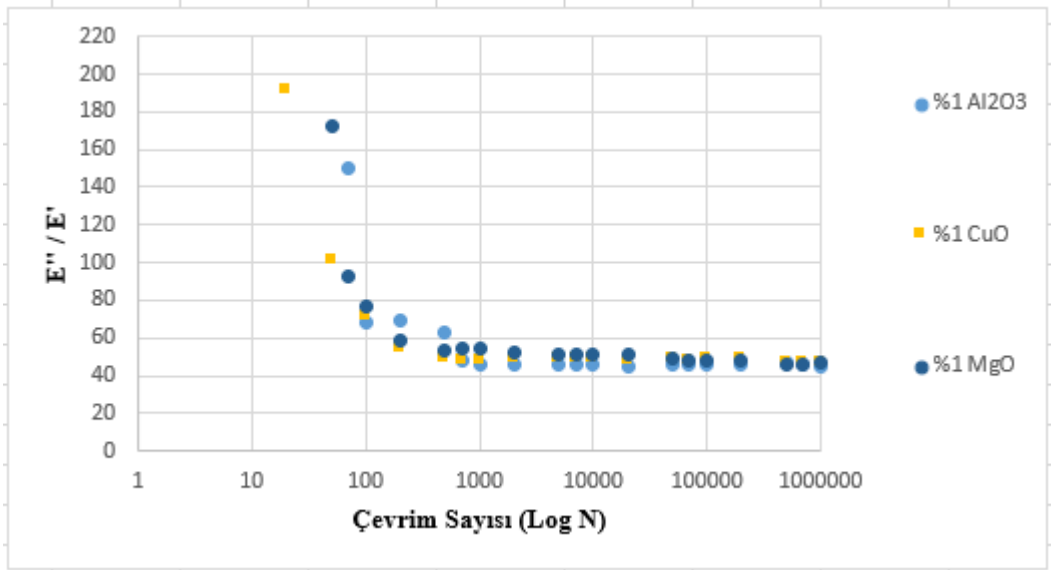
Şekil 4.29’da verilen değerlere göre en yüksek sönümlenme oranı %0.5 CuO takviyeli numunelerde, en düşük sönümlenme oranı ise %0.5 MgO takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir.

Hamzah ve arkadaşları (2015), çalışmalarında CuO nanopartiküllerinin kaliteli doldurucu malzemeler olduklarını keşfetmişlerdir.

Ayrıca Şekil 4.29’da verilen değerlere göre en yüksek sönümlenme oranının %0.5 CuO takviyeli numunelerde bulunması Hamzah ve arkadaşlarının çalışmalarına uygundur.

4.2.19. KM-3 katman yapısında ve %1 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlenme oranları

KM-3 katman yapısında ve %1 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.30’da verilmiştir.



Şekil 4.30. KM-3 katman yapısında %1 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği

KM-3 katman yapılı ve %1 takviye oranında farklı nanopartiküllerin (Al_2O_3 , CuO ve MgO) sönümlene oranlarına etkisini belirleyebilmek için numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

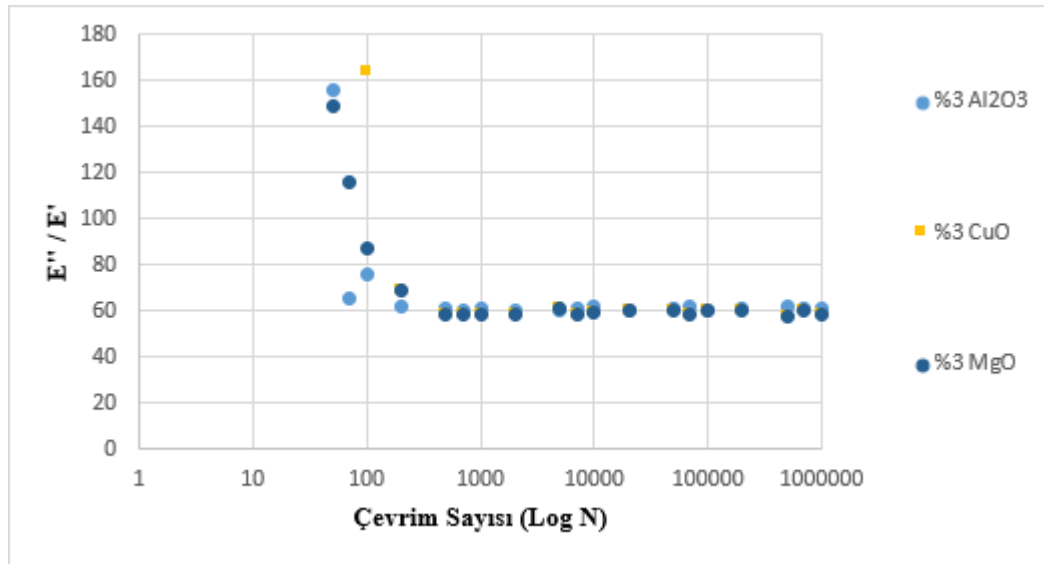
Şekil 4.30'da verilen değerlere göre en yüksek sönümlene oranı %1 CuO takviyeli numunelerde, en düşük sönümlene oranı ise %1 Al_2O_3 takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir.

Hamzah ve arkadaşları (2015), çalışmalarında CuO nanopartiküllerinin kaliteli doldurucu malzemeler olduklarını keşfetmişlerdir.

Ayrıca Şekil 4.30'da verilen değerlere göre en yüksek sönümlene oranının %1 CuO takviyeli numunelerde bulunması Hamzah ve arkadaşlarının çalışmalarına uygundur.

4.2.20. KM-3 katman yapısında ve %3 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlene oranları

KM-3 katman yapısında ve %3 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.31'de verilmiştir.



Şekil 4.31. KM-3 katman yapısında %3 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği

KM-3 katman yapılı ve %3 takviye oranında farklı nanopartiküllerin (Al_2O_3 , CuO ve MgO) sönümlene oranlarına etkisini belirleyebilmek için numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

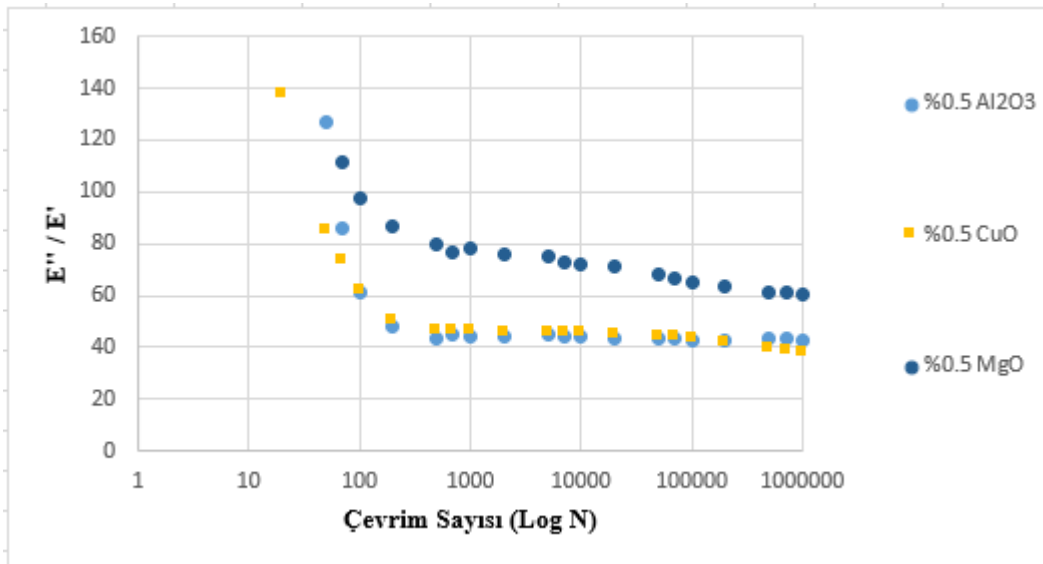
Şekil 4.31’de verilen değerlere göre en yüksek sönümlene oranı %3 CuO takviyeli numunelerde, en düşük sönümlene oranı ise %3 MgO takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir.

Hamzah ve arkadaşları (2015), çalışmalarında CuO nanopartiküllerinin kaliteli doldurucu malzemeler olduklarını keşfetmişlerdir.

Ayrıca Şekil 4.31’de verilen değerlere göre en yüksek sönümlene oranının %3 CuO takviyeli numunelerde bulunması Hamzah ve arkadaşlarının çalışmalarına uygundur.

4.2.21. KM-4 katman yapısında ve %0.5 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlene oranları

KM-4 katman yapısında ve %0.5 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.32’de verilmiştir.



Şekil 4.32. KM-4 katman yapısında %0.5 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği

KM-4 katman yapılı ve %0.5 takviye oranında farklı nanopartiküllerin (Al_2O_3 , CuO ve MgO) sönümlleme oranlarına etkisini belirleyebilmek için numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

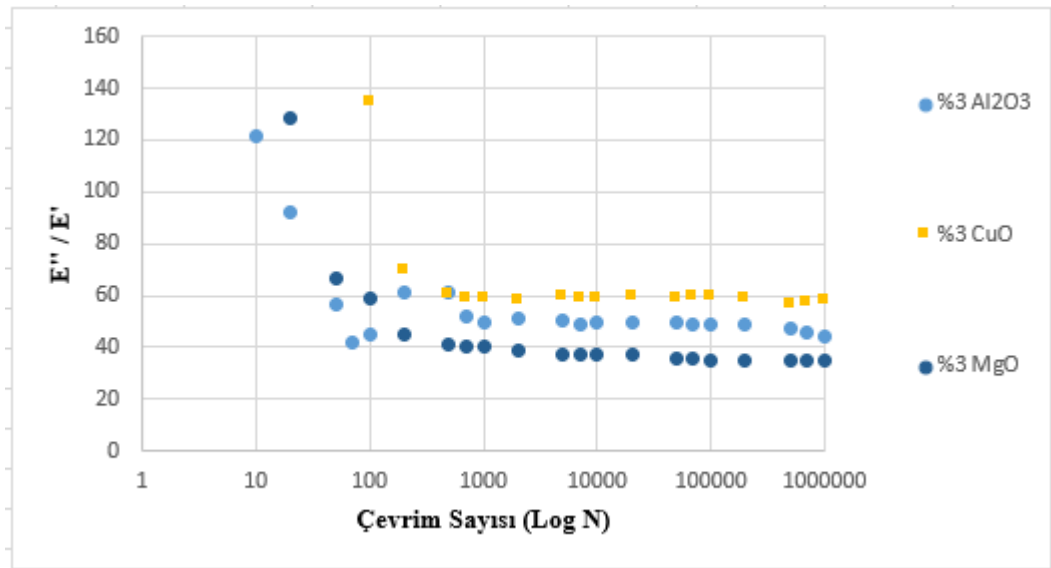
Şekil 4.32’de verilen değerlere göre en yüksek sönümlleme oranı %0.5 CuO takviyeli numunelerde, en düşük sönümlleme oranı ise %0.5 MgO takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir.

Hamzah ve arkadaşları (2015), çalışmalarında CuO nanopartiküllerinin kaliteli doldurucu malzemeler olduklarını keşfetmişlerdir.

Ayrıca Şekil 4.32’de verilen değerlere göre en yüksek sönümlleme oranının %0.5 CuO takviyeli numunelerde bulunması Hamzah ve arkadaşlarının çalışmalarına uygundur.

4.2.22. KM-5 katman yapısında ve %3 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin sönümlleme oranları

KM-5 katman yapısında ve %3 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.33’te verilmiştir.



Şekil 4.33. KM-5 katman yapısında %3 Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiği

KM-5 katman yapılı ve %3 takviye oranında farklı nanopartiküllerin (Al_2O_3 , CuO ve MgO) sönümlleme oranlarına etkisini belirleyebilmek için numuneler aynı grafikte incelenmiştir.

Şekil 4.33'te verilen değerlere göre en yüksek sönümlleme oranı %3 CuO takviyeli numunelerde, en düşük sönümlleme oranı ise %3 Al_2O_3 takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir.

Hamzah ve arkadaşları (2015), çalışmalarında CuO nanopartiküllerinin kaliteli doldurucu malzemeler olduklarını keşfetmişlerdir.

Ayrıca Şekil 4.33'te verilen değerlere göre en yüksek sönümlleme oranının %3 CuO takviyeli numunelerde bulunması Hamzah ve arkadaşlarının çalışmalarına uygundur.

4.3. Histerezis eğrileri

Yorulma testlerinde elde edilen histerezis eğrileri üretilen kompozit malzemelerin sönümleme oranları ve şekil değiştirme kabiliyetleri hakkında veriler elde etmemizi sağlar. Histerezis eğrileri arasındaki alanın fazla veya az olması üretilen kompozit malzemelerin sönüm özelliklerine bağlıdır. Histerezis eğrilerindeki eğim artışı ise üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin arttığını göstermektedir. Histerezis eğrileri, malzemelerin sertlik kayıplarını ve kalıcı gerinim deformasyonlarını belirlemek için kullanılabilir.

Topkaya (2017), tez çalışmasında histerezis eğrilerinden elde edilebilecek bir verinin, yorulma testlerinde daha önceden belirlenen ve cihaza işlenen çevrim sayılarında malzemenin sönümlendiği enerji miktarı olduğundan bahsetmiştir. Histerezis eğrileri arasındaki alan, tek bir çevrim sayısında malzeme tarafından emilen enerjiyi temsil eder. Genel olarak bu enerji daha sonra çevreye dağılan ısı enerjisine dönüştürülür. Ayrıca histerezis eğrileri, dinamik modüldeki ve çevrim başına harcanan enerjideki değişikliklerin izlenmesine olanak tanır. Histerezis eğrileri arasındaki alan, yorulma yükleri altında çevrim sayıları ilerledikçe artış gösterir. Bu, her çevrimde malzeme tarafından emilen enerjinin de giderek arttığını ve malzeme kırılana kadar hasarın da arttığını göstermektedir.

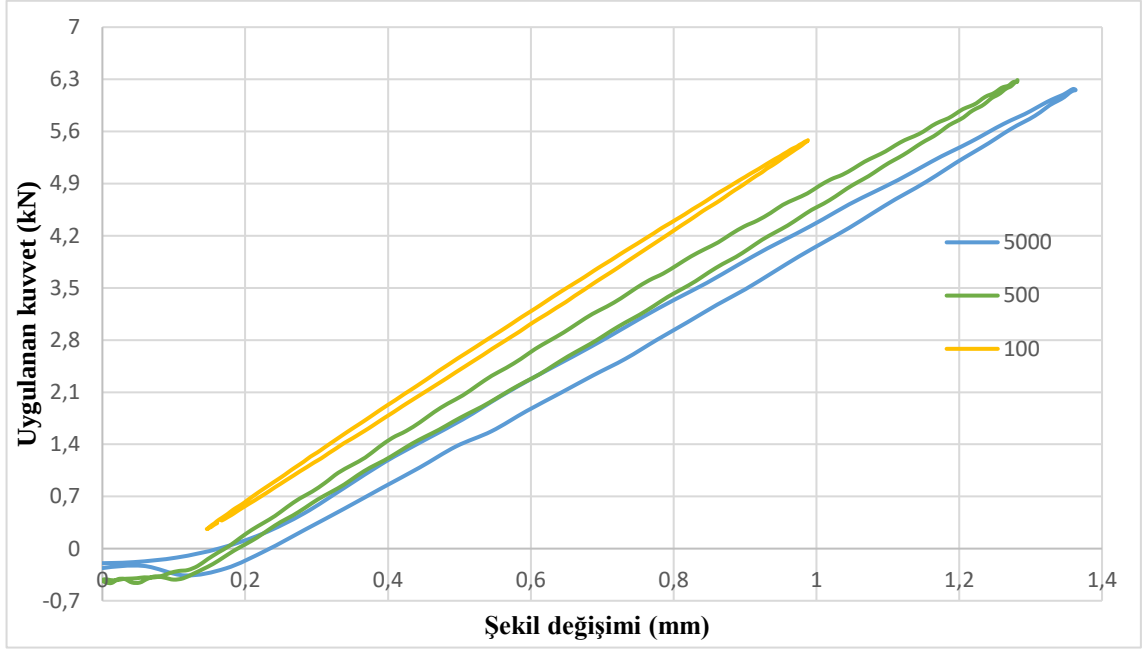
Bilgisayar kontrollü servo-hidrolik yorulma test cihazı pistonundan elde edilen kuvvet (kN) ve şekil değişimi (mm) verileri excel tabloları halinde bilgisayara aktarılmıştır. Daha sonra önceden belirlenen çevrim sayıları için bu excel tablolarından dokuma kompozit malzemelerin histerezis eğrileri elde edilmiştir.

Bu bölümde, yorulma testlerine tabi tutulan 5 farklı katman yapısında nanopartikül takviyesiz ve kütlece farklı oranlarda (%0.5, %1 ve %3) Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli olarak üretilen dokuma tip kompozit malzemelerin histerezis eğrileri incelenmiştir.

Ayrıca yorulma deneyleri sonrasında nanopartikül takviyeli ve takviyesiz olarak üretilen dokuma tip kompozit malzemelerin Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) karşılaştırmalı grafikleri verilerek, elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

4.3.1. KM-1 katman yapısında ve nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin histerezis eğrileri

KM-1 katman yapısında ve nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin %50 yük seviyesinde farklı çevrim sayılarında Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.34'te verilmiştir.



Şekil 4.34. KM-1 katman yapısında nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri

%50 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre farklı çevrim sayılarında (100-500-5000), KM-1 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri incelenmiştir.

KM-1 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelere uygulanan yorulma yükleri 500 çevrim sayısına kadar istenen değerlere ulaşarak malzeme hasara uğrayana kadar devam etmiştir.

Şekil 4.34'te verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre %50 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde çevrim sayıları arttıkça histerezis eğrileri arasındaki alanlarda artışlar beklenmektedir.

Histerezis eğrileri arasındaki tahmin edilen alan artışlarının sebebi, çevrim sayıları arttıkça KM-1 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelerin absorbe ettikleri enerjinin de artmasıdır.

%50 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre çevrim sayıları arttıkça, histerezis eğrileri arasındaki tahmin edilen alan artışları KM-1 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin azaldığını göstermektedir.

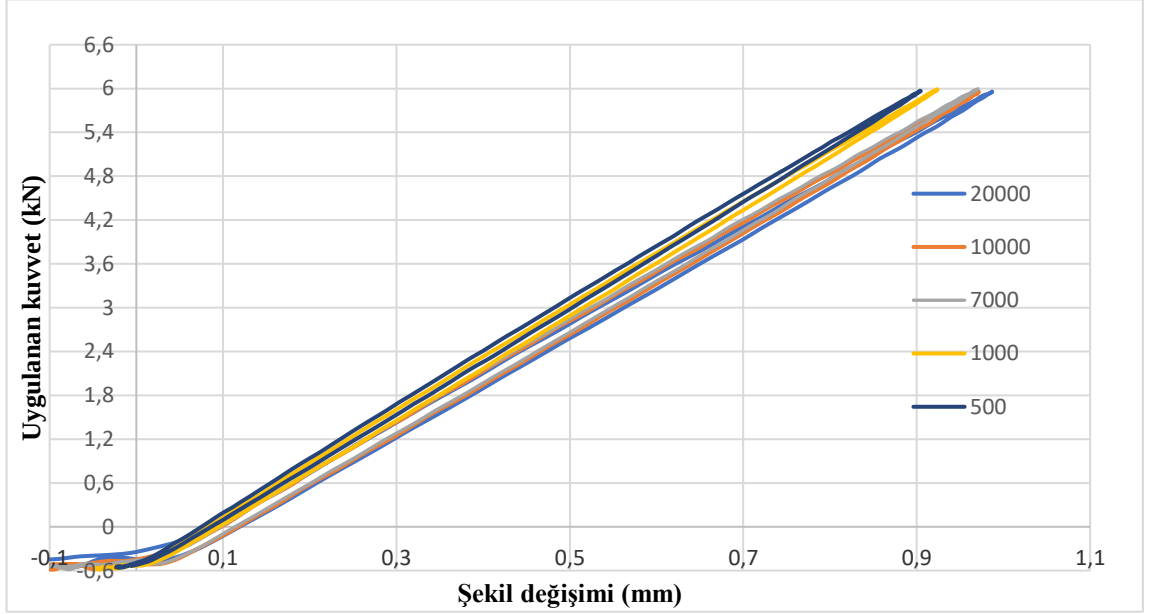
500 ve 5000 çevrim sayıları histerezis eğrilerinde gözlemlenen şekil bozukluklarının sebebi, basma yüklemesinde KM-1 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelerde oluşan plastik deformasyonlar olduğu düşünülmektedir.

Ayrıca Şekil 4.34'te görüldüğü gibi 100 çevrimden sonra histerezis eğrileri arası mesafede bir uzaklık göze çarpmaktadır. Bu uzaklık 100 ve 500 arasındaki çevrim sayılarında belirginleşmiştir. Tablo 6.'daki değerleri incelediğimizde KM-1 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelerin %50 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde 6595 çevrim sayısında hasara uğradığını görmekteyiz. Histerezis eğrileri arasındaki bu uzaklık KM-1 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelerin 500 çevrimden sonra hasara uğramaya başladığını gösterir. Li ve arkadaşları (2021), çalışmalarında elde ettikleri histerezis eğrileri arasındaki sapmalar için yaptıkları yorumlarda malzemenin tahrip olmaya başladığını belirtmişlerdir.

Şekil 4.34'te gösterildiği gibi histerezis eğrilerinin sık olmaması KM-1 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin az olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Şekil 4.34'te verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre, KM-1 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemeler düşük çevrim sayılarında daha az şekil değişimine uğramışlardır. Çevrim sayıları arttıkça, KM-1 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelerin şekil değişimleri de artmıştır.

4.3.2. KM-5 katman yapısında ve nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin histerezis eğrileri

KM-5 katman yapısında ve nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde farklı çevrim sayılarında Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.35'te verilmiştir.



Şekil 4.35. KM-5 katman yapısında nanopartikül takviyesiz kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre farklı çevrim sayılarında (500-1000-7000-10000-20000), KM-5 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri incelenmiştir.

KM-5 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelere uygulanan yorulma yükleri 500 çevrim sayısına kadar istenen değerlere ulaşarak malzeme hasara uğrayana kadar devam etmiştir.

Şekil 4.35'te verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde çevrim sayıları arttıkça histerezis eğrileri arasındaki alanlarda artışlar beklenmektedir.

Histerezis eğrileri arasındaki tahmin edilen alan artışlarının sebebi, çevrim sayıları arttıkça KM-5 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelerin absorbe ettikleri enerjinin de artmasıdır. 7000, 10000 ve 20000 çevrim sayılarında histerezis eğrileri arasında öngörülen alan artışlarındaki yakınsamalara sebep olarak KM-5 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzeme şekil değişimlerdeki yakınsamalar gösterilebilir.

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre çevrim sayıları arttıkça, histerezis eğrileri arasındaki öngörülen alan artışları KM-5 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin azaldığını göstermektedir. 7000, 10000 ve 20000 çevrim sayıları histerezis eğrilerinde gözlemlenen şekil bozukluklarının sebebi, basma yüklemesinde KM-5 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelerde oluşan plastik deformasyonlar olduğu düşünülmektedir.

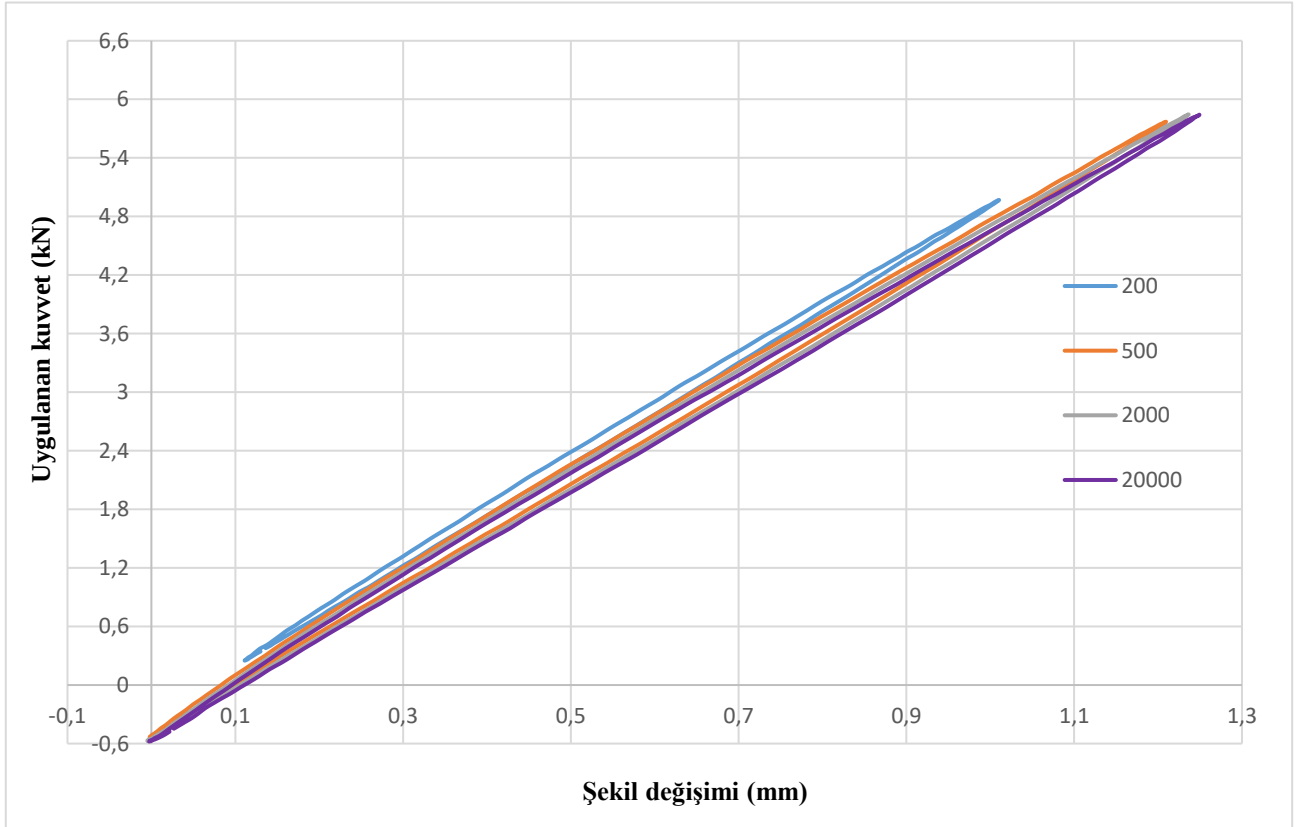
Şekil 4.35'te gösterildiği gibi histerezis eğrilerinin sık olması KM-5 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Şekil 4.35'te verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre, KM-5 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemeler düşük çevrim sayılarında daha az şekil değişimine uğramışlardır. Çevrim sayıları arttıkça, KM-5 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelerin şekil değişimleri de artmıştır.

Şekil 4.34 ve Şekil 4.35 birlikte incelendiğinde KM-5 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelerin rijitlikleri KM-1 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelerden yüksek çıkmıştır. Çünkü KM-5 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelere ait histerezis eğrileri KM-1 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrilerinden daha yoğundur. Ayrıca KM-5 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemeler basma yüklemesi altında KM-1 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelerden daha az plastik deformasyona uğramıştır.

Ayrıca Şekil 4.35'te görüldüğü gibi histerezis eğrileri arası mesafede bir yakınsaklık göze çarpmaktadır. Tablo 6.'daki değerleri incelediğimizde KM-5 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde 35984 çevrim sayısında hasara uğradığını görmekteyiz. Histerezis eğrileri arasındaki bu yakınsaklık KM-5 katman yapılı nanopartikül takviyesiz üretilen kompozit malzemelerin 20000 çevrime kadar hasara uğramadıklarını gösterir.

4.3.3. KM-1 katman yapısında ve %0.5 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri

KM-1 katman yapısında ve %0.5 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde farklı çevrim sayılarında Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.36'da verilmiştir.



Şekil 4.36. KM-1 katman yapısında %0.5 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre farklı çevrim sayılarında (200-500-2000-20000), KM-1 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri incelenmiştir.

KM-1 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere uygulanan yorulma yükleri 500 çevrim sayısına kadar istenen değerlere ulaşarak malzeme hasara uğrayana kadar devam etmiştir.

Şekil 4.36’da verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde çevrim sayıları arttıkça histerezis eğrileri arasındaki alanlarda artışlar beklenmektedir. Histerezis eğrileri arasındaki tahmin edilen alan artışlarının sebebi, çevrim sayıları arttıkça KM-1 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin absorbe ettikleri enerjinin de artmasıdır. 2000 ve 20000 çevrim sayılarında histerezis eğrileri arasındaki alan artışlarındaki yakınsamalara sebep olarak KM-1 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzeme şekil değişimlerindeki yakınsamalar gösterilebilir.

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre çevrim sayıları arttıkça, histerezis eğrileri arasındaki öngörülen alan artışları KM-1 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin azaldığını göstermektedir.

Şekil 4.36’da gösterildiği gibi histerezis eğrilerinin sık olması KM-1 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Şekil 4.36’da verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre, KM-1 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemeler düşük çevrim sayılarında daha az şekil değişimine uğramışlardır. Çevrim sayıları arttıkça, KM-1 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin şekil değişimleri de artmıştır. KM-1 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin bu davranışının matristeki çatlakları arttıracığı tahmin edilmektedir.

Şekil 4.36’da gösterildiği gibi KM-1 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemeler için simetrik histerezis eğrileri oluşmuştur. KM-1 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri şekil değişimi eksenı boyunca birbirine

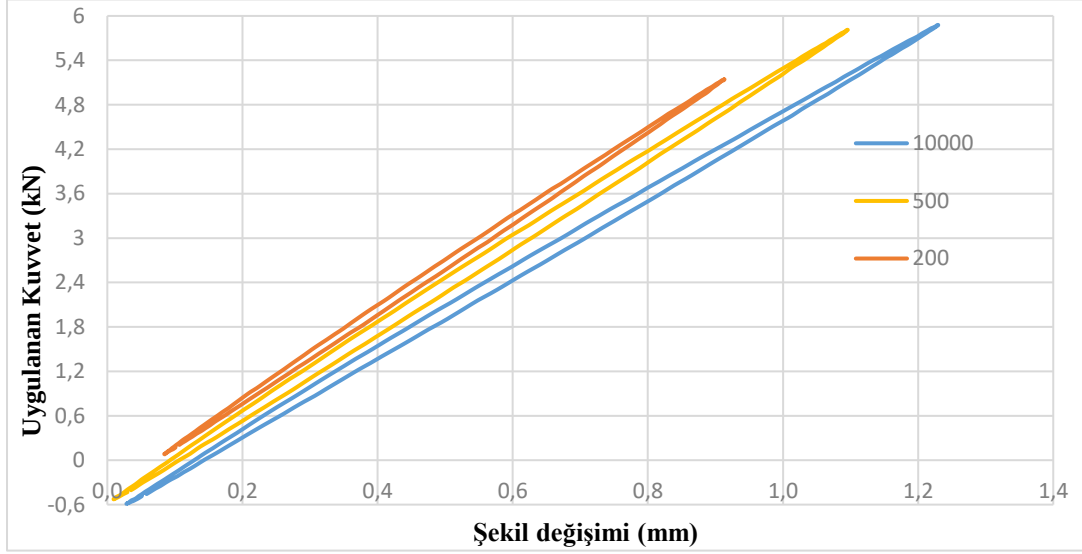
yakınsamıştır. KM-1 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri keskin kenarlı elipslere benzemiştir. KM-1 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri genellikle dar kalmış ve histerezis eğrileri arasındaki alanlar çok az değişmiştir, bu nedenle KM-1 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin deformasyon davranışlarının hemen hemen lineer elastik olduğu düşünülmektedir.

KM-1 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen dokuma kompozitlerde, histerezis eğrilerinin alanı, ortalama yorulma çevrim sayıları ile şekil değişimi eksenini boyunca kademeli olarak artmış ve KM-1 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen dokuma kompozitleri hasarlardan dolayı yumuşatmıştır. Çatlaklar oluşuktan sonra ortalama yorulma çevrimleri arttıkça, KM-1 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen dokuma kompozitler tarafından absorbe edilen enerji dağılmış ve kırılma mekanizmalarıyla azalmıştır.

Ayrıca Şekil 4.36'da görüldüğü gibi histerezis eğrileri arası mesafede bir yakınsaklık göze çarpmaktadır. Tablo 6.'daki değerleri incelediğimizde KM-1 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde 24524 çevrim sayısında hasara uğradığını görmekteyiz. Histerezis eğrileri arasındaki bu yakınsaklık KM-1 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin 20000 çevrime kadar hasara uğramadıklarını gösterir.

4.3.4. KM-1 katman yapısında ve %1 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri

KM-1 katman yapısında ve %1 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde farklı çevrim sayılarında histerezis eğrileri karşılaştırmalı grafiği Şekil 37’de verilmiştir.



Şekil 4.37. KM-2 katman yapısında %1 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre farklı çevrim sayılarında (200-500-10000), KM-1 katman yapılı %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri incelenmiştir.

KM-1 katman yapılı %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere uygulanan yorulma yükleri 500 çevrim sayısına kadar istenen değerlere ulaşarak malzeme hasara uğrayana kadar devam etmiştir.

Şekil 37’de verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde çevrim sayıları arttıkça histerezis eğrileri arasındaki alanlarda artış beklenmektedir. Histerezis eğrileri arasındaki tahmin edilen alan artışlarının sebebi, çevrim sayıları arttıkça KM-1 katman yapılı %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin absorbe ettikleri enerjinin de artmasıdır. 500 ve 10000 çevrim sayılarında histerezis eğrileri arasındaki alan artışlarındaki yakınsamalara sebep olarak KM-1 katman

yapılı %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzeme şekil değişimindeki yakınsamalar gösterilebilir.

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre çevrim sayıları arttıkça, histerezis eğrileri arasındaki öngörülen alan artışları KM-1 katman yapılı %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin azaldığını göstermektedir.

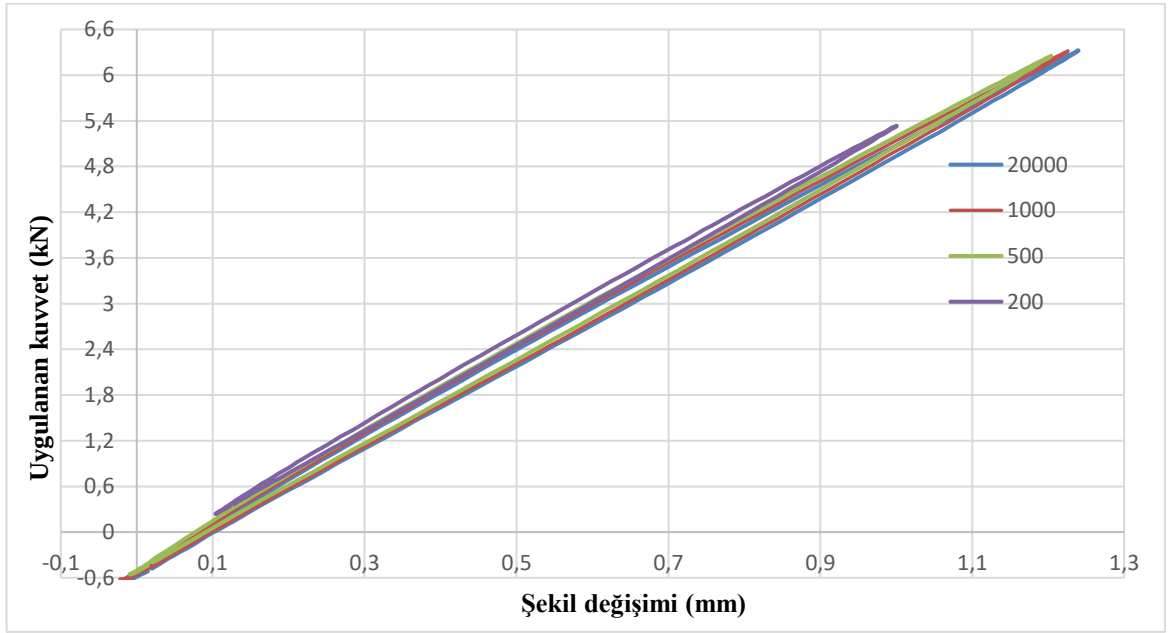
Şekil 37’de gösterildiği gibi histerezis eğrilerinin sık olmaması KM-1 katman yapılı %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin az olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Şekil 37’de verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre, KM-1 katman yapılı %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemeler düşük çevrim sayılarında daha az şekil değişimine uğramışlardır. Çevrim sayıları arttıkça, KM-1 katman yapılı %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin şekil değişimleri de artmıştır.

Şekil 36 ve Şekil 37 birlikte incelendiğinde KM-1 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitlikleri KM-1 katman yapılı %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerden yüksek çıkmıştır. Çünkü KM-1 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere ait histerezis eğrileri KM-1 katman yapılı %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrilerinden daha yoğundur.

Ayrıca Şekil 4.37’de görüldüğü gibi histerezis eğrileri arası mesafede bir yakınsaklık göze çarpmaktadır. Tablo 6.’daki değerleri incelediğimizde KM-1 katman yapılı %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde 23033 çevrim sayısında hasara uğradığını görmekteyiz. Histerezis eğrileri arasındaki bu yakınsaklık KM-1 katman yapılı %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin 10000 çevrime kadar hasara uğramadıklarını gösterir.

4.3.5. KM-1 katman yapısında ve %1 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri

KM-1 katman yapısında ve %1 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde farklı çevrim sayılarında histerezis eğrileri karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.38’de verilmiştir.



Şekil 4.38. KM-1 katman yapısında %1 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre farklı çevrim sayılarında (200-500-1000-20000), KM-1 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri incelenmiştir.

KM-1 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere uygulanan yorulma yükleri 500 çevrim sayısına kadar istenen değerlere ulaşarak malzeme hasara uğrayana kadar devam etmiştir.

Şekil 4.38’de verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde çevrim sayıları arttıkça histerezis eğrileri arasındaki alanlarda artışlar beklenmektedir. Histerezis eğrileri arasındaki tahmin edilen alan artışlarının sebebi, çevrim sayıları arttıkça KM-1 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin absorbe ettikleri enerjinin de artmasıdır. 500, 1000 ve 20000 çevrim sayılarında histerezis eğrileri arasındaki alan artışlarındaki yakınsamalara sebep olarak KM-1 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzeme şekil değişimindeki yakınsamalar gösterilebilir.

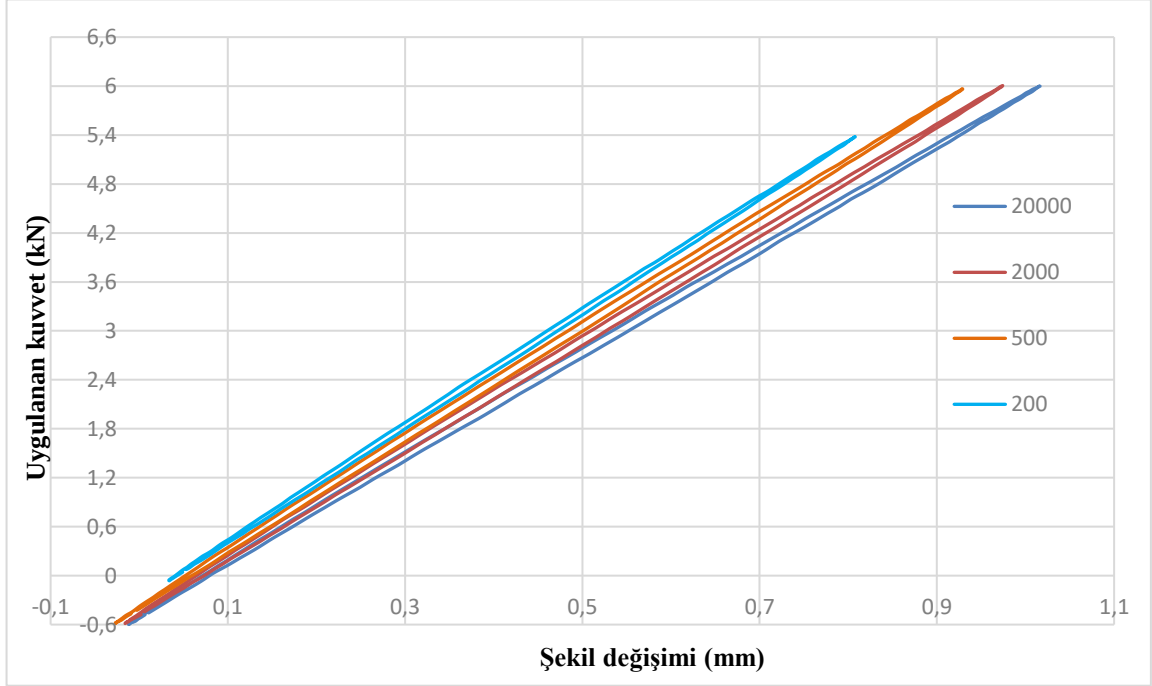
%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre çevrim sayıları arttıkça, histerezis eğrileri arasındaki öngörülen alan artışları KM-1 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin azaldığını göstermektedir.

Şekil 4.38’de gösterildiği gibi histerezis eğrilerinin sık olması KM-1 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Şekil 4.38’de verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre, KM-1 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin düşük çevrim sayılarında daha az şekil değişimine uğramışlardır. Çevrim sayıları arttıkça, KM-1 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin şekil değişimleri de artmıştır.

Ayrıca Şekil 4.38’de görüldüğü gibi histerezis eğrileri arası mesafede bir yakınsaklık göze çarpmaktadır. Tablo 6.’daki değerleri incelediğimizde KM-1 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde 23759 çevrim sayısında hasara uğradığını görmekteyiz. Histerezis eğrileri arasındaki bu yakınsaklık KM-1 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin 20000 çevrime kadar hasara uğramadıklarını gösterir.

4.3.6. KM-1 katman yapısında ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri

KM-1 katman yapısında ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde farklı çevrim sayılarında histerezis eğrileri karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.39'da verilmiştir.



Şekil 4.39. KM-1 katman yapısında %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre farklı çevrim sayılarında (200-500-2000-20000), KM-1 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri incelenmiştir.

KM-1 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere uygulanan yorulma yükleri 500 çevrim sayısına kadar istenen değerlere ulaşarak malzeme hasara uğrayana kadar devam etmiştir.

Şekil 4.39’da verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde çevrim sayıları arttıkça histerezis eğrileri arasındaki alanlarda artışlar beklenmektedir. Histerezis eğrileri arasındaki tahmin edilen alan artışlarının sebebi, çevrim sayıları arttıkça KM-1 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin absorbe ettikleri enerjinin de artmasıdır. 500, 2000 ve 20000 çevrim sayılarında histerezis eğrileri arasındaki alan artışlarındaki yakınsamalara sebep olarak KM-1 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzeme şekil değişimindeki yakınsamalar gösterilebilir.

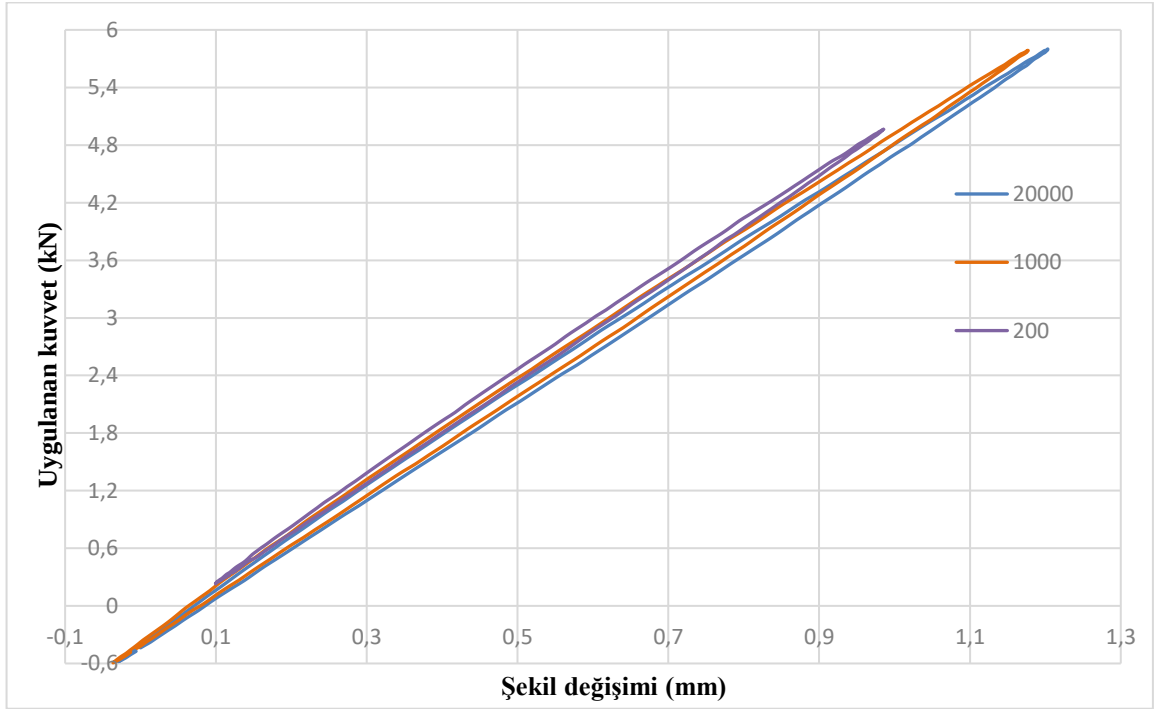
%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre çevrim sayıları arttıkça, histerezis eğrileri arasındaki öngörülen alan artışları KM-1 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin azaldığını göstermektedir.

Şekil 4.39’da gösterildiği gibi histerezis eğrilerinin sık olması KM-1 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Şekil 4.39’da verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre, KM-1 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemeler düşük çevrim sayılarında daha az şekil değişimine uğramışlardır. Çevrim sayıları arttıkça, KM-1 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin şekil değişimleri de artmıştır.

Şekil 38 ve Şekil 39 birlikte incelendiğinde KM-1 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitlikleri KM-1 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerden yüksek çıkmıştır. Çünkü KM-1 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere ait histerezis eğrileri KM-1 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrilerinden daha yoğundur.

4.3.7. KM-1 katman yapısında ve %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri

KM-1 katman yapısında ve %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde farklı çevrim sayılarında histerezis eğrileri karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.40'da verilmiştir.



Şekil 4.40. KM-1 katman yapısında %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre farklı çevrim sayılarında (200-1000-20000), KM-1 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri incelenmiştir.

KM-1 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere uygulanan yorulma yükleri 1000 çevrim sayısına kadar istenen değerlere ulaşarak malzeme hasara uğrayana kadar devam etmiştir.

Şekil 4.40’da verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde çevrim sayıları arttıkça histerezis eğrileri arasındaki alanlarda artışlar beklenmektedir. Histerezis eğrileri arasındaki tahmin edilen alan artışlarının sebebi, çevrim sayıları arttıkça KM-1 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin absorbe ettikleri enerjinin de artmasıdır. 1000 ve 20000 çevrim sayılarında histerezis eğrileri arasındaki alan artışlarındaki yakınsamalara sebep olarak KM-1 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzeme şekil değişimlerindeki yakınsamalar gösterilebilir.

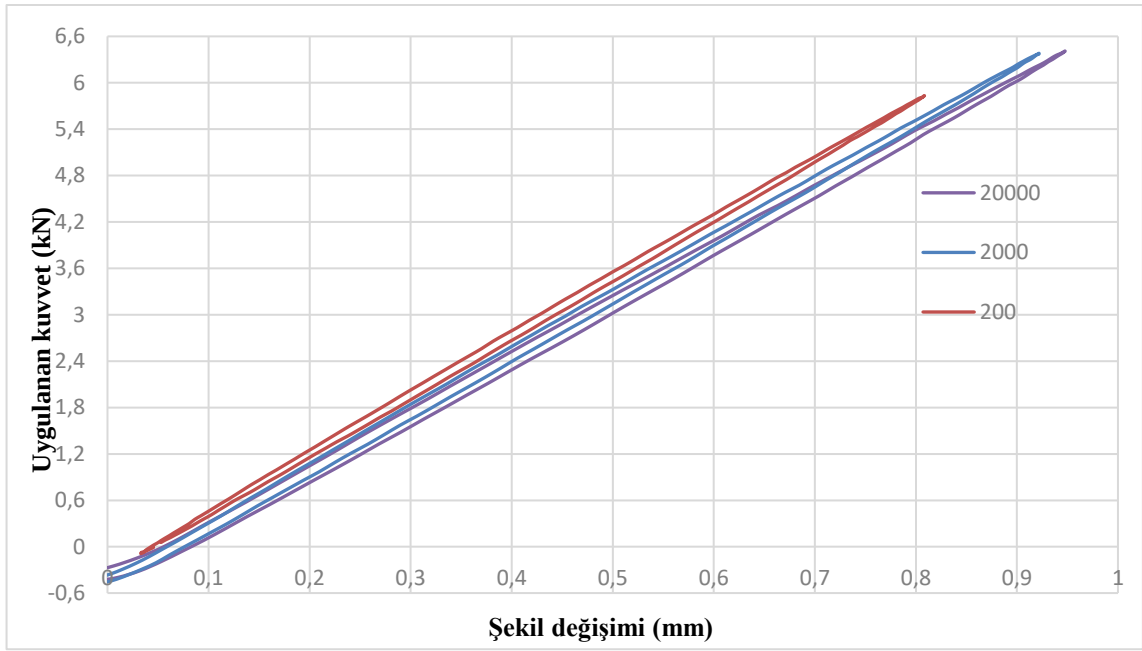
%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre çevrim sayıları arttıkça, histerezis eğrileri arasındaki öngörülen alan artışları KM-1 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin azaldığını göstermektedir.

Şekil 4.40’da gösterildiği gibi histerezis eğrilerinin sık olmaması KM-1 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin az olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Şekil 4.40’da verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre, KM-1 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemeler düşük çevrim sayılarında daha az şekil değişimine uğramışlardır. Çevrim sayıları arttıkça, KM-1 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin şekil değişimleri de artmıştır.

Ayrıca Şekil 4.40’da görüldüğü gibi histerezis eğrileri arası mesafede bir yakınsaklık göze çarpmaktadır. Tablo 6.’daki değerleri incelediğimizde KM-1 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde 23841 çevrim sayısında hasara uğradığını görmekteyiz. Histerezis eğrileri arasındaki bu yakınsaklık KM-1 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin 20000 çevrime kadar hasara uğramadıklarını gösterir.

4.3.8. KM-2 katman yapısında ve %0.5 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri

KM-2 katman yapısında ve %0.5 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde farklı çevrim sayılarında histerezis eğrileri karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.41’de verilmiştir.



Şekil 4.41. KM-2 katman yapısında %0.5 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre farklı çevrim sayılarında (200-2000-20000), KM-2 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri incelenmiştir.

KM-2 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere uygulanan yorulma yükleri 2000 çevrim sayısına kadar istenen değerlere ulaşarak malzeme hasara uğrayana kadar devam etmiştir.

Şekil 4.41’de verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde çevrim sayıları arttıkça histerezis eğrileri arasındaki alanlarda artışlar beklenmektedir. Histerezis eğrileri arasındaki tahmin edilen alan artışlarının sebebi, çevrim sayıları arttıkça KM-2 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin absorbe ettikleri enerjinin de artmasıdır. 2000 ve 20000 çevrim sayılarında histerezis eğrileri arasındaki alan artışlarındaki yakınsamalara sebep olarak KM-2 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzeme şekil değişimindeki yakınsamalar gösterilebilir.

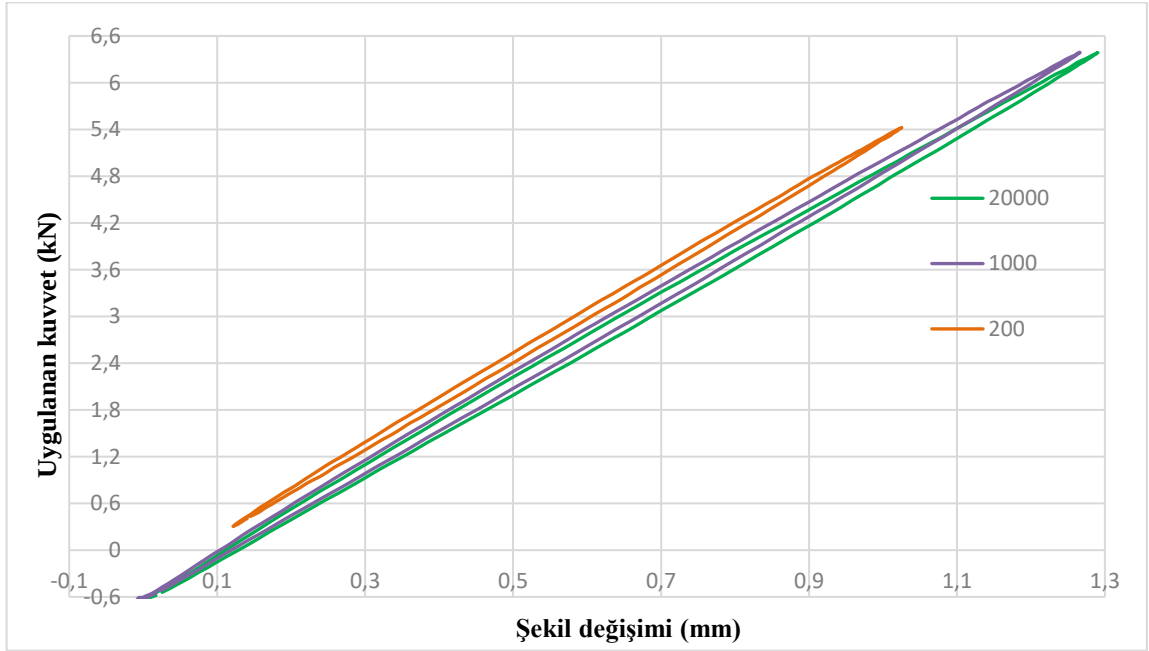
%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre çevrim sayıları arttıkça, histerezis eğrileri arasındaki öngörülen alan artışları KM-2 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin azaldığını göstermektedir.

Şekil 4.41’de gösterildiği gibi histerezis eğrilerinin sık olmaması KM-2 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin az olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Şekil 4.41’de verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre, KM-2 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemeler düşük çevrim sayılarında daha az şekil değişimine uğramışlardır. Çevrim sayıları arttıkça, KM-2 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin şekil değişimleri de artmıştır.

Ayrıca Şekil 4.41’de görüldüğü gibi histerezis eğrileri arası mesafede bir yakınsaklık göze çarpmaktadır. Tablo 6.’daki değerleri incelediğimizde KM-2 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde 48456 çevrim sayısında hasara uğradığını görmekteyiz. Histerezis eğrileri arasındaki bu yakınsaklık KM-2 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin 20000 çevrime kadar hasara uğramadıklarını gösterir.

4.3.9. KM-2 katman yapısında ve %1 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri

KM-2 katman yapısında ve %1 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde farklı çevrim sayılarında histerezis eğrileri karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.42’de verilmiştir.



Şekil 4.42. KM-2 katman yapısında %1 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre farklı çevrim sayılarında (200-1000-20000), KM-2 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri incelenmiştir.

KM-2 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere uygulanan yorulma yükleri 1000 çevrim sayısına kadar istenen değerlere ulaşarak malzeme hasara uğrayana kadar devam etmiştir.

Şekil 4.42’de verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde çevrim sayıları arttıkça histerezis eğrileri arasındaki alanlarda artışlar beklenmektedir. Histerezis eğrileri arasındaki tahmin edilen alan artışlarının sebebi, çevrim sayıları arttıkça KM-2 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin absorbe ettikleri enerjinin de artmasıdır. 1000 ve 20000 çevrim sayılarında histerezis eğrileri arasındaki alan artışlarındaki yakınsamalara sebep olarak KM-2 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzeme şekil değişimindeki yakınsamalar gösterilebilir.

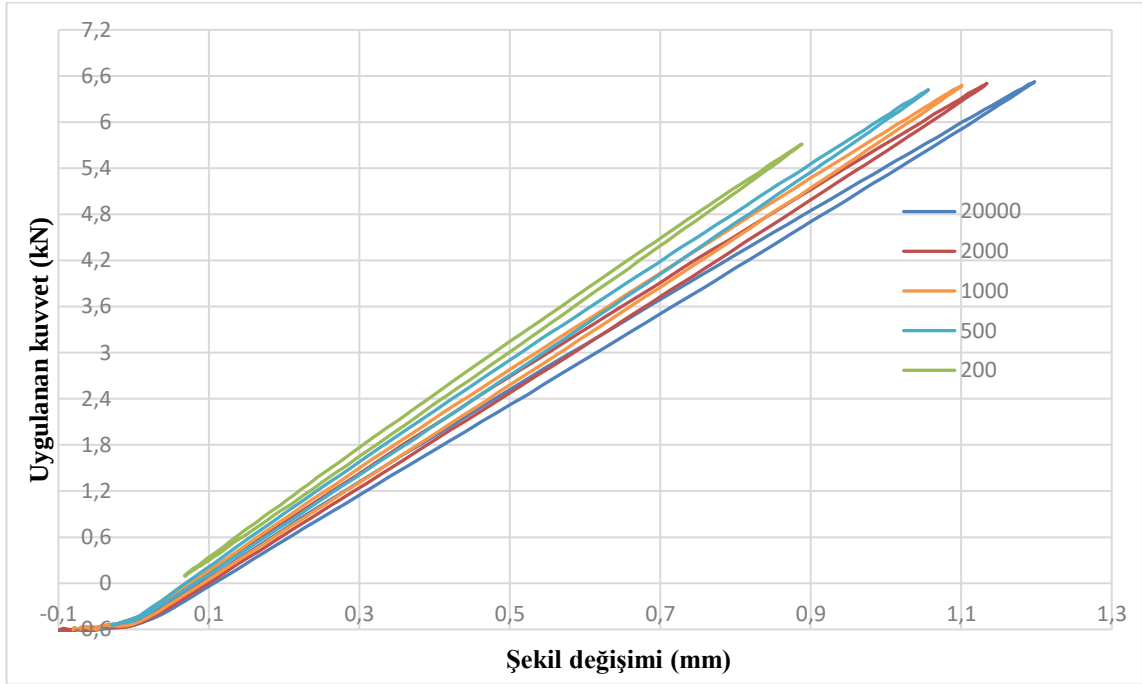
%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre çevrim sayıları arttıkça, histerezis eğrileri arasındaki öngörülen alan artışları KM-2 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin azaldığını göstermektedir.

Şekil 4.42’de gösterildiği gibi histerezis eğrilerinin sık olmaması KM-2 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin az olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Şekil 4.42’de verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre, KM-2 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemeler düşük çevrim sayılarında daha az şekil değişimine uğramışlardır. Çevrim sayıları arttıkça, KM-2 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin şekil değişimleri de artmıştır.

Ayrıca Şekil 4.42’de görüldüğü gibi histerezis eğrileri arası mesafede bir yakınsaklık göze çarpmaktadır. Tablo 6.’daki değerleri incelediğimizde KM-2 katman yapılı %1 Mgo nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde 27322 çevrim sayısında hasara uğradığını görmekteyiz. Histerezis eğrileri arasındaki bu yakınsaklık KM-2 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin 20000 çevrime kadar hasara uğramadıklarını gösterir.

4.3.10. KM-2 katman yapısında ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri

KM-2 katman yapısında ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde farklı çevrim sayılarında histerezis eğrileri karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.43'te verilmiştir.



Şekil 4.43. KM-2 katman yapısında %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre farklı çevrim sayılarında (200-500-1000-10000-20000), KM-2 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri incelenmiştir.

KM-2 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere uygulanan yorulma yükleri 500 çevrim sayısına kadar istenen değerlere ulaşarak malzeme hasara uğrayana kadar devam etmiştir.

Şekil 4.43'te verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde çevrim sayıları arttıkça histerezis eğrileri arasındaki alanlarda artışlar beklenmektedir. Histerezis eğrileri arasındaki tahmin edilen alan artışlarının sebebi, çevrim sayıları arttıkça KM-2 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin absorbe ettikleri enerjinin de artmasıdır. 500, 1000, 2000 ve 20000 çevrim sayılarında histerezis eğrileri arasındaki alan artışlarındaki yakınsamalara sebep olarak KM-2 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzeme şekil değişimindeki yakınsamalar gösterilebilir.

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre çevrim sayıları arttıkça, histerezis eğrileri arasındaki öngörülen alan artışları KM-2 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin azaldığını göstermektedir.

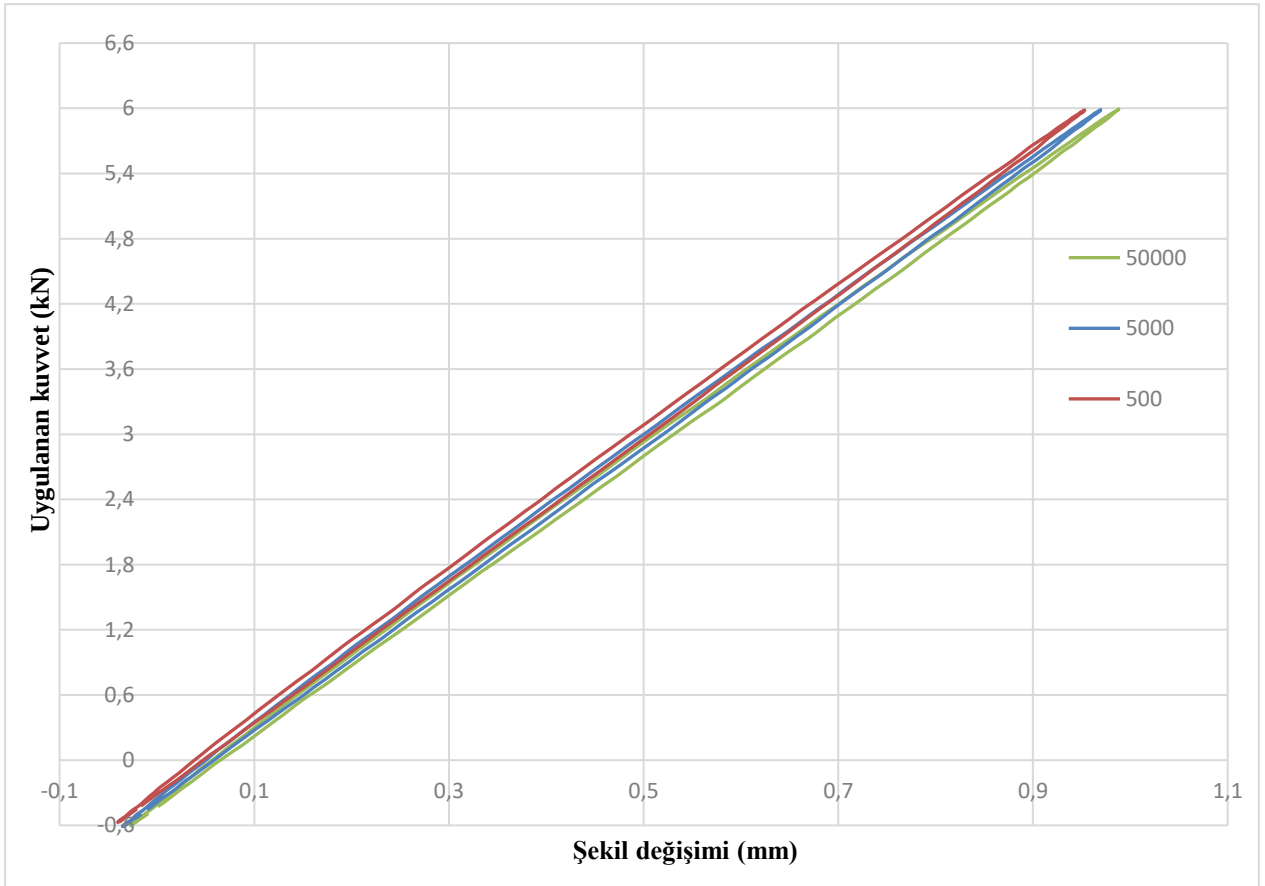
Şekil 4.43'te gösterildiği gibi histerezis eğrilerinin sık olmaması KM-2 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin az olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Şekil 4.43'te verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre, KM-2 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemeler düşük çevrim sayılarında daha az şekil değişimine uğramışlardır. Çevrim sayıları arttıkça, KM-2 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin şekil değişimleri de artmıştır.

Ayrıca Şekil 4.43'te görüldüğü gibi histerezis eğrileri arası mesafede bir yakınsaklık göze çarpmaktadır. Tablo 6.'daki değerleri incelediğimizde KM-2 katman yapılı %3 Mgo nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde 27233 çevrim sayısında hasara uğradığını görmekteyiz. Histerezis eğrileri arasındaki bu yakınsaklık KM-2 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin 20000 çevrime kadar hasara uğramadıklarını gösterir.

Şekil 4.42 ve Şekil 4.43 birlikte incelendiğinde KM-2 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitlikleri KM-2 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerden yüksek çıkmıştır. Çünkü KM-2 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere ait histerezis eğrileri KM-2 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrilerinden daha yoğundur.

4.3.11. KM-3 katman yapısında ve %3 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri

KM-3 katman yapısında ve %3 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde farklı çevrim sayılarında histerezis eğrileri karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.44'te verilmiştir.



Şekil 4.44. KM-3 katman yapısında %3 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre farklı çevrim sayılarında (500-5000-50000), KM-3 katman yapılı %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri incelenmiştir.

KM-3 katman yapılı %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere uygulanan yorulma yükleri 500 çevrim sayısına kadar istenen değerlere ulaşarak malzeme hasara uğrayana kadar devam etmiştir.

Şekil 4.44'te verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde çevrim sayıları arttıkça histerezis eğrileri arasındaki alanlarda artışlar beklenmektedir. Histerezis eğrileri arasındaki tahmin edilen alan artışlarının sebebi, çevrim sayıları arttıkça KM-3 katman yapılı %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin absorbe ettikleri enerjinin de artmasıdır. 5000 ve 50000 çevrim sayılarında histerezis eğrileri arasındaki alan artışlarındaki yakınsamalara sebep olarak KM-3 katman yapılı %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzeme şekil değişimlerindeki yakınsamalar gösterilebilir.

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre çevrim sayıları arttıkça, histerezis eğrileri arasındaki öngörülen alan artışları KM-3 katman yapılı %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin azaldığını göstermektedir.

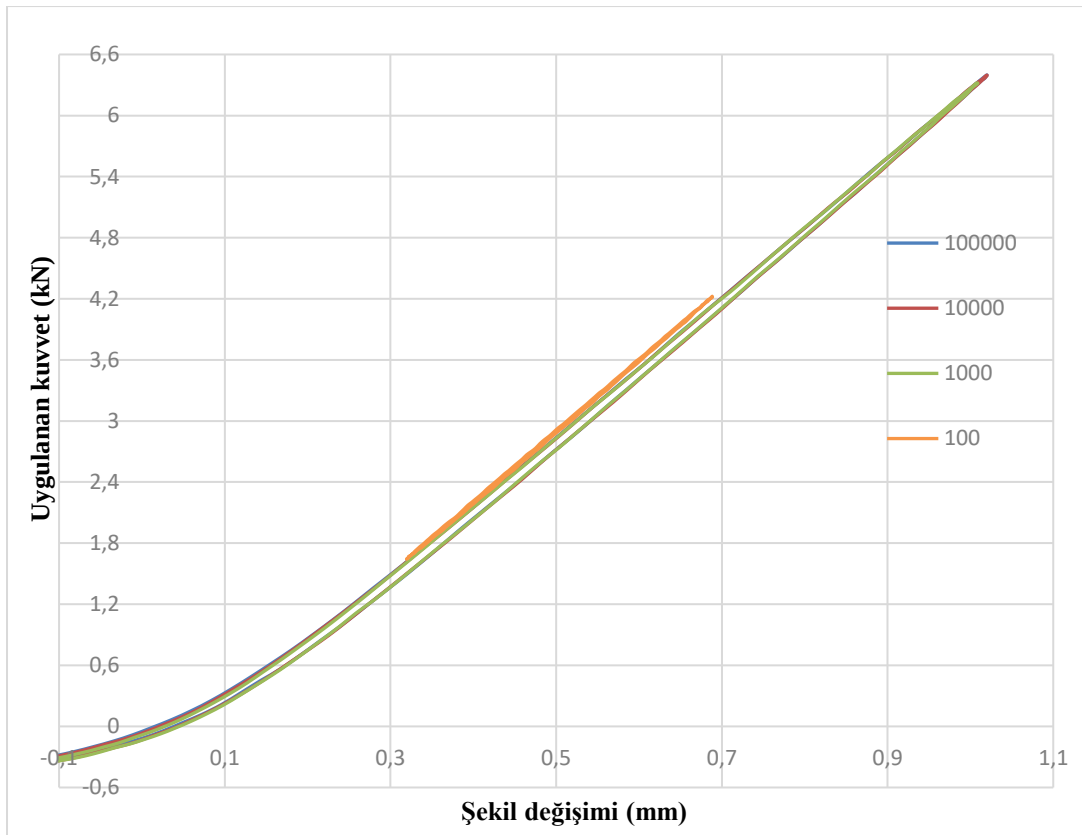
Şekil 4.44'te gösterildiği gibi histerezis eğrilerinin sık olması KM-3 katman yapılı %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Şekil 4.44'te verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre, KM-3 katman yapılı %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemeler düşük çevrim sayılarında daha az şekil değişimine uğramışlardır. Çevrim sayıları arttıkça, KM-3 katman yapılı %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin şekil değişimleri de artmıştır.

Ayrıca Şekil 4.44'te görüldüğü gibi histerezis eğrileri arası mesafede bir yakınsaklık göze çarpmaktadır. Tablo 6.'daki değerleri incelediğimizde KM-3 katman yapılı %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde 84211 çevrim sayısında hasara uğradığını görmekteyiz. Histerezis eğrileri arasındaki bu yakınsaklık KM-3 katman

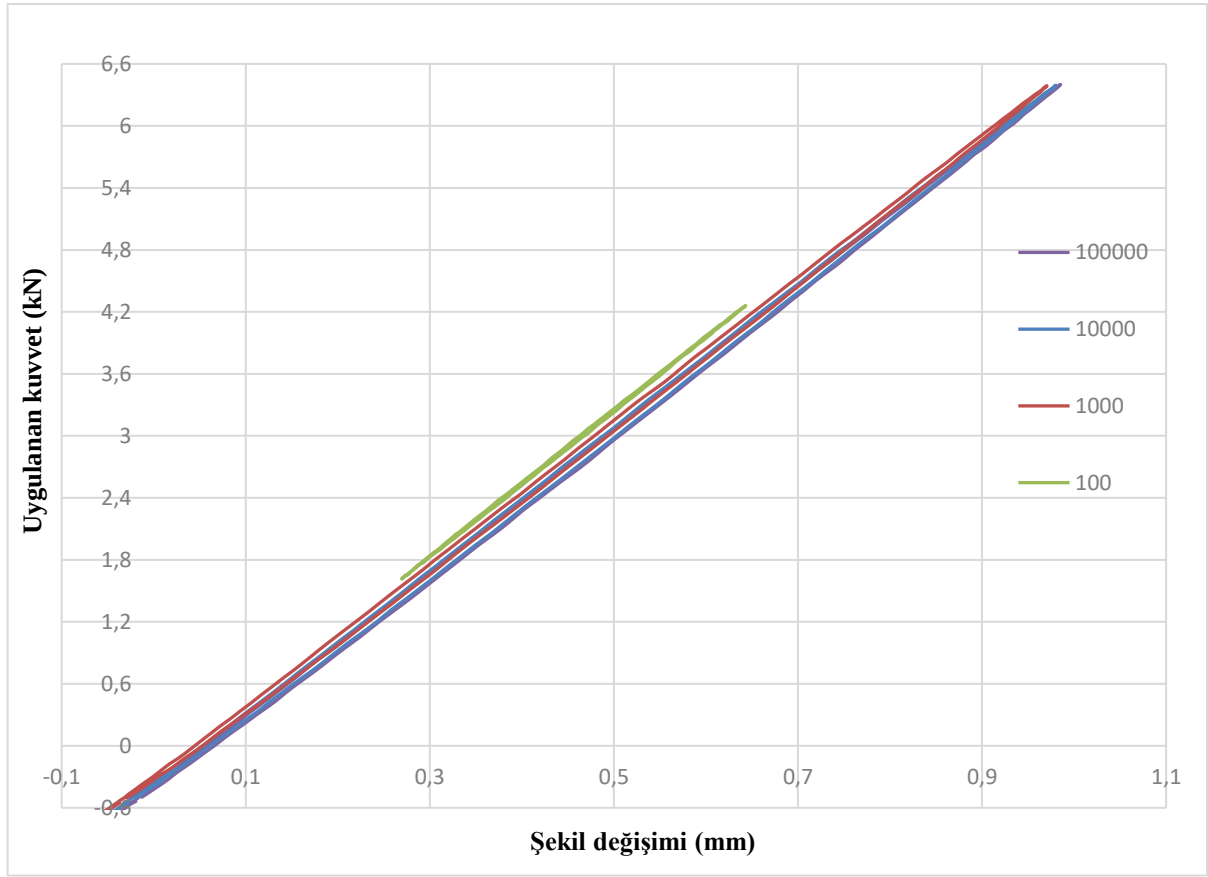
yapılı %3 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin 50000 çevrime kadar hasara uğramadıklarını gösterir.

4.3.12. KM-3 katman yapısında ve %0.5 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri

KM-3 katman yapısında ve %0.5 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde farklı çevrim sayılarında histerezis eğrileri karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.45 ve Şekil 4.46'da verilmiştir.



Şekil 4.45. KM-3 katman yapısında %0.5 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri



Şekil 4.46. KM-3 katman yapısında %0.5 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre farklı çevrim sayılarında (100-100-10000-100000), KM-3 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri Şekil 4.45 ve Şekil 4.46'da incelenmiştir.

KM-3 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere uygulanan yorulma yükleri 1000 çevrim sayısına kadar istenen değerlere ulaşarak malzeme hasara uğrayana kadar devam etmiştir.

Şekil 4.45 ve Şekil 4.46'da verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde çevrim sayıları arttıkça histerezis eğrileri arasındaki alanlarda artışlar beklenmektedir. Histerezis eğrileri arasındaki tahmin edilen alan artışlarının sebebi, çevrim sayıları arttıkça KM-3 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin absorbe ettikleri enerjinin de artmasıdır. 1000, 10000 ve 100000 çevrim sayılarında histerezis eğrileri arasındaki alan artışlarındaki

yakınsamalara sebep olarak KM-3 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzeme şekil değişimindeki yakınsamalar gösterilebilir.

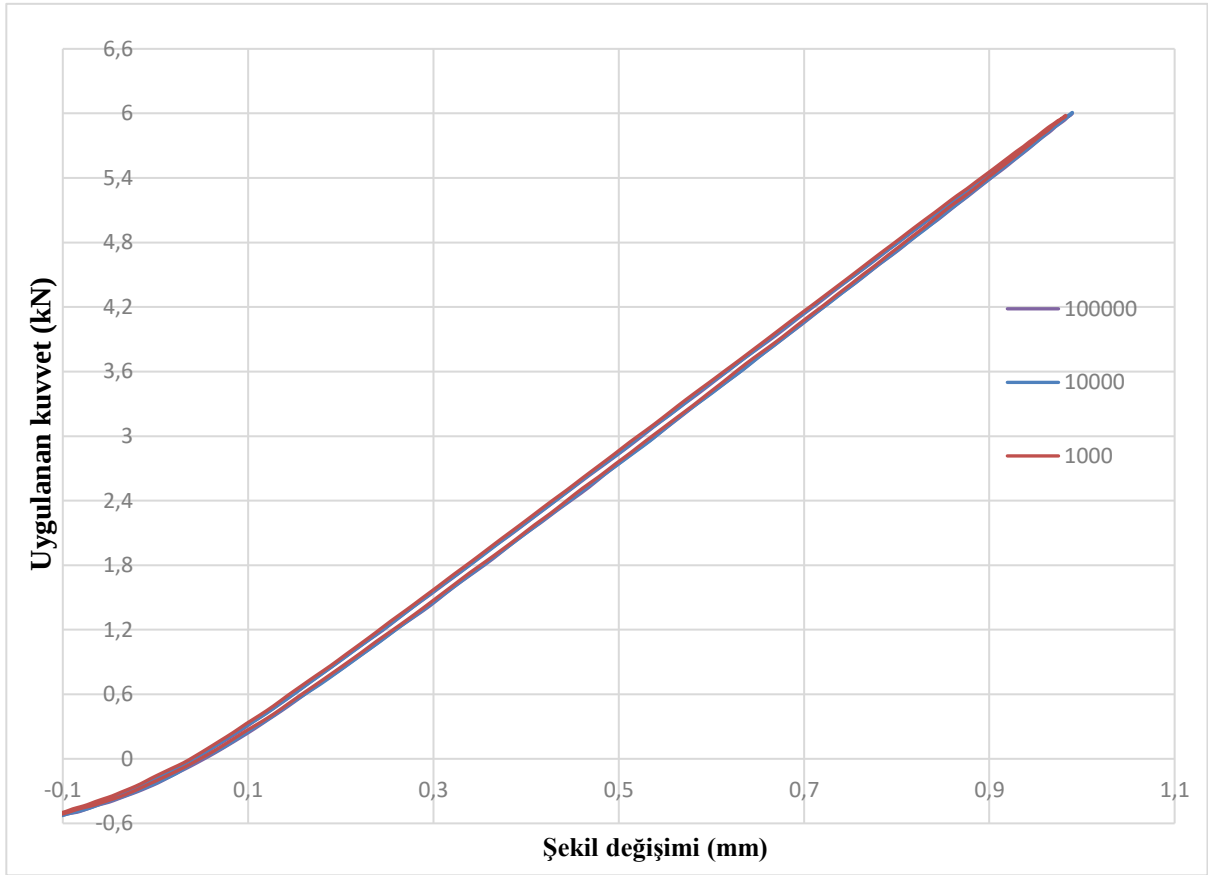
%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre çevrim sayıları arttıkça, histerezis eğrileri arasındaki öngörülen alan artışları KM-3 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin azaldığını göstermektedir.

Ayrıca Şekil 4.45’de görüldüğü gibi histerezis eğrileri arası mesafede bir yakınsaklık göze çarpmaktadır. Tablo 6.’daki değerleri incelediğimizde KM-3 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde 128232 çevrim sayısında hasara uğradığını görmekteyiz. Histerezis eğrileri arasındaki bu yakınsaklık KM-3 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin 100000 çevrime kadar hasara uğramadıklarını gösterir.

Şekil 4.45 ve Şekil 4.46’da gösterildiği gibi histerezis eğrilerinin sık olması KM-3 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitlikleri yüksek çıkmıştır. Sonuç olarak Şekil 4.45 ve Şekil 4.46’da verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre, KM-3 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemeler düşük çevrim sayılarında daha az şekil değişimine uğramışlardır. Çevrim sayıları arttıkça, KM-3 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin şekil değişimleri de artmıştır.

4.3.13. KM-3 katman yapısında ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri

KM-3 katman yapısında ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde farklı çevrim sayılarında histerezis eğrileri karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.47’de verilmiştir.



Şekil 4.47. KM-3 katman yapısında %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre farklı çevrim sayılarında (1000-1000-100000), KM-3 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri incelenmiştir.

KM-3 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere uygulanan yorulma yükleri 1000 çevrim sayısına kadar istenen değerlere ulaşarak malzeme hasara uğrayana kadar devam etmiştir.

Şekil 4.47’de verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde çevrim sayıları arttıkça histerezis eğrileri arasındaki alanlarda artışlar beklenmektedir. Histerezis eğrileri arasındaki tahmin edilen alan artışlarının sebebi, çevrim sayıları arttıkça KM-3 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin absorbe ettikleri enerjinin de artmasıdır. 1000, 10000 ve 100000 çevrim sayılarında histerezis eğrileri arasındaki alan artışlarındaki yakınsamalara sebep olarak KM-3 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzeme şekil değişimindeki yakınsamalar gösterilebilir.

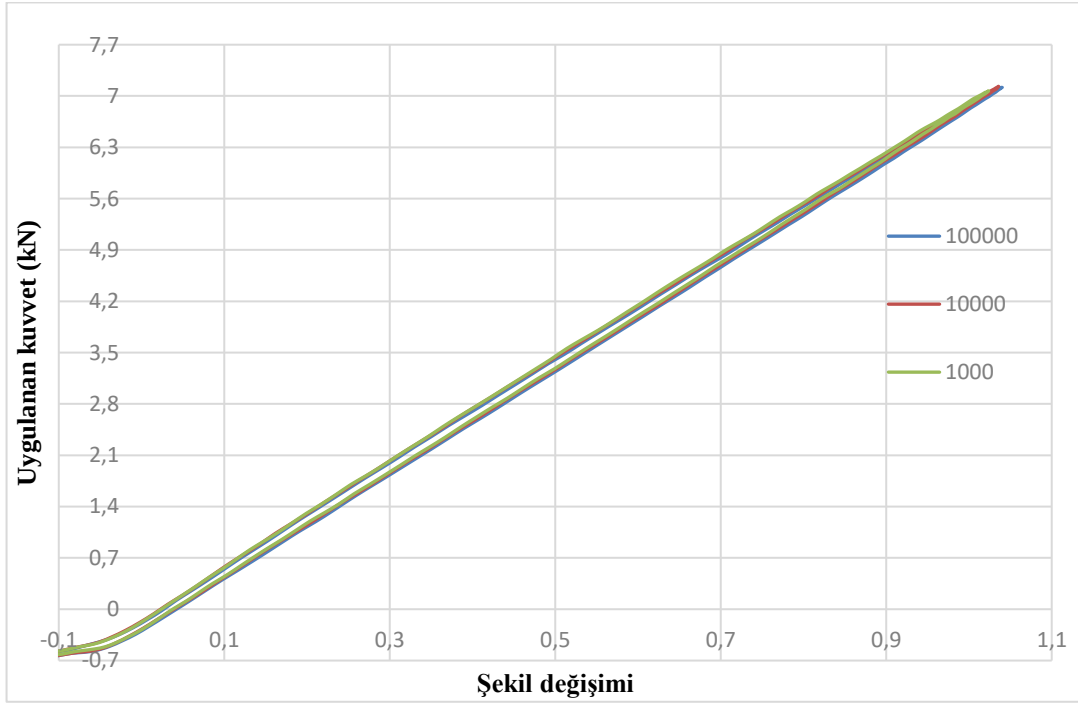
%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre çevrim sayıları arttıkça, histerezis eğrileri arasındaki öngörülen alan artışları KM-3 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin azaldığını göstermektedir.

Şekil 4.47’de gösterildiği gibi histerezis eğrilerinin sık olması KM-3 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Şekil 4.47’de verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre, KM-3 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemeler düşük çevrim sayılarında daha az şekil değişimine uğramışlardır. Çevrim sayıları arttıkça, KM-3 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin şekil değişimleri de artmıştır.

Şekil 4.45 ve Şekil 4.47 birlikte incelendiğinde KM-3 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitlikleri KM-3 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerden yüksek çıkmıştır. Çünkü KM-3 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere ait histerezis eğrileri KM-3 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrilerinden daha yoğundur.

4.3.14. KM-3 katman yapısında ve %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri

KM-3 katman yapısında ve %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde farklı çevrim sayılarında histerezis eğrileri karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.48’de verilmiştir.



Şekil 4.48. KM-3 katman yapısında %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre farklı çevrim sayılarında (1000-10000-100000), KM-3 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri incelenmiştir.

KM-3 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere uygulanan yorulma yükleri 1000 çevrim sayısına kadar istenen değerlere ulaşarak malzeme hasara uğrayana kadar devam etmiştir.

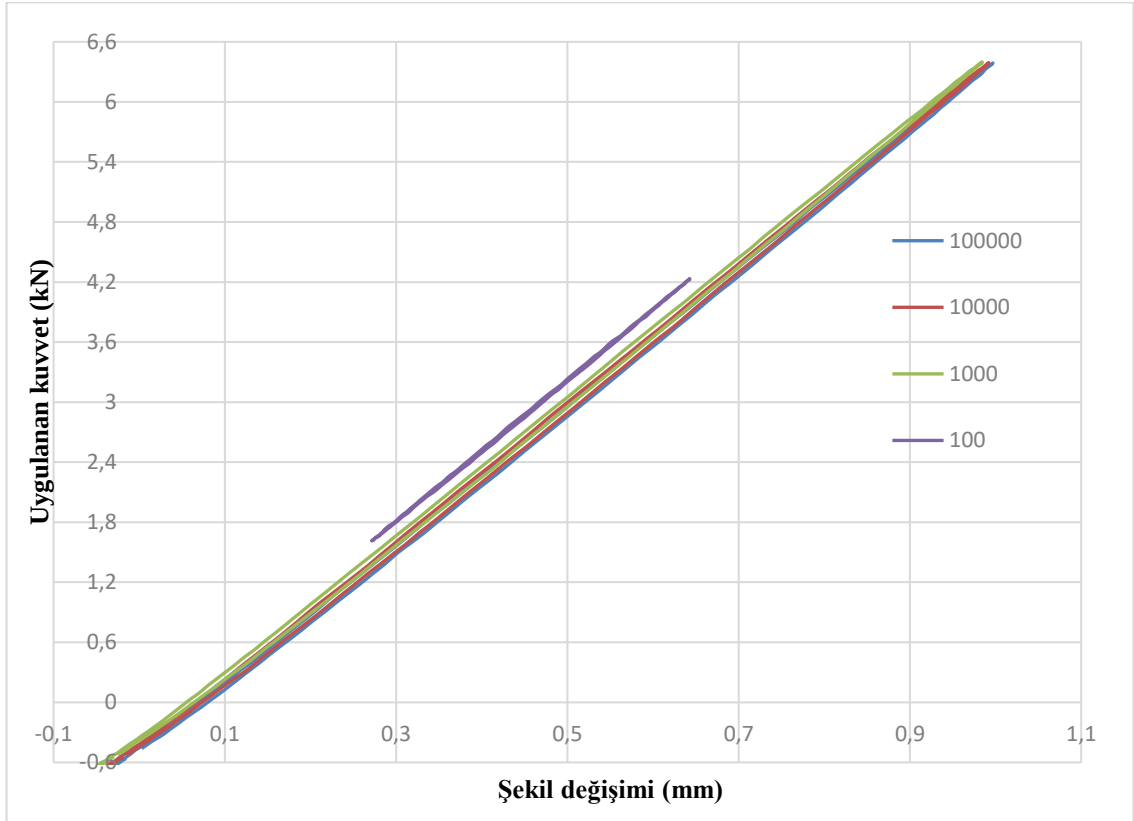
Şekil 4.48’de verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde çevrim sayıları arttıkça histerezis eğrileri arasındaki alanlarda artışlar beklenmektedir. Histerezis eğrileri arasındaki tahmin edilen alan artışlarının sebebi, çevrim sayıları arttıkça KM-3 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin absorbe ettikleri enerjinin de artmasıdır. 1000, 10000 ve 100000 çevrim sayılarında histerezis eğrileri arasındaki alan artışlarındaki yakınsamalara sebep olarak KM-3 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzeme şekil değişimindeki yakınsamalar gösterilebilir.

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre çevrim sayıları arttıkça, histerezis eğrileri arasındaki öngörülen alan artışları KM-3 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin azaldığını göstermektedir.

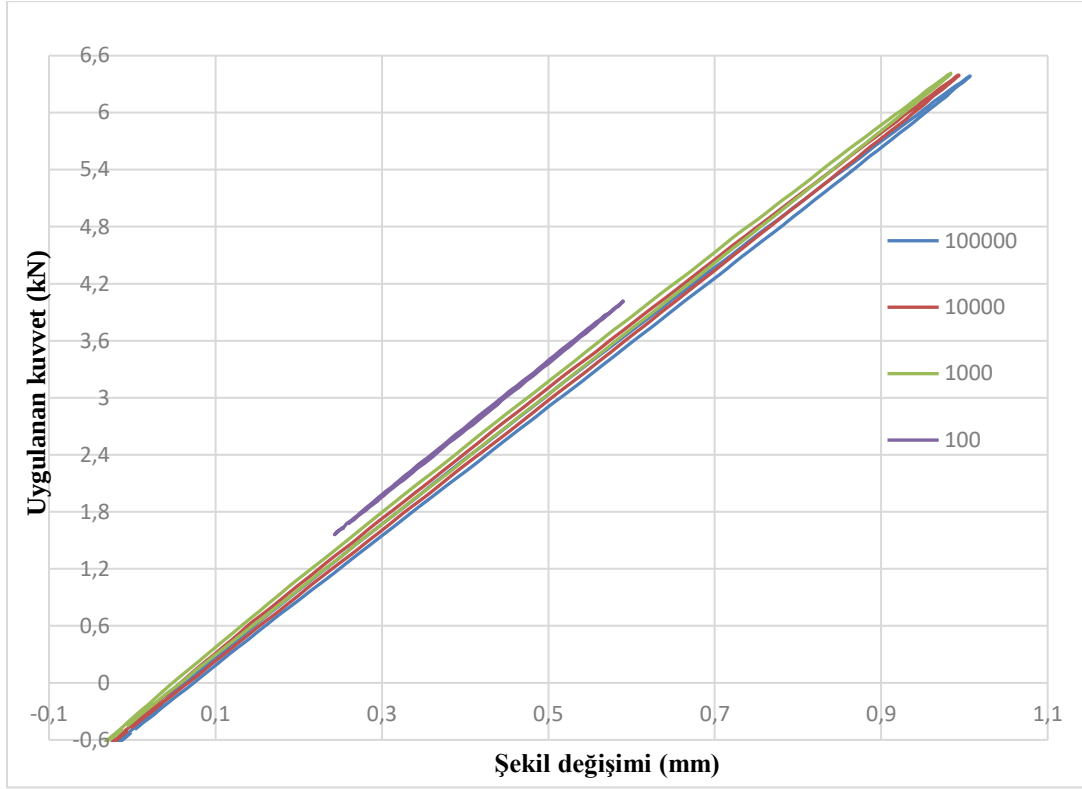
Şekil 4.48’de gösterildiği gibi histerezis eğrilerinin sık olması KM-3 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Şekil 4.48’de verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre, KM-3 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemeler düşük çevrim sayılarında daha az şekil değişimine uğramışlardır. Çevrim sayıları arttıkça, KM-3 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin şekil değişimleri de artmıştır.

4.3.15. KM-3 katman yapısında ve %1 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri

KM-3 katman yapısında ve %1 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde farklı çevrim sayılarında histerezis eğrileri karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.49 ve Şekil 4.50’de verilmiştir.



Şekil 4.49. KM-3 katman yapısında %1 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri



Şekil 4.50. KM-3 katman yapısında %1 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre farklı çevrim sayılarında (100-1000-10000-100000), KM-3 katman yapılı %1 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri incelenmiştir.

KM-3 katman yapılı %1 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere uygulanan yorulma yükleri 1000 çevrim sayısına kadar istenen değerlere ulaşarak malzeme hasara uğrayana kadar devam etmiştir.

Şekil 4.49 ve Şekil 4.50’de verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde çevrim sayıları arttıkça histerezis eğrileri arasındaki alanlarda artışlar beklenmektedir. Histerezis eğrileri arasındaki tahmin edilen alan artışlarının sebebi, çevrim sayıları arttıkça KM-3 katman yapılı %1 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin absorbe ettikleri enerjinin de artmasıdır. 1000, 10000 ve 100000 çevrim sayılarında histerezis eğrileri arasındaki alan artışlarındaki yakınsamalara sebep olarak KM-3 katman yapılı %1 Al_2O_3 nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzeme şekil değişimlerindeki yakınsamalar gösterilebilir.

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre çevrim sayıları arttıkça, histerezis eğrileri arasındaki öngörülen alan artışları KM-3 katman yapılı %1 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin azaldığını göstermektedir.

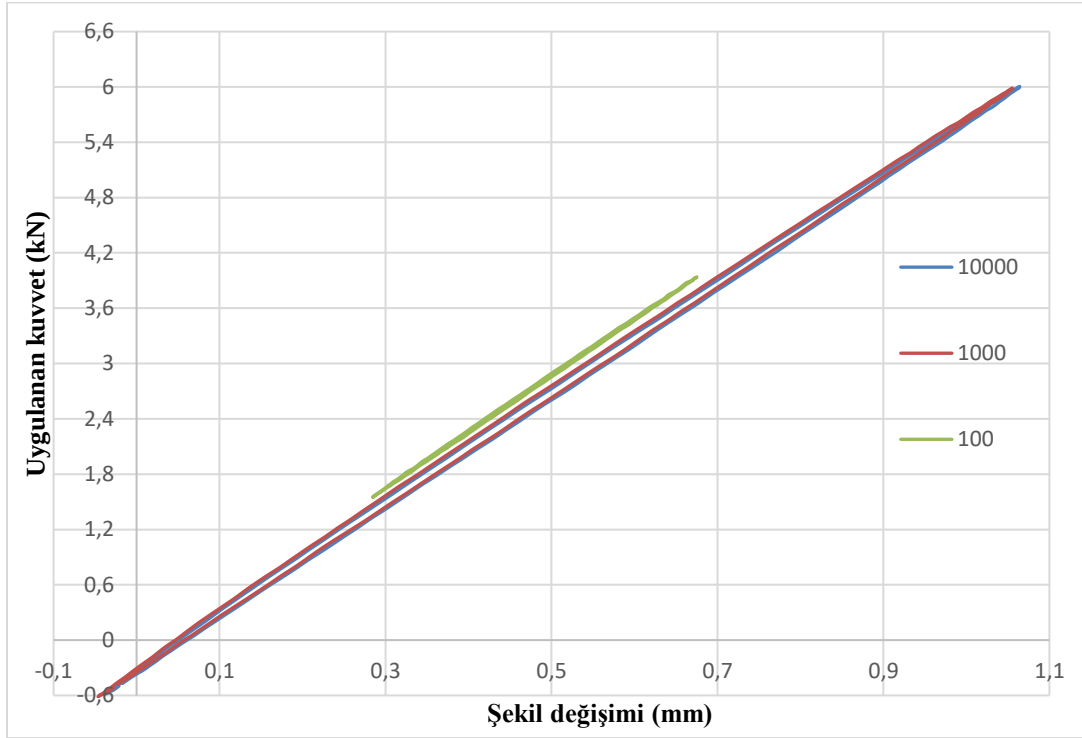
Şekil 4.49 ve Şekil 4.50’de gösterildiği gibi histerezis eğrilerinin sık olması KM-3 katman yapılı %1 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Şekil 4.49 ve Şekil 4.50’de verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre, KM-3 katman yapılı %1 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemeler düşük çevrim sayılarında daha az şekil değişimine uğramışlardır. Çevrim sayıları arttıkça, KM-3 katman yapılı %1 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin şekil değişimleri de artmıştır.

Ayrıca Şekil 4.49’da görüldüğü gibi histerezis eğrileri arası mesafede bir yakınsaklık göze çarpmaktadır. Tablo 6.’daki değerleri incelediğimizde KM-3 katman yapılı %1 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde 128464 çevrim sayısında hasara uğradığını görmekteyiz. Histerezis eğrileri arasındaki bu yakınsaklık KM-3 katman yapılı %1 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin 100000 çevrime kadar hasara uğramadıklarını gösterir.

Şekil 4.48 ve Şekil 4.49 birlikte incelendiğinde KM-3 katman yapılı %1 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitlikleri KM-3 katman yapılı %1 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerden yüksek çıkmıştır. Çünkü KM-3 katman yapılı %1 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere ait histerezis eğrileri KM-3 katman yapılı %1 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrilerinden daha yoğundur.

4.3.16. KM-4 katman yapısında ve %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri

KM-4 katman yapısında ve %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde farklı çevrim sayılarında histerezis eğrileri karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.51’de verilmiştir.



Şekil 4.51. KM-4 katman yapısında %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre farklı çevrim sayılarında (100-1000-10000), KM-4 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri incelenmiştir.

KM-4 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere uygulanan yorulma yükleri 1000 çevrim sayısına kadar istenen değerlere ulaşarak malzeme hasara uğrayana kadar devam etmiştir.

Şekil 4.51’de verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde çevrim sayıları arttıkça histerezis eğrileri arasındaki alanlarda artışlar beklenmektedir. Histerezis eğrileri arasındaki tahmin edilen alan artışlarının sebebi, çevrim sayıları arttıkça KM-4 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin absorbe ettikleri enerjinin de artmasıdır. 1000 ve 10000 çevrim sayılarında histerezis eğrileri arasındaki alan artışlarındaki yakınsamalara sebep olarak KM-4 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzeme şekil değişimindeki yakınsamalar gösterilebilir.

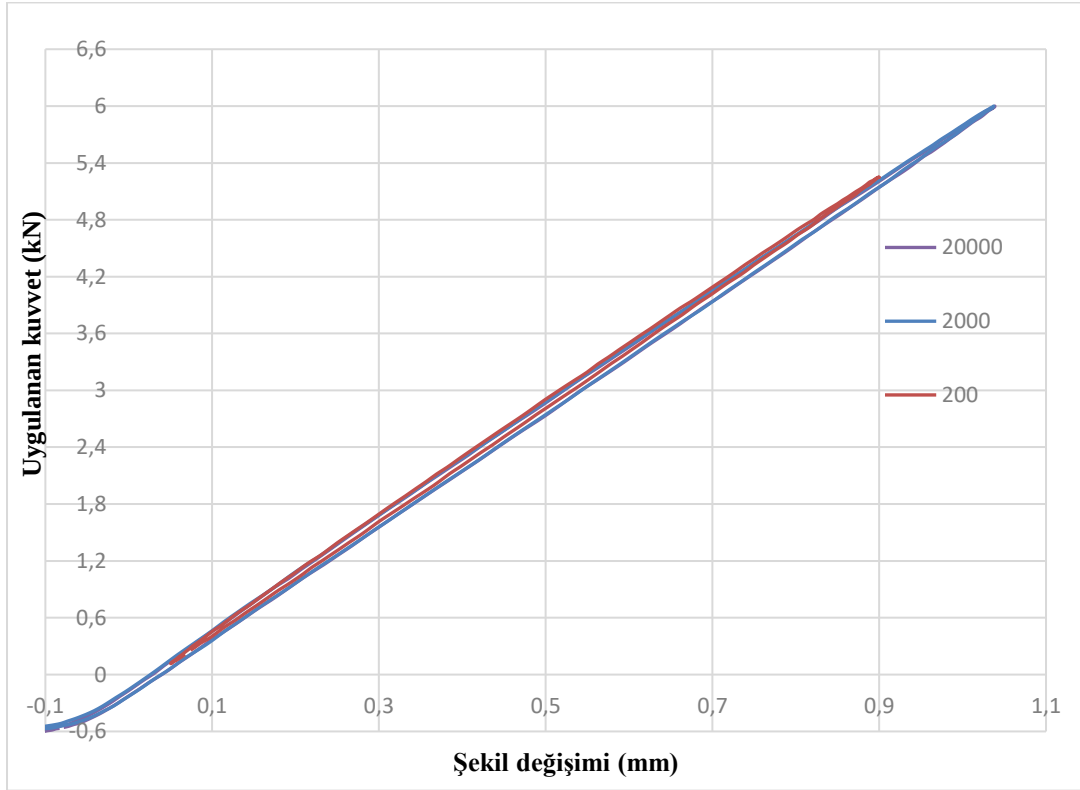
%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre çevrim sayıları arttıkça, histerezis eğrileri arasındaki öngörülen alan artışları KM-4 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin azaldığını göstermektedir.

Şekil 4.51’de gösterildiği gibi histerezis eğrilerinin sık olması KM-4 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Şekil 4.51’de verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre, KM-4 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemeler düşük çevrim sayılarında daha az şekil değişimine uğramışlardır. Çevrim sayıları arttıkça, KM-4 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin şekil değişimleri de artmıştır.

Ayrıca Şekil 4.51’de görüldüğü gibi histerezis eğrileri arası mesafede bir yakınsaklık göze çarpmaktadır. Tablo 6.’daki değerleri incelediğimizde KM-4 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde 30160 çevrim sayısında hasara uğradığını görmekteyiz. Histerezis eğrileri arasındaki bu yakınsaklık KM-4 katman yapılı %0.5 Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin 10000 çevrime kadar hasara uğramadıklarını gösterir.

4.3.17. KM-5 katman yapısında ve %0.5 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri

KM-5 katman yapısında ve %0.5 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde farklı çevrim sayılarında histerezis eğrileri karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.52’de verilmiştir.



Şekil 4.52. KM-5 katman yapısında %0.5 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre farklı çevrim sayılarında (200-2000-20000), KM-5 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri incelenmiştir.

KM-5 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere uygulanan yorulma yükleri 2000 çevrim sayısına kadar istenen değerlere ulaşarak malzeme hasara uğrayana kadar devam etmiştir.

Şekil 4.52’de verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde çevrim sayıları arttıkça histerezis eğrileri arasındaki alanlarda artışlar beklenmektedir. Histerezis eğrileri arasındaki tahmin edilen alan artışlarının sebebi, çevrim sayıları arttıkça KM-5 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin absorbe ettikleri enerjinin de artmasıdır. 2000 ve 20000 çevrim sayılarında histerezis eğrileri arasındaki alan artışlarındaki yakınsamalara sebep olarak KM-5 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzeme şekil değişimindeki yakınsamalar gösterilebilir.

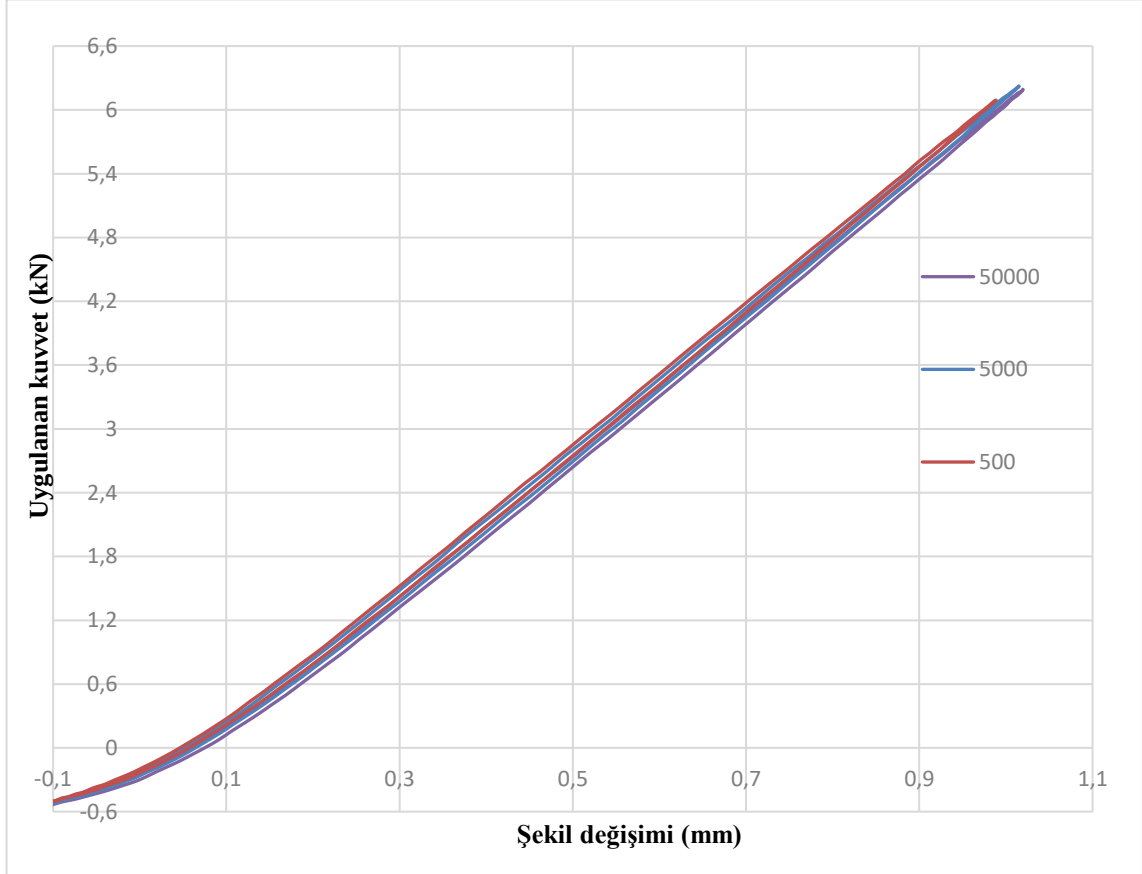
%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre çevrim sayıları arttıkça, histerezis eğrileri arasındaki öngörülen alan artışları KM-5 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin azaldığını göstermektedir.

Şekil 4.52’de gösterildiği gibi histerezis eğrilerinin sık olması KM-5 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Şekil 4.52’de verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre, KM-5 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemeler düşük çevrim sayılarında daha az şekil değişimine uğramışlardır. Çevrim sayıları arttıkça, KM-5 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin şekil değişimleri de artmıştır.

Ayrıca Şekil 4.52’de görüldüğü gibi histerezis eğrileri arası mesafede bir yakınsaklık göze çarpmaktadır. Tablo 6.’daki değerleri incelediğimizde KM-5 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde 39577 çevrim sayısında hasara uğradığını görmekteyiz. Histerezis eğrileri arasındaki bu yakınsaklık KM-5 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin 20000 çevrime kadar hasara uğramadıklarını gösterir.

4.3.18. KM-5 katman yapısında ve %1 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri

KM-5 katman yapısında ve %1 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde farklı çevrim sayılarında histerezis eğrileri karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.53'te verilmiştir.



Şekil 4.53. KM-5 katman yapısında %1 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre farklı çevrim sayılarında (500-5000-50000), KM-5 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri incelenmiştir.

KM-5 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere uygulanan yorulma yükleri 500 çevrim sayısına kadar istenen değerlere ulaşarak malzeme hasara uğrayana kadar devam etmiştir.

Şekil 4.53'te verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde çevrim sayıları arttıkça histerezis eğrileri arasındaki alanlarda artışlar beklenmektedir. Histerezis eğrileri arasındaki tahmin edilen alan artışlarının sebebi, çevrim sayıları arttıkça KM-5 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin absorbe ettikleri enerjinin de artmasıdır. 5000 ve 50000 çevrim sayılarında histerezis eğrileri arasındaki alan artışlarındaki yakınsamalara sebep olarak KM-5 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzeme şekil değişimindeki yakınsamalar gösterilebilir.

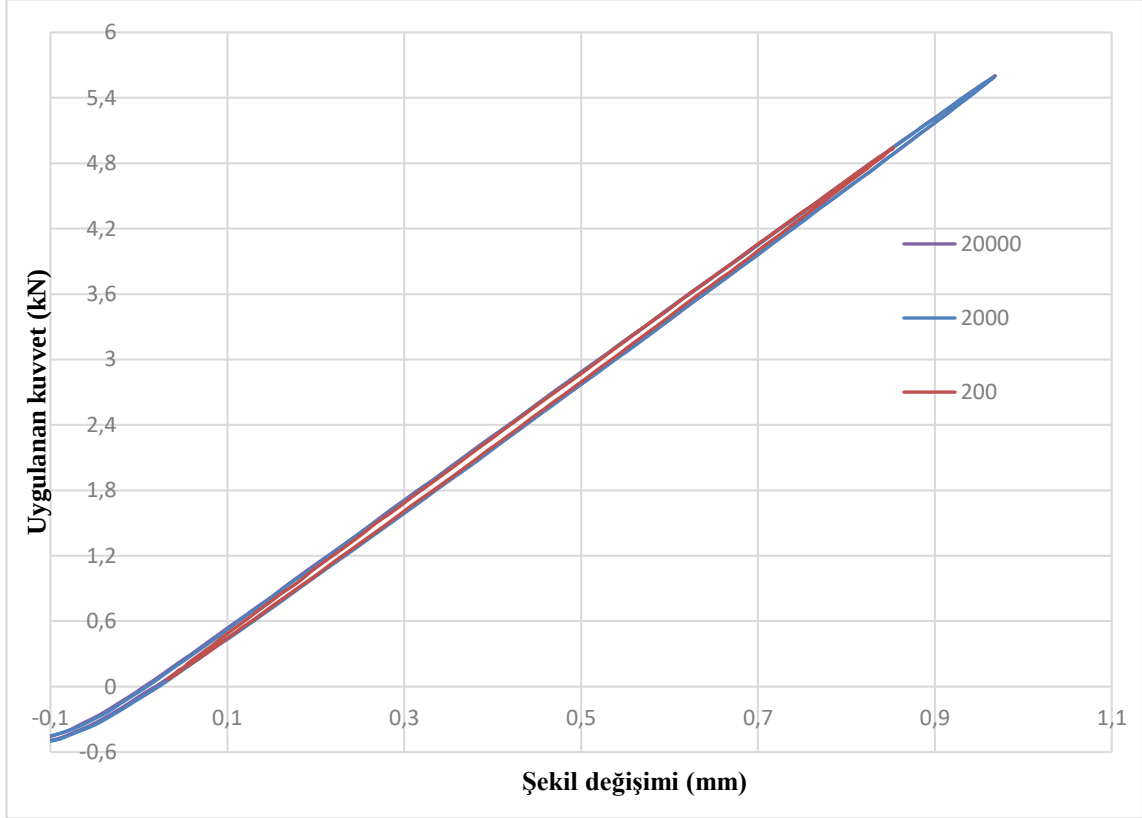
%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre çevrim sayıları arttıkça, histerezis eğrileri arasındaki öngörülen alan artışları KM-5 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin azaldığını göstermektedir.

Şekil 4.53'te gösterildiği gibi histerezis eğrilerinin sık olması KM-5 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Şekil 4.53'te verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre, KM-5 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemeler düşük çevrim sayılarında daha az şekil değişimine uğramışlardır. Çevrim sayıları arttıkça, KM-5 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin şekil değişimleri de artmıştır.

Şekil 4.52 ve Şekil 4.53 birlikte incelendiğinde KM-5 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitlikleri KM-5 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerden yüksek çıkmıştır. Çünkü KM-5 katman yapılı %0.5 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere ait histerezis eğrileri KM-5 katman yapılı %1 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrilerinden daha yoğundur.

4.3.19. KM-5 katman yapısında ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri

KM-5 katman yapısında ve %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde farklı çevrim sayılarında histerezis eğrileri karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.54'te verilmiştir.



Şekil 4.54. KM-5 katman yapısında %3 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre farklı çevrim sayılarında (200-2000-20000), KM-5 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri incelenmiştir.

KM-5 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere uygulanan yorulma yükleri 2000 çevrim sayısına kadar istenen değerlere ulaşarak malzeme hasara uğrayana kadar devam etmiştir.

Şekil 4.54'te verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde çevrim sayıları arttıkça histerezis eğrileri arasındaki alanlarda artışlar beklenmektedir. Histerezis eğrileri arasındaki tahmin edilen alan artışlarının sebebi, çevrim sayıları arttıkça KM-5 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin absorbe ettikleri enerjinin de artmasıdır. 2000 ve 20000 çevrim sayılarında histerezis eğrileri arasındaki alan artışlarındaki yakınsamalara sebep olarak KM-5 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzeme şekil değişimindeki yakınsamalar gösterilebilir.

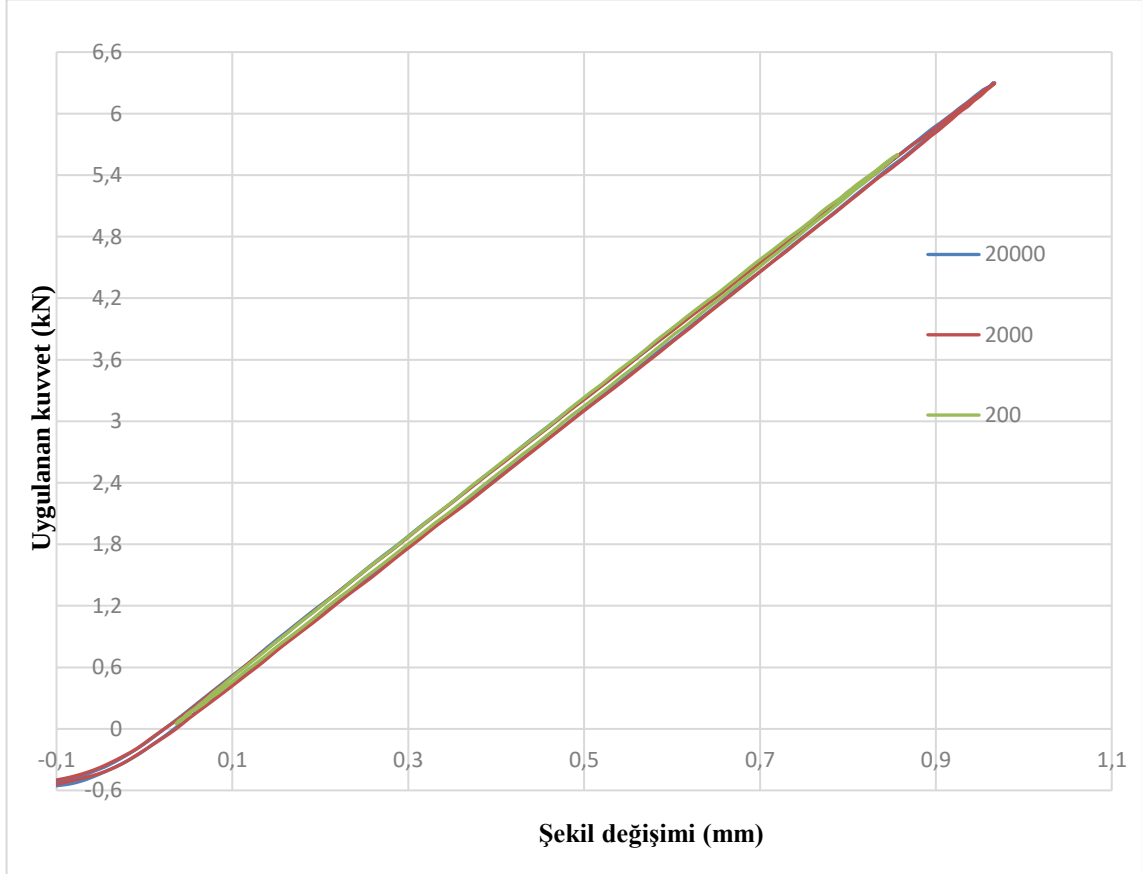
%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre çevrim sayıları arttıkça, histerezis eğrileri arasındaki öngörülen alan artışları KM-5 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin azaldığını göstermektedir.

Şekil 4.54'te gösterildiği gibi histerezis eğrilerinin sık olması KM-5 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Şekil 4.54'te verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre, KM-5 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemeler düşük çevrim sayılarında daha az şekil değişimine uğramışlardır. Çevrim sayıları arttıkça, KM-5 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin şekil değişimleri de artmıştır.

Ayrıca Şekil 4.54'te görüldüğü gibi histerezis eğrileri arası mesafede bir yakınsaklık göze çarpmaktadır. Tablo 6.'daki değerleri incelediğimizde KM-5 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde 37647 çevrim sayısında hasara uğradığını görmekteyiz. Histerezis eğrileri arasındaki bu yakınsaklık KM-5 katman yapılı %3 MgO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin 20000 çevrime kadar hasara uğramadıklarını gösterir.

4.3.20. KM-5 katman yapısında ve %0.5 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri

KM-5 katman yapısında ve %0.5 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde farklı çevrim sayılarında histerezis eğrileri karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.55'te verilmiştir.



Şekil 4.55. KM-5 katman yapısında %0.5 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre farklı çevrim sayılarında (200-2000-20000), KM-5 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri incelenmiştir.

KM-5 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere uygulanan yorulma yükleri 2000 çevrim sayısına kadar istenen değerlere ulaşarak malzeme hasara uğrayana kadar devam etmiştir.

Şekil 4.55'te verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde çevrim sayıları arttıkça histerezis eğrileri arasındaki alanlarda artışlar beklenmektedir. Histerezis eğrileri arasındaki tahmin edilen alan artışlarının sebebi, çevrim sayıları arttıkça KM-5 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin absorbe ettikleri enerjinin de artmasıdır. 2000 ve 20000 çevrim sayılarında histerezis eğrileri arasındaki alan artışlarındaki yakınsamalara sebep olarak KM-5 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzeme şekil değişimindeki yakınsamalar gösterilebilir.

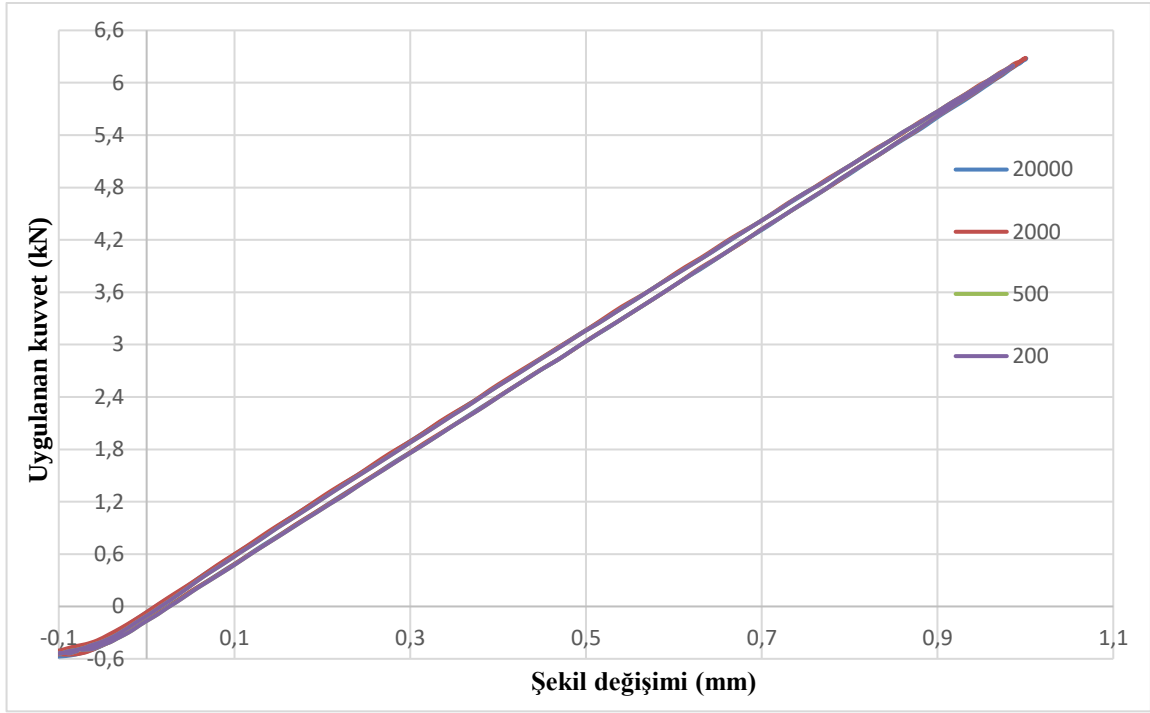
%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre çevrim sayıları arttıkça, histerezis eğrileri arasındaki öngörülen alan artışları KM-5 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin azaldığını göstermektedir.

Şekil 4.55'te gösterildiği gibi histerezis eğrilerinin sık olması KM-5 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Şekil 4.55'te verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre, KM-5 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemeler düşük çevrim sayılarında daha az şekil değişimine uğramışlardır. Çevrim sayıları arttıkça, KM-5 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin şekil değişimleri de artmıştır.

Ayrıca Şekil 4.55'te görüldüğü gibi histerezis eğrileri arası mesafede bir yakınsaklık göze çarpmaktadır. Tablo 6.'daki değerleri incelediğimizde KM-5 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde 45393 çevrim sayısında hasara uğradığını görmekteyiz. Histerezis eğrileri arasındaki bu yakınsaklık KM-5 katman yapılı %0.5 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin 20000 çevrime kadar hasara uğramadıklarını gösterir.

4.3.21. KM-5 katman yapısında ve %1 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin histerezis eğrileri

KM-5 katman yapısında ve %1 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde farklı çevrim sayılarında histerezis eğrileri karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.56'da verilmiştir.



Şekil 4.56. KM-5 katman yapısında %1 CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı çevrim sayılarında karşılaştırmalı histerezis eğrileri

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre farklı çevrim sayılarında (200-500-2000-20000), KM-5 katman yapılı %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin histerezis eğrileri incelenmiştir.

KM-5 katman yapılı %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelere uygulanan yorulma yükleri 500 çevrim sayısına kadar istenen değerlere ulaşarak malzeme hasara uğrayana kadar devam etmiştir.

Şekil 4.56’da verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde çevrim sayıları arttıkça histerezis eğrileri arasındaki alanlarda artışlar beklenmektedir. Histerezis eğrileri arasındaki tahmin edilen alan artışlarının sebebi, çevrim sayıları arttıkça KM-5 katman yapılı %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin absorbe ettikleri enerjinin de artmasıdır. 2000 ve 20000 çevrim sayılarında histerezis eğrileri arasındaki alan artışlarındaki yakınsamalara sebep olarak KM-5 katman yapılı %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzeme şekil değişimindeki yakınsamalar gösterilebilir.

%40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerine göre çevrim sayıları arttıkça, histerezis eğrileri arasındaki öngörülen alan artışları KM-5 katman yapılı %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin azaldığını göstermektedir.

Şekil 4.56’da gösterildiği gibi histerezis eğrilerinin sık olması KM-5 katman yapılı %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin rijitliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Şekil 4.56’da verilen Uygulanan kuvvet (kN) – Şekil değişimi (mm) grafiğine göre, KM-5 katman yapılı %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemeler düşük çevrim sayılarında daha az şekil değişimine uğramışlardır. Çevrim sayıları arttıkça, KM-5 katman yapılı %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin şekil değişimleri de artmıştır.

Ayrıca Şekil 4.56’da görüldüğü gibi histerezis eğrileri arası mesafede bir yakınsaklık göze çarpmaktadır. Tablo 6.’daki değerleri incelediğimizde KM-5 katman yapılı %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin %40 yük seviyesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde 36014 çevrim sayısında hasara uğradığını görmekteyiz. Histerezis eğrileri arasındaki bu yakınsaklık KM-5 katman yapılı %1 CuO nanopartikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin 20000 çevrime kadar hasara uğramadıklarını gösterir.

4.4. SEM Analiz Sonuçları

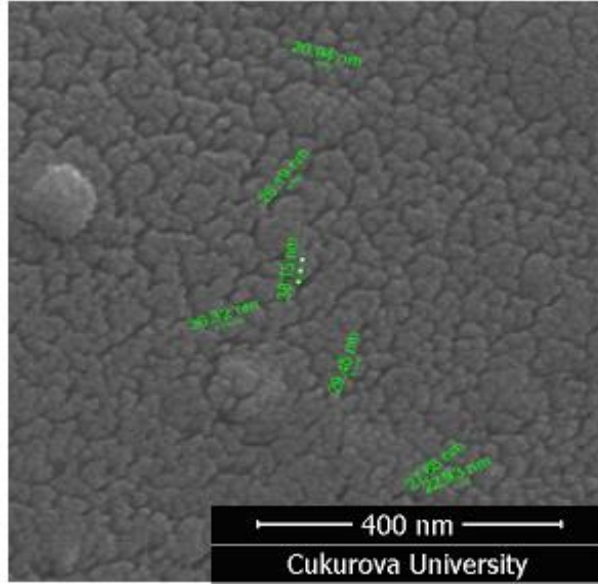
SEM analizleri, Çukurova Üniversitesi Mikroskobik Analiz Laboratuvarlarında bulunan Quanta 650 Field Emission cihazı kullanılarak yapılmıştır.

Işınların numuneye girmesi ile üretilen SE1 sinyalleri, çarpma noktasına çok yakın mesafede yüksek bir açıyla yayılırlar ve bu nedenle numunelerde yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilir. SEM görüntülerinin doğru çıkabilmesi ve nanopartiküllerin gözükebilmesi için numuneler nem içermemelidir.

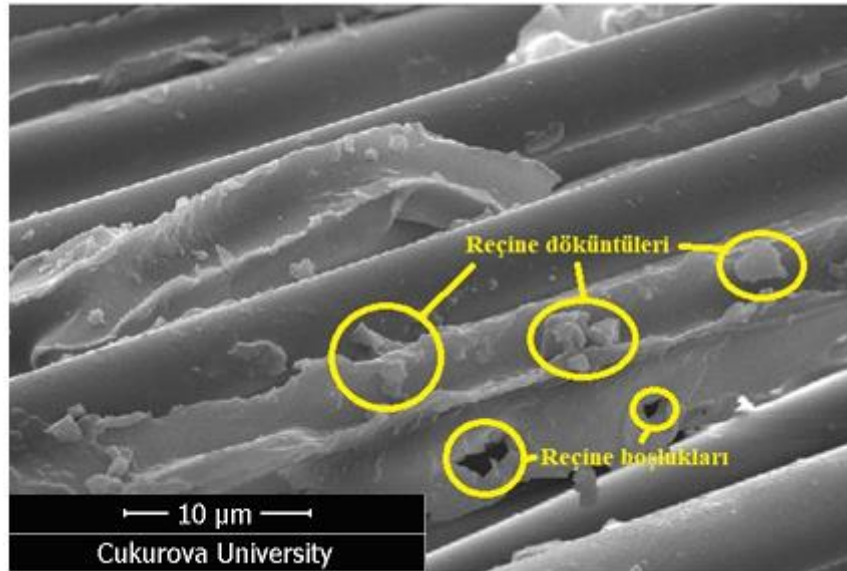
Nanopartikül takviyeli ve takviyesiz numuneler 1cm-1cm boyutlarında kestirildikten sonra mikroskobik hasar mekanizmalarını anlamak için SEM görüntüleri alınmıştır.

4.4.1. Al₂O₃ nanopartikül takviyeli yorulma numuneleri SEM analizleri

%60 yük seviyesinde, uygulanan yorulma yükü neticesinde %0.5, %1 ve %3 oranlarında Al₂O₃ nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerin, SEM analiz görüntüleri elde edilerek Al₂O₃ nanopartikül bölgesel dağılımları ve boyutları 200.000 kat büyütülerek Şekil 4.57’de ve oluşan hasar mekanizmaları da sırasıyla 5.000 kat büyütülerek Şekil 4.58’de, 1.000 kat büyütülerek Şekil 4.59’da, 250 kat büyütülerek Şekil 4.60’da ve 54 kat büyütülerek Şekil 4.61’de verilmiştir.



Şekil 4.57. SEM analizi ile elde edilen Al_2O_3 nanopartikül boyutları



Şekil 4.58. Al_2O_3 nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerde fiber yüzeyleri hasar mekanizmaları

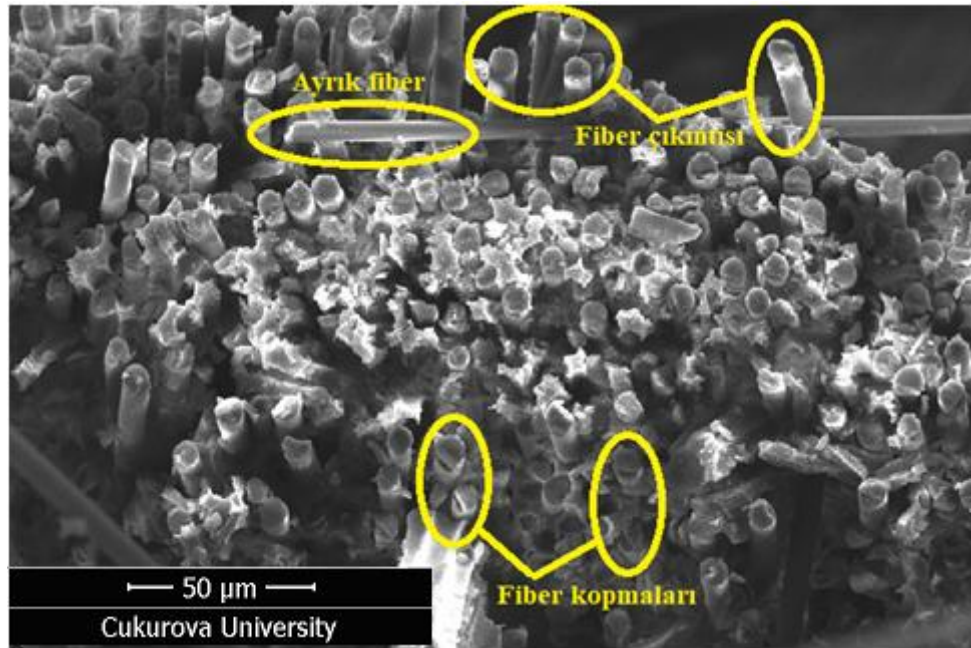
Al_2O_3 nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerin %60 yük seviyesinde, fiber yüzeylerinde oluşan hasar mekanizmaları SEM görüntüleri 5000 kat büyütülerek Şekil 4.58’de verilmiştir. Şekil 4.58’de görüldüğü gibi nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzeme fiberlerinde hasar mekanizmaları gözlemlenmiştir.

Shindo ve arkadaşları (2009), çalışmalarında uygulanan yorulma yükü neticesinde oluşan reçine döküntülerinin yorulma hasar mekanizmalarında önemli bir özellik olduğundan bahsetmişlerdir.

Epoksi reçinenin kırılgan özellik göstermesi sebebiyle epoksi matrisi üzerinde reçine boşlukları oluşmuştur. Fiber doğrultusunda oluşan reçine boşluklarının sebebi reçine matrisinin, fiberlerden ve matris malzemeden daha zayıf olmasıdır.

Reçine malzemesi üzerinde gözlemlenen boşlukların delaminasyon hasarı bölgesine yakınlık sebebiyle oluştuğu düşünülmektedir. Zorko ve arkadaşları (2021), çalışmalarında delaminasyon kusurlarının, yüksek yük seviyelerinde yorulma yükleri altında uzun süreler çalışıldıktan sonra oluştuğuna dikkat çekmişlerdir.

Sonuç olarak Şekil 4.58’de görülen reçine boşluklarının oluştuğu ve reçine döküntülerinin fazlaştığı delaminasyon hasarı bölgesine yaklaştıkça ve yüzey enerjisi dağılımı daha fazla olan bölgelerde, reçine döküntülerinde artışlar olduğu düşünülmektedir. Delaminasyon hasarı bölgesinden uzaklaştıkça fiberlerde daha güçlü bağlar oluşmuştur ve fiber dağılımları daha düzgün olmuştur.



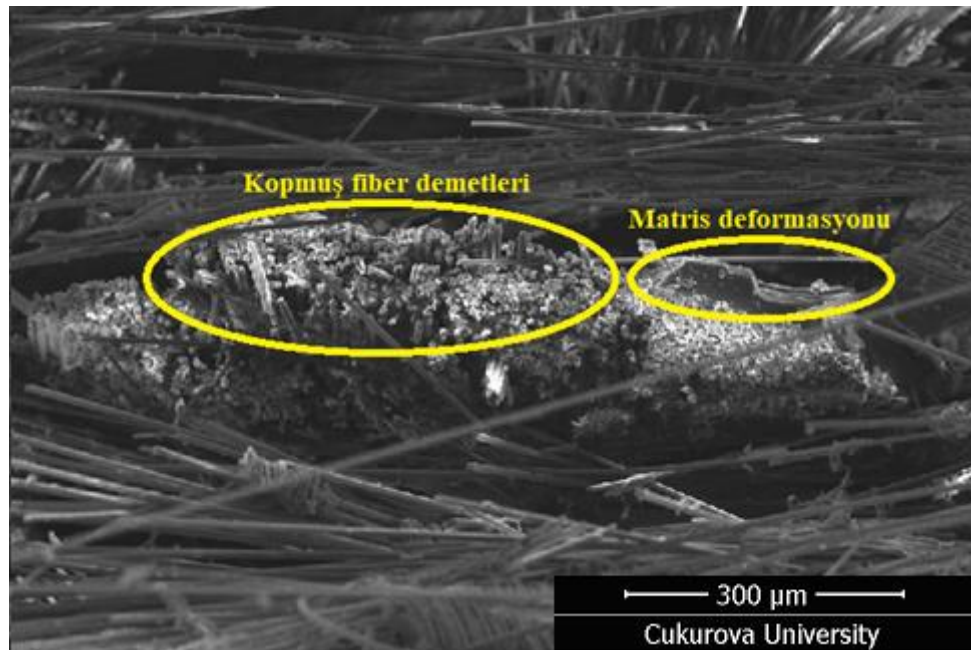
Şekil 4.59. Al_2O_3 nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerde fiber hasar mekanizmaları

%60 yük seviyesinde, Al_2O_3 nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerde fiber hasarları SEM görüntüleri 1000 kat büyütülerek Şekil 4.59’da verilmiştir.

Yorulma çevrimlerinin ilerlemesiyle, çekme-basma yorulma yükleri altında bulunan atkı ve çözgü ipliklerinde başlangıç aşamasında az miktarda lif kopmaları oluşur. Bazı atkı ve çözgü lif demetleri hasara uğradığında, malzeme çekme-basma yorulma yüklerini taşımayaz hale gelir. Sonrasında lif demetlerinde daha fazla lifin kırılarak sonuçta nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerin hasar görmesine yol açar.

Yorulma çevrim sayılarının ilerlemesine bağlı olarak fiberlerde kopmalar, çıkıntılar ve ayrılmalar gözlemlenmiştir. Fiber kopmaları neticesinde kompozit malzemeler uygulanan yorulma yüklerini taşıyamadıklarından fiber demetleri de hasara uğramıştır. Fiber demeti hasarları ise kompozit malzemeler kopana kadar devam etmiştir. Matris malzemeden ayrılan ve çekilen fiberlerin yönleri Şekil 4.59'da verilen SEM görüntülerinde net bir şekilde belli olmaktadır. Şekil 4.59'da verilen SEM görüntüleri orta bölgelerde fiber demeti kopmaları yoğun olarak gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak uygulanan çekme-basma yorulma yükleri altında nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzeme fiberlerinde geniş çaplı ve sıralı bir şekilde kopmalar meydana gelmiştir.



Şekil 4.60. Al_2O_3 nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerde fiber demetlerinin matris hasar mekanizmasına etkisi

%60 yük seviyesinde, Al_2O_3 nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerde fiber demetleri ve matris hasarları SEM görüntüleri 250 kat büyütülerek Şekil 4.60'da verilmiştir.

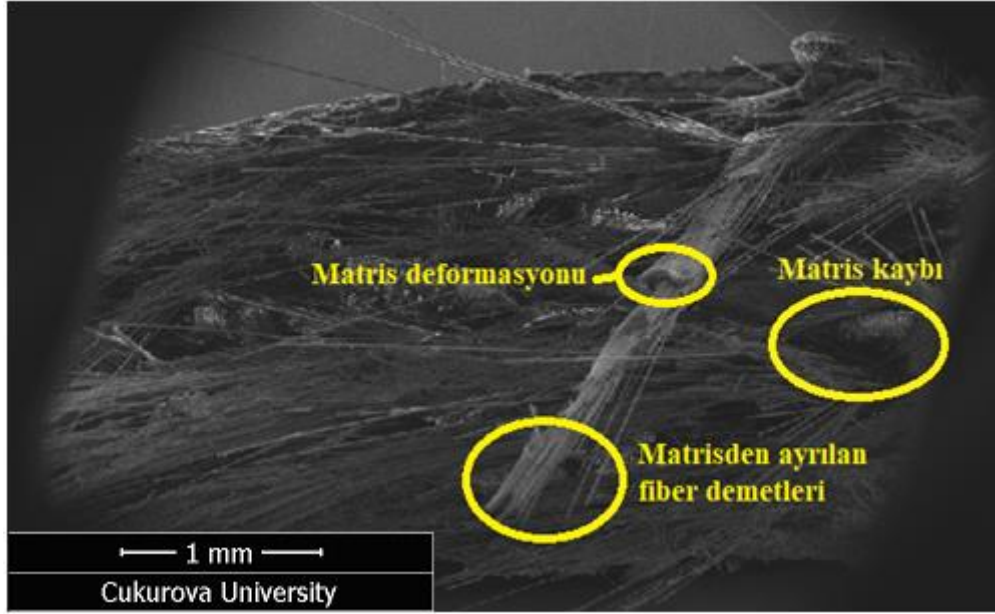
Nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerde çekme-basma yorulma yükleri altında ana hasar mekanizmaları, matris mikro çatlaklarının meydana gelmesi ve sonrasında bu çatlakların atkı ve çözgü iplikleri boyunca malzemenin içinde yayılması ve genişlemesidir. Bu ana hasar mekanizmaları fiber/matris arayüzüne yayıldığında nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzeme içerisinde gerilme dağılımları meydana gelir, bu da farklı derecelerde arayüz ayrılmasına neden olabilmektedir.

Çekme-basma yorulma yükleri altında çevrim sayıları arttıkça ilerleme gösteren hasar durumlarında, atkı ve çözgü iplikleri koparak, çok sayıda atkı ve çözgü fiber demetlerinin kırılmasına ve sonunda kompozit malzemenin de hasara uğramasına neden olacaktır.

Al_2O_3 nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerin hasar mekanizmaları incelendiğinde cam fiber bağımsız lif seviyelerinin çok yoğun olduğu ve matris malzemedan ayrıldıkları görülmüştür. Bu fiber ayrılmalarının katmanlar arası delaminasyondan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Malzemenin kopmasıyla beraber bağımsız lif seviyelerindeki yoğunluk, arayüz ve matris arasında tam bir hasarın oluştuğunu gösterir. Matris içinde oluşan deformasyon ve çatlakların sebebi, iç içe geçen dokuma tip kumaşlar ve matristen liflere aktarılan yüklerdir. Cai ve arkadaşları (2017) tek yönlü ve dokuma tip cam elyaf kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine yaptıkları deneysel çalışmalarda benzer sonuçlar elde ederek kopma sonrası çok sayıda bağımsız lif oluşumunun, hasarlı numunenin kırılma yüzeyinde arayüz ve matriste tam hasar oluşturduğunu gözlemlemişlerdir.

Bu bulgular dikkate alındığında, nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerde hasar mekanizmaları; matris çatlakları, fiber-matris bağlarının ayrılması, fiber kırılması, fiber çekilmesi ve delaminasyon gibi arıza modlarına bağlanabilir.



Şekil 4.61. Al_2O_3 nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerde matris hasar mekanizmaları

%60 yük seviyesinde, Al_2O_3 nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerde fiber demetleri ve matris hasarları SEM görüntüleri 54 kat büyütülerek Şekil 4.61’de verilmiştir.

Çekme-basma yorulma yükleri altında nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerde atkı ve çözgü iplikleri boyunca yayılan mikro çatlaklar ilerleyerek matris malzemedeki deformasyona sebep olmaktadır. Benzer olarak, çekme-basma yorulma yükleri altında kopan matris parçaları gözlemlenmektedir.

Şekil 4.61’de verilen SEM görüntülerinde matris kayıpları, matris deformasyonu ve matrisden ayrılan fiber demetleri olmak üzere üç çeşit hasar mekanizması gözlemlenmiştir. Şekil 4.61’de verilen SEM görüntüleri dikkatle incelendiğinde nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerde atkı ve çözgü ipliklerinin kırılarak matris malzemedeki ayrılımları açıkça belli olmaktadır.

Nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelere çekme-basma yorulma yükleri uygulanırken, matris deformasyonları sonucunda büyük yoğunlukta atkı ve çözgü ipliklerinin kırılarak matris malzemedeki ayrılımları ve matris malzeme içerisinde dağınık şekilde konumlanan matris kayıpları oluşmuştur.

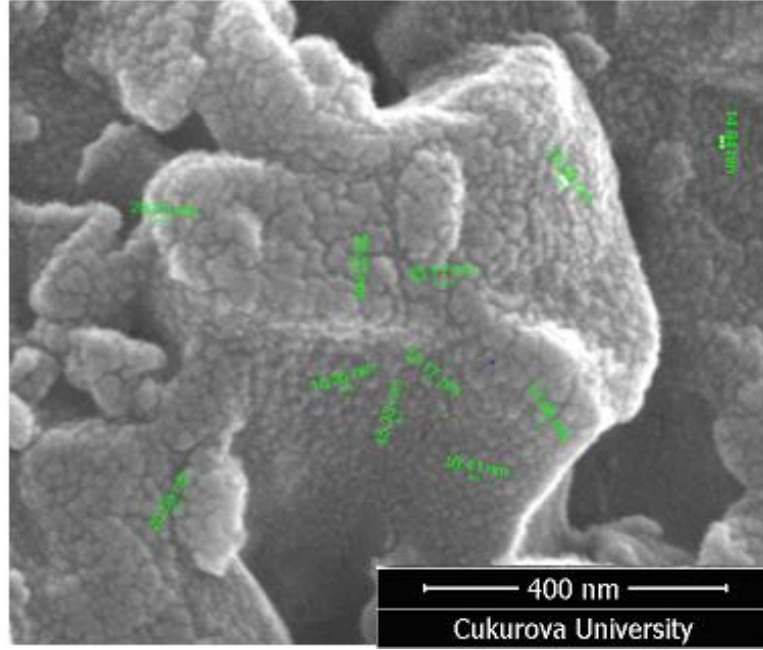
Matris kayıplarının sebebi, kompozit malzemelerin yüksek yüklere maruz kalmasından dolayı matrisin bozularak çatlakların iyice yayılması olduğu düşünülmektedir.

Nayak ve arkadaşları (2020), katman dizilimlerinin örgülü olmayan E-glass bambu dokunmamış hibrit epoksi kompozitlerinin mekanik özelliklerine etkisini araştırırken benzer sonuçlar gözlemlemişlerdir. Örnek olarak, artan çatlak yayılmalarının, matrisin birkaç yerde yerinden çıkmasına ve matris kayıplarının artmasına neden olduğunu gözlemlemişlerdir.

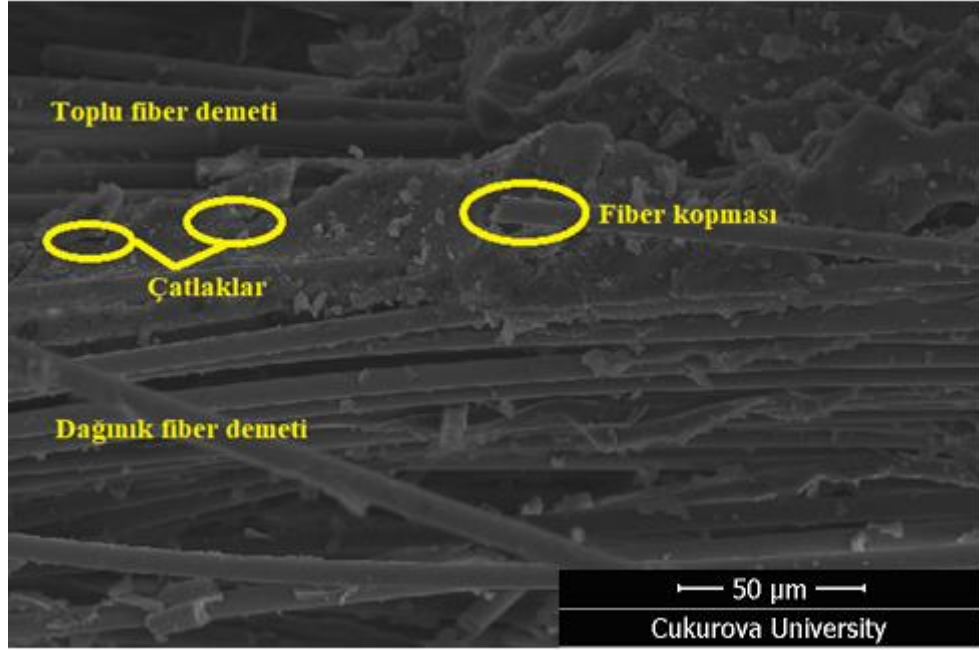
Sonuç olarak, çok sayıda atkı ve çözgü lif demetleri matris malzemeden ayrıldığında ve kırıldığında, nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerde kopmalar gerçekleşmektedir.

4.4.2. CuO nanopartikül takviyeli yorulma numuneleri SEM analizleri

%60 yük seviyesinde uygulanan yorulma yükü neticesinde %0.5, %1 ve %3 oranlarında CuO nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerin, SEM analiz görüntüleri elde edilerek CuO nanopartikül bölgesel dağılımları ve boyutları 200.000 kat büyütülerek Şekil 4.62’de ve oluşan hasar mekanizmaları da sırasıyla 10000 kat büyütülerek Şekil 4.63’te, 1000 kat büyütülerek Şekil 4.64’te, ve 54 kat büyütülerek Şekil 4.65’te verilmiştir.



Şekil 4.62. SEM analizi ile elde edilen CuO nanopartikül boyutları



Şekil 4.63. CuO nanopartikül takviyeli kompozit fiber yüzeyleri hasar mekanizmaları

%60 yük seviyesinde, CuO nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzeme fiberlerinde oluşan hasar mekanizmaları SEM görüntüleri 10000 kat büyütülerek Şekil 4.63'te verilmiştir.

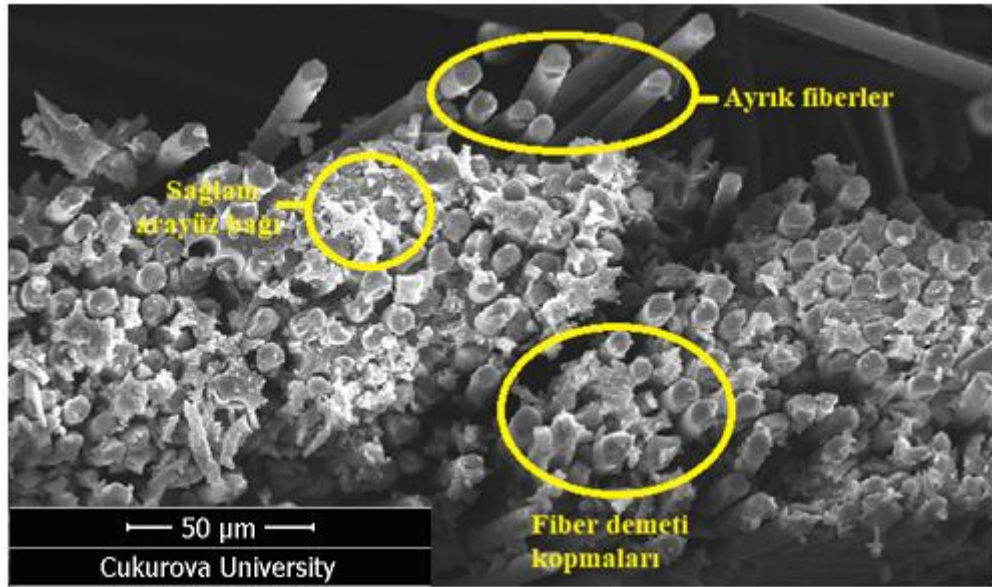
Şekil 4.63'te verilen SEM görüntülerine göre uygulanan çekme-basma yorulma yükleri neticesinde toplu ve dağınık fiber demetleri, çatlaklar, reçine döküntüleri ve fiberlerde kopmalar görülmüştür. Epoksi malzemenin yoğun olduğu bölgelerde toplu fiber demetleri gözlemlenirken, epoksi malzemenin yoğun olmadığı bölgelerde ise dağınık fiber demetleri gözlemlenmiştir.

Al_2O_3 nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzeme epoksi reçine matrisleri üzerinde çatlaklar oluşmuştur. Çatlak yakınlarında epoksi malzemeye ait reçine döküntüleri yoğun bir şekilde bulunmaktadır. Toplu fiber demetleri ise önemli ölçülerde yorulma hasarına uğramadığından epoksi malzemeye ait reçine döküntüleri yoğun bir şekilde görülmemektedir.

Epoksi malzeme reçine matrisinde çatlakların oluşma sebebi fiberlerin uygulanan çekme-basma yorulma yüklerine karşı daha dayanıklı olmasıdır. Çekme-basma yorulma yüklemesi altında çevrim sayıları arttıkça nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerde oluşan mikro çatlaklar ilerleyerek kompozit malzemenin kopmasına sebep olur.

Shao ve arkadaşları (2015) çalışmalarında, hasar bölgelerinde epoksi malzemeye ait reçine döküntülerinin fazlaca olduğu kompozit malzemelerde ana hasar mekanizmasının matris malzemede oluşan kohesif hasarlar olduğunu gözlemlemişlerdir.

Ayrıca ticari yapıştırıcılar içinde bulunan farklı boyutlu mineral parçacıkları nanopartiküllerin epoksi matrisine bağlanmasını zorlaştırmasına rağmen, bu mekanizmalar nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerin yorulma ömrünü artırabilir.



Şekil 4.64. CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerde fiber hasar mekanizmaları

%60 yük seviyesinde, CuO nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzeme fiberlerinde oluşan hasar mekanizmaları SEM görüntüleri 1000 kat büyütülerek Şekil 4.64'te verilmiştir.

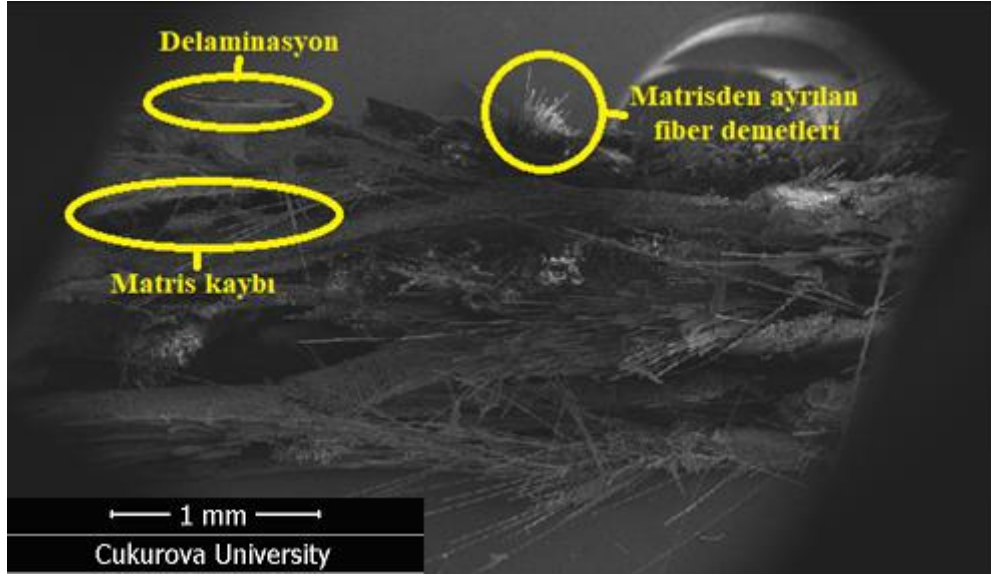
Şekil 4.64'te verilen SEM görüntülerinde, fiber ve matris malzeme arasındaki zayıf bağlar nedeniyle fiber demetlerinde kopmalar ve ayrı fiberler gözlemlenmiştir. Şekil 4.64'te verilen SEM görüntülerinde, reçine döküntüleri az olduğundan ve bazı bölgelerde sağlam arayüz bağları olduğundan fiber demeti kopmalarının ve ayrı fiberlerin delaminasyon hasar bölgesine uzak alanlarda oluştuğu düşünülmektedir.

Geniş alana yayılan fiberlerde kopmalar ve ayrılmalar, uzun süreli çekme-basma yorulma yükleri altında çevrim sayıları arttıkça fiber / matris arayüz bağlarının zayıflamasıyla meydana gelir.

Şekil 4.64'te gösterildiği gibi matris malzemeden ayrılan ve çekilen fiberlerin etrafında meydana gelen oyuklar ile atkı ve çözgü ipliklerinin temiz görünümü, çekme-basma yorulma yükleri altında nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerde çatlakların genel olarak fiber-matris arayüzeyinde büyümeye başladığını göstermektedir.

Marinho ve arkadaşları (2021), çalışmalarında yorulma kırılma yüzeylerinde Şekil 4.64'te elde edilen görüntülere benzer olarak fiber yüzeylerinde pürüzsüz ve optik yansımalar sunan hasar morfolojileri elde etmişlerdir. Buna ilaveten yorulma yüklerine maruz kalarak kırılan fiber yüzeylerinin pürüzsüz olması sebebiyle, kompozit malzemelerin hasar morfolojilerinde optik yansımaların fazla olabileceğini belirtmişlerdir.

Sonuç olarak, Şekil 4.64'te elde edilen hasar mekanizmalarında, nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzeme matrisinden ayrılan ve çekilen fiberlerin nispeten topluluğunu koruyabilmesi yüksek arayüzey bağ mukavemetini göstermektedir.



Şekil 4.65. CuO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerde matris hasar mekanizmaları

%60 yük seviyesinde, CuO nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzeme matrisinde oluşan hasar mekanizmaları SEM görüntüleri 54 kat büyütülerek Şekil 4.65'te verilmiştir.

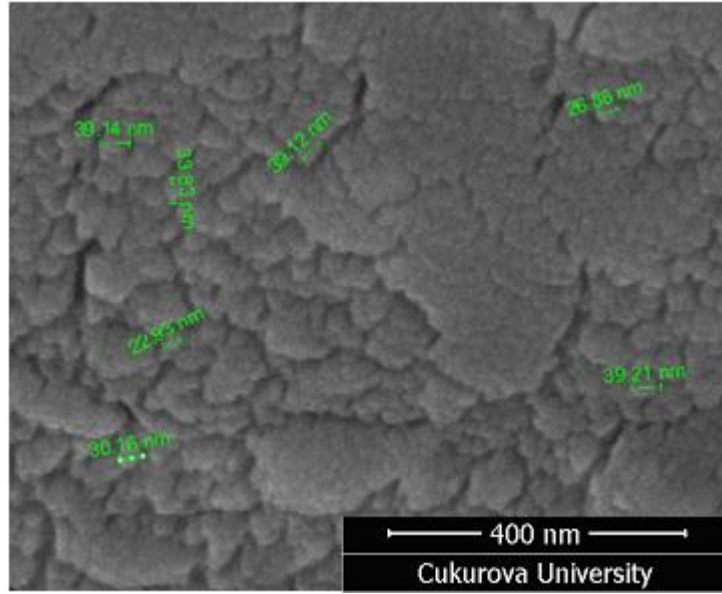
Uygulanan yorulma yükleri neticesinde CuO nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzeme matrisinde ilk önce mikro çatlaklar meydana gelir. Çevrim sayıları arttıkça bu çatlaklar ara yüzeye yayılır. Fiberler, kompozit malzemelerde yükü taşıyan takviye elemanlarıdır. Fiberler boyunca ilerleyen ve genişleyen çatlaklar, CuO nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzeme matrisinde delaminasyon hasarına, matris kayıplarına ve fiber demetlerinin matrisden ayrılarak kopmasına sebep olduğu gözlemlenmiştir.

Nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerde, delaminasyon oluşumu ve hızlı büyümesinin neden olduğu kapsamlı bir katmanlar arası delaminasyon, düşük kuvvetli bir ara yüzey yapışmasını göstermektedir.

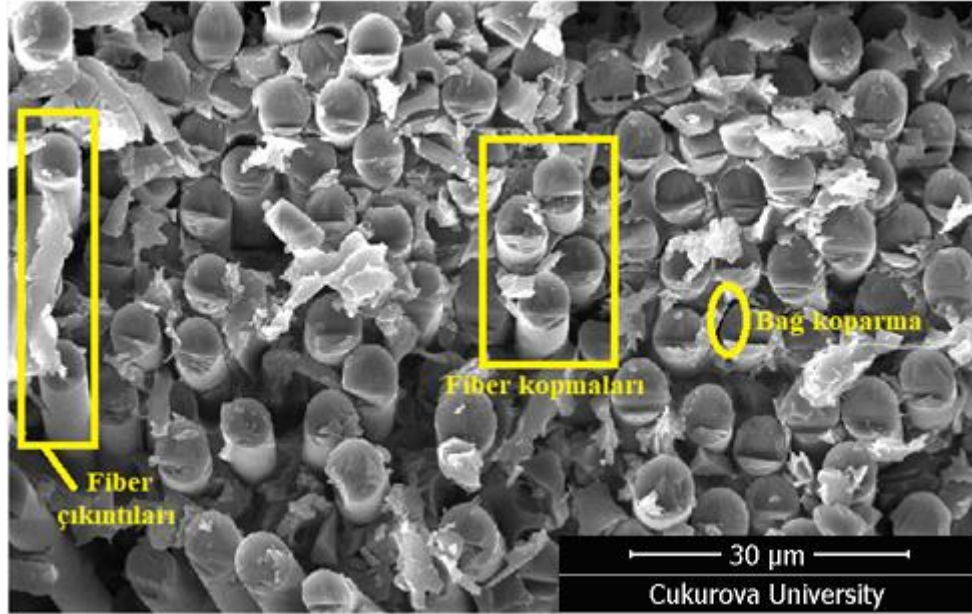
Bu sonuçlar, kompozit malzeme yorulma hasar mekanizmaları üzerine yayınlanmış birçok araştırmaya uygun ve benzer sonuçlar sergilemiştir.

4.4.3. MgO nanopartikül takviyeli yorulma numuneleri SEM analizleri

%60 yük seviyesinde, uygulanan yorulma yükü neticesinde %0.5, %1 ve %3 oranlarında MgO nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerin, SEM analiz görüntüleri elde edilerek MgO nanopartikül bölgesel dağılımları ve boyutları 200.000 kat büyütülerek Şekil 4.66’da ve oluşan hasar mekanizmaları da sırasıyla 2500 kat büyütülerek Şekil 4.67’de, 1000 kat büyütülerek Şekil 4.68’de, ve 250 kat büyütülerek Şekil 4.69’da verilmiştir.



Şekil 4.66. SEM analizi ile elde edilen MgO nanopartikül boyutları



Şekil 4.67. MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerde fiber hasar mekanizmaları

%60 yük seviyesinde, MgO nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzeme fiberlerinde oluşan hasar mekanizmaları SEM görüntüleri 2500 kat büyütülerek Şekil 4.67’de verilmiştir.

Şekil 4.67’de verilen SEM görüntülerinde fiber kopmaları, fiber çıkıntıları ve bağ kopmaları olmak üzere üç çeşit hasar mekanizması meydana gelmiştir.

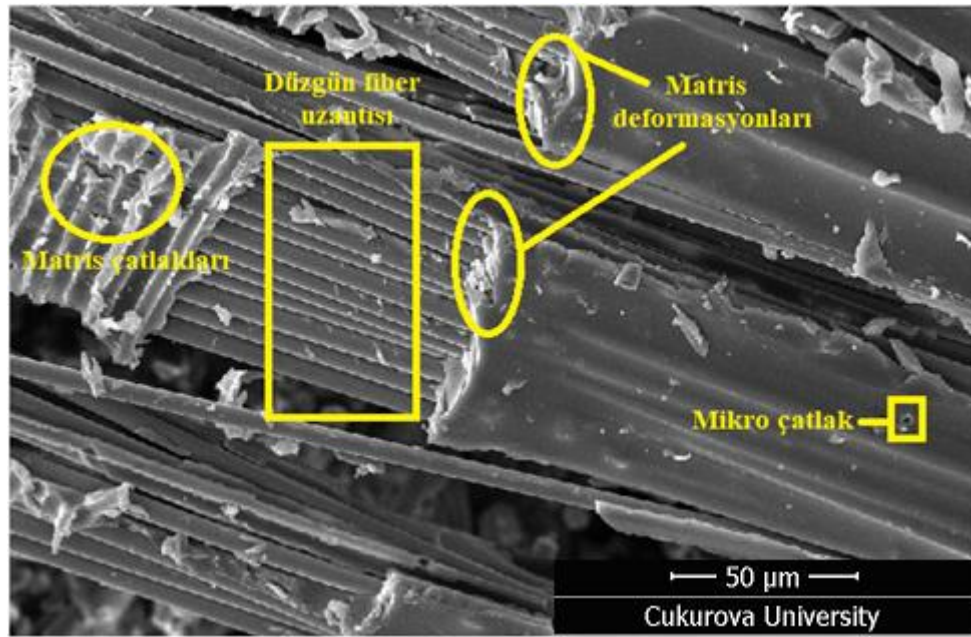
MgO nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerin hasar mekanizmaları incelendiğinde fiberler üzerinde az miktarda reçine döküntüsü gözlemlenmiştir. Şekil 4.67’de gösterildiği gibi çok sayıda atkı ve çözgü fiber kopmaları mevcuttur. Atkı ve çözgü iplikleri de reçine matris malzemesi gibi kırılgan özellik gösterdiklerinden düz ve pürüzsüz kırılma morfolojileri sergilemişlerdir.

MgO nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzeme fiber demetlerinde düzgün ve geniş alana yayılan kopmalar görülmüştür. Düzgün ve geniş alana yayılan fiber demeti kopmalarına sebep olarak kompozit malzemeye uygulanan yorulma yüklerinin matris ve arayüze uniform dağılması gösterilebilir.

Genel olarak MgO nanopartikülleri, epoksi reçine ve fiberler arasındaki yapışma kuvvetlerini önemli ölçüde artırırlar, böylece epoksi reçinesindeki çatlakların ilerlemesi engellenir veya geciktirilir.

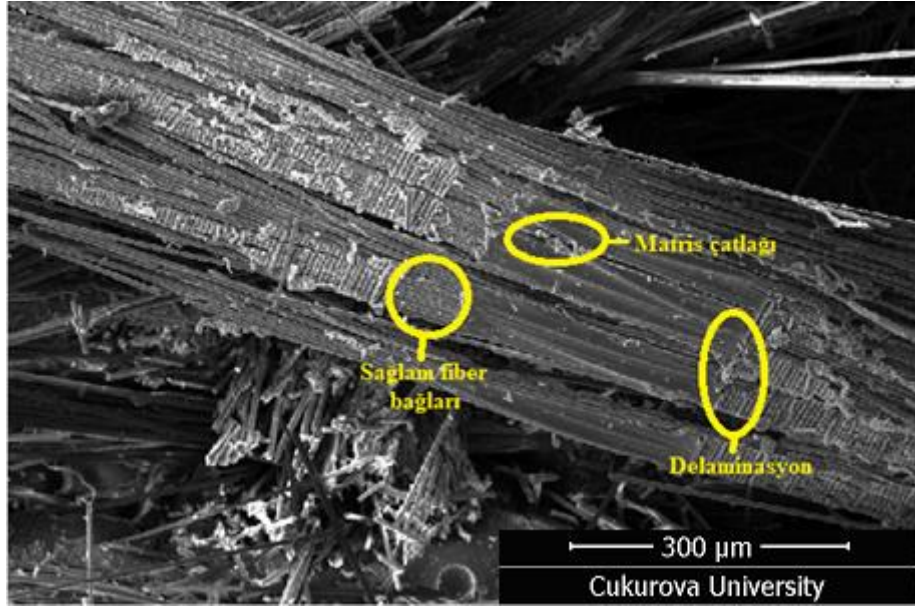
Sonuç olarak, nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ve çekme-basma yorulma yükleri altında ömrünün uzatılması, hasar mekanizmalarını etkiler.

Buna ek olarak, nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerde çekme-basma yorulma yüklemesi altında meydana gelen kırılma yüzeylerinde Şekil 4.67’de elde edilen görüntülerde gösterildiği gibi fiber yüzeylerinde pürüzsüz ve optik yansımalar sunan hasar morfolojileri gözlemlenmiştir.



Şekil 4.68. MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerde matris ve fiber hasar mekanizmaları

%60 yük seviyesinde, MgO nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzeme fiberlerinde oluşan hasar mekanizmaları SEM görüntüleri 1000 kat büyütülerek Şekil 4.68’de verilmiştir. MgO nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerde matrisden çıkan düzgün fiber uzantıları görülmektedir. Sonuç olarak Şekil 4.68’de verilen SEM görüntülerinde, düzgün fiber uzantıları sayesinde temiz delaminasyon yüzeyleri oluşmaktadır. Ayrıca matris malzeme içerisindeki çatlak ilerlemesinin düzgün fiber uzantılarını hasara uğratmadığı gözlemlenmiştir. MgO nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerde düzgün fiber uzantılarının dağılması ve hasar oluşması için daha büyük miktarda enerji gerekmektedir. Yorulma çevrim sayılarının artmasıyla birlikte enerji miktarı da artarak, kompozit malzemelerde fiber uzantılarının ayrılması ve çatlakların büyümesi gibi hasarlar gözlemlenebilir.



Şekil 4.69. MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerde matris hasar mekanizmaları

%60 yük seviyesinde, MgO nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzeme fiberlerinde oluşan hasar mekanizmaları SEM görüntüleri 250 kat büyütülerek Şekil 4.69’da verilmiştir.

Matris mikro çatlakları, artan çekme-basma yorulma yüklemesine bağlı olarak kompozit malzeme içerisinde yayılmaya devam eder. Bu mikro çatlaklar, fiber/matris arayüzeyinde yayılırken de arayüz bağlarının ayrılmasına ve uzun süreli çekme-basma yorulma yükleri altında matris çatlamasına neden olur. Buna ilaveten, kompozit malzemelerin tamamen hasara uğramasından önce, matris mikro çatlaklarının oluşumu, yayılması ve fiber/matris arayüzeyinin ayrılması ana arıza modları olarak değerlendirilebilir.

MgO nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzeme matrisinde fiber demetleri yönünde matris çatlakları meydana gelmiştir. Çatlakların yakınındaki bölgelerde matris parçaları da bulunmaktadır. Reçine matrisinin zayıflığından kaynaklanan bu çatlaklar, fiber demetleri yönünde ilerler. Çatlakların ilerlemesiyle birlikte fiber demetlerinde kopmalar ve kompozit malzeme matrisinde delaminasyonlar gözlemlenmiştir. Fiber demetlerinde kopmalar ve delaminasyon hasarları yorulmanın son aşamalarında gerçekleşir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, 5 farklı katman yapısında nanopartikül takviyesiz ve kütlece farklı oranlarda (%0.5, %1 ve %3) Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül takviyeli olarak üretilen dokuma tip kompozit malzemelerin yorulma davranışları incelenmiştir. Elde edilen Yük Seviyesi (%) – Çevrim Sayısı (N) diyagramları, sönümleme oranları ve histerezis eğrileri karşılaştırılmıştır. Ayrıca nanopartikül takviyeli olarak üretilen kompozit malzemelerdeki Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartikül yapılarını ve kopma bölgelerindeki hasar mekanizmalarını araştırmak için SEM analizleri yapılmıştır.

5.1.1. Yorulma Sonuçları

- Farklı katman yapılarının yorulma ömürlerine etkisini belirlemek amacıyla uygulanan yorulma testlerinde en yüksek yorulma ömürleri ve sönümleme oranları KM-3 katman yapısına sahip nanopartikül takviyeli ve takviyesiz üretilen kompozit malzemelerde tespit edilmiştir. Bu yüzden üretim açısından tavsiye ettiğimiz dokuma kompozit malzemeler KM-3 katman yapılı numunelerdir.
- Nanopartikül takviyeli ve takviyesiz olarak üretilen kompozit malzemelerin yorulma testlerinde yük seviyeleri arttıkça yorulma ömürleri azalmıştır.
- Genel olarak dokuma kompozit malzemelere eklenen Al_2O_3 , CuO ve MgO nanopartiküllerinin yorulma ömrünü iyileştirdiği ifade edilebilir. En yüksek yorulma ömürleri KM-3 katman yapılı %0.5 Al_2O_3 , %1 Al_2O_3 ve %0.5 MgO nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerde gözlemlenmiş ve birbirine yakınsamıştır.

- Nanopartikül takviyesiz olarak üretilen bütün kompozit malzemelerde çekme-basma yorulma testleri uygulanırken E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafiklerdeki değerler incelendiğinde nanopartikül takviyeli olarak üretilen bütün kompozit malzemelerden daha düşük sönümlene oranları bulunmuştur.
- Nanopartikül takviye oranları arttıkça kompozit malzemelerin sönümlene oranlarında azalmalar gözlemlenmiştir. Sonuç olarak düşük oranlarda nanopartikül ilavesi, üretilen kompozit malzemelerin rijitliklerinin artmasına sebep olmuştur.
- Sönümlene oranlarını katman yapılarına göre karşılaştırırken nanopartikül takviyeli ve takviyesiz olarak üretilen bütün kompozit malzemelerde E''/E' – Çevrim Sayısı (Log N) karşılaştırmalı grafik değerleri incelendiğinde en yüksek sönümlene oranlarına KM-3 katman yapıli kompozit malzemelerde ulaşılmıştır.
- Üretilen kompozit malzemelerde nanopartikül takviye oranları azaldıkça histerezis eğrileri yoğunlaşmıştır. Histerezis eğrilerinin yoğunlaşması kompozit malzemelerde rijitlik değerlerinin arttığını göstermektedir.
- Çekme-basma yorulma yükleri altında nanopartikül takviyeli dokuma tip kompozit malzeme fiberlerinde geniş çaplı ve sıralı bir şekilde kopmalar meydana gelmiştir. Malzemenin kopmasıyla beraber bağımsız lif seviyelerindeki yoğunluk, arayüz ve matris arasında tam bir hasarın oluştuğunu gösterir. Sonuç olarak, çok sayıda atkı ve çözgü lif demetleri matris malzemedan ayrıldığında ve kırıldığında, nanopartikül takviyeli üretilen dokuma tip kompozit malzemelerde kopmalar gerçekleşmektedir.

5.2 Öneriler

Doktora çalışmamızda değişik katman yapılarının ve farklı nanopartiküllerin kütlece çeşitli yüzdelerde ilavesinin kompozit malzemelerin yorulma ömürleri ve rijitlikleri üzerinde etkili oldukları gözlemlenmiştir. Cam elyaf dokuma kumaşlar yerine carbon veya aramid dokuma kumaşlar kullanılarak daha sağlam kompozit malzemeler elde edilebilir. Elle yatırma yöntemi yerine vakum infüzyon ve reçine transfer kalıplama gibi başka yöntemlerle de kompozit malzemeler üretilerek yorulma testleri uygulanabilir. Ayrıca farklı dokuma tip kumaşlarla cam elyaf dokuma kumaşlar birleştirilerek hibrit kompozitlerle farklı çalışmalar yapılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Adam, T.J. Horst, P., 2017, Fatigue damage and fatigue limits of a GFRP angle-ply laminate tested under very high cycle fatigue loading, *International Journal of Fatigue*, 99, 202–214.
- Alam, Md.S. Chowdhury M.A., 2020, Characterization of epoxy composites reinforced with $\text{CaCO}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-TiO}_2\text{/CuO}$ filler materials, *Alexandria Engineering Journal*, 59(6), 4121-4137.
- Albouy, W. Vieille, B. Taleb, L., 2014, Influence of matrix ductility on the high-temperature fatigue behaviour of quasi-isotropic woven-ply thermoplastic and thermoset laminates, *Composites: Part A*, 67, 22–36.
- Alp, M.S., 2019, “Jüt ve keten fiber takviyeli kompozitlerin frezelenme performansının belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Batman
- Anonymous, 2021, <http://accluster.com/kompozit-malzemelerinin-kullanim-alanlari/> [Ziyaret Tarihi: 15 Ağustos2021].
- Anonymous, 2021, <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=1079> [Ziyaret Tarihi: 07 Ağustos2021].
- Anonymous, 2022, <https://cumerlab.cu.edu.tr/cu/laboratuvarlar/cihazlar-listesi/sem> [Ziyaret Tarihi: 05 Kasım2022].
- Anonymous, 2021, <https://www.derstekstil.name.tr/%C3%BC%C3%A7-boyutlu-dokuma-kuma%C5%9Flar.html> [Ziyaret Tarihi: 03 Ağustos2021].
- Anonymous, 2021, <https://ec.europa.eu/programmes/erasmus-plus/project-result-content/e65a9a45-3040-4c88-96bd-d911e45d3b54/Nanoteknoloji%201%20Nanoteknolojinin%20Temelleri.pdf> [Ziyaret Tarihi: 19 Ağustos2021].
- Anonymous, 2021, <https://insapedia.com/kompozit-nedir-kompozit-malzemeler-ve-ozellikleri/> [Ziyaret Tarihi: 12 Ağustos2021].
- Anonymous, 2021, <https://insapedia.com/yorulma-kirilmesi-nedir/> [Ziyaret Tarihi: 21 Temmuz2021].
- Anonymous, 2021, <https://www.labcihazlari.com/blog/icerik/nanopartikül-nedir-nanopartikül-kullanım-alanlari-nanopartikül-cesitleri-nelerdir-nanopartikül-cesitleri> [Ziyaret Tarihi: 03 Ağustos2021].
- Anonymous, 2021, <https://malzemebilimi.net/malzemedede-yorulma.html> [Ziyaret Tarihi: 03 Ağustos2021].
- Anonymous, 2021, <https://nanoteknoloji.org/metal-oksid-nanopartikulleri/> [Ziyaret Tarihi: 07 Ağustos2021].

- Anonymous, 2021, <https://nanotoz.com.tr/urun/nano-aluminyum-oksit-alpha-40-nm/> [Ziyaret Tarihi: 07 Ağustos2021].
- Anonymous, 2021, <https://nanotoz.com.tr/urun/nano-bakir-oksit-15-45nm/> [Ziyaret Tarihi: 07 Ağustos2021].
- Anonymous, 2021, <https://shop.nanografi.com.tr/magnezyum-oksit-mgo-nano-tozu-safl-k-99-5-boyut-18-nm/> [Ziyaret Tarihi: 07 Ağustos2021].
- Anonymous, 2021, <https://www.uslularhadde.com/yorulma-dayanimina-etki-edenfaktorler> [Ziyaret Tarihi: 03 Ağustos2021].
- Ansari, A.A., Khan, M.N., Alhoshan, M., Aldwayyan, A.S. ve Alsalhi, M.S., (2010), Nanostructured Materials Classification, Properties and Fabrication, Nova Science Publishers
- Berat Gürdal Tugay, B.G., 2009, Bir İnsansız Hava Aracının Kompozit İniş Takımının Tasarımı, Üretimi ve Testleri, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul
- Bizeul, M. Bouvet, C. Barrau, J.J. Cuenca, R. 2010, Influence of woven ply degradation on fatigue crack growth in thin notched composites under tensile loading, *International Journal of Fatigue*, 32, 60–65.
- Bizeul, M. Bouvet, C. Barrau, J.J. Cuenca, R., 2011, Fatigue crack growth in thin notched woven glass composites under tensile loading. Part I: Experimental, *Composites Science and Technology*, 71, 289–296.
- Blackman, B.R.K. Steininger, H. Williams, J.G. Zuo, K., 2016, The Fatigue Behaviour of Zn Nano-Particle Modified Thermoplastics, *Composites Science and Technology* 122, 10-17.
- Carvelli, V. Okubo, K. Fujii, T., 2021, Fatigue damage characterization and percolation in plain-weave carbon fiber-epoxy composites, *Composites Part B*, 224, 109225.
- Carvelli, V. Betti, A. Fujii, T., 2016, Fatigue and Izod impact performance of carbon plain weave textile reinforced epoxy modified with cellulose microfibrils and rubber nanoparticles, *Composites: Part A*, 84, 26–35.
- Carvelli, V. Gramellini, G. Lomov, S.V. Bogdanovich, A.E. Mungalov, D.D. Verpoest, I., 2010, Fatigue behavior of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass reinforced composites, *Composites Science and Technology*, 70, 2068–2076.
- Ceschini, L. Minak, G. Morri, A., 2006, Tensile and Fatigue Properties of the AA6061/20 vol.% Al₂O₃p and AA7005/10 vol.% Al₂O₃p Composites, *Composites Science and Technology* 66, 333–342.

- Chawla, N. Liaw, P.K. Lara-Curzio, E. Ferber, M.K. Lowden, R.A., 2012, Effect of fiber fabric orientation on the flexural monotonic and fatigue behavior of 2D woven ceramic matrix composites, *Materials Science & Engineering A*, 557, 77–83.
- Çolakoglu, M., 2013, Description of Fatigue Damage Using a Damping Monitoring Technique, *Turkish Journal Engineering Environmental Science*, 27, 125-130.
- Daggumati, S. Baere, D. Van Paepegem, W. Degrieck, J. Xub, J. Lomov, S.V. Verpoest, I., 2013, Fatigue and post-fatigue stress–strain analysis of a 5-harness satin weave carbon fibre reinforced composite, *Composites Science and Technology*, 74, 20–27.
- Dai, S. Cunningham, P.R. Marshall, S. Silva, C., 2015, Open hole quasi-static and fatigue characterisation of 3D woven composites, *Composite Structures*, 131, 765–774.
- De Silva, C.W., 1983, Dynamic Testing and Seismic Qualification Practice, *Lexington Books*
- Devendra, K. Rangaswamy , T. , 2012, Determination of Mechanical Properties of Al₂O₃, Mg(OH)₂ and Sic Filled E-Glass/ Epoxy Composites, *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 2, Issue 5, September-October 2028-2033.
- Doruk, E., 2018, Bir Binek Araç Gövdesindeki Çelik Sacların Direnç Nokta Kaynaklı Birleştirmelerinin Yorulma Dayanımlarının Parametrik Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya
- Fruehmann, R.K. Dulieu-Barton, J.M. Quinn, S., 2010, Assessment of fatigue damage evolution in woven composite materials using infra-red techniques, *Composites Science and Technology*, 70, 937–946.
- Guo, J. Wen, W. Zhang, H. Cui, H., 2021, Warp-loaded mechanical performance of 3D orthogonal layer-to-layer woven composite perforated structures with different apertures, *Composite Structures*, 278, 114720.
- Gündoğan, S. Eren, R.Mehmet Karahan, M., 2009, Üç Boyutlu Dokuma Kumaş Takviyeli Kompozit Yapıların Çekme Mukavemetinin Analizi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 14,2.
- Hamzah, K.A. Keat, Y.C. Leng, T.P. Noor, M.M. Sazali, S.A. Yun, A.Y., 2015, Tensile strength and hardness property of ABS filled CuO prepared via 3D printing approach, *Materials Today: Proceedings*, 16, 1778-1787.
- Ishbir, C. Banks-Sills, L. Fourman, V. Eliasi, R., 2014, Delamination propagation in a multi-directional woven composite DCB specimen subjected to fatigue loading, *Composites: Part B*, 66, 180–189.

- Jin, L. Jin, B.C. Kar, N. Nutt, S. Sun, B. Gu, B., 2013, Tension tension fatigue behavior of layer-to-layer 3-D angle-interlock woven composites, *Materials Chemistry and Physics*, 140, 183-190.
- Karahan, M. Lomov, S.V. Bogdanovich, A.E. Verpoest, I., 2011, Fatigue tensile behavior of carbon/epoxy composite reinforced with non-crimp 3D orthogonal woven fabric, *Composites Science and Technology*, 71, 1961–1972.
- Kılıç, E. 2008, 14NiCr10-14NiCr14 çeliklerinin uygulanacak sementasyon işlemine bağlı olarak yorulma özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırıkkale
- Kothmann, M.H. Zeiler, R. Rios de Anda A. Brückner, A. Altstadt, V., 2015, Fatigue Crack Propagation Behaviour of Epoxy Resins Modified with Silica-Nanoparticles, *Polymer* 60, 157-163.
- Köroğlu, M. 2012, Ultrasonik Sprey Piroliz Ve Hidrojen Redüksiyonu Yöntemi İle (Usp-Hr) Nano Yapılı Gümüş-Bakır Alaşım Partiküllerinin Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul
- Kumar, S.M. Pramod, R. Govindaraju, H.K., 2017, Evaluation of Mechanical and Wear Properties of Aluminium AA430 Reinforced with SiC and MgO, *Materials Today: Proceedings*, 4, 509–518.
- Lei, B. Tran, V. Taheri, S. Wana, L. Zhou, Y., 2014, Effects of biaxial mean stress on the critical plane orientation under biaxial tension/compression fatigue loading conditions, *International Journal of Fatigue*, 66, 194–206.
- Li, D. Dang, M. Jiang, L., 2021, Fatigue behavior and failure mechanisms of 3D angle-interlock woven composite at room and cryogenic temperatures under bending, *Composites Communications*, 23, 100559.
- Li, D. Jiang, H. Zhao, C. Jiang, L. Tan, Y., 2015, Experimental study on the tension fatigue behavior and failure mechanism of 3D multi-axial warp knitted composites, *Composites: Part B*, 68, 126–135.
- Li, Q. Yu, Q. Zhangb, J. Jiangb, Y., 2010, Effect of strain amplitude on tension–compression fatigue behavior of extruded Mg6Al1ZnA magnesium alloy, *Scripta Materialia*, 62, 778–781.
- Li, R.H. Zhang, P. Zhang, Z.F., 2013, Fatigue cracking and fracture behaviors of coarse-grained copper under cyclic tension–compression and torsion loadings, *Materials Science&Engineering A*, 574, 113–122.
- Longbiao, L., 2021, A micromechanical tension-compression fatigue hysteresis loops model of fiber-reinforced ceramic-matrix composites, *Ceramics International* 47,3, 4279-4293.

- Longbiao, L., 2017, Damage evolution and life prediction of different 2D woven ceramic-matrix composites at room and elevated temperatures based on hysteresis loops, *Engineering Fracture Mechanics*, 173, 1–20.
- Malpot, A. Toucharda, F. Bergamo, S., 2015, Fatigue behaviour of a thermoplastic composite reinforced with woven glass fibres for automotive application, *Procedia Engineering*, 133, 136 – 147.
- Malpot, A. Toucharda, F. Bergamo, S., 2016, Influence of moisture on the fatigue behaviour of a woven thermoplastic composite used for automotive application, *Materials and Design*, 98, 12–19.
- Maragoni, L. Modenato, G. De Rossi, N. Vescovi, L. Quaresimin, M., 2020, Effect of fibre waviness on the compressive fatigue behavior of woven carbon/epoxy laminates, *Composites Part B: Engineering* 199, 108282
- Marinho, N.R. Arbelo, M.A. Candido, G.M. Sales, R.C.M. Donadon, M.V., 2021, Effects of mean load on interlaminar fracture behavior of carbon-epoxy prepreg fabric laminates under Mode I fatigue loading, *Composite Structures*, 276, 114451.
- Matsumoto, T. Wangsiripaisal, K. Hayashikawa, T. He, X., 2010, Uniaxial tension–compression fatigue behavior and fiber bridging degradation of strain hardening fiber reinforced cementitious composites, *International Journal of Fatigue*, 32, 1812–1822.
- Mohammadı, M. 2016, Rijit Tabakalı Elastomerik Sönümleyicilerin Dinamik Karakteristiklerinin Teorik ve Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara
- Montesano, J. Fawaz, Z. Bougherara, H., 2015, Non-destructive assessment of the fatigue strength and damage progression of satin woven fiber reinforced polymer matrix composites, *Composites: Part B*, 71, 122–130.
- Mostafa, H. Ismarrubie, Z.N. Sapuana, S.M. Sultan, M.T.H., 2016, Effect of fabric biaxial prestress on the fatigue of woven E-glass/polyester composites, *Materials and Design*, 92, 579–589.
- Narasimhachary, S.B. Saxena, A. Newman Jr, J.C., 2012, A double edge notch specimen design for tension–compression fatigue crack growth testing, *Engineering Fracture Mechanics*, 92, 126–136.
- Naseri, F. Jafari, F. Mohseni, E. Tang, W. Feizbakhsh, A. Khatibinia, M., 2017, Experimental observations and SVM-based prediction of properties of polypropylene fibres reinforced self-compacting composites incorporating nano-CuO, *Construction and Building Materials*, 143, 589–598.

- Nazari, A. Riahi, S., 2011, Effects of CuO Nanoparticles on Microstructure, Physical, Mechanical and Thermal Properties of Self-Compacting Cementitious Composites, *Journal of Materials Science & Technology*, 27(1), 81-92.
- Nishikawa, Y. Okubo, K. Fujii, T. Kawabe, K., 2006, Fatigue crack constraint in plain-woven CFRP using newly-developed spread tows, *International Journal of Fatigue*, 28, 1248–1253.
- Olave, M. Vara, I. Usabiaga, H. Aretxabaleta, L. Lomov, S.V. Vandepitte, D., 2015, Mode I fatigue fracture toughness of woven laminates: Nesting effect, *Composite Structures*, 133, 226–234.
- Oğuz, B., 2017, Prepreg Teknolojisi ile Üretilen Kompozit Malzemelerin Performanslarının Araştırılması, Tezsiz Yüksek Lisans Bitirme Projesi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli
- Rajaneesh, A. Satrio, W. Cha, G.B. Sridhar, I., 2016, Long-term life prediction of woven CFRP laminates under three point flexural fatigue, *Composites Part B*, 91, 539-547.
- Ram, K. Andreescu, M. Ding, H., (2011), *Nanotechnology for Environmental Decontamination* McGraw Hill Companies
- Rama Murthy Rajua, P. Rajesha, S. Sita Rama Rajua, K. Ramachandra Raju, V., 2017, Evaluation of Fatigue Life of Al₂O₃/Al₂O₃ Particulate Nano Composite Fabricated Using Stir Casting Technique, *Materials Today: Proceedings* 4, 3188–3196.
- Rouway, M. Boulahia, Z. Chakhchaoui, N. Cherkaoui, O. Omari, L.H. Fraija, F., 2020, Graphene and Carbone nanotubes reinforced ceramic nanocomposite TiO₂-MgO: Experimental and numerical study, *Materials Today: Proceedings* 30, 809–815.
- Rudov-Clark, S. Mouritz, A.P., 2008, Tensile fatigue properties of a 3D orthogonal woven composite, *Composites: Part A*, 39, 1018–1024.
- Ruggles-Wrenn, M.B. Jones, T.P., 2013, Tension–compression fatigue of a SiC / SiC ceramic matrix composite at 1200⁰C in air and in steam, *International Journal of Fatigue*, 47, 154–160.
- Ruggles-Wrenn, M.B. Lanser, R.L., 2016, Tension-compression fatigue of an oxide/oxide ceramic composite at elevated temperature, *Materials Science and Engineering A*, 659, 270–277.
- Sakin, R., 2017, RTM ile üretilen iki-yönlü cam-dokuma takviyeli kompozit levhalarda camkeçe kullanımının mekanik anizotropi üzerine etkisi, *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, (16. Uluslararası Malzeme Sempozyumu Özel Sayısı) 23, 967-973.
- Sanchez, F. Sobolev, K., (2010), Nanotechnology In Concrete - A review, *Construction and Building Materials*, 24, 2060-2071.

- Saraç, İ. Adin, H. Temiz, Ş. 2018, Experimental Determination of the Static and Fatigue Strength of the Adhesive Joints Bonded by Epoxy Adhesive Including Different Particles, *Composites Part B* 155, 92–103.
- Saxena, A. Bassi, F. Nibur, K. Newman Jr, J.C., 2017, On single-edge-crack tension specimens for tension-compression fatigue crack growth testing, *Engineering Fracture Mechanics*, 176, 343–350.
- Shao, Y. Okubo, K. Fujii, T. Shibata, O. Fujita, Y., 2014, Effect of matrix properties on the fatigue damage initiation and its growth in plain woven carbon fabric vinylester composites, *Composites Science and Technology*, 104, 125–135.
- Shao, Y. Yashiro, T. Okubo, K. Fujii, T., 2015, Effect of cellulose nano fiber (CNF) on fatigue performance of carbon fiber fabric composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 76, 244–254.
- Shindo, Y. Miura, M. Takeda, T. Saito, N. Narita, F., 2011, Cryogenic delamination growth in woven glass/epoxy composite laminates under mixed-mode I/II fatigue loading, *Composites Science and Technology*, 71, 647–652.
- Shindo, Y. Takeda, T. Narita, F. Saito, N. Watanabe, S. Sanada, K., 2009, Delamination growth mechanisms in woven glass fiber reinforced polymer composites under Mode II fatigue loading at cryogenic temperatures, *Composites Science and Technology*, 69, 1904–1911.
- Singh, K.K. Ansari, T.A. Azam, S., 2021, Fatigue life and damage evolution in woven GFRP angle ply laminates, *International Journal of Fatigue* 142, 105964
- Song, J. Wena, W. Cui, H., 2017, Fatigue behaviors of 2.5D woven composites at ambient and un-ambient temperatures, *Composite Structures*, 166, 77–86.
- Stegschuster, G. Pingkarawat, K. Wendland, B. Mouritz, A.P., 2016, Experimental determination of the mode I delamination fracture and fatigue properties of thin 3D woven composites, *Composites: Part A*, 84, 308–315.
- Sun, B. Wang, J. Wu, L. Fang, F. Gu, B., 2014, Computational schemes on the bending fatigue deformation and damage of three-dimensional orthogonal woven composite materials, *Computational Materials Science*, 91, 91–101.
- Sun, L.Y. Gibson, R.F. Gordaninejad, F. Suhr, J., 2009, Energy absorption capability of nanocomposites: a review, *Composite Science and Technology*, 69 (14), 2392–2409.
- Takeda, Y. Miura, N. Shindo, M. Narita, F., 2013, Fatigue delamination growth in woven glass/epoxy composite laminates under mixed-mode II/III loading conditions at cryogenic temperatures, *Cryogenics*, 58, 55–61.

- Topkaya, T. 2017, Bal Peteği Sandviç Kompozitlerin Darbe Ön Hasarı Sonrası Yorulma Davranışlarının Araştırılması, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ
- Toubal, L. Karama, M. Lorrain, B., 2006, Damage evolution and infrared thermography in woven composite laminates under fatigue loading, *International Journal of Fatigue*, 28, 1867–1872.
- Turner, P. Liu, T. Zeng, X., 2016, Collapse of 3D orthogonal woven carbon fibre composites under in-plane tension/compression and out-of-plane bending, *Composite Structures*, 142, 286–297.
- Vieille, B. Albouy, W., 2015, Fatigue damage accumulation in notched woven-ply thermoplastic and thermoset laminates at high-temperature: Influence of matrix ductility and fatigue life prediction, *International Journal of Fatigue*, 80, 1–9.
- Wang, B.Z. Liu, D.S. Wen, Z.X. Yue, Z.F., 2014, Tension/compression asymmetry of [001] single-crystal nickel-based superalloy DD6 during low cycle fatigue, *Materials Science and Engineering A*, 593, 31–37.
- Wen, C. Yazdani, S., 2008, Anisotropic damage model for woven fabric composites during tension–tension fatigue, *Composite Structures*, 82, 127–131.
- Xi, J. Xia, R. He, Y. Yu, Z., 2020, The fatigue repairing evaluation of hybrid woven composite patch with 2D&3D styles bonded Al-alloy plates under UV and thermal curing, *Composites Part B: Engineering* 185, 107743
- Xu, J. Lomov, S.V. Verpoest, I. Daggumati, S. Van Paepegem, W. Degrieck, J., 2016, A comparative study of twill weave reinforced composites under tension–tension fatigue loading: Experiments and meso-modelling, *Composite Structures*, 135, 306–315.
- Yadav, I.N. Thapa, K.B., 2020, Strain-based theoretical fatigue damage model of woven glass-epoxy fabric composite material, *Composites Part C: Open Access* 3, 100067
- Yenigün, B. 2018, Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Delinmesinde Delme Parametrelerinin Mekanik Özellikler Üzerine Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, *Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Batman
- Yu, B. Blanc, R. Soutis, C. Withers, P.J., 2016, Evolution of damage during the fatigue of 3D woven glass-fibre reinforced composites subjected to tension–tension loading observed by time-lapse X-ray tomography, *Composites: Part A*, 82, 279–290.
- Yu, B. Bradley, R.S. Soutis, C. Hogg, P.J. Withers, P.J., 2015, 2D and 3D imaging of fatigue failure mechanisms of 3D woven composites, *Composites: Part A*, 77, 37–49.

- Zamani, P. Jaamialahmadi, A. Silva, L.F.M., 2021, The influence of GNP and nano-silica additives on fatigue life and crack initiation phase of Al-GFRP bonded lap joints subjected to four-point bending, *Composites Part B: Engineering*, 207, 108589
- Zhou, X. Gaenser, H. Pippan, R., 2016, The effect of single overloads in tension and compression on the fatigue crack propagation behaviour of short cracks, *International Journal of Fatigue*, 89, 77–86.
- Zorko, D. TavCar, J. Bizjak, M. Sturm, R. Bergant, Z., 2021, High cycle fatigue behaviour of autoclave-cured woven carbon fibre-reinforced polymer composite gears, *Polymer Testing*, 102, 107339

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :
Uyruğu : T.C.

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Fethiye Kemal Mumcu A.L., Keçiören, Ankara	2000
Üniversite	: Kırıkkale Üniversitesi, Merkez, Kırıkkale	2006
Yüksek Lisans	: Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Merkez, Kahramanmaraş	2014

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2008-2009	Aterya Asansör	Makine Müh.
2009-2010	Termikel	Makine Müh.
2010-2011	Kahramanmaraş Sütçü İmam Üni.	Arş. Gör.
2011-.....	Batman Üni.	Arş. Gör.