

## Nanosilika/ Sansevieria Trifasciata (Paşa Kılıcı) Doğal Fiber Katkılı Hibrid Epoksi Kompozitlerin Eğilme Performansının İncelenmesi

Bertan BEYLERGİL<sup>1,a</sup>, Cihat Kerem ERGİN<sup>2,b</sup>, Sefa YILDIRIM<sup>1,c</sup>

<sup>1</sup>Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Antalya

<sup>2</sup>Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Antalya

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0002-3204-6746; <sup>b</sup>ORCID: 0009-0003-0355-0550; <sup>c</sup>ORCID: 0000-0002-9204-5868

### Makale Bilgileri

Geliş : 07.08.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606449

### Sorumlu Yazar

Sefa YILDIRIM

sefa.yildirim@alanya.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Doğal kompozit

Nanosilika

Enzimatik havuzlama

Mekanik karakterizasyon

Eğilme mukavemeti

**Atf şekli:** BEYLERGİL, B., ERGİN, C.K., YILDIRIM, S., (2024). Nanosilika/ Sansevieria Trifasciata (Paşa Kılıcı) Doğal Fiber Katkılı Hibrid Epoksi Kompozitlerin Eğilme Performansının İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 1103-1112.

### ÖZ

Bu çalışmada, Sansevieria Trifasciata (Paşa Kılıcı) bitkisinden elde edilen doğal lifler ve nanosilika katkılı hibrid epoksi kompozitlerin eğilme performansı araştırılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, doğal lifler enzimatik havuzlama yöntemleri kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen lifler, alkali işlemle geçirilerek epoksi bağlanma kapasiteleri artırılmıştır. Bu aşamanın ardından, lifler uzunlamasına yerleştirilerek epoksi matrisine nanosilika tozu ile eklenmiştir. Nanosilika oranı ağırlıkça %3 olarak belirlenmiştir. Ayrıca saf epoksiden referans numuneler üretilmiştir. Çalışma süresince üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri ASTM D790 standartlarına uygun olarak üç nokta eğme testleri ile karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kompozit malzemenin yüksek mukavemet ve elastikiyet özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir. Ancak homojen olmayan kırılma davranışları, malzemenin üretim sürecindeki varyasyonlardan kaynaklanabilir. Çalışma, çevresel sürdürülebilirlik ve endüstriyel uygulamalarda doğal kompozitlerin potansiyelini ortaya koymuştur.

## Investigation of the Flexural Performance of Hybrid Epoxy Composites Reinforced with Nanosilica/Sansevieria Trifasciata (Snake Plant) Natural Fiber

### Article Info

Received : 07.08.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606449

### Corresponding Author

Sefa YILDIRIM

sefa.yildirim@alanya.edu.tr

### Keywords

Natural composite

Nanosilica

Enzymatic retting

Mechanical characterization

Flexural strength

**How to cite:** BEYLERGİL, B., ERGİN, C.K., YILDIRIM, S., (2024). Nanosilika/ Sansevieria Trifasciata (Paşa Kılıcı) Doğal Fiber Katkılı Hibrid Epoksi Kompozitlerin Eğilme Performansının İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 1103-1112.

### ABSTRACT

In this study, the flexural performance of hybrid epoxy composites reinforced with natural fibers obtained from Sansevieria Trifasciata (Snake Plant) and nanosilica was investigated. In the first stage of the study, natural fibers were obtained using enzymatic retting methods. The obtained fibers were treated with an alkali process to enhance their epoxy bonding capacities. Following this stage, the fibers were placed horizontally and added to the epoxy matrix with nanosilica powder. The nanosilica content was set at 3% by weight. Additionally, reference samples were produced from pure epoxy. The mechanical properties of the composites produced during the study were characterized by three-point bending tests in accordance with ASTM D790 standards. The results obtained showed that the composite material possesses high strength and elasticity properties. However, the non-uniform fracture behaviours may be due to variations in the material's production process. The study demonstrated the potential of natural composites in environmental sustainability and industrial applications.

## 1. GİRİŞ

Doğal fiberler üretilen malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu hakkında literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Burada Sansevieria Trifasciata bitkisinden elde edilen lifler üzerine yapılan bazı güncel çalışmalar verilmiştir. Mardiyati ve arkadaşları [1] Sansevieria Trifasciata bitkisi liflerinin lignin ve pektin içeriği analiz edilip, değişken parametrelerde uygulanan alkali işlem sonrasında mukavemet değişimi incelenmiştir. Bu çalışmada lifin optimum saflıktaki eldesi için gereken değer ağırlıkça %3 NaOH çözeltisi olduğu ve işlem uygulanmamış liflere kıyasla %46 mukavemet artışı sergilediği tespit edilmiştir. Widodo ve arkadaşları [2] Sansevieria Trifasciata liflerinin fizikokimyasal özellikleri alkali işlem öncesi ve sonrası incelenmiş; özellikle lignin ve hemiselüloz içeriğindeki azalma ile çekme dayanımı ve termal stabilitedeki değişimler değerlendirilmiştir. %51,8 selüloz artışı ve %75 kristallik indeksi artışıyla liflerin mekanik özelliklerinde belirgin bir iyileşme sağlandığı tespit edilmiştir. Sansevieria Trifasciata liflerinden polyester kompozitler üretilerek, lif uzunluğu ve ağırlık yüzdesinin mekanik özelliklere etkisi Raj ve arkadaşları [3] tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada, lif uzunluğunun 40 mm'ye kadar artırılmasıyla çekme ve eğilme dayanımlarında artış sağlanmış, %40 lif oranının optimum değer olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, kompozitin termal stabilitesinin 200 °C olduğu belirlenmiştir. Shieddieque ve arkadaşları [4] Sansevieria Trifasciata lifleri ile güçlendirilmiş Vinyl Ester (STF/VE) biyo-kompozitlerin mekanik ve fiziksel özellikleri incelemiştir. Alkali işlem ve tek yönlü lif dizilimi ile %15 lif hacmi oranının, çekme dayanımı ve yoğunluk açısından optimum parametreler olduğu tespit edilmiştir. ANOVA analizi, lif hacmi oranının çekme dayanımı üzerinde %50,57, yoğunluk üzerinde %51,34 etkisi olduğunu göstermiştir. Sansevieria Trifasciata lifleriyle güçlendirilmiş epoksi reçine kompozitlerinin mekanik, morfolojik ve su emme özellikleri Mishfa ve arkadaşları [5] tarafından incelenmiştir. %30 lif oranı ile üretilen kompozitlerin çekme dayanımı 6.99 MPa, eğilme dayanımı 10.77 MPa ve darbe direnci 14 J olarak ölçülmüştür. FTIR analizi, lignin ve hemiselüloz içeriğindeki azalma ile lif-reçine arası bağın güçlendiğini göstermiştir. Sansevieria Trifasciata bitkisinden elde edilip örülen ve epoksi kompozit malzemede takviye elemanı olarak kullanılan lifler, muz bitkisinden elde edilen liflere kıyasla daha yüksek mukavemet göstermiştir [6]. Kevlar ve Sansevieria Trifasciata lifleriyle güçlendirilmiş hibrit epoksi kompozitler Ashok Kumar ve arkadaşları [7] tarafından üretilmiş ve özellikleri incelenmiştir. %25 Kevlar ve %75 Sansevieria Trifasciata içeren sistem, çekme ve darbe dayanımında en yüksek performansı göstermiştir. SEM analizi, bu sistemde yüzey bağlarının güçlendiğini ve boşlukların azaldığını ortaya koymuştur.

Genel olarak doğal fiberler üzerine yapılan çalışmalara bakıldığında yüksek oranda lignin içeren liflerin polimerik matrisle iyi bir arayüzey ilişkisi oluşturmadığı bilinmektedir [8]. Agave bitkisinden lif üretimi sürecinde, lignin gibi istenmeyen bileşenlerden kurtulmak için, lif eldesi sonrasında liflerin alkali işleme tabi tutulması, liflerin kırılabilirliğini ve polimerizasyon meyilini azalttığı gözlemlenmiştir [9]. Bu çalışmada Sansevieria Trifasciata bitkisinden elde edilen liflerin yüzey özellikleri NaOH alkali uygulaması iyileştirilmiş ve Nanosilika takviyeli epoksi matris içine elle yatırma yöntemiyle dağıtılmıştır. Alkali işlem takviye liflerini genellikle çeşitli konsantrasyonlarda sodyum hidroksit (NaOH) ile farklı sıcaklık veya sürede muamele etmektir. Bitkisel lifler, yapılarında bulunan hidroksil gruplar (selüloz) nedeniyle polar karakterlidir. Liflerde bulunan pektin, lignin ve vaks gibi safsızlıklar ve yüksek miktarlardaki hidroksil grupları, bu liflerin matris polimerine bağlanmasına engel olup arayüzeyi zayıflatmakta ve nihai kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Alkali işlem ile selüloz liflerinin yüzeyinde bulunan bu maddelerin bir kısmı giderilmekte ve lif yüzeyinde polimer ile etkileşime girebilecek çok sayıda açık selüloz uçları oluşmaktadır. Alkali işlem lifin yüzeydeki serbest enerjisini arttırmaktadır. Aynı zamanda lif yüzeyini pürüzlü hale getirerek lif/polimer arayüzeyinde mekaniksel bağlanmayı geliştirmektedir [10]. Doğal selülozik lif kaynağı olan kenaf bitkisi üzerinde çeşitli lif eldesi yöntemleri uygulanıp, bunun lifin mukavemetine etkileri tartışılmış ve selüloz dışında istenmeyen safsızlıkların liflerin mukavemetine olumsuz etkisi olduğu gözlemlenmiştir [11]. Üretilen numunelerin mekanik özellikleri analiz edilmiştir. Yapılan çalışmalarda doğal lifler ile üretilmiş polimerik kompozit malzemelerin mekanik özellikleri liflerin akma dayanımı ile doğrudan ilişkili olduğu görülmüştür [12]. Ortega ve arkadaşları [13], Agave americana bitkisinin liflerinin kompozit üretimi konusundaki potansiyelini incelemiş olup eğilme mukavemeti açısından oldukça iyi sonuçlar elde etmişlerdir.

Doğal fiberlerle üretilen kompozit malzemelerin düşük mekanik performansları, özellikle liflerin mekanik özelliklerinin sentetik liflerle kıyaslandığında sınırlı kalması nedeniyle önemli bir engel teşkil etmektedir. Sansevieria Trifasciata bitkisinden elde edilen liflerin kullanımıyla oluşturulan kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için epoksi matris malzemesine nanosilika katkısı yapılmıştır. Çalışmada, nanosilika partikülleri, kompozitin hem mukavemet hem de elastikiyet özelliklerini artırma potansiyeli

taşıyan bir takviye elemanı olarak tercih edilmiştir. Nanosilikanın, matris malzemesi içerisindeki dağılımı ve kompozit ile arayüz etkileşimleri sayesinde, doğal lif kaynaklı kompozitlerde karşılaşılan kırılma ve homojenlik problemlerinin önemli ölçüde azaltılması hedeflenmiştir. Elde edilen bulgular, bu tür hibrit yapı kompozitlerin çevresel sürdürülebilirlik ve endüstriyel uygulamalardaki rolünü artırabileceğini göstermektedir.

## 2. YÖNTEM

Bu bölümde, çalışmada kullanılan malzeme bilgileri, havuzlama yönteminin detayları, alkalizasyon işlemi, kompozitlerin üretim yöntemi ve elde edilen numunelerin mekanik karakterizasyon işlemleri hakkında bilgiler verilmiştir.

### 2.1. Malzemeler

Bu çalışmada, *Sansevieria Trifasciata* (Paşa Kılıcı) bitkisinin yapraklarından elde edilen doğal lifler kullanılmıştır. Bu bitki, liflerin mekanik özelliklerini incelemek için seçilmiş ve enzimatik havuzlama yöntemiyle liflerin saflaştırılması amaçlanmıştır.

Matris malzemesi olarak, piyasadan temin edilen ticari epoksi reçine kullanılmıştır. Epoksi reçineler, düşük büzülme, düşük toksisite, iyi yapışma özellikleri ve yüksek endüstriyel uygulamalar gibi avantajlara sahiptir. Epoksi reçine, doğal liflerle güçlü bir bağ oluşturmak için idealdir. İkincil takviye elemanı olarak, nanosilika partikülleri kullanılmıştır. Nanosilika, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için eklenmiştir. Ağırlıkça %3 oranında nanosilika kullanılarak farklı kompozit numuneler üretilmiştir. Havuzlama işlemi için, ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA), sodyum hidroksit (NaOH), asetik asit ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) ile beta-glukanaz, pektinaz, hemiselülaz ve ksilanaz enzim karışımı kullanılmıştır. Bu kimyasallar, doğal liflerin selüloz dışı bileşenlerden arındırılmasını sağlamak amacıyla kullanılmıştır.

### 2.2. Enzimatik Havuzlama Yöntemi

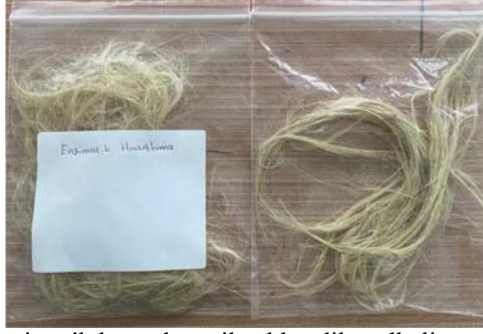
Bu yöntemde selülozu, diğer organik bileşenlerden ayırmak için enzim karışımı ile çeşitli kimyasallar kullanılmaktadır. Bu aşamada kullanılan kimyasalların amacı enzimlerin çalışma koşullarını sağlamaktır. İlk olarak, konteynere doldurulan 4lt suya 25 mM seviyesinde ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) eklenerek karıştırılmıştır. Çözeltiye sodyum hidroksit (NaOH) 1N ve asetik asit ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) eklenip karıştırılarak pH seviyesinin 5 olması sağlanmıştır. Çözeltinin hazırlanmasının son aşaması olarak beta-glukanaz, pektinaz, hemiselülaz ve ksilanaz enzimlerinin ticari karışımı olan Viscozyme L 0.3 (v/v) % seviyesinde çözeltiye eklenerek nihai havuzlama çözeltisi elde edilmiştir. Elde edilen çözelti içerisinde uygun boyutlarda kesilip bir merdane aracılığıyla ezilen bitkiler atılıp, konteyner ağzı kapatılarak 2 dakika boyunca karıştırılmıştır. İlgili görsel Şekil 1'de gösterilmiştir. Daha sonra konteyner içindeki çözelti ve bitkilerle birlikte ağzı kapalı olarak 40°C sıcaklıkta fırında 1 hafta boyunca bekletilmiştir. Bir hafta sonunda fırından çıkarılan konteyner içerisinde çıkarılan lifler artık organik bileşenler elle uzaklaştırıldıktan sonra musluk suyunda 5 dakika yıkandıktan sonra 50°C sıcaklıkta fırında kurutulmuştur.



Şekil 1. Enzim karışımı içerisine atılan uygun boyutlarda kesilmiş bitkiler

### 2.3. Alkalizasyon İşlemi

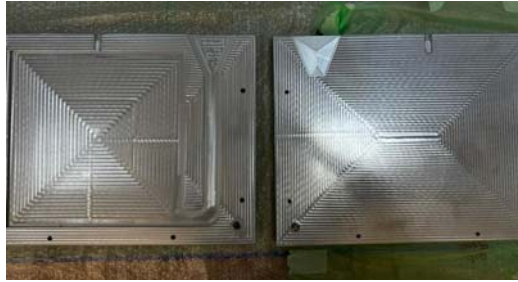
Selülozik liflerin matris ile bağlanma kabiliyetini artırarak kompozit yapının toplam mekanik özelliklerini artırma amacıyla liflere alkalizasyon işlemi yapılmıştır. Su dolu bir konteynere hacimce %5 oranında NaOH 1N eklenerek çözelti hazırlanmış ve lifler bu çözelti içerisinde 30 dakika bekletilmiştir. Süre sonunda, lifler distile su ile yıkanarak atık alkaliler uzaklaştırılmıştır. Enzimatik havuzlama ile elde edilen lifler alkalizasyon işlemi sonrasında 50°C sıcaklıkta fırında kurutulularak kompozit üretimi için hazır hale getirilmiştir. Üretime hazır lifler Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Enzimatik havuzlama ile elde edilen alkalize edilmiş lifler

### 2.4. Kompozitlerin Üretimi

İlk olarak mekanik özelliklerin belirlenmesi kısmında gerekli olan referans numuneler için plaka üretimi kalıp yardımıyla dökülmüştür. Referans numuneler saf epoksi reçineden üretilmişlerdir. Kullanılan kalıp 2 parçadan oluşmakta olup Şekil 3’de gösterilmiştir. Bir kaba kalıbı dolduracak kadar dökülen epoksi reçine vakumlanma işlemi uygulanarak içerisinde bulunan hava kabarcıklarının giderilmesi sağlanmıştır. Vakumlanma işlemi Şekil 4’de verilmiştir. Hava kabarcıklarından arındırılan epoksi reçine plaka üretimi için kalıba dökülmüştür. Referans numune plakası üretiminin son adımı olarak kalıp 80°C’de 8 saat kurlenme işlemine bırakılmıştır. Son adım olarak kurlenme işlemi sonrasında referans numune plakası kalıptan çıkarılmış olup elde edilen plaka Şekil 5’de gösterilmiştir. Daha sonra kompozit deney numuneleri sulu kesim yöntemi ile üretilmiştir(Şekil6).

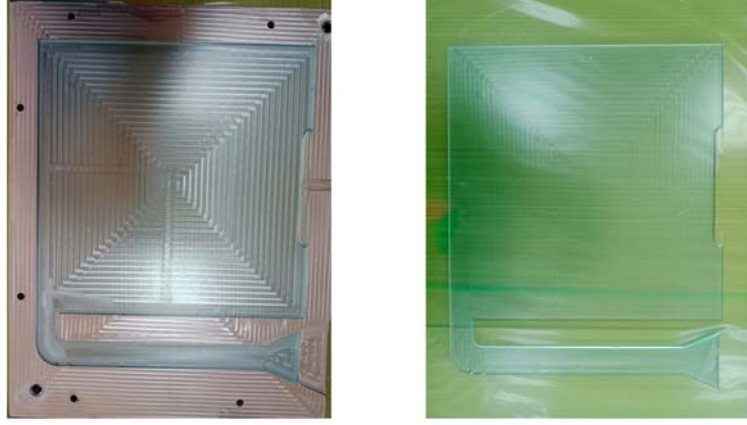


Şekil 3. Kompozit üretiminde kullanılan kalıp

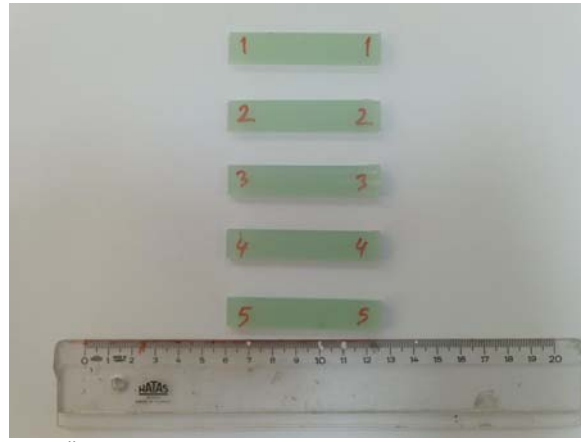


Şekil 4. Vakumlama işlemi





Şekil 5. Elde edilen referans numune plakası



Şekil 6. Üretimi gerçekleştirilen saf epoksi deney numuneleri

Referans üretimini takriben, nanosilika katkıli hibrit kompozitlerin üretimine geçilmiştir. Elde edilen doğal lifler kalıba yatay olarak yerleştirilmiştir. İkincil takviye elemanı olarak nanosilika partikülleri eklenmiştir. Nanosilika, ağırlıkça %3 oranında kullanılarak nanosilika katkıli hibrit kompozitler elde edilmiştir. Elde edilen numuneler, ASTM D790 standartlarına uygun olarak sulu kesim yöntemi kesilmiştir. Şekil 7'de üretimleri gerçekleştirilen fiber takviyeli epoksi kompozitler gösterilmiştir.

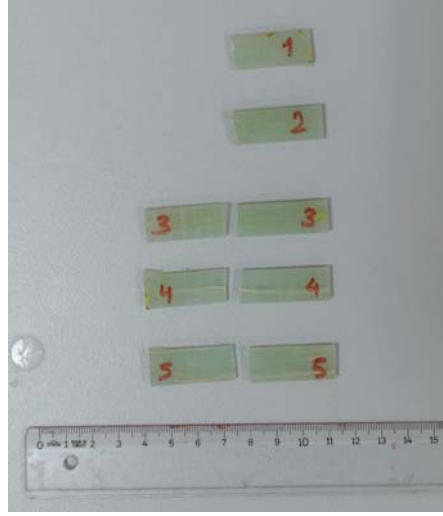


Şekil 7. Üretimi gerçekleştirilen fiber takviyeli deney numuneleri

## 2.5. Mekanik Karakterizasyon

Elde edilen kompozit numuneler, ALKÜ Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Mekanik Test Cihazında üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Bu test sonucunda, numune gruplarının ortalama eğilme

mukavemeti ve eğilme modülü değerleri belirlenmiştir. Şekil 8’de test edilmiş deney numunelerinin görüntüleri verilmiştir.



Şekil 8. Hasarlanmış hibrit kompozitlerin deney sonrası görüntüsü

### 3. MEKANİK TEST SONUÇLARI

#### 3.1. Saf Epoksinin Eğilme Performansı

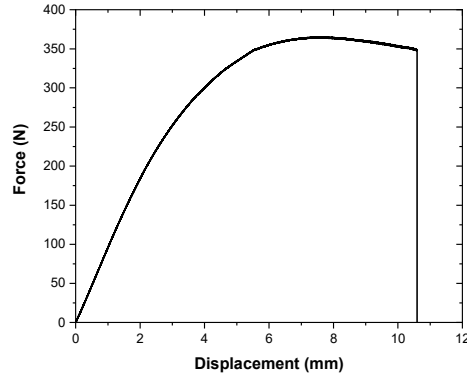
Saf epoksi reçinenin eğilme davranışını incelemek için yapılan testlerde elde edilen yük-deplasman eğrileri, malzemenin farklı deformasyon bölgelerini net bir şekilde göstermektedir. Aşağıda, saf epoksi reçine için elde edilen eğrilerin detaylı bir analizi bulunmaktadır.

Eğrinin başlangıç kısmı, epoksi reçinenin elastik davranışını temsil etmektedir. Örneğin, 0-0.5 mm deplasman aralığında uygulanan yük ile meydana gelen deplasman arasında doğrusal bir ilişki gözlenmiştir. Bu bölgede, yük yaklaşık 0-50 N arasında artış göstermektedir. Elastik bölgede malzeme, uygulanan yük kaldırıldığında başlangıç şekline geri döner.

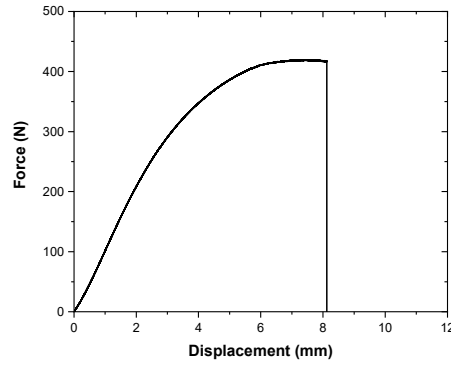
Şekil 9’da (1. numune) ve Şekil 10’da (2. numune) bu başlangıç fazı net bir şekilde görülmektedir. 0.5-1.5 mm deplasman aralığında epoksi reçine elastik deformasyona uğrar. Bu bölgede uygulanan yük yaklaşık 50 N’den 150 N’a kadar artar. Uygulanan yük kaldırıldığında malzeme başlangıç şekline geri döner. Elastik bölgedeki yük-deplasman eğrisi doğrusal bir ilişki sergiler ve bu, malzemenin elastik modülünü belirlemede kullanılır. Elastik bölge, Şekil 11’de (3. numune) ve Şekil 12’de (4. numune) gösterilmiştir.

1.5 mm’den sonraki deplasmanlarda malzeme plastik deformasyona başlar. Örneğin, 1.5-2.5 mm aralığında yük 150 N’dan 250 N’a kadar artar. Bu bölgede epoksi reçinenin moleküler yapısında kalıcı değişiklikler meydana gelir. Plastik bölge, malzemenin dayanıklılığını ve kalıcı deformasyona uğrama kapasitesini değerlendirmek için önemlidir. Plastik bölge, Şekil 13’de (5. numune) detaylandırılmıştır. Eğrinin en yüksek noktası, malzemenin maksimum yük kapasitesine ulaştığı ve kırılma başladığı noktadır. Bu noktada maksimum yük yaklaşık 300 N olarak ölçülmüştür. Kırılma noktası, epoksi reçinenin en yüksek dayanımını temsil eder. Bu noktadan sonra yük hızla düşer ve malzeme kırılır.

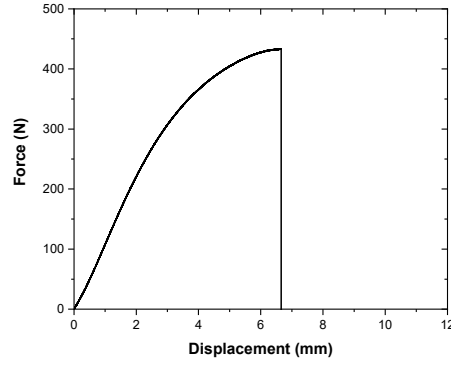
Elde edilen yük-deplasman eğrileri, saf epoksi reçinenin farklı deformasyon bölgelerini ve maksimum yük kapasitesini net bir şekilde ortaya koymuştur. Bu eğriler, malzemenin elastik ve plastik davranışlarını, elastik modülünü ve kırılma noktasını belirlemede kullanılmıştır. Epoksi reçinenin yüksek elastik modülü, malzemenin sert ve dayanıklı olduğunu gösterir. Bununla birlikte, plastik deformasyon bölgesi ve kırılma noktası, epoksi reçinenin belirli bir yükten sonra kalıcı deformasyona uğradığını ve kırılma bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır.



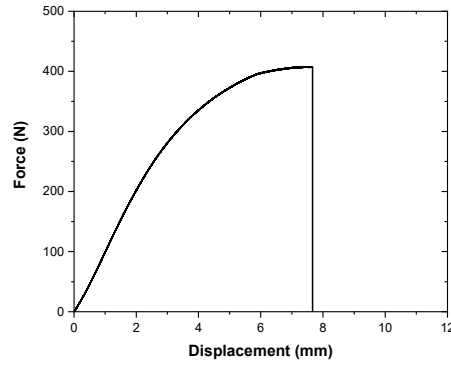
Şekil 9. Saf epoksinin eğme yükü altında davranışı (1.numune)



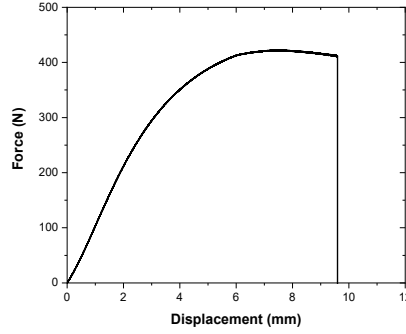
Şekil 10. Saf epoksinin eğme yükü altında davranışı (2.numune)



Şekil 11 Saf epoksinin eğme yükü altında davranışı (3.numune)



Şekil 12. Saf epoksinin eğme yükü altında davranışı (4.numune)



Şekil 13. Saf epoksinin eğme yükü altında davranışı (5.numune)

### 3.2. Lif ve %3 Nanosilika Takviyeli Kompozitlerin Eğilme Davranışı

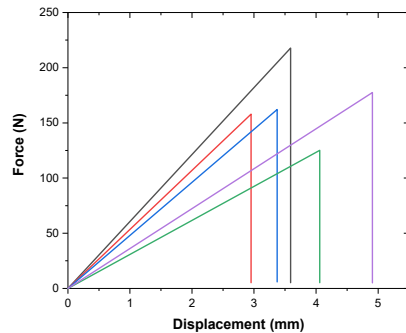
Lif ve nanosilika katkıli hibrit kompozitlerin eğilme performansını incelemek için yapılan testlerde elde edilen yük-deplasman eğrileri, malzemenin elastik ve plastik deformasyon bölgelerini, elastik modülünü ve maksimum yük kapasitesini göstermektedir. Aşağıda, lif ve %3 nanosilika takviyeli kompozitler için elde edilen eğrilerin detaylı bir analizi bulunmaktadır.

Eğrinin başlangıç kısmında, 0-1 mm deplasman aralığında ve 0-50 N yük aralığında doğrusal bir ilişki gözlenmektedir. Bu bölgede kompozit malzeme elastik davranış sergiler. Yani uygulanan yük kaldırıldığında malzeme başlangıç şekline geri döner. Elastik modül, bu doğrusal bölgeden hesaplanabilir ve malzemenin sertliğinin bir göstergesidir. Bu durum, kompozitin başlangıçta iyi bir elastikiyet sergilediğini gösterir.

Şekil 13'te lif ve %3 nanosilika takviyeli kompozitin eğme yükü altındaki davranışı gösterilmektedir. Elastik bölge, 1-2.5 mm deplasman aralığında ve 50-150 N yük aralığında yer alır. Bu bölgede kompozit malzeme hala elastik deformasyona uğrar ve yük kaldırıldığında başlangıç şekline geri döner. Yük ve deplasman arasındaki doğrusal ilişki devam eder ve bu, malzemenin esnekliğini ve mukavemetini gösterir. Bu bölgedeki yük artışı, kompozitin lif ve nanosilika takviyeleri sayesinde yüksek mukavemet ve esneklik kazandığını gösterir. Şekil 14'te bu elastik bölge net bir şekilde görülmektedir.

Plastik bölge, 2.5 mm'den sonraki deplasmanlarda başlar ve malzeme plastik deformasyona uğrar. Bu bölgede, 2.5-5.0 mm aralığında yük 150 N'dan 200 N'a kadar artar. Plastik deformasyon bölgesi, kompozit malzemenin moleküler yapısında kalıcı değişiklikler meydana gelir ve malzeme yük kaldırıldığında başlangıç şekline dönemez. Bu malzemenin dayanıklılığını ve kırılma dayanıklılığını değerlendirmede önemli bir göstergedir. Kompozitin bu bölgede deforme olması, yüksek dayanıklılığa sahip olduğunu gösterir ancak aynı zamanda belirli bir yükten sonra kalıcı deformasyona uğradığını da belirtir. Plastik bölge, Şekil 14'te detaylandırılmıştır.

Eğrinin en yüksek noktası, malzemenin maksimum yük kapasitesine ulaştığı ve kırılma başladığı noktadır. Bu noktada maksimum yük yaklaşık 200 N olarak ölçülmüştür. Kırılma noktası, kompozit malzemenin en yüksek dayanımını temsil eder. Bu noktadan sonra yük hızla düşer ve malzeme kırılır. Kırılma sonrası yük değerinin hızlı bir şekilde düşmesi, malzemenin kırılma yapısını gösterir. Farklı renklerde gösterilen eğrilerin her birinde kırılma noktası farklı yerlerde meydana gelmiştir. Bu, malzemenin homojen olmadığını ve farklı numunelerde farklı kırılma davranışları sergilediğini göstermektedir.



Şekil 14. Lif ve nanosilika takviyeli kompozitin eğme yükü altındaki davranışı



#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Sansevieria Trifasciata doğal lifleri ve nanosilika katkılı epoksi matris kompozitlerin mekanik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Enzimatik havuzlama ve alkalizasyon işlemleri, doğal liflerin yüzey özelliklerini iyileştirerek epoksi matrise bağlanma kapasitesini artırmış, aynı zamanda lif-matris arayüzündeki mekanik bağlanmayı güçlendirmiştir. Üç nokta eğme testlerinden elde edilen sonuçlar, nanosilika katkılı kompozitlerin saf epoksi numunelere kıyasla daha yüksek eğilme dayanımı ve elastikiyet modülü değerlerine sahip olduğunu göstermiştir. %3 nanosilika katkısı, kompozitin elastik ve plastik deformasyon bölgelerinde mukavemet ve dayanıklılık artışı sağlamış, aynı zamanda lif takviyesiyle birlikte kırılma aniden gerçekleşirken, lif ve nanosilika katkılı kompozitlerde yük taşıma kapasitesi düzenli bir şekilde artmış ve bu durum malzemenin dayanıklılığını artırmıştır. Ancak, farklı numunelerde gözlemlenen kırılma noktalarındaki farklılıkların, üretim sürecindeki varyasyonlardan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Çalışmanın genel sonuçları, doğal lif takviyeli kompozitlerin çevresel sürdürülebilirlik ve endüstriyel uygulamalardaki potansiyelini ortaya koymaktadır. Nanosilika takviyesi, kompozit malzemelerin dayanıklılık ve elastikiyet özelliklerini iyileştirerek bu tür malzemelerin daha geniş bir uygulama alanında kullanılabilirliğini göstermiştir. Bu bulgular, doğal lifler ve nanosilika katkılı hibrit kompozitlerin, çevre dostu ve yüksek performanslı mühendislik malzemeleri olarak uygulanabilirliğini desteklemektedir. Ancak, üretim parametrelerinin optimize edilmesi ve mikroyapısal analizlerin yapılması, gelecekteki çalışmalar için önem arz etmektedir.

#### 4. GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada elde edilen bulgular, doğal lif takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirme konusundaki potansiyelini göstermiştir. Ancak, daha kapsamlı ve derinlemesine araştırmalar yapılması gerekmektedir. Gelecekteki çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulmuştur:

Ketenden, kenevirde ve jüt gibi diğer doğal lif türlerinden elde edilen kompozit malzemeler üretilebilir ve bu malzemelerin mekanik özellikleri karşılaştırılabilir.

Nanosilika dışında, nanokil, karbon nanotüpler ve grafen gibi farklı nanopartiküller ile takviye edilmiş kompozitler üretilebilir ve bu takviyelerin mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenebilir. Farklı nanopartikül oranları ve dağılım şekilleri kullanılarak optimal kompozisyon belirlenebilir.

Enzimatik havuzlama süresi ve kullanılan enzim/kimyasal oranlarının mekanik özellikler üzerindeki etkisini optimize etmek için detaylı parametre çalışmaları yapılabilir. Farklı havuzlama süreleri ve enzim/kimyasal konsantrasyonları denenerek, liflerin en yüksek saflıkta elde edilmesi sağlanabilir.

Üretilen kompozitlerin mikroyapısal analizleri yapılabilir ve lif-matris arayüzünün incelenmesi sağlanabilir. Bu analizler için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve geçirimli elektron mikroskobu (TEM) gibi ileri görüntüleme teknikleri kullanılabilir. Lif-matris arayüzündeki bağlanma kuvvetleri ve nanopartikül dağılımı detaylı bir şekilde incelenerek, kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirme yolları araştırılabilir.

Kompozitlerin uzun süreli yük altındaki davranışları, sürünme ve yorulma testleri ile incelenebilir. Bu testler, malzemelerin uzun vadeli performansını değerlendirmede kritik öneme sahiptir. Farklı yük ve çevresel koşullar altında yapılan yorulma testleri ile kompozitlerin dayanıklılığı ve ömür tahminleri yapılabilir.

Nem, sıcaklık değişimleri ve UV ışınımı gibi çevresel faktörlerin kompozit malzemelerin performansına etkisi araştırılabilir. Çevresel koşullar altında yapılan testler, kompozitlerin gerçek dünya uygulamalarındaki performansını değerlendirmeye yardımcı olabilir.

Bu öneriler, doğal lif takviyeli kompozitlerin daha geniş bir uygulama yelpazesinde etkin bir şekilde kullanılmasını sağlayacak ve bu malzemelerin sentetik kompozitlere alternatif olarak kullanılabilirliğini artıracaktır. Gelecekteki araştırmaların, doğal liflerin mekanik özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği de göz önünde bulundurarak daha kapsamlı bir yaklaşım benimsemesi önerilmektedir.

## 6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2022-02-06-MAP02 proje numarası ile desteklenmiştir. Sağlanan finansal destek için teşekkür ederiz.

## 7. KAYNAKLAR

1. Mardiyati, M., Steven, S., Rizkiansyah, R.R., Senoaji, A., Suratman, R., 2016. Effects of alkali treatment on the mechanical and thermal properties of Sansevieria trifasciata fiber. AIP Conference Proceedings, 1725, AIP Publishing.
2. Widodo, E., Pratikto, S., Widodo, T.D., 2024. Comprehensive investigation of raw and NaOH alkalinized sansevieria fiber for enhancing composite reinforcement. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 9(100546).
3. Raj, F.I., Pushparaj, L., Thanu, C., 2023. Mechanical characterization of randomly oriented short Sansevieria Trifasciata natural fibre composites. International Polymer Processing, 38(5), 564-581.
4. Shieddieque, A.D., Widyanto, B., Aminanda, Y., 2022. Multi-objective optimization of sansevieria trifasciata fibre reinforced vinyl ester (STF/VE) bio-composites for the sustainable automotive industry. Automotive Experiences, 5(3), 288-303.
5. Mishfa, K.F., Alim, M.A., Repon, M.R., Habibullah, M.D., Tonmoy, M.A.H., Jurkonienė, S., Shukhratov, S., 2024. Preparation and characterization of snake plant fiber reinforced composite: A sustainable utilization of biowaste. SPE Polymers, 5(1), 35-44.
6. Rwawiire, S., Okello, J., Habbi, G., 2014. Comparative evaluation of dynamic mechanical properties of epoxy composites reinforced with woven fabrics from Sansevieria (Sansevieria trifasciata) fibres and banana (Musa sapientum) fibres. Tekstilec, 57(4), 315-320.
7. Ashok Kumar, M., Mallikarjuna, K., Sanjeev Kumar, P.V., Hari Sankar, P., 2020. An experimental studies on the polymer hybrid composites—effect of fibers on characterization. Smart Innovation, Systems and Technologies, 169, 85-92.
8. Kaddami, H., Dufresne, A., Khelifi, B., Bendahou, A., Taourirte, M., Raihane, M., Issartel, N., Sautereau, H., Gerard, J.-F., Sami, N., 2006. Short palm tree fibers—Thermoset matrices composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 37(9), 1413-1422.
9. Hulle, A., Kadole, P., Katkar, P., 2015. Agave Americana leaf fibers. Fibers, 3(1), 64-75.
10. Bulut, Y., Erdoğan, Ü.H., 2011. Selüloz esaslı doğal liflerin kompozit üretiminde takviye materyali olarak kullanımı. Tekstil ve Mühendis, 18(82), 26-35.
11. Yu, H., Yu, C., 2010. Influence of various retting methods on properties of kenaf fiber. The Journal of The Textile Institute, 101(5), 452-456.
12. Shadrach, J., Palani, K., Pitchandi, K., 2015. Evaluation on mechanical properties of woven Aloe vera and sisal fibre hybrid reinforced epoxy composites. Bulletin of Materials Science, 38, 1183-1193.
13. Ortega, Z., Castellano, J., Suárez, L., Paz, R., Díaz, N., Benítez, A.N., Marrero, M.D., 2019. Characterization of Agave americana L. plant as potential source of fibres for composites obtaining. SN Applied Sciences, 1, 1-9.