T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOĞAL ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİTLERDE ÖMRÜN ANALİTİK VE NÜMERİK İNCELENMESİ

Taha ÇALIŞKAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ

Temmuz, 2021

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOĞAL ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİTLERDE ÖMRÜN ANALİTİK VE NÜMERİK İNCELENMESİ

Taha ÇALIŞKAN tarafından hazırlanan tez çalışması 13.07.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Konstrüksiyon Anabilim Dalı, Makine Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Berna BOLAT, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Atakan ALTINKAYNAK, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Doğal Elyaf Takviyeli Kompozitlerde Ömrün Analitik Ve Numerik İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Taha ÇALIŞKAN

İmza

Aileme

ve

biricik eşime

TEŞEKKÜR

Öncelikle bu tezin hazırlanmasında, çalışmanın başından sonuna kadar her aşamasında yardımlarını, desteklerini ve bilgi birikimini esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ'a teşekkürlerimi ve minnetlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olan, bu süreçte destek, anlayış ve hoşgörülerini eksik etmeyen biricik eşim Sezen ÇALIŞKAN'a sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ **VIII**
KISALTMA LİSTESİ **X**
ŞEKİL LİSTESİ **XI**
TABLO LİSTESİ **XIV**
ÖZET **XV**
ABSTRACT **XVII**
1 GİRİŞ **1**
1.1. Literatür Özeti 1
1.2. Tezin Amacı 3
1.3. Hipotez 3
2 KOMPOZİT MALZEMELER **4**
2.1. Tanım 4
2.2. Kompozit Çeşitleri 5
2.2.1. Parçacık Takviyeli Kompozitler 5
2.2.2. Lif Takviyeli Kompozitler 8
2.2.3. Yapısal Kompozitler 13
3 DOĞAL FİBERLİ KOMPOZİT MALZEMELER **17**
3.1. Doğal Fiber malzemeler 17
3.2. Polimer Matris Malzemeler 18
4 KOMPOZİT MALZEME MODELİ YAKLAŞIMLARI **20**
4.1. Malzeme Modellemesi 20
4.2. Mikromekanik Modelleme 21
4.3. Elastiklik Modülü Modellemesi 23
4.3.1. Einstein Modeli 23
4.3.2. Guth Modeli 23
4.3.3. Değiştirilmiş Guth Modeli 23
4.3.4. Karışımlar Kuralı (ROM) ve Ters Karışımlar Kuralı (IROM) 24
4.3.5. Hirsch Modeli 25
4.3.6. Hui-Shia Modeli 25
4.3.7. Halpin-Tsai Modeli 25
4.3.8. Temsili Hacim Elemanı Modeli (RVE) 26
4.3.9. Ortalama Alan Homojenizasyonu (MFH) 27

4.3.10. Eshelby's Yaklaşımı 27
4.3.11. Mori-Tanaka Modeli 28
4.3.12. Digimat-MF Modeli 28
5 DİGİMAT İLE KOMPOZİT MALZEME MODELLENMESİ 37
5.1. Matris ve Fiber Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması 37
5.2. Farklı Kütlesel Oranlarda Takviye içeren Kompozit Modellemesi: 42
5.2.1. Hooke Kanunu 44
5.2.2. Kütlece %8 Muz Lifi – Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi 45
5.2.3. Kütlece %12 Muz Lifi – Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi 45
5.2.4. Kütlece %16 Muz Lifi - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi 46
5.2.5. Kütlece %20 Muz Lifi - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi 46
5.2.6. Kütlece %8 Cam Elyaf - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi 47
5.2.7. Kütlece %12 Cam Elyaf - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi 47
5.2.8. Kütlece %16 Cam Elyaf - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi 48
5.2.9. Kütlece %20 Cam Elyaf - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi 48
5.2.10. Kütlece %8 Kenaf - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi 49
5.2.11. Kütlece %12 Kenaf - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi 49
5.2.12. Kütlece %16 Kenaf - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi 50
5.2.13. Kütlece %20 Kenaf - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi 50
5.2.14. Kütlece %8 Keten - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi 51
5.2.15. Kütlece %12 Keten - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi 51
5.2.16. Kütlece %16 Keten - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi 52
5.2.17. Kütlece %20 Keten - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi 52
6 STATİK ANALİZ VE YORULMA 53
6.1. Statik Çekme Testi Analizi 53
6.1.1. Kompozit Malzemenin Gerilme Dayanımının Hesaplanması 55
6.2. Statik Birim Uzama Analizi 58
6.2.1. Saf Epoksi Numunesi Birim Uzama Analizi 58
6.2.2. Muz Lifi – Epoksi Numunesi Birim Uzama Analizi 59
6.2.3. Cam elyaf – Epoksi Numunesi Birim Uzama Analizi 60
6.2.4. Kenaf – Epoksi Numunesi Birim Uzama Analizi 61
6.2.5. Keten – Epoksi Numunesi Birim Uzama Analizi 62
6.3. Yorulma Analizi 65
6.3.1. Yükleme Tipi 66
6.3.2. Ortalama Gerilim Düzeltme Faktörü 66

6.3.3. Çok Eksenli Gerilme Düzeltme Faktörü 66
6.3.4. Yorulma Modifikasyonu 67
6.3.5. S-N Eğrisi 67
6.4. Yorulma Analizi Sonuçları 73
6.4.1. Muz Lifi – Epoksi 74
6.4.2. Cam Elyaf – Epoksi 75
6.4.3. Kenaf – Epoksi 76
6.4.4. Keten – Epoksi 77
6.4.5. Epoksi 78
6.5. Analiz Sonuçlarının Karşılaştırması 79
7 SONUÇ VE ÖNERİLER **81**
KAYNAKÇA **83**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **85**

SİMGE LİSTESİ

W_f	Fiber ağırlığı
ε_f^*	Fiber birim uzama miktarı
l	Fiber boyu
d	Fiber çapı
σ_f^*	Fiber gerilim dayanımı
ρ_f	Fiber malzeme yoğunluğu
K	Fiber verimlilik parametresi
E_c	Kompozit elastiklik modülü
τ_c	Kompozit kayma gerilmesi
ρ_c	Kompozit malzeme yoğunluğu
F	Kuvvet (N)
α	Lif doğrultu faktörü
ϕ_f	Liflerin hacimsel oranı
α	Malzemeye bağlı yorulma çarpanı
β	Malzemeye bağlı yorulma düzeltme değeri
W_m	Matris ağırlığı
ε_m^*	Matris birim uzama miktarı
E_m	Matris elastiklik modülü
σ_m^*	Matris gerilme dayanımı
V_m	Matris hacmi
G_m	Matris kayma modülü
ρ_m	Matris malzeme yoğunluğu
N	Ömür çevrim sayısı
E_p	Partikül elastiklik modülü
V_p	Partikül Hacmi
v	Poisson oranı
C	Rijitlik matrisi
ζ	Şekil faktörü
X	Uzama miktarı

σ_{xx}	x-x doğrultusu gerilme dayanımı
K	Yay rijitlik katsayısı
σ_{yy}	y-y doğrultusu gerilme dayanımı
σ_{zz}	z-z doğrultusu gerilme dayanımı

KISALTMA LİSTESİ

FE	Digimat Sonlu Elemanlar Malzeme Tanımlama Modülü
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi
IROM	Ters Karışımlar Kuralı
MF	Digimat Malzeme Tanımlama Modülü
MFH	Ortalama Alan Homojenizasyonu
NFC	Doğal Elyaf Kompozitler
ROM	Karışımlar Kuralı
RVE	Temsili Hacim Elemanı
SAP	Sinterlenmiş Aluminyum Tozu

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Yapılarına göre kompozit çeşitleri [17] 5

Şekil 2.2 Elastiklik modülünün parçacık oranına etkisi [17] 7

Şekil 2.3(a) sürekli ve hizalı, (b) süreksiz ve hizalı ve (c) kesintili ve rastgele yönlendirilmiş fiber takviyeli kompozitlerin şematik gösterimleri [17] 9

Şekil 2.4(a) Kırılgan fiber ile sünek matris malzemelerin Gerilim-Gerinim grafiği, (b) lif doğrultusunda yük uygulanan kompozit malzemenin ve bileşenlerin Gerilme – Gerinim grafiği [17] 10

Şekil 2.5Güçlendirilmemiş ve farklı oranlarda rastgele liflerle güçlendirilmiş kompozitin mekanik özellikleri 12

Şekil 2.6 Lif ve yük yönüne göre takviye etkisi 13

Şekil 2.7 Tabakalı yapısal kompozitin katmanları 14

Şekil 2.8 Sandviç kompozit yapısının katmanları 15

Şekil 2.9 Bal Peteği Yapılı Sandviç Kompozitin şematik gösterimi 16

Şekil 3.1 Endüstride kullanılan doğal liflerin sınıflandırılması 18

Şekil 3.2 Polimer malzemelerin sınıflandırılması ve matris olarak yaygın kullanılan polimer malzemeler 19

Şekil 4.1 Modelleme ölçekleri [17] 21

Şekil 4.2 Digimat kısa rastgele lif dağılımlı kompozit malzeme temsili hacim elemanı modeli (RVE) 26

Şekil 4.3 Soldaki Heterojen kompozit bileşenlerden sağdaki eşdeğer tokluğa sahip hesaplanmış homojen malzeme 27

Şekil 4.4 Eshelby yaklaşımı şeması 28

Şekil 4.5 Digimat MF modülü ana ekranı 29

Şekil 4.6 Malzeme mekanik yapı tanımlama aşaması epoksi örneği 30

Şekil 4.7 Microstructures fazında matris için gerekli parametreler 31

Şekil 4.8 Takviye malzemesinin yapısal özelliklerinin tanımlanması 32

Şekil 4.9 Takviye fazının yapısal özelliklerinin tanımlanması 33

Şekil 4.10 Tanımlanan kompozit malzemenin gerilme - birim uzama grafiği 34

Şekil 4.11 Kompozit için MF modülü tarafından hesaplanan rijitlik matrisi 35

Şekil 4.12 Kompozit için MF modülü tarafından hesaplanan malzeme sabitleri 36

Şekil 5.1 Digimat muz lifi gerilme-birim uzama grafiği 39

Şekil 5.2 Digimat epoksi gerilme - birim uzama grafiği 39

Şekil 5.3 Digimat cam elyaf gerilme - birim uzama grafiği 40

Şekil 5.4 Digimat kenaf gerilme - birim uzama grafiği 40

Şekil 5.5 Digimat keten gerilme - birim uzama grafiği 41
Şekil 5.6 Malzemelerin gerilme - birim uzama karşılaştırması 41
Şekil 5.7 %8 Kütlesel fiber oranlı kompozitin temsili hacim elemanı görseli 43
Şekil 5.8 %8 muz lifi - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği 45
Şekil 5.9 %12 muz lifi - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği 45
Şekil 5.10 %16 muz lifi - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği 46
Şekil 5.11 %20 muz lifi - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği 46
Şekil 5.12 %8 cam elyaf - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği 47
Şekil 5.13 %12 cam elyaf - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği 47
Şekil 5.14 %16 cam elyaf - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği 48
Şekil 5.15 %20 cam elyaf - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği 48
Şekil 5.16 %8 kenaf - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği 49
Şekil 5.17 %12 kenaf - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği 49
Şekil 5.18 %16 kenaf - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği 50
Şekil 5.19 %20 kenaf - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği 50
Şekil 5.20 %8 keten - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği 51
Şekil 5.21 %12 keten - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği 51
Şekil 5.22 %16 keten - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği 52
Şekil 5.23 %20 keten - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği 52
Şekil 6.1 ASTM D638'e göre standart çekme testi numunesi 53
Şekil 6.2 Numunelerin elastiklik modülü karşılaştırması 54
Şekil 6.3 Numunelerin yoğunluk karşılaştırması 55
Şekil 6.4 Otomatik hesaplamalar için oluşturulan Excel tablosu 56
Şekil 6.5 Numunelerin gerilim dayanım değerleri karşılaştırması 57
Şekil 6.6 Saf epoksi numunenin uzama miktarı 58
Şekil 6.7 Farklı oranlarda muz lifi içeren epoksi kompozitin uzama miktarı (a:%8, b:%12 c:%16 d:%20) 59
Şekil 6.8 Farklı oranlarda cam elyaf içeren epoksi kompozitin uzama miktarı (a:%8, b:%12 c:%16 d:%20) 60
Şekil 6.9 *Farklı oranlarda kenaf içeren epoksi kompozitin uzama miktarı (a:%8, b:%12 c:%16 d:%20)* 61
Şekil 6.10 Farklı oranlarda keten içeren epoksi kompozitin uzama miktarı (a:%8, b:%12 c:%16 d:%20) 62
Şekil 6.11 Uzama analizi karşılaştırma grafiği 64
Şekil 6.12 a) Gerilim/Ömür, b)Uzama/Ömür yorulma analizi için girdi karar basamakları 65

Şekil 6.13 %8, %12, %16 ve %20 muz lifli malzemelerin S-N grafiği (log-log) 68

Şekil 6.14 %8, %12, %16 ve %20 cam elyaflı malzemelerin S-N grafiği (log-log). 69

Şekil 6.15 %8, %12, %16 ve %20 kenaflı malzemelerin S-N grafiği (log-log) 70

Şekil 6.16 %8, %12, %16 ve %20 ketenli malzemelerin S-N grafiği (log-log) 71

Şekil 6.17 Sendeckyj [25], Kim-Zhang [26], Weibull ve Kohout-Vechet R=0,1 oranlı çekme-çekme ömür testi S-N eğrisi yaklaşımlarının karşılaştırması [27] 72

Şekil 6.18 Muz lifi - epoksi numunesi ömür dayanım analizi sonuçları. a) %8, b)%12, c)%16, d)%20 takviye oranlı numuneler 74

Şekil 6.19 Cam elyaf - epoksi numunesi ömür dayanım analizi sonuçları. a) %8, b)%12, c)%16, d)%20 takviye oranlı numuneler 75

Şekil 6.20 Kenaf - epoksi numunesi ömür dayanım analizi sonuçları. a) %8, b)%12, c)%16, d)%20 takviye oranlı numuneler 76

Şekil 6.21 Keten - epoksi numunesi ömür dayanım analizi sonuçları. a) %8, b)%12, c)%16, d)%20 takviye oranlı numuneler 77

Şekil 6.22 Epoksi numunesi ömür dayanım analizi sonucu 78

Şekil 6.23 Numunelerin ömür dayanımı karşılaştırması 80

TABLO LİSTESİ

Tablo 5.1 Malzemeler için kullanılan değerler 38
Tablo 6.1 Kompozit numuneler için Digimat MF modülü ile hesaplanan değerler 54
Tablo 6.2 Kompozit numuneler için hesaplanan maksimum gerilme dayanımı 56
Tablo 6.3 Çekme testi analizi uzama sonuçları 63
Tablo 6.4 Muz lifi - epoksi numunelerine göre α ve β değerleri 68
Tablo 6.5 Cam elyaf - epoksi numunelerine göre α ve β değerleri 69
Tablo 6.6 Kenaf - epoksi numunelerine göre α ve β değerleri 70
Tablo 6.7 Keten - epoksi numunelerine göre α ve β değerleri 71
Tablo 6.8 Ömür dayanım analizi sonuçları 79

ÖZET

Doğal Elyaf Takviyeli Kompozitlerde Ömrün Analitik ve Nümerik İncelenmesi

Taha ÇALIŞKAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ

Havacılık ve uzay endüstrisi ile başlayan kompozit malzeme kullanımı günümüzde hafiflik-dayanım, maliyet-dayanım gibi iki etkin özelliğin istendiği birçok endüstride sıklıkla tercih edilmektedir. Dünyada son dönemde öne çıkan sürdürülebilirlik kavramı ile doğal kaynaklardan elde edilen kompozit bileşenlerinin kullanımı da artış göstermektedir. Bu kullanım artışıyla beraber öngörülmesi zor olan kompozit malzeme özelliklerinin tespiti de önem kazanmıştır. Bu çalışmada kompozit malzeme yapısını anlamada önemli bir araç olan Digimat yazılımı ile 5 mm boyunda ve 0,12 mm çapında kısa-rastgele dağılımlı lif takviyeli kompozit malzeme modellemesi yapılmış; %8, %12, %16 ve %20 kütlesel oranlarda muz lifi, kenaf, keten ve cam elyaf takviye bileşenli epoksi kompozitin nihai özellikleri tespit edilmiştir. Numunelerin çekme dayanımına, birim uzamaya ve ömür dayanımına etkisi yapılan analitik hesaplamalar ve ANSYS analizleri ile değerlendirilmiştir. Gerilme dayanımının, %20 takviye oranlı numunelerde %8 takviye oranlı numunelere kıyasla, muz lifi için %5, kenaf için %14, keten için %23, cam elyaf için %46 iyileşme göstererek sırasıyla 58,2 MPa, 67 MPa, 76,5 MPa ve 107,8 MPa olduğu görülmüştür. Sendeckyj metodu ile elde edilen gerilme – ömür verileri ile yorulma dayanımı analizi yapılarak numunelerin ömür dayanımları hesaplanmış, %8 cam

elyaf katkısının yerine doğal bir alternatif olarak %16 ve %20 keten takviyesinin kullanılabileceği hem analitik hem de nümerik olarak tespit edilmiştir. Bu çalışma ile farklı özelliklere sahip doğal lifli kompozit yapıların sürdürülebilirlik temel hedefiyle nümerik ortamda mekanik özelliklerinin hızlı bir şekilde değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yorulma, kısa lif takviyeli kompozit, doğal lif, Digimat, malzeme modelleme.

ABSTRACT

Analytical and Numerical Investigation of Fatigue Life in Natural Fiber Reinforced Composites

Taha ÇALIŞKAN

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ

The use of composite materials, which started with the aerospace industry, is frequently preferred in many industries where two effective properties such as weight-strength and cost-strength are desired. With the concept of sustainability, which has come to the fore in the world recently, the use of composite components obtained from natural resources is also increasing. With this increase in usage, determination of composite material properties, which are difficult to predict, has gained importance. In this study, a short-random distributed fiber-reinforced composite material with a length of 5 mm and a diameter of 0.12 mm fiber was modeled with Digimat software, which is an important tool in understanding the composite material structure; the final properties of the epoxy composite with banana fiber, kenaf, flax and glass fiber reinforcement components at 8%, 12%, 16% and 20% by mass were determined. The effects on the tensile strength, elongation and life strength of the samples were evaluated with analytical calculations and ANSYS analyzes. The tensile strength of the samples with 20% reinforcement was 58.2 MPa, 67 MPa, 76.5 MPa and 107.8 MPa, respectively, with 5% improvement for banana fiber, 14% for kenaf, 23% for flax and 46% for glass fiber compared to samples with 8% reinforcement. By performing fatigue strength analysis with the

stress-life data obtained by the Sendeckyj method, the fatigue life of the samples were calculated, and it was determined both analytically and numerically that 16% and 20% flax reinforcement could be used as a natural alternative to 8% glass fiber additive. With this study, it is aimed to quickly evaluate the mechanical properties of natural fiber composite structures with different properties in numerical environment with the main goal of sustainability.

Keywords: Fatigue, short fibre reinforced composites, natural fibre, Digimat, material modeling

1
GİRİŞ

1.1. Literatür Özeti

Son yıllarda kompozit malzemelerin ve özellikle de doğal katkılı kompozit malzemelerin yaygın kullanımı ile bu alandaki araştırma, değerlendirme, analiz ve testleri içeren bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaları doğuran başlıca ihtiyaçlardan biri kompozit malzemelerin yapısının ve mekanik özelliklere etkisinin anlaşılması ihtiyacı olmuştur. Bu konudaki ihtiyacı karşılamada Digimat yazılımı önemli bir rol oynamaktadır. Bu yazılım ile tüm kompozit tipleri bileşen bazında tanımlanabilmekte, ve farklı yapılarda bir araya gelen malzemelerin kompozit olarak davranışları modellenebilmektedir. Bu sayede kompozitin nihai özelliğine bileşenin ve kompozitin yapısının etkileri önceden değerlendirilip optimize edilebilmektedir.

L. Mats ve arkadaşları [1], A. Laurent ve arkadaşları [2] ve S.Robert ve arkadaşları [3] kısa lif takviyeli kompozit yapısını anlamada Digimat yazılımını kullanmışlar ve bu verilerin girdisi ile analizlerini gerçekleştirmişlerdir. M. Thierry ve arkadaşları [4] Sürekli lif takviyesi ile Süreksiz lif takviyesinin Digimat model karşılaştırmasını yapmış ve kiriş elemanın ömür dayanımının modeli üzerine çalışmışlardır. E.I. Kurkin ve arkadaşları [5] enjeksiyonla üretilmiş kısa lif takviyeli kompozitin lif yönelimi etkisini de Digimat modellerine dahil etmiş ve bu etkinin parça üzerindeki deliğin yük altında şekil değişimine etkisini incelemiştir. S.S. Shinde ve arkadaşları [6], R. Potluri ve arkadaşları [7] ve S.A.H.A. Seman ve arkadaşları [8] farklı doğal lifli kompozitlerin mekanik özelliklerinin tespiti için teorik, test ve analiz yöntemlerini kullanarak kıyaslama yapmıştır. L. Biradar ve arkadaşları [9] Digimat ile İzotropik ve Anizotropik malzeme modellemesi yapmış ve bunu debriyaj pedalı modeli üzerinden statik ve yorulma analizlerinde kullanmışlardır. T. K. Mulenga ve arkadaşları [10] ile M. Alhijazi ve arkadaşları [11] son yıllarda çalışılan doğal lif takviyeli kompozitlerin üzerine bir değerlendirme çalışması yapmışlardır. A. Karakoti ve arkadaşları [12], M. Alhijazi ve arkadaşları [13], ve R. M. Abhilash ve

arkadaşları [14] doğal lif takviyeli polimer kompozitlerin farklı lif oranlarında numuneleri ile ASTM çekme testlerini gerçekleştirmiş ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Nevzat Şifa [15] yüksek lisans tezinde matris olarak Nişasta, takviye malzemesi olarak farklı oranlarda muz lifi kullanarak elde ettiği numuneleri termal, akustik ve mekanik olarak teste tabi tutmuş ve karşılaştırmıştır. A. P. Vassilopoulos ve arkadaşları [16] ömür dayanım analizleri için gerçek test verileri üzerinden bulanık mantık ve genetic programlama gibi gelişmiş algoritmik tahmin modellerini incelemişlerdir.

Havacılık ve uzay endüstrisi ile başlayan kompozit kullanımı başta otomotiv sektörü olmak üzere endüstride her geçen gün artmaktadır. Kompozit malzemelerin başlıca tercih edilme sebebi maliyet,hafiflik ve dayanım açısından optimum durumu sağlayabilmesidir. Artan rekabet koşullarında maliyetlerin her zaman daha çok düşürülmesi ihtiyacı süregelen bir durumdur. Hem maliyetler hem de sürdürülebilirlik açısından değerlendirildiğinde kompozit malzemelerde doğal bileşenlerin kullanılması fikri son on yıllarda giderek yaygınlaşmaktadır. Bu sayede tarım, tekstil vb. sektörlerden elde edilen ve aslında başka bir prosesin atıkları olan malzemeler işlenerek endüstriye kazandırılmakta ve çevreye daha zararsız bileşenler olarak ürün yaşam döngüsünde yerlerini almaktadır.

Ürün yaşam döngüsüne katılan bu doğal bileşenlerin yeni formlarındaki mekanik performansları kullanıldıkları alanda hayli önem arz etmektedir. Bunun için bu bileşenlerin son ürün haline geldikten sonraki mekanik özellikleri ve ömür dayanım sonuçları çok kritiktir.

Ömür testleri süreç alan ve oldukça maliyetli test tipleridir. Hem maliyetleri düşürmek hem de istenen sonuçları ürün piyasaya sürme/proje sürelerinde görmek amacıyla çeşitli Yorulma analizi ve malzeme modelleme yazılımları mevcuttur. Bu çalışmada malzeme modelleme için Digimat yazılımı, yorulma analizleri için de ANSYS yazılımı kullanılmıştır.

1.2. Tezin Amacı

Farklı kütlesel oranlarda doğal rastgele yönelimli kısa liflerle takviye edilmiş epoksi kompozit malzemelerin Digimat yazılımından faydalanarak mekanik özelliklerinin tespit edilmesi ve bu mekanik özellikler yardımıyla ANSYS'te ömür dayanım limitlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

1.3. Hipotez

Bu çalışmada takviye elemanı olarak kısa muz lifi, cam elyaf, kenaf ve keten, matris olarak epoksi kullanılan rastgele kısa lif dağılımlı kompozit malzemelerin modellemesi yapılmıştır. Bu modelleme ile kompozit malzemenin özellikleri belirlenmiş, mekanik özellikler ve ömür dayanımı karşılaştırması yapılmıştır. Bu çalışma ile enjeksiyon, eklemeli imalat ve el yatırma gibi farklı imalat proseslerinde kullanılan cam elyaf takviye malzemesinin yerine sürdürülebilir ve doğal alternatifler olan muz lifi, kenaf ve ketenin kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

2
KOMPOZİT MALZEMELER

2.1. Tanım

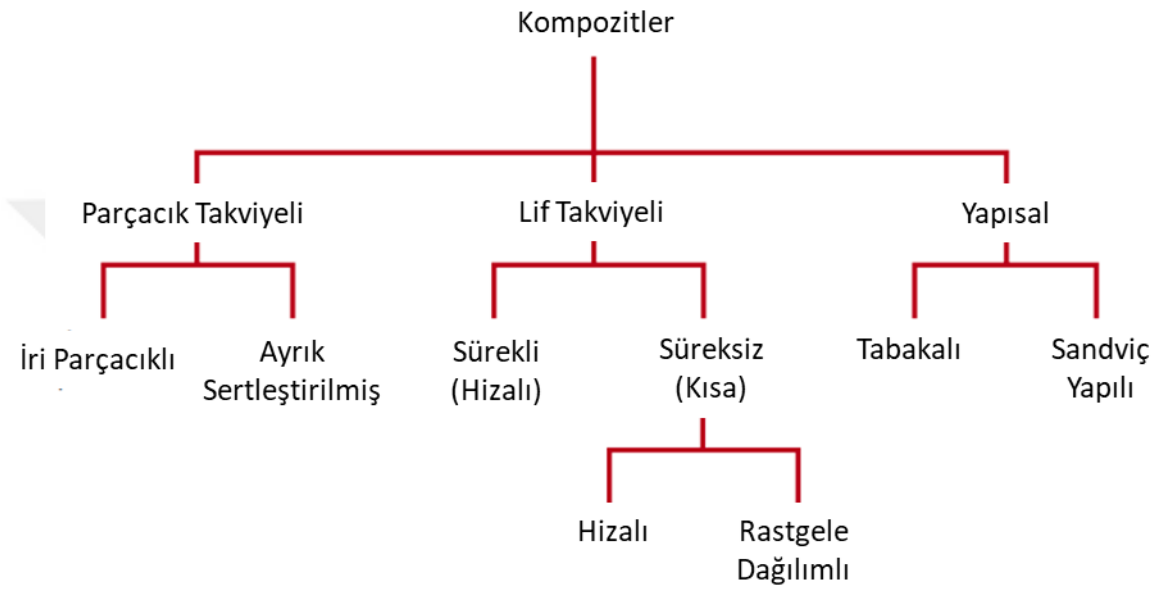
Kompozit malzemeler; belirli bir amaç doğrultusunda iki ya da daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı tür malzemelerin özelliklerini, yeni ve tek bir malzemede toplamak için, bileşenlerin kendi sınırlarını koruyacak şekilde makro düzeyde birleştirilmesi ile oluşturulan yeni ve yapay malzemeler olarak tanımlanabilir. Kompozit malzemeler genelde düşük dayanıma sahip olan matris ana fazı ile bu faz içinde dağılmış destekleyici yapı vazifesi gören takviye fazından meydana gelmektedir. Kompozit malzemelerde takviye ve matris yapıları atomsal boyutta birleşmez, birbirleri içinde çözünmeyerek ayrık bir yapıda gözlemlenebilirler.

Elde edilecek kompozitin istenen özelliklerine göre fiber/matris seçimi ve proses parametreleri belirlenir. Kompozit kullanımı, hem hafif hem de güçlü malzemelere büyük talep olduğundan, ağırlıklı kullanım fırsatını havacılık endüstrisinde bulmuştur. Ancak daha da geçmişe gidecek olursak insanlar tarafından kullanılan ilk kompozit malzemelerden birinin kerpiç tuğla olduğunu görebiliriz.

Günümüzde kompozit malzemeler çok daha yaygın bir kullanım alanına sahip olup, çok farklı sektörlerde rol bulmaktadır. Bu malzemeler yaşam alanlarımızın her yerinde insanlara modern ve çağdaş çözümler sunmaktadır. kullandığımız otomobilde ve toplu taşıma araçlarında, yaşadığımız binalarda, kentimizin altyapı ve üstyapısında, denizcilik, havacılık, savunma sektörlerinde ve tarımda çok yönlü malzeme olarak sorunlara çözüm üretmektedir.

2.2. Kompozit Çeşitleri

Kompozit malzemeler yapılarına göre 3 ana çeşide ayrılmaktadır. Bunun yanı sıra kullanıldıkları yerdeki mekanik ve ısıl dayanıma, ekonomiklik düzeyine göre farklı malzemelerin birleşimi ile oluşturulabilir.



Şekil 2.1 Yapılarına göre kompozit çeşitleri *[17]*

2.2.1. Parçacık Takviyeli Kompozitler

Şekil 2.1'de belirtildiği gibi, büyük partiküllü ve ayrık güçlendirilmiş kompozitler, parçacık takviyeli kompozitlerin iki alt sınıflandırmasıdır. Bunlar arasındaki ayrım, pekiştirme veya güçlendirme mekanizmasına dayanmaktadır. "İri" terimi, parçacık-matris etkileşimlerinin atomik veya moleküler düzeyde işlenemeyeceğini belirtmek için kullanılır; bunun yerine süreklilik mekaniği kullanılır. Bu kompozitlerin çoğu için, tanecik fazı matristen daha sert ve toktur. Bu güçlendirici tanecikler, her taneciği çevresindeki matris fazının hareketini kısıtlama eğilimindedir. Esas itibariyle, matris uygulanan gerilmenin bir kısmını yükün bir kısmını taşıyan parçacıklara aktarır. Kompozit malzemenin performansı büyük ölçüde seçilmiş olan bileşenlerin birbirleri arasındaki birleşim ve gerilim aktarımından etkilenir.

İri taneli kompozitlere kıyasla ayrık güçlendirilmiş kompozitler takviye malzemesi olarak çok daha küçük boyutlarda bileşenlerden oluşur. İri taneli kompozitlerde olduğu gibi matris fazının hareketinin kısıtlanması davranışı esastır ancak buradaki etkileşim daha yaygın ve daha düşük yapısal bileşenler bazında gerçekleşir. Matris, uygulanan yükün büyük bölümünü taşırken, küçük dağılmış parçacıklar dislokasyonların hareketini engeller veya sınırlandırır. Böylece, plastik deformasyon, akma ve gerilme mukavemetlerinin yanı sıra sertliğin de gelişmesini sağlayacak şekilde sınırlandırılır.

2.2.1.1. İri Parçacıklı Kompozitler

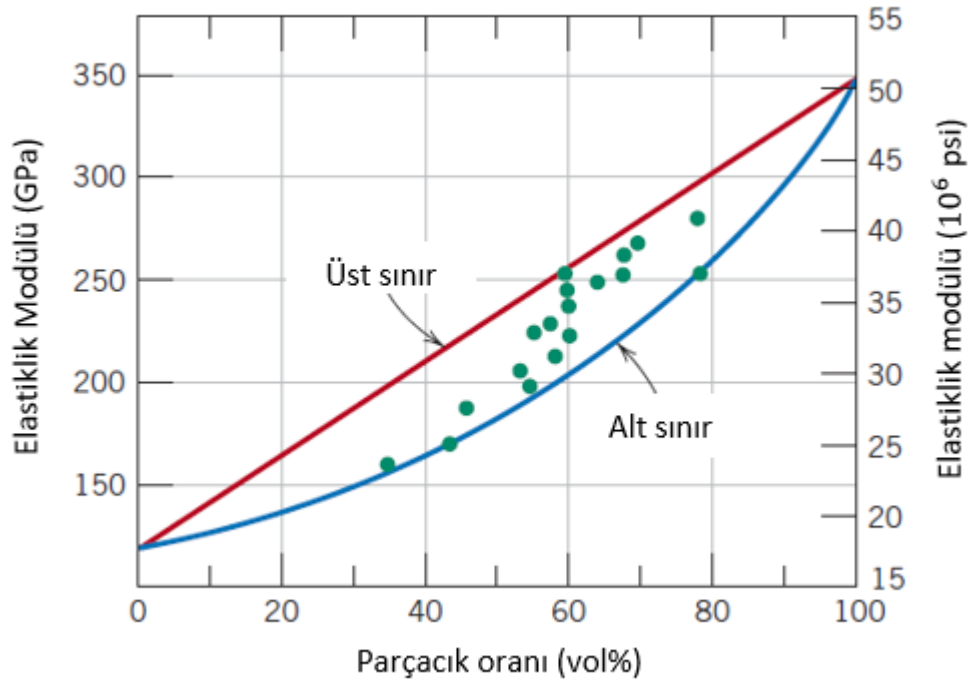
Takviye maddelerinin eklendiği bazı polimerik(matris) malzemeler gerçekten büyük parçacıklı kompozitlerdir. Burada takviye malzemesinin daha büyük taneli olmasının avantajı kompozit için daha iyi bir performans sergilemeyi sağlarken aynı zamanda da matris malzemesinin daha pahalı olduğu durumlar için hacimden tasarruf sağlayarak parçanın ekonomiklik seviyesini iyileştirir.

Günlük hayatta karşımıza çıkan örnek büyük parçacıklı kompozit, çimento (matris) ile kum ve çakıldan (parçacık) oluşan betondur.

Günümüzde de aktif kullanım bulan bu kompozit örneğinden yola çıkacak olursak, buradaki en önemli detay takviye olarak kullanılan malzemenin ölçülerinin her bir tane için benzer ve yakın özelliklerde olması gerekliliğidir. Her bir bölgesel hacim içerisinde birbirine yakın adette takviye malzemesi olması ve bu malzemelerin arasında dengeli miktarda matris malzemesi olması bağlayıcılığı arttırarak daha iyi performans göstermesini sağlar. Ayrıca ideal bir oranla sınırlı olmak şartıyla tane miktarının matris miktarına oranının artması kompozit malzemenin nihai özelliklerinin iyileşmesi olarak kendini gösterecektir. Elastiklik modülünün iki fazlı bir kompozit için bileşen fazların hacim oranına bağımlılığı için iki matematiksel ifade formüle edilmiştir. Bu karışım kuralı denklemleri, Elastisite modülünün aşağıdaki Denklem (2.1) ile temsil edilen bir üst sınır ve Denklem (2.2) ile temsil edilen bir alt sınır arasında olması gerektiğini öngörür.

$$E_c(u) = E_m V_m + E_p V_p \tag{2.1}$$

$$E_C(l) = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m} \tag{2.2}$$



Şekil 2.2 Elastiklik modülünün parçacık oranına etkisi *[17]*

Bu ifadelerde, E ve V sırasıyla elastik modülü ve hacim oranını belirtirken, c, m ve p alt simgeleri kompozit, matris ve partikül fazlarını temsil eder. Şekil 2.2, tungstenin partikül fazı olduğu bir bakır-tungsten kompoziti için üst ve alt sınır eğrilerini çizer; deneysel veri noktaları iki eğri arasına düşer. Büyük parçacıklı tip kompozitler, her üç malzeme türünde (metaller, polimerler ve seramikler) kullanılır.

2.2.1.2. Ayrık Sertleştirilmiş Kompozitler

Bu kompozit tipi ağırlık olarak metallerde uygulanan bir yöntemdir. Metal bileşenlerin kendine kıyasla daha yüksek dayanımda olan bir malzemenin, içerisine toz veya çok küçük tane yapıları şeklinde takviye edilmesi sayesinde tek başlarına olduklarından daha iyi dayanım göstermeleri sağlanabilir. Dağılmış faz metalik veya ametal olabilir; güçlendirme mekanizması, çökelme sertleşmesinde olduğu gibi, matris içindeki parçacıklar ve çıkıklar arasındaki etkileşimleri içerir. Ayrık

sertleştirme etkisi, yüksek sıcaklıklarda ve uzun süreler boyunca korunur, çünkü dağılmış parçacıklar, matris fazı ile reaktif olmayacak şekilde seçilir. Çökelme ile sertleştirilmiş alaşımlar için, ısıl işlem sonrasında çökelti büyümesi veya çökelti fazının çözünmesinin bir sonucu olarak mukavemetteki artış kaybolabilir. Nikel alaşımlarının yüksek sıcaklık mukavemeti, ince bir şekilde dağılmış partiküller halinde hacimce yaklaşık % 3 oranında Toriya (ThO2) ilavesiyle önemli ölçüde artırılabilir; bu malzeme, Toriya dağılmış (veya TD) nikel olarak bilinir. Benzer durum Alüminyum için de geçerlidir. Metallerin birçoğu için tehlikeli olabilecek oksitlenme belirli sınırlar içinde kalmak şartıyla malzemede meydana geldiğinde mekanik özellikleri iyileştirici rol oynar. Alüminyum metal bir matris içinde dağılmış son derece küçük (0,1 ila 0,2 m kalınlığında) alüminyum pullarının yüzeyinde çok ince ve yapışkan bir alümina kaplaması oluşur; bu malzeme sinterlenmiş alüminyum tozu (SAP) olarak adlandırılır.

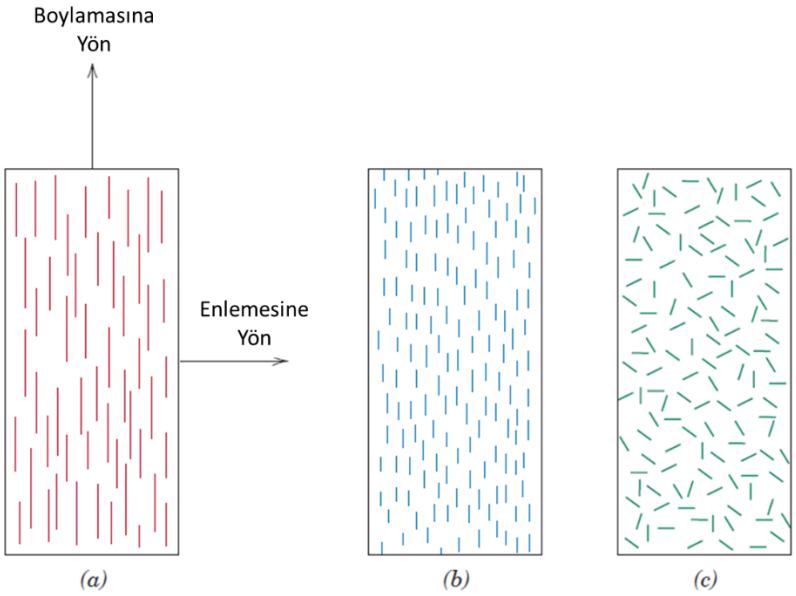
2.2.2. Lif Takviyeli Kompozitler

Teknolojik olarak en önemli kompozitler, takviye fazının bir lif (fiber) formunda olduğu kompozitlerdir. Lif takviyeli kompozitlerin kullanım hedefleri genellikle ağırlık başına daha yüksek mukavemet veya tokluk olmaktadır. Bu nedenle değerlendirmelerin başında birim kütle başına çekme kuvveti etkisiyle oluşan gerilme seviyesi gelmektedir. Bir diğer değerlendirme kriteri de malzemenin birim çekme kuvveti altındaki uzama miktarı olmaktadır. Düşük yoğunluklu fiber ve matris malzemeleri kullanan, olağanüstü yüksek özgül mukavemetlere ve modüle sahip fiber takviyeli kompozitler üretilmiştir. Şekil 2.1'de belirtildiği gibi, lif takviyeli kompozitler, lif uzunluğuna göre alt sınıflandırılır. Kısa lifli tipler için, lif boyutları mukavemette önemli bir gelişme sağlamak için çok kısadır. Ancak üretim kolaylığı gibi proses avantajları sağlamaktadır.

2.2.2.1. Sürekli Lif Takviyeli Kompozitler

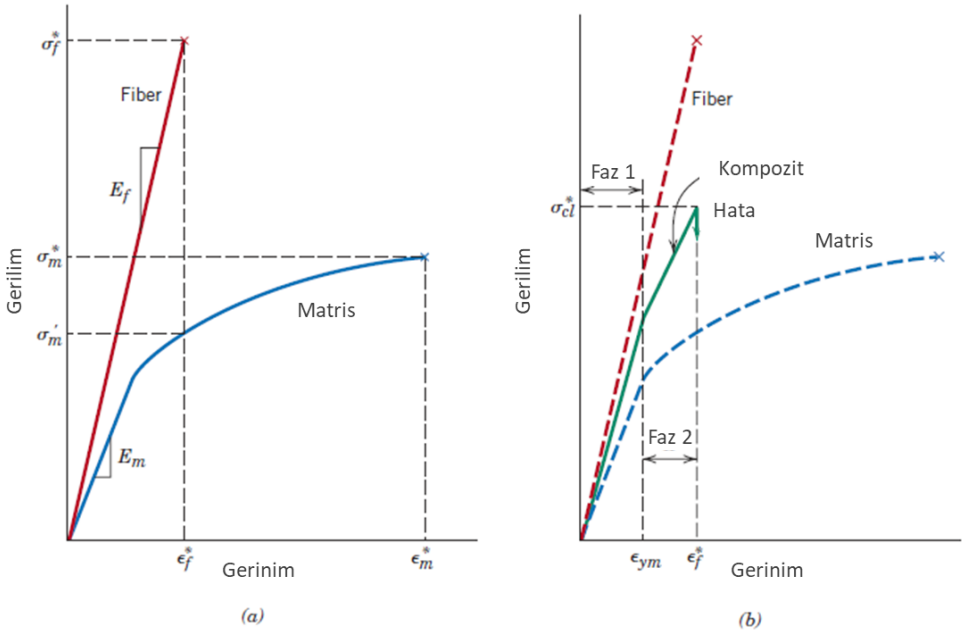
Bu tür kompozitlerin mekanik davranışları, fiber ve matris fazlarının gerilme-gerinim davranışlarına, faz hacim oranlarına ve ayrıca gerilmenin veya yükün uygulandığı yönü içeren birkaç faktöre bağlıdır. Dahası, lifleri hizalanmış bir kompozitin özellikleri oldukça anizotropiktir, yani ölçüldükleri yöne göre değişiklik gösterir. Öncelikle, Şekil 2.3'te gösterilen uzunlamasına doğrultuda gerilmenin

hizalama yönü boyunca uygulandığı durum için gerilim-gerinim davranışını ele alalım.



Şekil 2.3 (a) sürekli ve hizalı, (b) süreksiz ve hizalı ve (c) kesintili ve rastgele yönlendirilmiş fiber takviyeli kompozitlerin şematik gösterimleri *[17]*

Şekil 2.4.a 'da fiber ve matris fazları için gerilmeye karşı şekil değiştirme davranışlarının şematik gösterimini dikkate alacak olursak; bu grafikte, lifin tamamen kırılgan olduğu ve matris fazının makul ölçüde sünek olduğu varsayılmıştır. Bu şekilde ayrıca lif ve matris için gerilimdeki kırılma dayanımları σ_f^*, σ_m^*ve bunlara karşılık ε_f^*, ε_m^*gelen kırılma uzamaları da belirtilmiştir.



Şekil 2.4 (a) Kırılgan fiber ile sünek matris malzemelerin Gerilim-Gerinim grafiği, (b) lif doğrultusunda yük uygulanan kompozit malzemenin ve bileşenlerin Gerilme – Gerinim grafiği *[17]*

Bu bileşenlerden oluşan kompozit malzemenin Gerilme-Gerinim grafiği de Şekil 2.4.b 'deki gibi gözlemlenecektir. Grafiği inceleyecek olursak, Faz 1 bölgesinde her iki malzeme ve kompozit elastik davranış göstermektedir. Faz 2 bölgesi incelenecek olursa, bu bölgede fiber malzeme elastik davranış göstermeye devam ederken matris malzemesi plastik şekil değiştirme evresine geçmektedir. Bu da kompozit malzemenin davranışında yine neredeyse doğrusal; ancak Faz1'e kıyasla daha düşük eğimli bir doğru sergilemektedir.

Kompozit malzemelerde bozulma fiber malzemesinin kopması ile başlar. Ancak bu noktada bile hasarlanma tamamıyla gerçekleşmez. Uzun fiberlerde kopma yaşansa bile bu fiberler daha kısa olarak bozulmamış matris malzeme içerisinde görevlerini kısmen sürdürürler. Bu nedenle daha düşük kuvvetlerde bile olsa matris plastik şekil değiştirmeye uğrarken bütünlüğü korur ve belirli bir yüke dayanırlar.

2.2.2.2. Süreksiz (kısa) Lif Takviyeli Kompozitler

Hizalı Kısa Lif Takviyeli Kompozitler

Sürekli liflere göre sürekli olmayan liflerde takviye verimliliği daha düşük olsa da, kısa ve hizalı lifli kompozitler ticari pazarda giderek daha önemli hale gelmektedir. Kıyılmış cam elyaflar en yaygın şekilde kullanılır; bununla birlikte, karbon ve aramid kesintili lifler de kullanılır. Bu kısa lifli kompozitler, sürekli lifli muadillerinin sırasıyla %90 ve % 50'sine yaklaşan elastiklik modülüne ve gerilme mukavemetine sahip olarak üretilebilmektedir.

Liflerin homojen olarak dağıldığı süreksiz-hizalı kompozitlerde lif boyu kritik boydan uzun ($l > l_c$) olan durumlarda σ_{cd}^* aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$\sigma_{cd}^* = \sigma_f^* V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + \sigma_m'(1 - V_f) \tag{2.3}$$

Burada σ_f^* lifin kırılma mukavemetini ve σ_m' kompozit başarısız olduğunda matristeki gerilimi temsil eder.

Eğer lif uzunluğu kritik uzunluktan daha kısa ($l < l_c$) ise boyuna dayanım σ_{cd}^* aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$\sigma_{cd'}^* = \left(\frac{l\tau_c}{d}\right) V_f + \sigma_m'(1 - V_f) \tag{2.4}$$

Burada d fiber çapı, τ_c ise fiber-matris bağ mukavemeti veya matris kayma akma mukavemetinden küçük olanıdır.

Rastgele Lif Dağılımlı Kompozitler

Kompozit malzemede dayanımın özellikle belirli bir doğrultuda olması istenmediği durumlarda sürekli takviye kullanımı, istenmeyen maliyetlere ve imalat zorluklarına yol açacaktır. Bu tip durumlar için sürekli takviye yerine kesintili ve daha kısa takviye liflerinin kullanımı avantajlı olacaktır. Örnek bir gösterim geride kalan bölümlerde Şekil 2.3 içerisinde "c" görselinde verilmiştir.

Bu koşullar altında, esneklik modülü için aşağıdaki bağıntı kullanılabilir.

$$E_{cd} = KE_f V_f + E_m V_m \qquad (2.5)$$

Bu bağıntıda K, V_f'ye ve E_f/E_m'e bağlı bir fiber verimlilik parametresidir. Bu parametrenin değeri 1'den düşük olacaktır. Genellikle pratikte 0.1 ile 0.6 arasında değerlenmektedir. Bu nedenle, rastgele lif dağılımında (Hizalıda da olduğu gibi) elastiklik modülü lif ve matris hacim oranında bir katsayı etkisiyle artış gösterir.

		Takviye Oranı (% Hacim)		
	Takviyesiz	20	30	40
Yoğunluk	1.19–1.22	1.35	1.43	1.52
Çekme Dayanımı	59–62	110	131	159
Mpa (ksi)	(8.5–9.0)	(16)	(19)	(23)
Elastiklik Modülü	2.24–2.345	5.93	8.62	11.6
Gpa (psi)	(0.325–0.340)	(0.86)	(1.25)	(1.68)
Uzama %	90–115	4–6	3–5	3–5

Şekil 2.5 Güçlendirilmemiş ve farklı oranlarda rastgele liflerle güçlendirilmiş kompozitin mekanik özellikleri

Şekil 2.5'te güçlendirilmemiş ve farklı oranlarda rastgele liflerle güçlendirilmiş kompozitlerin mekanik özelliklere etkisi görülebilir.

Özetleyecek olursak, hizalanmış lifli kompozitler doğası gereği anizotropiktir, çünkü hizalama (uzunlamasına) yönü boyunca maksimum mukavemet ve takviye elde edilir. Enine yönde ise lif takviyesi neredeyse mevcut değildir. Bu nedenle ayrılma genellikle uzunlamasına oranla düşük çekme gerilimlerinde meydana gelir. Diğer gerilme yönelimleri için (±45° vb. ara açılar), kompozit mukavemeti bu uç noktalar arasındadır. Birkaç durum için fiber takviyenin etkinliği Şekil 2.6'da sunulmuştur; bu verimlilik, hizalama yönünde yönlendirilmiş bir fiber kompozit için 1 ve ona dik olarak yönlendirilmiş kompozit için 0 olarak alınır.

Takviye Doğrultusu	Gerilim Doğrultusu	Takviye Verimi
Tüm lifler paralel	liflere paralel	1
	liflere dik	0
2 Boyutta rastgele dağılmış lifler	lif düzleminde	$\frac{3}{8}$
	tüm yönler	
3 Boyutta rastgele dağılmış lifler	tüm yönler	$\frac{1}{5}$

Şekil 2.6 Lif ve yük yönüne göre takviye etkisi

Tamamen çok yönlü uygulanan gerilmeleri içeren uygulamalarda matris malzemesinde rastgele yönlendirilen süreksiz lifler kullanır. Şekil 2.6, takviye verimliliğinin, uzunlamasına doğrultuda hizalanmış bir kompozitinkinin yalnızca beşte biri olduğunu göstermektedir; ancak kompozitin mekanik özellikleri izotropiktir.

Bir kompozit malzemeden beklenen dayanım miktarı o kompozit malzemenin yapısını belirlemede önemli bir faktördür. Bu faktörün yanı sıra malzeme seçiminde ve imalat süreçlerinde bir parçanın ekonomiklik seviyesi de ticari hayatta her zaman başta gelen kriterlerden olacaktır. Dolayısıyla nihai olarak ihtiyacın kesin bir şekilde belirlenmesi daha ucuz alternatiflerin kullanımını da beraberinde sağlayabilmektedir. Benzer şekilde sürekli yerine süreksiz takviye kullanımı ile üretim maliyetleri ciddi oranda düşürülebilmekte; sürekli takviye ile üretilmesi zor veya imkansız olan parçalar süreksiz takviyeli yöntemler ile çok daha kolay gerçekleştirilebilmektedir. İmalat maliyetleri sürekli ve hizalı maliyetlerden önemli ölçüde daha düşüktür ve geleneksel üretim yöntemlerine kolaylıkla entegre edilebilirler.

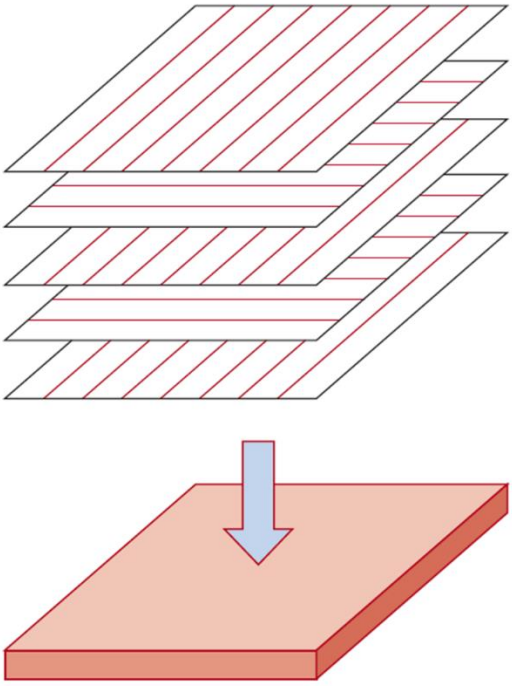
2.2.3. Yapısal Kompozitler

2.2.3.1. Tabakalı Yapısal Kompozitler

Bir tabakalı kompozit, ahşapta ve sürekli ve hizalı fiber takviyeli plastiklerde olduğu gibi tercih edilen yüksek mukavemetli bir yöne sahip iki boyutlu tabakalardan veya panellerden oluşur. Katmanlar istiflenir ve ardından yüksek mukavemet doğrultusunun yönü birbirini takip eden her katmanla değişecek şekilde birbirine

yapıştırılır (Şekil 2.7). Örneğin, kontrplaktaki bitişik ahşap levhalar, damar yönüne dik açılarla hizalanır. Laminasyonlar ayrıca plastik bir matris içine gömülü pamuk, kağıt veya dokuma cam elyafları gibi kumaş malzemeler kullanılarak da yapılabilir.

Tabakalı (katmanlı) yapısal kompozitler aslında yönlendirilmiş lif yapısına sahip birden fazla kompozit yüzeyinin üst üste yerleştirilerek birleştirilmesiyle oluşturulan kompozit yapılardır. Yerleştirme yapılırken tabakalar genellikle 90 veya 45 derece gibi döndürülmüş açılarla yerleştirilir. Bu yerleşim tamamıyla tek yönlü yerleşime kıyasla daha az yüke dayanım gösterebilecektir ancak farklı yönlerde de belirli baz bir dayanım elde edilmesini sağlar.



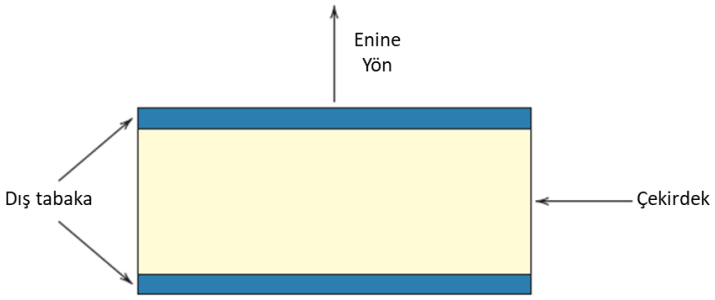
Şekil 2.7 Tabakalı yapısal kompozitin katmanları

2.2.3.2. Sandviç Yapısal Kompozitler

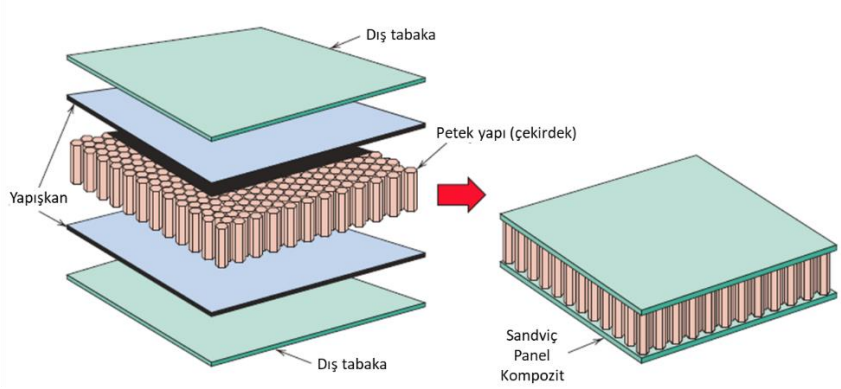
Bir yapısal kompozit sınıfı olarak kabul edilen sandviç paneller, nispeten yüksek sertlik ve mukavemetlere sahip hafif ağırlıklı kirişler veya paneller olacak şekilde tasarlanmıştır. Temel olarak sandviç yapıları, adından da anlaşılacağı gibi alt ve üst kısımda dış etkilere karşı koruyucu bir tabakadan ve merkezde yer alan bir orta katmandan meydana gelir. Dış katmanlar genelde özdeş yapıda olurlar ve orta

tabakayla kıyaslandığında daha güçlü malzemelerden imal edilirler. Kompozit malzemenin bu kısmının kalınlığı ve malzeme yapısı önemli bir parametredir; çünkü çekirdek yapısının destekleyip gerilimi dağıtabileceği rijitliği sağlamalıdır. Orta katmanın kompozitteki görevi dış tabakaları homojen bir şekilde desteklemek ve yükü dağıtmaktır. Aynı zamanda da bükülme etkilerine dayanabilecek geometri ve kalınlıkta imal edilmeleri gerekmektedir.

Diğer bir popüler çekirdek, "bal peteği" yapısından oluşur eksenleri yüz düzlemlerine dikey olarak yönlendirilmiş, Şekil 2.9 birbirine kenetlenen altıgen hücreler halinde oluşturulmuş ince folyolar; bir bal peteği çekirdekli sandviç panelin bir kesit görünüşünü göstermektedir. Çekirdek yapılı kompozit malzemelerin dış yüklere karşı sergilediği performans yapıldığı malzemenin özelliklerine ve geometrik şekline bağlıdır. Çekirdeğin geometrik yapısı mekanik anlamda dış tabakaları ne kadar destekleyici ve yükü dengeli dağıtıcı ise o denli dayanıklı kompozitler meydana getirir. Bu nedenle çekirdek yapısı ile ilgili çok çeşitli geometrik denemeler yapılsa da altıgen geometrinin etkinliği öne çıkmaktadır. Sandviç paneller, binaların çatıları, zeminleri ve duvarları, havacılık sektöründe uçak gövdeleri de dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda kullanılır.



Şekil 2.8 Sandviç kompozit yapısının katmanları



Şekil 2.9 Bal Peteği Yapılı Sandviç Kompozitin şematik gösterimi

3
DOĞAL FİBERLİ KOMPOZİT MALZEMELER

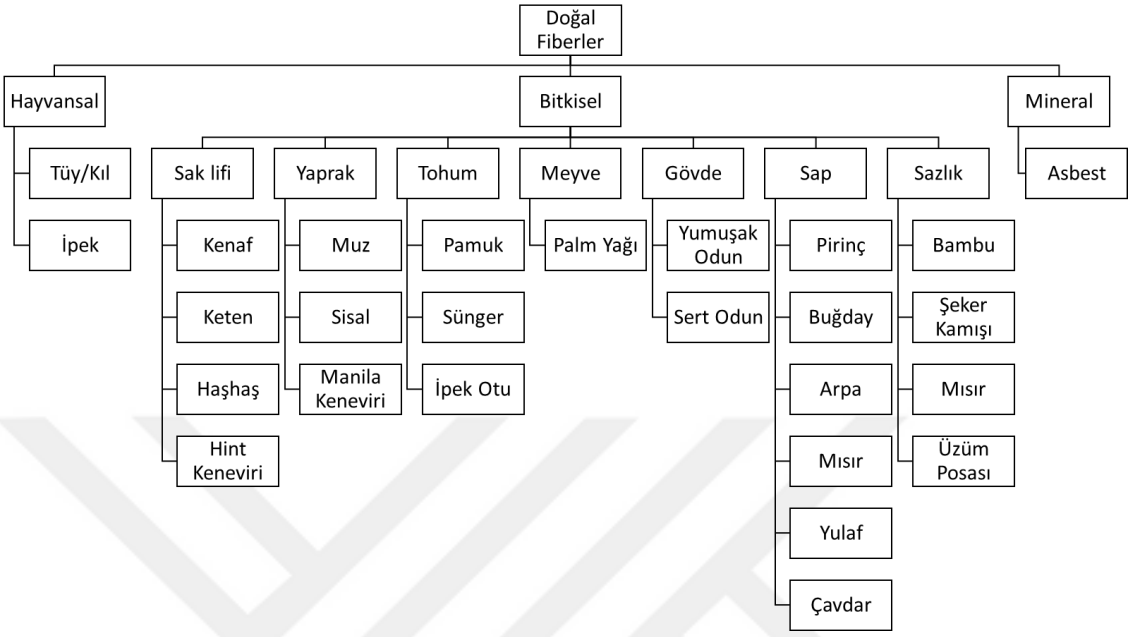
3.1. Doğal Fiber malzemeler

Çevresel kaygılar konusunda artan farkındalık, biyolojik olarak parçalanabilir, geri dönüştürülebilir ve çevre dostu kompozit malzemeler geliştirmenin önemini göstermektedir. Kenaf, rami, hint keneviri, palmiye, yaprak, sisal, keten ve kenevir gibi doğal lifler, çekici özellikleri nedeniyle kompozit malzemelerdeki cam lifleri, karbon lifleri ve diğer tipik takviyelerin yerine geçme potansiyeline sahip malzemelerdir. Bu liflerin güç, tokluk, esneklik ve sertlik gibi bazı önemli özellikleri mevcuttur. Bundan da önemlisi sürdürülebilir ve yenilenebilirler olmaları itibariyle yüksek kullanılabilirliğe sahiptirler. Düşük yoğunluk, ihmal edilebilir maliyet, dikkate değer enerji geri kazanımı, titreşim sönümleme, daha az cilt ve solunum tahrişi ve daha az ekipman aşınması gibi bazı avantajları da beraberinde getirmektedir. Son zamanlarda, kompozit malzeme geliştirmede bir takviye olarak doğal bitki liflerinin seçiminde artış oldu ve bu doğal liflerle vinil-ester, epoksi, polyester, polipropilen vb. birkaç matris eşleştirilerek hibrit kompozitlerin kullanımı yaygınlaşmıştır.

Bu doğal lifler, bandaj, ev aletleri, çatı kaplama ve ipler gibi farklı amaçlar için geçtiğimiz yıllarda sıklıkla kullanılmıştır. Endüstride ise doğal elyaf kompozitler (NFC), inşaat malzemeleri, havacılık kompozit malzemeleri ve otomotiv için birçok sentetik elyaf takviyeli polimerin yerini almış bulunmaktadır. Elde edilen Lifler saç yapısına benzemektedir bu nedenle daha uzun iplere veya filamentlere dönüştürülebilirler. Bu doğal lifler, bu esneklik sayesinde kompozit malzeme geliştirmeye dahil edilebilir.

Kullanılan doğal liflerin sınıflandırması Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Doğal lifler, minerallerden, hayvanlardan ve bitkilerden elde edilen lifleri içermektedir. Bu nedenle, sınıflandırmaları, elde edildikleri kaynaklar ile gerçekleştirilmektedir.

Bu tip doğal lifli kompozit malzemelerin üretiminde geleneksel termoset ve termoplastik kompozit malzemeler için kullanılan üretim teknikleri uygulanmaktadır.

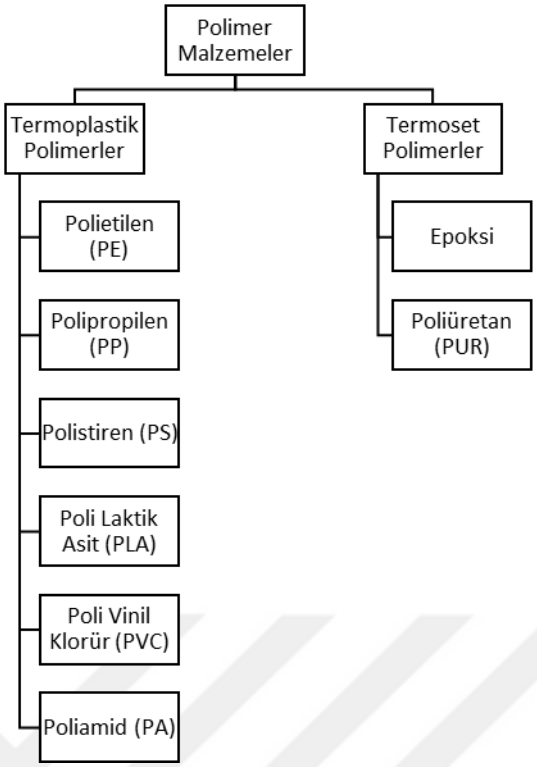


Şekil 3.1 Endüstride kullanılan doğal liflerin sınıflandırılması

Bu çalışmada özellikle muz lifi, kenaf ve keten ile elde edilen doğal lifli kompozitlere odaklanılmıştır.

3.2. Polimer Matris Malzemeler

Kolay bulunabilirliği ve üretilebilirliği sebebiyle doğal fiberli kompozit malzemelerde ağırlıklı olarak Polimer matrisler tecih edilmektedir. Polimer matrisler temelde termoplastik malzemeler ve termoset malzemeler olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Polimerlerin sınıflandırılması detayı Şekil 3.2'de görülebilmektedir.



Şekil 3.2 Polimer malzemelerin sınıflandırılması ve matris olarak yaygın kullanılan polimer malzemeler

Polimer malzemeler yapı olarak çok dayanıklı olmasalar da çeşitli takviye elemanları ile bir araya gelerek kompozit oluşturmaya elverişli malzemelerdir. Bu elverişliliğin sebeplerinden biri, kolay şekillendirilebilir olduklarından karmaşık şekilli modelerin üretimi mümkün olabilmektedir. Bir diğer sebep ise şekillendirme için çok yüksek sıcaklık ve basınca ihtiyaç duyulmamasıdır. Bu sayede basit kalıp ve yöntemler ile işlenebilirler. Şekillendirme sırasındaki sıcaklığın ve basıncın çok yüksek olmaması takviye malzemesi olarak kullanılacak bileşenin bozulmasının da önüne geçebilmeyi sağlamaktadır.

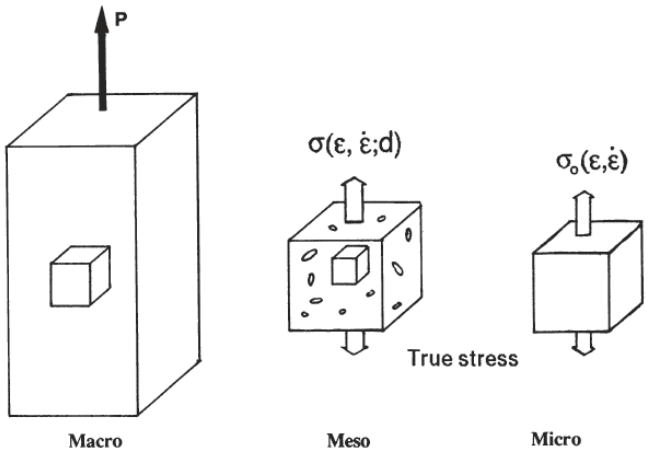
4
KOMPOZİT MALZEME MODELİ YAKLAŞIMLARI

4.1. Malzeme Modellemesi

Makine ve malzeme mühendisliklerinde gelişmiş sonlu elemanlar analizlerinin kullanımı ile malzeme modelleme teknikleri de gelişmiştir. Malzeme modellemenin temeli malzemenin gerçek durumdaki davranışını mümkün olan en iyi şekilde analize yansıtabilmektir. Tüm bu matematiksel modellemenin temelinde de malzemenin gerilim – uzama eğrisi yer almaktadır.

Malzemeler makro, mezo ve mikro olmak üzere farklı seviyelerde modellenebilir. (Şekil 4.1) Makro modelleme homojen malzemelerin genel yapısal davranışını yeterli seviyede tanımlayabilirken mikro modelleme kompozit gibi malzemelerin genel davranış yapısını modellemede gerçek durumu daha iyi yansıtabilmektedir. Boyutlandırmayı bir örnek ile ifade edecek olursak, kuvvet altında eğilmeye uğrayan kompozit bir yapı makro ölçeği ifade eder, gerilim yoğunluklarının arttığı ve hasarın meydana geldiği bölgelerdeki durum mezo ölçeği ifade eder, daha derinlemesine incelenecek olursa hasarlanan bölgedeki matris mikro çatlakları ve lif ayrılması gibi oluşumların ölçeği ise mikro ölçek olacaktır.

Gerçekleştirilecek olan analize göre malzeme modellemesi ihtiyaç duyulan ölçekte tanımlanır. Burada önemli olan analiz edilmek istenen durumun net bir şekilde belirlenmesidir.



Şekil 4.1 Modelleme ölçekleri *[17]*

4.2. Mikromekanik Modelleme

Malzeme davranışının makroskopik sınır koşulları ve mikro geometriler dikkate alınarak direk modellenmesi yüksek hesaplama kapasiteleri gerektirmektedir. Bu problemi aşmak için birkaç farklı çözüm yolu mevcuttur. [18]

Çok ölçekli modelleme: malzeme davranışı, hem mikro yapıların hem de örneklemin ölçek düzeylerinde modellenir; daha düşük ölçekli model, makro modele göre hareket ederek sınır koşullarına tabi tutulurken, makro modeldeki malzemenin mekanik davranışı, mikro modele dahil edilen daha ince mikro ölçekli özellikler dikkate alınarak belirlenir. En basit modellerde, üst ölçek-alt ölçek ilişkileri tek taraflıdır, daha karmaşık modeller ise çeşitli düzeylerde eşzamanlı genel-bölgesel analize izin verir.

Malzeme özelliklerinin ve mikro-yapıların homojenleştirilmesi ve ortalamasının alınması: Malzeme, makro düzeyde homojen eşdeğer bir ortam olarak kabul edilir ve ortamın etkili özellikleri, mikro yapı, mikro geometri ve özelliklerinin analizi malzemelerin temelinde belirlenir.

Hacimsel oran, toplam kompozit hacmi üzerinden fiber veya matris hacmi olarak tanımlanabilir: [14]

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \tag{4.1}$$

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \tag{4.2}$$

$$v_f + v_m = v_c \tag{4.3}$$

$$V_f + V_m = 1 \tag{4.4}$$

Kütle/Ağırlık oranı lif veya matrisin ağırlığının kompozitin toplam ağırlığına oranı olarak tanımlanabilir.

$$W_f = \frac{\omega_f}{\omega_c} \tag{4.5}$$

$$W_m = \frac{\omega_m}{\omega_c} \tag{4.6}$$

$$\omega_f + \omega_m = \omega_c \tag{4.7}$$

$$W_f + W_m = 1 \tag{4.8}$$

Tek bir bileşenin ağırlığı $\omega = \rho.\upsilon$ olarak ifade edilebilir.

Kütle ve Hacim oranları aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$W_f = \frac{\rho_f}{\rho_c} V_f \qquad W_m = \frac{\rho_m}{\rho_c} V_m \tag{4.9}$$

Kısa lifli kompozitler için pratikte ölçüm kolaylığından ötürü kütle oranı kullanılmaktadır. Kütle parametresi ile hacimsel hesaplama için aşağıdaki denklem kullanılabilir. [14]

$$V_f = \frac{W_f \rho_m}{W_f \rho_m + W_m \rho_f} \tag{4.10}$$

Kompozit malzemenin yoğunluğu şu şekilde ifade edilmektedir,

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \tag{4.11}$$

Dikkat edilmesi gereken nokta, kütle ve hacimsel bileşen oranları birbirine eşit olmamaktadır. Bileşenler arası yoğunluk farkı arttıkça bu fark da artmaktadır.

4.3. Elastiklik Modülü Modellemesi

Elastiklik modülünün modellenmesi ile ilgili tarihsel süreçte birçok yöntem ele alınmıştır. Bunlardan en eskileri Einstein ve Guth modelleridir. Bu model, düşük lif/partikül oranına sahip kompozitler için çok etkili olduğunu kanıtlamaktadır. Denklem 4.12 ve 4.13'te görülen bu modeller, matris Elastiklik modülü ile kısa liflerin hacim oranı arasındaki doğrusal ilişkiye dayalı olarak kompozitin etkili elastiklik modülünü hesaplamak için kullanılır [19]

4.3.1. Einstein Modeli

Einstein modeli genel olarak küresel takviyeli kompozitlerin Elastiklik modülü hesaplanmasında kullanılmaktadır.

$$E_c = E_m(1 + 1.25V_f) \tag{4.12}$$

4.3.2. Guth Modeli

Guth, Einstein modeli üzerine çalışarak aşağıdaki şekilde denklemi güncellemiştir. Bu model daha sonraları şekil faktörü eklenen halinin temel aldığı denklemi oluşturmaktadır.

$$E_c = E_m(1 + 2.5V_f + 14.1V_f^2) \tag{4.13}$$

4.3.3. Değiştirilmiş Guth Modeli

Bu değiştirilmiş modelde Guth modeline ek olarak şekil "S" faktörü denkleme eklenmiştir. Bu "S" faktörü lif uzunluğunun genişliğine oranını ifade etmektedir. [19]

$$E_c = E_m(1 + 0.675SV_f + 1.62S^2V_f^2) \tag{4.14}$$

4.3.4. Karışımlar Kuralı (ROM) ve Ters Karışımlar Kuralı (IROM)

Bileşenlerin özelliği kullanılarak kompozitin özelliğinin tahmin edilmesi öncelerinde karışım kavramı kullanılarak analitik olarak ele alınmıştır. Voigt tarafından önerilen model, malzemedeki her iki fazın da yükün etkisi altında aynı gerilimi deneyimlediği varsayımına dayanmaktadır. Voigt'in modeli daha sonra "karışımlar kuralı" (ROM) olarak kullanılmaya başlandı. ROM'a göre, kompozitin özelliği, bileşen malzemelerin hacim ağırlıklı özelliklerinin toplamına eşittir.[20] Kompozitin elastik modülü, bu karışımlar kuralına göre denklem 4.15'teki gibi hesaplanabilmektedir.

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \tag{4.15}$$

1929 yılında "Reuss" kompozitlerin minimum sınır koşulunun tespiti için ters karışımlar kuralını ortaya atmıştır. Bu ters karışımlar kuralında da karışımlar kuralında olduğu gibi matris ve lif bileşenleri için eşit gerilim olduğu varsayılmaktadır. Reuss modeli ile belirlenen Elastiklik modülü, sürekli tek yönlü lifli kompozitteki enine etkili toklukla çok iyi eşleşir. Reuss modeli daha sonra "ters karışım kuralı" (IROM) (Denklem 4.16) olarak kullanılmaya başlanmıştır. [21]

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \tag{4.16}$$

Enjeksiyon kalıplama kompozit parçalarda liflerin doğrultusu kompozitte gözlenen mekanik özelliklerde çok etkili bir rol oynamaktadır. Lifler maksimum dayanımı yük doğrultusunda hizalandıklarında sağlayabilmektedir. Bu lif doğrultusunun etkisini denkleme yansıtabilmek için α lif doğrultu faktörü ROM formülüne eklenir. Bu ekleme ile denklem 4.17'deki halini alır. [22]

$$E_c = \alpha E_f V_f + E_m V_m \tag{4.17}$$

4.3.5. Hirsch Modeli

Hirsch modeli ROM modeli ile IROM modelinin her ikisinden de yararlanan, ek olarak bir x faktörü ile lif yönlendirmesi etkisinin de belirtildiği bir modeldir. Denklem 4.18'deki gibi ifade edilir.

$$E_c = x(E_f V_f + E_m V_m) + (1-x)\frac{E_f \rho_m}{E_f \rho_m + E_m \rho_f} \tag{4.18}$$

4.3.6. Hui-Shia Modeli

Bu modelde Elastiklik Modülü tespit edilirken matris ve lif arasında ideal bağlanma koşulları olduğu varsayılmaktadır. Bu denklemlerde $\phi_f$liflerin hacimsel oranı, $\alpha = l/d$ lif boyunun çapına oranını ifade etmektedir.

$$\frac{E_c}{E_m} = \frac{1}{1 - \frac{\phi}{4}\left[\frac{1}{\zeta} + \frac{3}{\zeta + A}\right]} \tag{4.19}$$

$$\zeta = \phi + \frac{E_m}{E_i - E_m} + 3(1-\phi)\left[\frac{(1-g)\alpha^2 - \frac{g}{2}}{\alpha^2 - 1}\right] \tag{4.20}$$

$$g = \frac{\pi}{2}\alpha \tag{4.21}$$

$$A = (1-\phi_f)\left[\frac{3(\alpha^2 + 0.25)g - 2\alpha^2}{\alpha^2 - 1}\right] \tag{4.22}$$

4.3.7. Halpin-Tsai Modeli

Bu model, lif en boy oranı ve hacim oranının bir fonksiyonu olarak lif takviyesinin kompozitin tokluk özellikleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Halpin-Tsai modelinde bir kompozit malzemenin elastiklik modülü hesaplaması Denklem 4.23'teki gibi ifade edilmektedir.

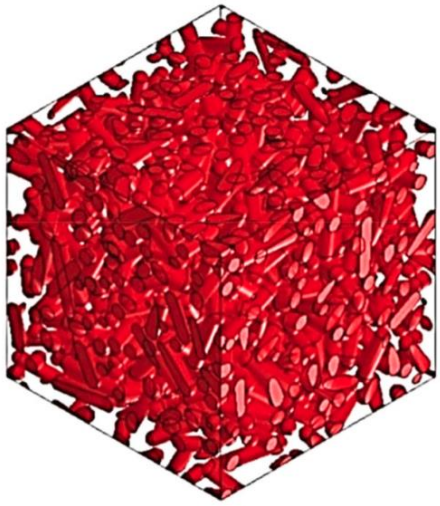
$$\frac{E_c}{E_m} = \frac{1 + \xi\eta V_f}{1 - \xi\eta V_f} \tag{4.23}$$

$$\eta = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \zeta} \tag{4.24}$$

Burada ζ dolgu malzemesinin yapısına göre şekil faktörünü ifade etmektedir. Lifler için ζ=2(l/d) , disk şekilli tanecikler için ζ=2(l/t) değerini almaktadır. Burada l, tanecik/lif boyu, d çap, t katkının kalınlığını ifade etmektedir.

4.3.8. Temsili Hacim Elemanı Modeli (RVE)

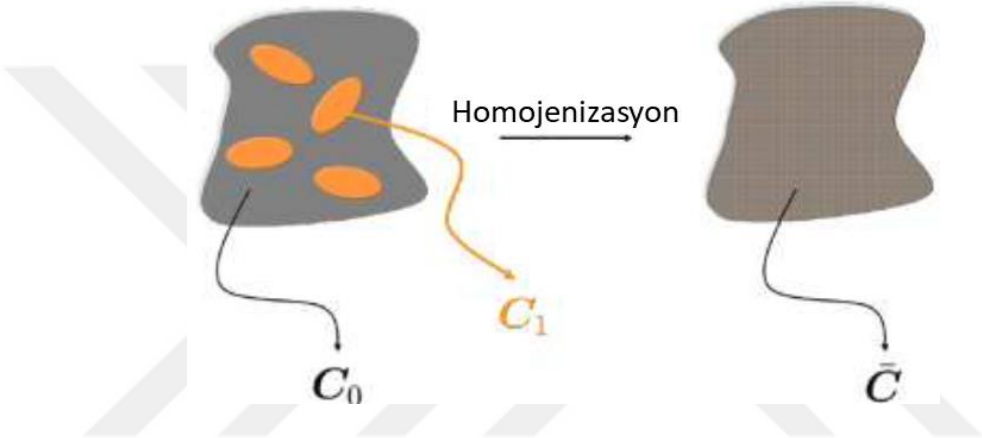
Kompozitin tüm mikro yapısı, Şekil 4.2'de görülen temsili hacim elemanı (RVE) adı verilen bir hacim öğesi ile temsil edilebilir. Kompozit yapısına genel bir perspektiften bakıldığında temsili hacim eleman yapısı bir hücre gibi değerlendirilebilir. Tıpkı vücutta olduğu gibi yapının genel özelliğini yansıtan en küçük yapıtaşıdır. Bu tip bir tümevarım yöntemi ile en küçük bileşenden parçanın genel davranışına doğru bir yaklaşım yapılabilir. Bununla birlikte, RVE, tüm mikroyapıyı yakalayacak kadar büyük ve aynı zamanda makroskopik gövdeye kıyasla boyut olarak daha küçük olmalıdır [22]



Şekil 4.2 Digimat kısa rastgele lif dağılımlı kompozit malzeme temsili hacim elemanı modeli (RVE)

4.3.9. Ortalama Alan Homojenizasyonu (MFH)

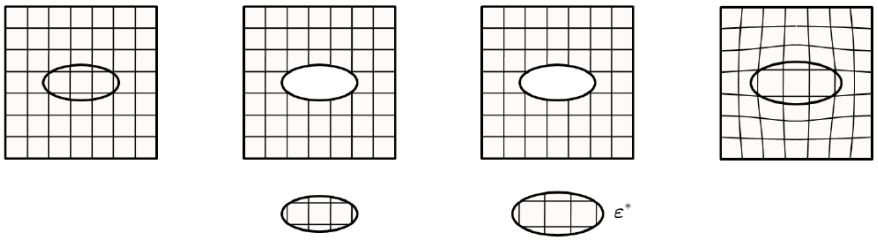
Ortalama alan homojenizasyonunun birincil hedefi genel yapı itibariyle homojen olmayan bir malzemenin bölgesel değişkenliklerini de hesaba katarak kabul edilebilir seviyeler içinde homojen bir malzeme yaklaşımı oluşturmaktır. Bu yaklaşım ile kompozit malzemeler için de belirlenmiş olan homojen malzeme özellikleri kullanılabilir olmaktadır. (Şekil 4.3) Bir makro malzeme noktasında, makro gerilimi bilirsek, makro gerilimi (σ) = C . (ε) bağıntısını kullanarak hesaplayabiliriz; burada C, rijitlik matrisidir. Ortalama alan homojenizasyonu, her aşamada ayrıntılı mikro gerilme ve gerinim alanını hesaplamaz [23]



Şekil 4.3 Soldaki Heterojen kompozit bileşenlerden sağdaki eşdeğer tokluğa sahip hesaplanmış homojen malzeme

4.3.10. Eshelby's Yaklaşımı

Eshelby, genel olarak homojen olmayan kompozit malzemelerin indirgenmiş homojen özelliklerini belirlemek amacıyla bir yöntem öne sürmektedir. Yöntemin temeli sonsuz boyuttaki bir katı malzeme içerisinde gözlemlenen bir birim elemanı esas almaktadır. Genel olarak katı malzemenin termal genleşmesinin sıfır olduğu varsayılmaktadır. Bu katı malzeme içerisinden belirlenen elips formlu bir birim eleman ayrılır. Sonsuz katının genelinden ayrı olarak termal genleşmenin sıfırdan farklı olduğu bir ortamda bu birim elemanın şekil değişimi(ε *) gerçekleştiği varsayılır. Daha sonrasında bu genişlemiş birim eleman başlangıçta kesildiği yere tekrar yerleştirilir ve sonsuk katının yapısı da bu birim elemana adapte edilir. Bu yerleşim ve geometrik uyarlama ile eşdeğer bir gerinim elde edilir. [23]



Şekil 4.4 Eshelby yaklaşımı şeması

Eshelby, elipsoidal hacim içindeki homojen gerinimi öz gerinim ile şu şekilde ilişkilendirmektedir,

$$\varepsilon(x) = \zeta(1, C_0); \varepsilon^* \tag{4.25}$$

Burada $\zeta(1, C_0)$ Eshelby Tensörü, ε^*ise özgün gerinimi ifade etmektedir.

4.3.11. Mori-Tanaka Modeli

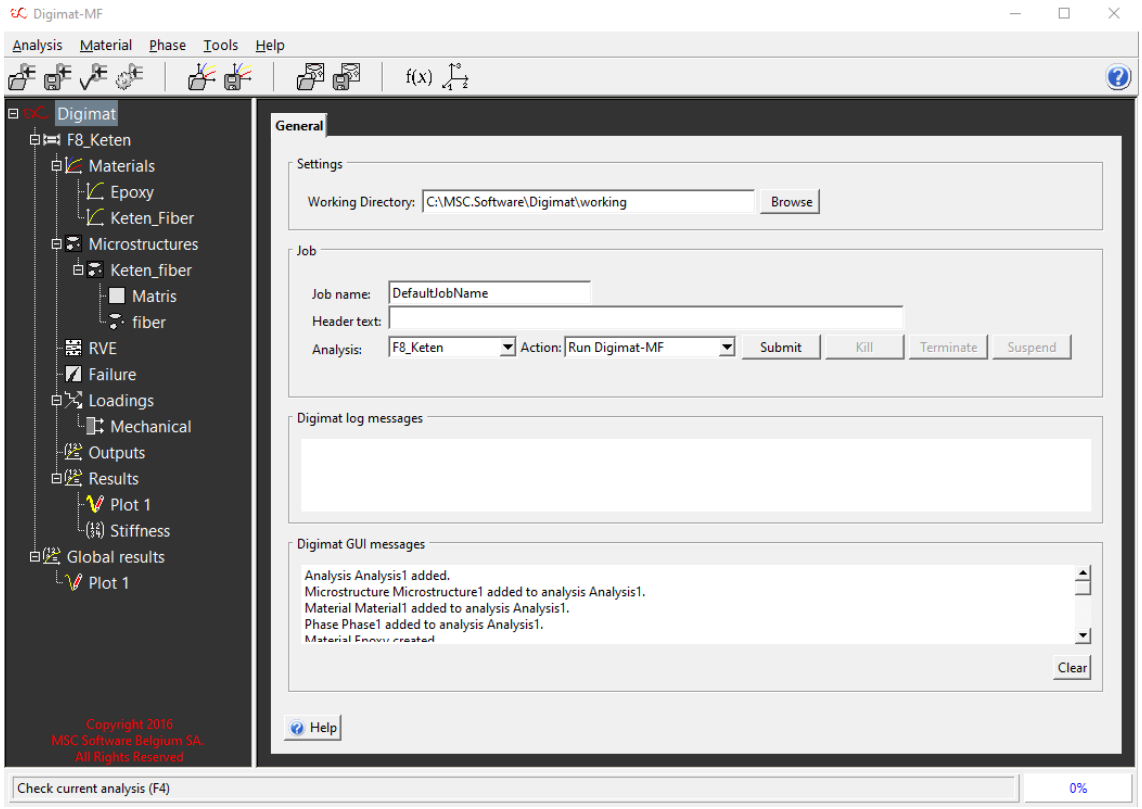
Mori ve Tanaka ortaya attıkları model ile aslında Eshelby yöntemi ve tensörünü esas almaktadır. Yine benzer bir şekilde sonsuz boyutta bir katı içerisindeki süreksiz birim elemanın davranışından yola çıkmaktadır. Farklı olarak bu yöntemde sonsuz katıya bir gerilim uygulandığı varsayılır ve bu uygulanan gerilim doğrultusunda her bir takviye birim hacim davranışı gözlenir. Bu gözlemler yapılırken her bir takviye elemanı birbirinden bağımsız varsayımı yapılır ve ayrı davranışları değerlendirilir. Sonrasında bu tekil davranışlar hesaplanarak bütünün yapısı elde edilir. Bu metodun verimliliği matris miktarının kütlesel olarak takviye miktarından çokça fazla olduğu kompozit malzemeler için daha etkilidir. [23]

4.3.12. Digimat-MF Modeli

MF modülü, Digimat yazılımı içerisinde bulunan birçok malzeme tanımlama modüllerinden bir tanesidir. Yaklaşım olarak ayrıştırıldığında ortalama alan homojenizasyonu yaklaşımını esas alarak malzeme sabitlerini hesaplar. Mikroyapı morfolojisinin bir fonksiyonu olarak bir kompozitin mekanik özelliklerini tahmin etmek için malzemenin analitik bir tanımıyla birlikte Eshelby tabanlı yarı analitik

ortalama alan homojenizasyon yaklaşımlarını kullanır. Kompozitin modellenmesinde hacim oranı, kütle oranı, matris ve lif malzemesi özellikleri, lif boyutu gibi mikroyapısal morfolojiler dikkate alınır. Mevcut çalışmada Digimat-MF, Mori – Tanaka modelinin doğal lif katkılı kompozitlerde uygulaması için kullanılmıştır. Lif ve matris, izotropik malzemeler olarak modellenmiştir. Lif, kısa ve rastgele yerleşimli olarak modellenmiştir.

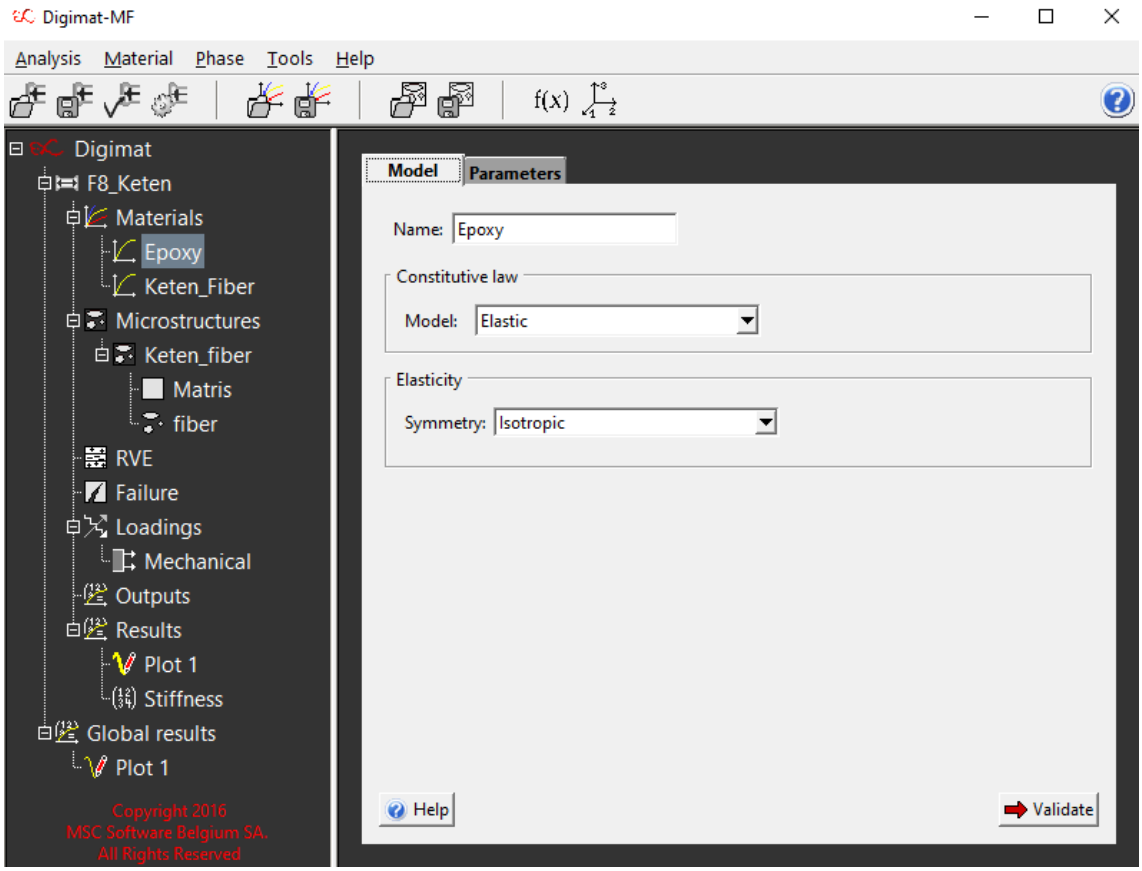
Şekil 4.5'te kompozit modelleme için kullanılan Digimat MF modülü ana ekranı görülmektedir. Sol tarafta görülen "Materials" kısmından kompozit bileşenlerinin malzemeleri tanımlanmaktadır.



Şekil 4.5 Digimat MF modülü ana ekranı

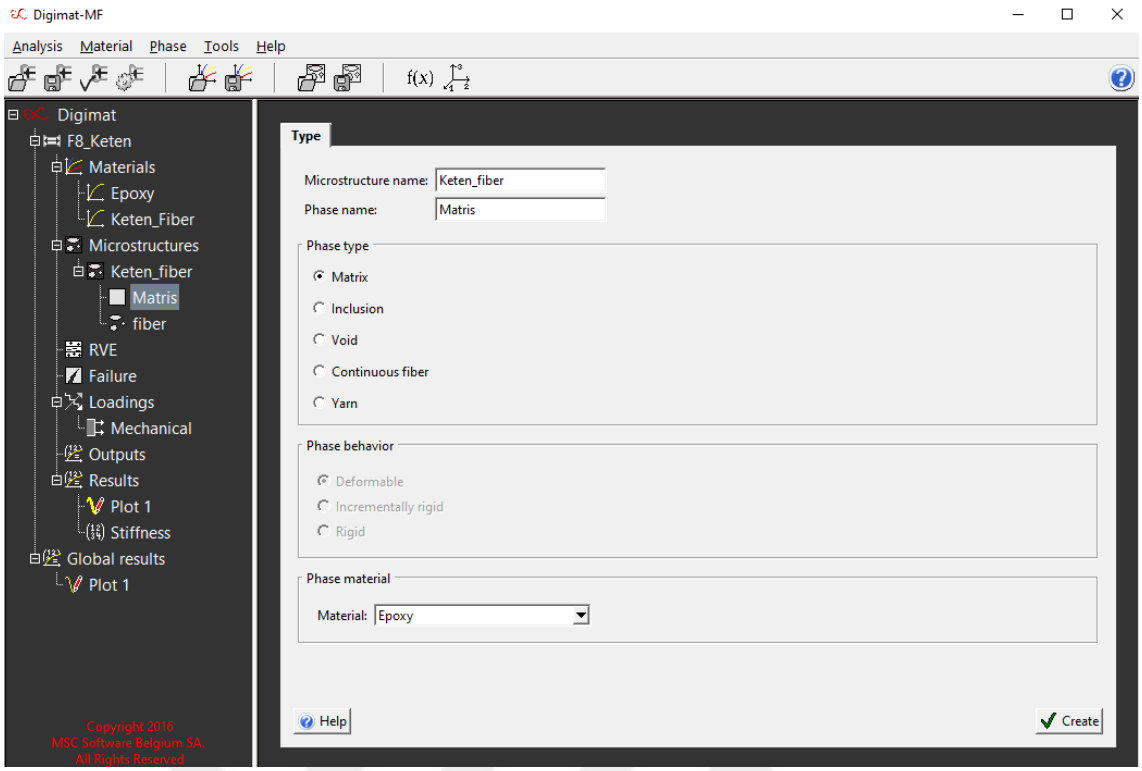
Malzeme tanımlama aşamasında her bir malzemenin mekanik yapısı ve özelliklerinin girilerek oluşturulması gerekmektedir. Şekil 4.6'da epoksi için örnek olarak gösterilen mekanik yapı girildikten sonra "Parameters" sekmesinden

yoğunluk, elastiklik modülü, Poisson oranı gibi malzeme özelliklerinin girilmesi gerekmektedir.



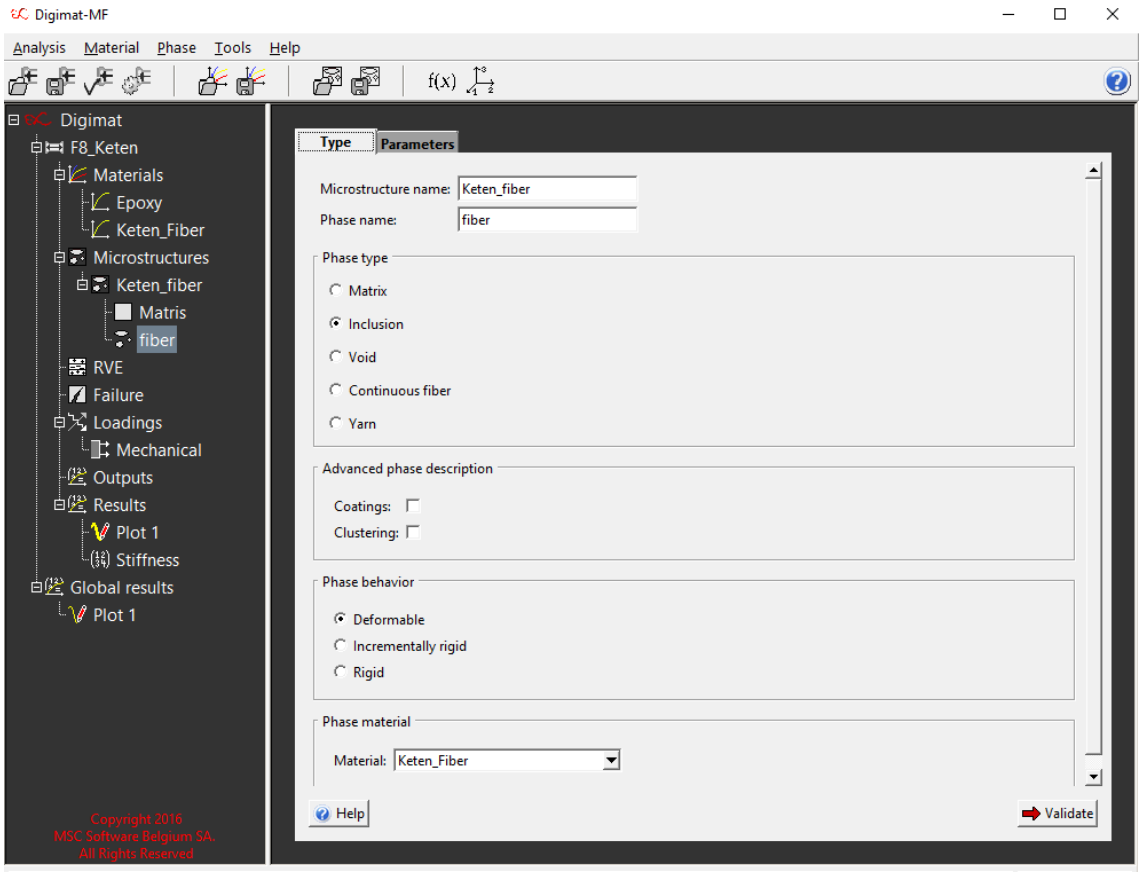
Şekil 4.6 Malzeme mekanik yapı tanımlama aşaması epoksi örneği

Ayrı ayrı kompozit malzemeleri tanımlandıktan sonra bu malzemelerin matris ve takviye fazlarına atanması ve bu fazların fiziki koşullarının "Microstructures" fazında tanımlanması gerekmektedir. Şekil 4.7'de matris fazı parametreleri görülmektedir.



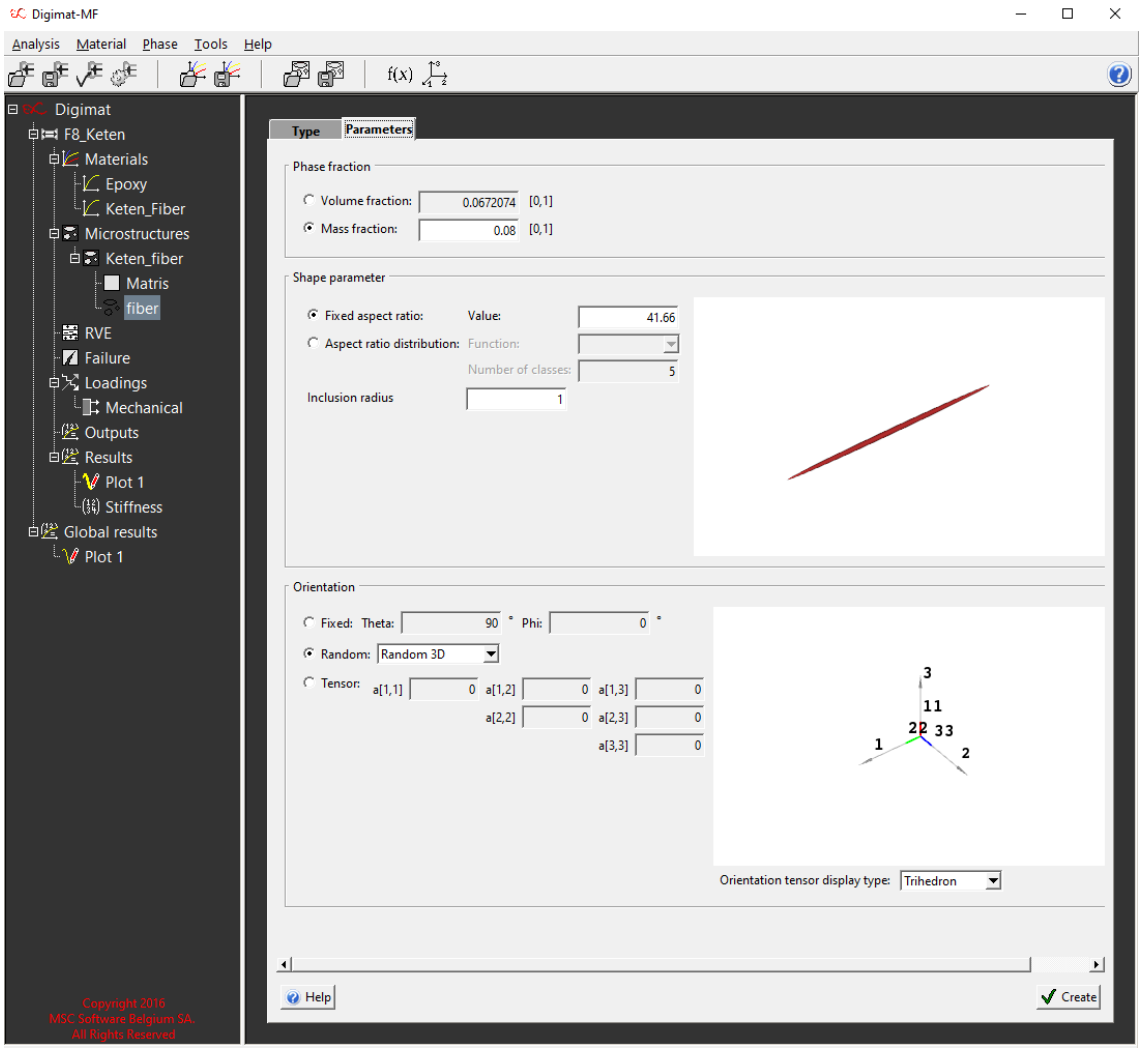
Şekil 4.7 Microstructures fazında matris için gerekli parametreler

Matris malzemesi tanımlandıktan sonra takviye malzemesinin özelliklerinin tanımlanması gerekmektedir. Takviye oranı ve takviye fazının mekanik ve yapısal özellikleri de yine "Microstructures" aşaması altında tanımlanmaktadır. Şekil 4.8'de takviye fazının yapısal özelliklerinin girildiği ekran görülmektedir.



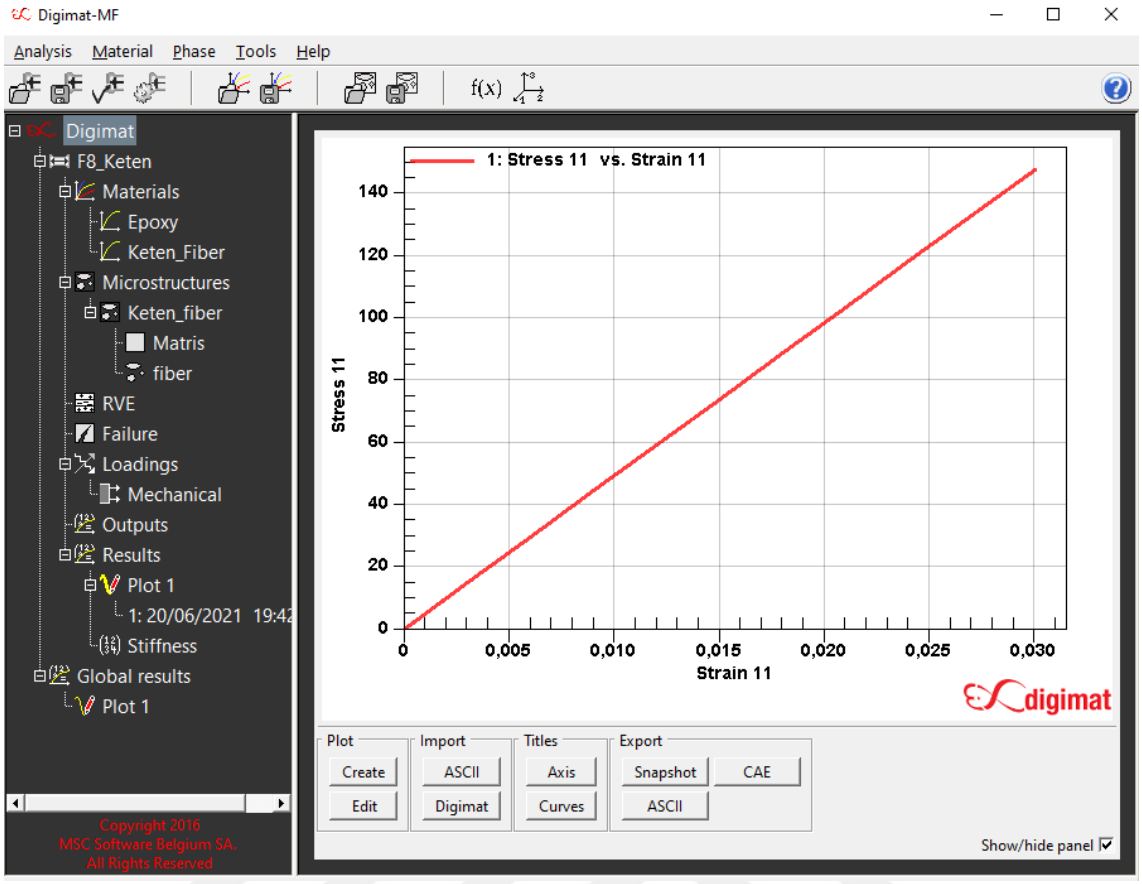
Şekil 4.8 Takviye malzemesinin yapısal özelliklerinin tanımlanması

Takviye malzemesinin genel yapısal özellikleri tanımlandıktan sonra malzeme parametreleri ve takviye yapısının tanımlanması için "Parameters" sekmesine ilerlenir. Bu aşamada Şekil 4.9'da görülen kütlesel veya hacimsel takviye oranı değerleri tanımlanmaktadır. Ardından ortalama alan homojenizasyonu için gerekli olan birim takviye elemanı geometrik oranı (l/d) ve liflerin yöneliminin tanımlaması gerçekleştirilir.



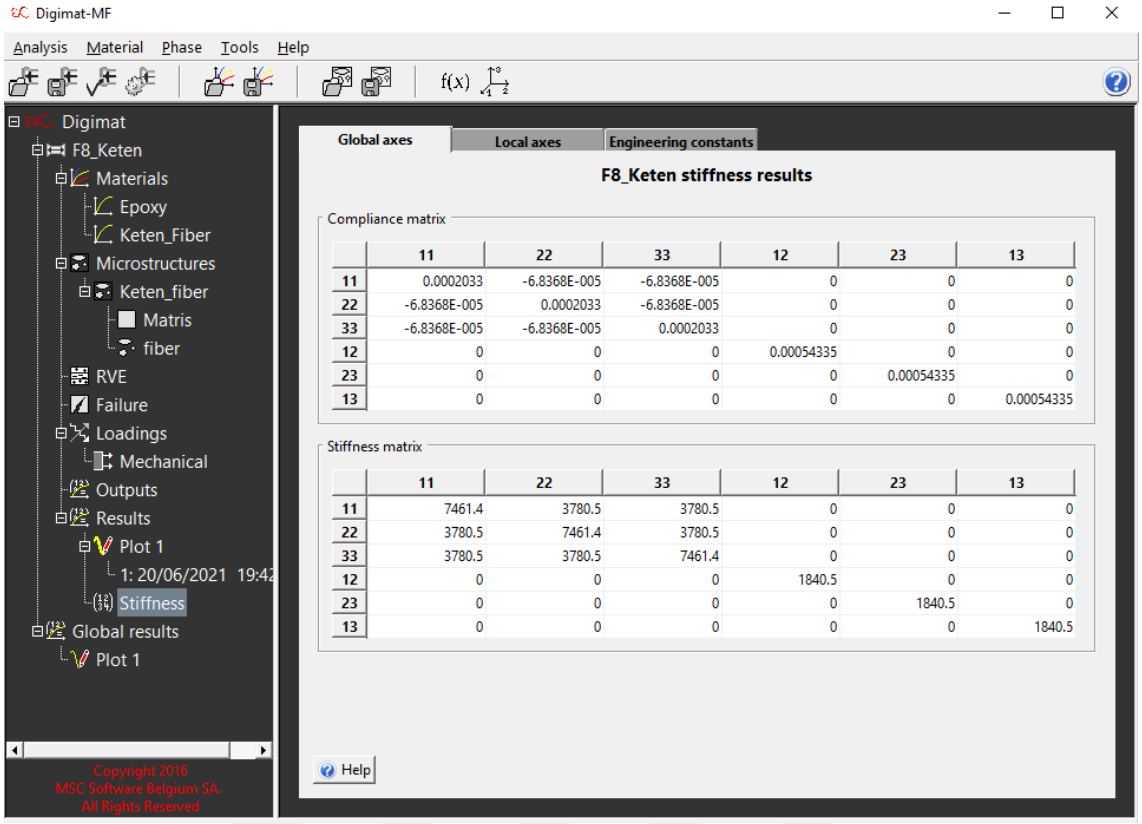
Şekil 4.9 Takviye fazının yapısal özelliklerinin tanımlanması

Tüm bu tanımlamalar tamamlandığında analiz koşmaya hazır hale gelir. Analiz koşturulduktan sonra Plot 1 sekmesinden Şekil 4.10'da görülen malzeme gerilme – birim uzama grafiği elde edilebilir.

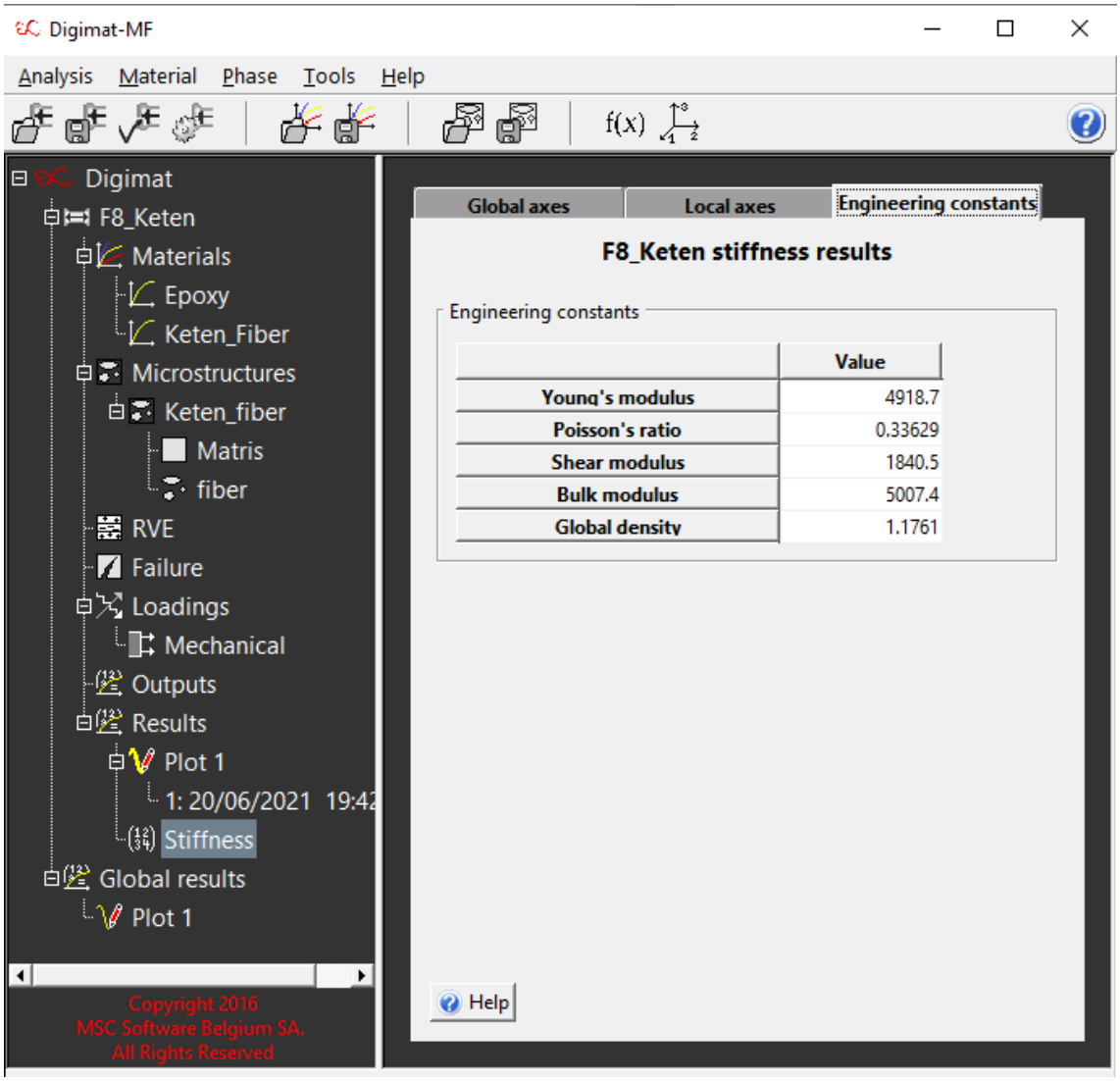


Şekil 4.10 Tanımlanan kompozit malzemenin gerilme - birim uzama grafiği

"Plot 1" sekmesindeki grafiği sorunsuz bir şekilde elde ettikten sonra "Stiffness" sekmesinden malzemeye ait Şekil 4.11'de görülen rijitlik matrisine ve Şekil 4.12'de görülen malzeme değerlerine ulaşılabilir. Bu değerler çalışmanın ilerleyen kısmındaki analiz ve hesaplamalar için kullanılacaktır.



Şekil 4.11 Kompozit için MF modülü tarafından hesaplanan rijitlik matrisi



Şekil 4.12 Kompozit için MF modülü tarafından hesaplanan malzeme sabitleri

5
DİGİMAT İLE KOMPOZİT MALZEME MODELLENMESİ

Daha önceki kısımlarda da bahsedildiği gibi kompozit malzemeler en az iki farklı bileşenden oluştuğundan herhangi bir FEA yazılımına aktarmadan önce bu malzeme bileşenlerinden meydana gelen kompozit malzemenin analiz ortamında doğru bir şekilde yaratılması gerekmektedir. Günümüzde bu malzemelerle ilgili FEA yazılımlarının oldukça geniş kütüphaneleri mevcuttur. Ancak söz konusu kompozitler ve özellikle de doğal fiberli kompozitler olduğunda bu yelpaze biraz daha daralmaktadır. Son yıllarda gelişen doğal fiberli kompozitlere paralel olarak bu konudaki FEA açığını da Digimat yazılımının doldurmaya çalıştığı görülmektedir. Literatürdeki pratik uygulamalara da bakıldığında Digimat yazılımının bu konuda gerçeğe oldukça yakın sonuç veren çalışmalara imza attığı da görülmektedir. Bu çalışmadaki modelleme aşamasında da Digimat yazılımından faydalanılmıştır.

Bu çalışma kapsamında fiber olarak farklı oranlarda ve ayrı numunelerde muz lifi, cam elyaf, kenaf ve keten, matris olarak da epoksi içeren doğal fiberli kompozitlerin modellemesi gerçekleştirilmiştir.

Ağırlık oranı olarak %8, %12, %16 ve %20 muz lifi, cam elyaf, kenaf ve keten fiber oranlı malzemelerin modellenmesi incelenmiştir. Bunun için Digimat yazılımının MF ve FE modülleri kullanılmıştır.

5.1. Matris ve Fiber Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması

Elde edilecek olan kompozit malzemenin nihai özelliklerinin Digimat içerisinde belirlenebilmesi için bilinen bileşen özelliklerinin tanımlanması gerekmektedir. Bunun için Digimat yazılımı içinde muz lifi, cam elyaf, kenaf, keten ve epoksi bileşenleri için mekanik malzeme özellikleri tanımlaması yapılmıştır.

Çalışmada kullanılan lifler boyları 5 mm, çapları 0,12 mm olacak şekilde modellenmiştir.

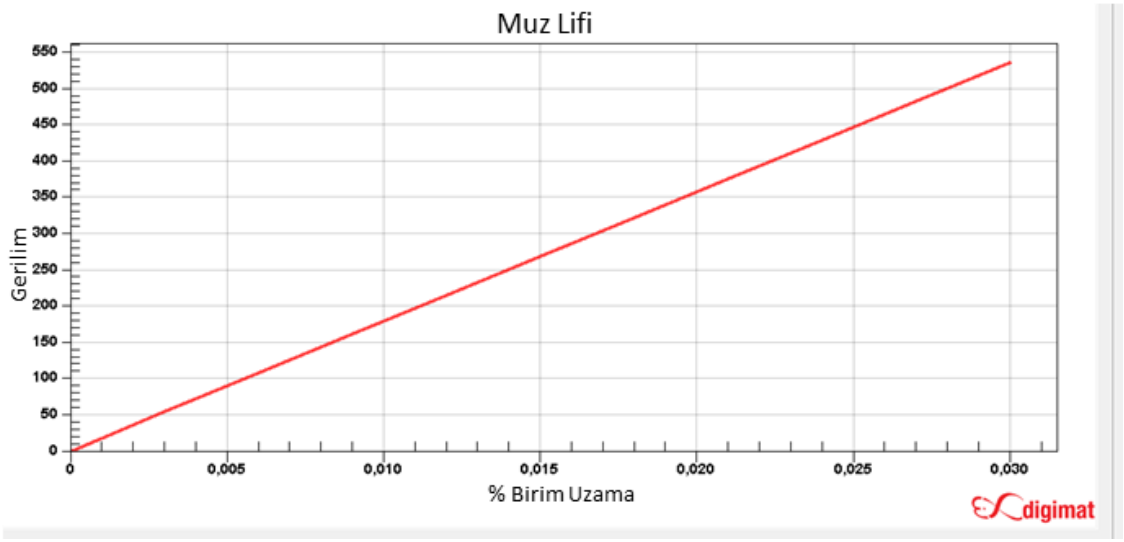
Literatürdeki birçok çalışmada sürekli düzenli lif takviyeli kompozitlerde takviye liflerin ve kompozitin anizotropik davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Lif yönlenme yapısı dolayısıyla böyle bir sonuç elde edilmesi de oldukça tabiidir. Bu çalışma özelinde kısa ve rastgele dağılımlı lif takviyeli kompozit incelemesi yapıldığından literatürdeki benzer çalışmalara da paralel olarak takviye malzemesi izotropik olarak kabul edilmiştir. Bu kabul hem çalışma süresince sonlu elemanlar analizlerinde hız kazandırmış hem de nihai durumda enjeksiyonla kolay üretilebilir rastgele kısa lif dağılımlı kompozitlerin mekanik davranışını göstermesi açısından da istenen sonuca daha uygundur.

Digimat yazılımına tanımlamada kullanılan muz lifi, cam elyaf, kenaf, keten ve epoksi malzemelerin mekanik özellikleri tablo 5.1'de özetlenmiştir.

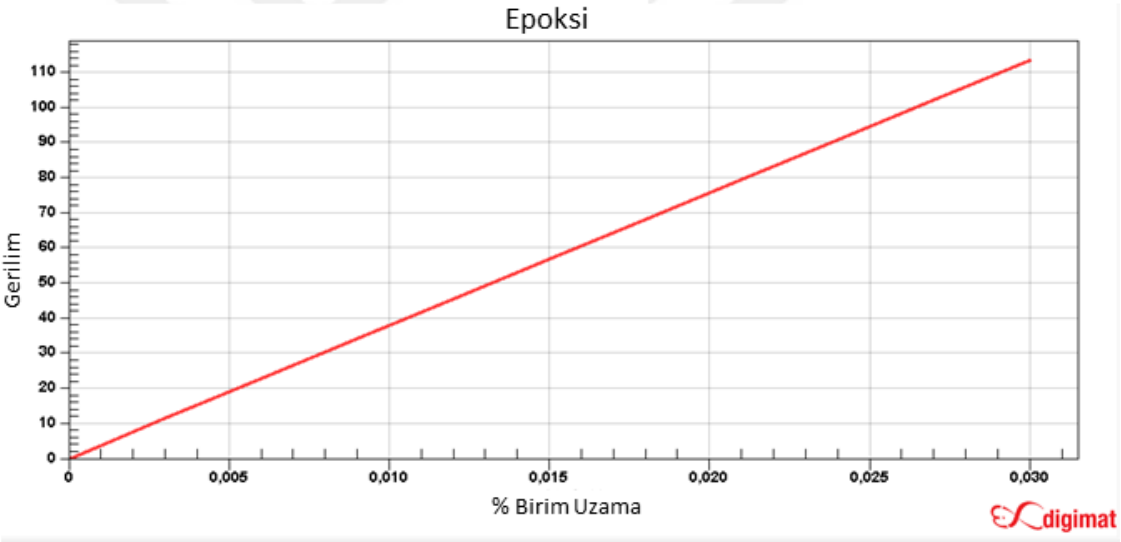
Tablo 5.1 Malzemeler için kullanılan değerler

	Yoğunluk (g/cm^3)	**Young Modülü (MPa)**	**Poisson Oranı**
Epoksi	1,16	3780	0,35
Muz Lifi	1,35	17850	0,3
Cam elyaf	2,5	90000	0,22
Kenaf	1,2	53000	0,3
Keten	1,4	80000	0,32

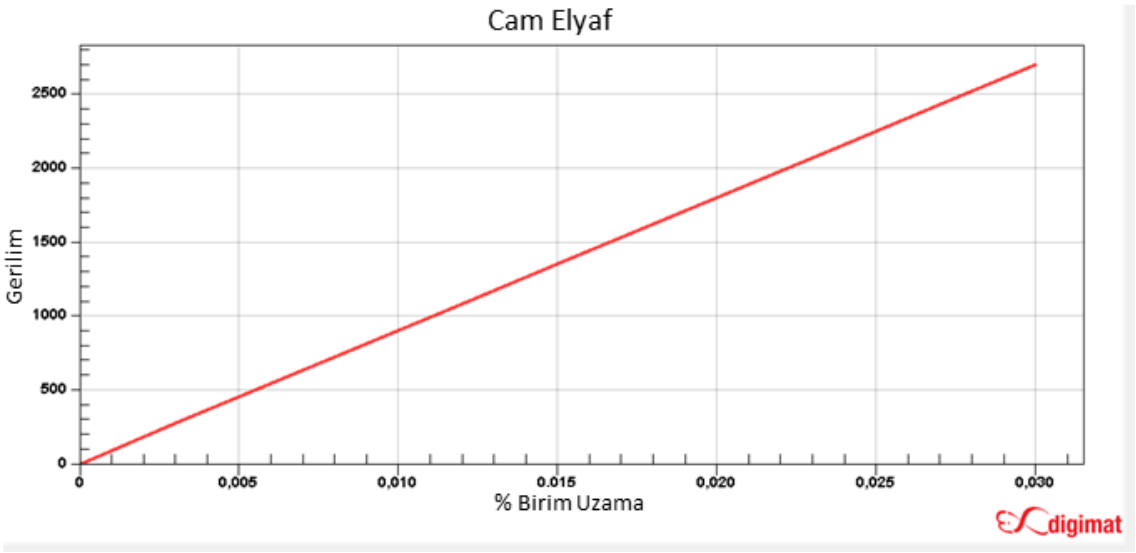
Digimat içerisinde tanımlanan malzemelerin gerilme – birim uzama grafikleri Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te görülmektedir.



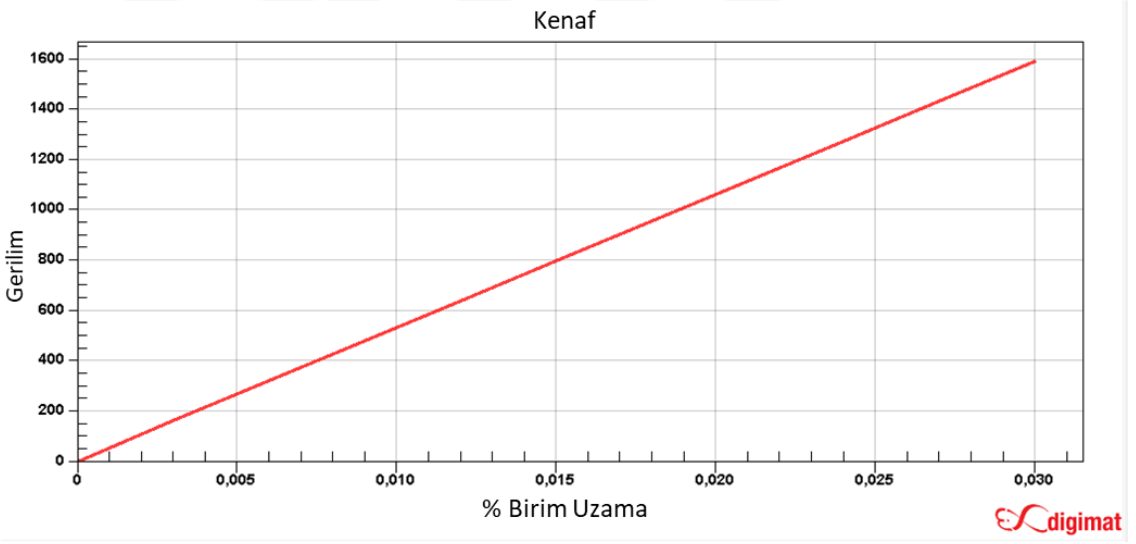
Şekil 5.1 Digimat muz lifi gerilme-birim uzama grafiği



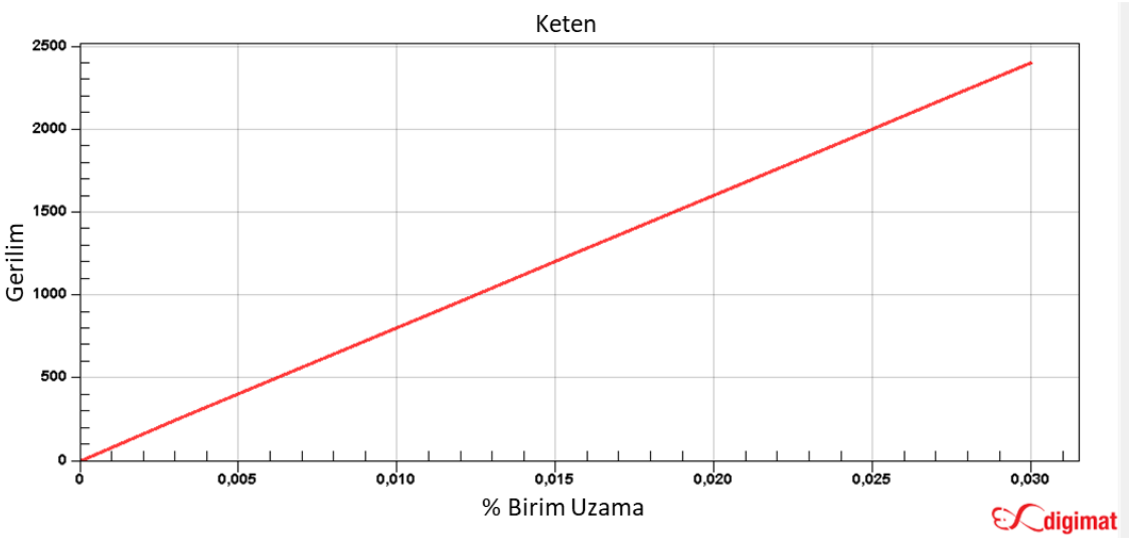
Şekil 5.2 Digimat epoksi gerilme - birim uzama grafiği



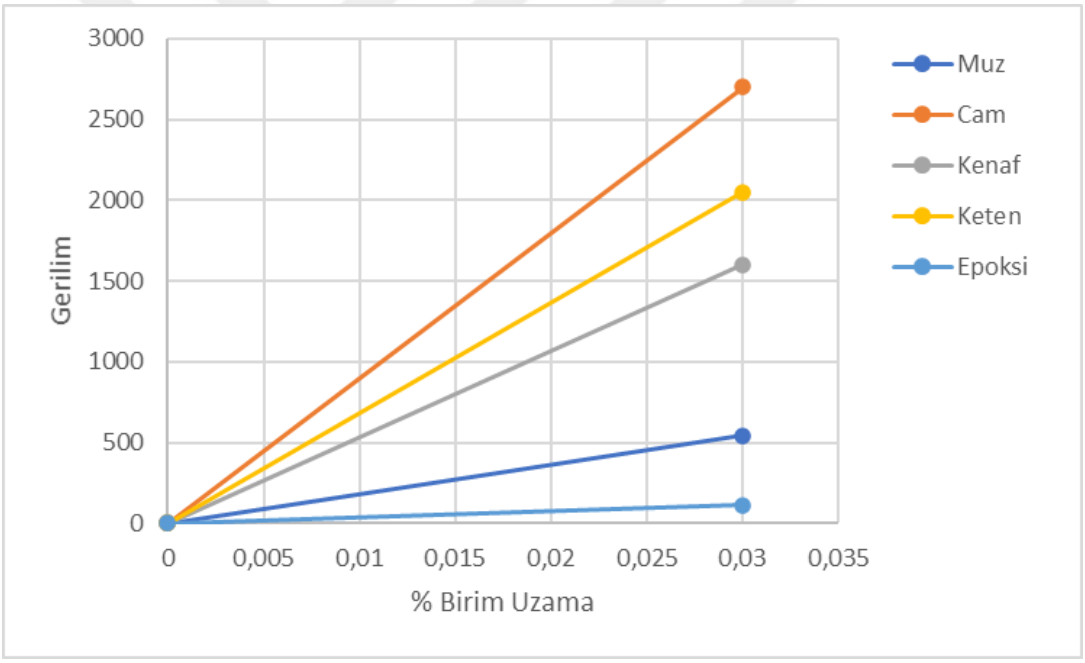
Şekil 5.3 Digimat cam elyaf gerilme - birim uzama grafiği



Şekil 5.4 Digimat kenaf gerilme - birim uzama grafiği



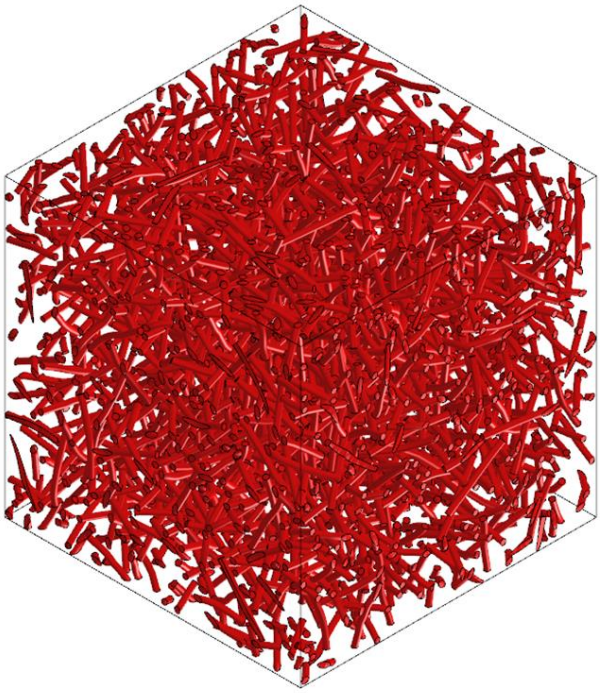
Şekil 5.5 Digimat keten gerilme - birim uzama grafiği



Şekil 5.6 Malzemelerin gerilme - birim uzama karşılaştırması

5.2. Farklı Kütlesel Oranlarda Takviye içeren Kompozit Modellemesi:

Digimat yazılımı hem diğer FEA yazılımları için Ortalama Alan Homojenizasyonu yöntemi ile eşdeğer malzeme bilgisi sağlarken aynı zamanda da kompozitin gerçek durumunu simüle eden RVE (Temsili hacim elemanı) verisi de oluşturabilmektedir. Bu çalışma içerisinde her ne kadar Ortalama Alan Homojenizasyonu verisi kullanılmış olsa da kompozitin final durumunu gösteren RVE modeli de malzeme modelleme aşamasında çalışılmıştır. Şekil 5.7'de ağırlık olarak %8 fiber oranlı kompozit malzeme için RVE modeli gösterilmiştir. Digimat yazılımı kompozit modellemesinde oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. Kullanıcı istenen lif yönelimini bu modül içerisinde istediği gibi programlayabilmektedir. Bu sayede farklı dizilim ve yerleşimin malzemenin son mekanik özelliklerine olan etkisini analiz etmek mümkün olmaktadır. Digimat FE modülü belirtilen kütlesel veya hacimsel oranda belirtilen açıda lif yerleşimini simüle etmede oldukça yeterli ve kesin sonuçlar vermektedir; ancak söz konusu model rastgele lif dağılımlı kompozit için oluşturulmak istendiğinde bazı zorluklar gözlemlenmiştir. Temsili birim hacim eleman oluştururken belirlenen kesit içerisine lif elemanlar tek tek iteratif olarak yerleştirilerek hedeflenen hacim oranı yakalanmaya çalışılır. Bu lif elemanlar yerleştirilirken yazılım daha önce yerleştirilen lifler ile izin verilen koşullarda yakınlık/temas ilişkisini kontrol eder. Eğer isterler sağlanamıyorsa iterasyon devam ederek ideal koşullar sağlanana kadar bu aşamalar tekrarlanır. Rastgele lif dağılımının rastgelelik doğası gereği liflerin kesişmesi ihtimali daha yüksektir. Bu nedenle yönlenmiş lif yapısında hacimsel oranda %80 seviyelerinde kompozit model oluşturulabilirken rastgele lif yapısında en fazla yaklaşık %1 civarı hacimsel oranda temsili birim eleman oluşturmak mümkün olabilmektedir. Bu hacimsel orandaki model için bile hesaplama süreleri yönlendirilmiş lifler için olan sürelerden birkaç kat daha uzun olmaktadır. Çalışma süresince bu zorluklar da deneyimlenmiştir.



Şekil 5.7 %8 Kütlesel fiber oranlı kompozitin temsili hacim elemanı görseli

5.2.1. Hooke Kanunu

Hooke kanunu adını İngiliz fizikçi Robert Hooke'tan alan ve malzemelerin gerilme-uzama grafiğinde elastik bölgedeki davranışını açıklayan eşitliktir. Robert Hooke bu eşitliği 17 yy.'da ortaya atmıştır. Temel olarak bir yaya etkiyen kuvvetin, yayın özellikleri doğrultusunda ortaya çıkardığı uzama miktarını ifade etmektedir. Katı cisimler mekaniğinde de her malzeme temelde belirli rijitliğe sahip yay davranışı göstermektedir. Malzemelerin elastik bölgede kalan davranışları için bu eşitlik kullanılabilmektedir.

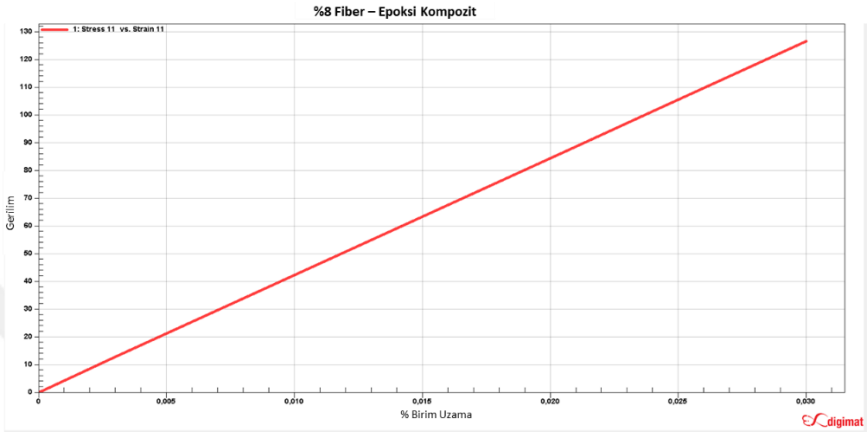
$$F = k.x \tag{5.1}$$

Burada F cisme uygulanan kuvveti, k yayın esneklik katsayısını ve x de uzama miktarını ifade etmektedir. Unutulmamalıdır ki Hooke'un bu yaklaşımı cisimlerin elastik davranışına birinci dereceden bir yaklaşımdır. Hiçbir cisim belirli bir hacimden daha küçük bir hacime sıkıştırılamayacağından veya deformasyon görülmeden belirli bir boydan daha fazla uzatılamayacağından kuvvetler malzeme için belirli bir sınırı aştığında gerçek durumdan sapma görülecektir. Yine de günümüz esneklik teorisi malzemelerin kendine uygulanan gerilim doğrultusundan meydana gelen gerinimi genelleştirerek kullanımına devam etmektedir. Bu gerinim birden fazla bağımsız parametreye bağlı olacağından rijitliği ifade eden bir sayı yerine bir matris kullanılmaktadır. Matrisin genel gösterimi Denklem 5.2'de görülmektedir. Bu matris de malzemelerin rijitlik matrisi olarak isimlendirilmektedir.

$$\begin{bmatrix}\sigma_{xx}\\ \sigma_{yy}\\ \sigma_{zz}\\ \sigma_{yz}\\ \sigma_{zx}\\ \sigma_{xy}\end{bmatrix} = \frac{E}{(1+v)(1-2v)}\begin{bmatrix}1-v & v & v & 0 & 0 & 0\\ v & 1-v & v & 0 & 0 & 0\\ v & v & 1-v & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1-2v & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2v & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2v\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_{xx}\\ \varepsilon_{yy}\\ \varepsilon_{zz}\\ \varepsilon_{yz}\\ \varepsilon_{zx}\\ \varepsilon_{xy}\end{bmatrix} \tag{5.2}$$

5.2.2. Kütlece %8 Muz Lifi – Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi

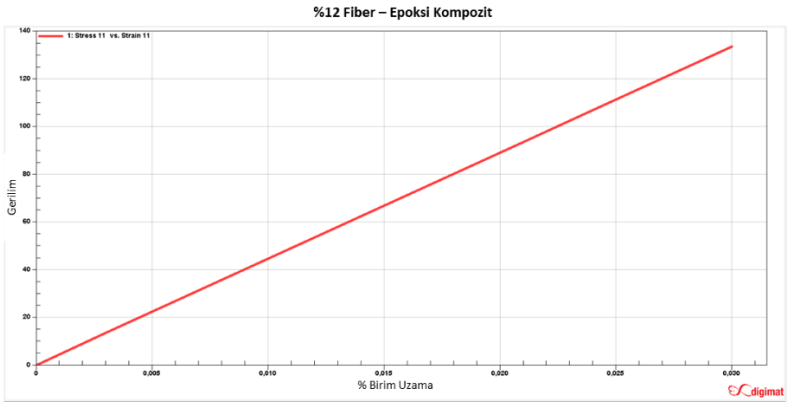
$$k_{0,08} = \begin{bmatrix} 6614,9 & 3478,3 & 3478,3 & 0 & 0 & 0 \\ 3478,3 & 6614,9 & 3478,3 & 0 & 0 & 0 \\ 3478,3 & 3478,3 & 6614,9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1568,3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1568,3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1568,3 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$



Şekil 5.8 %8 muz lifi - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği

5.2.3. Kütlece %12 Muz Lifi – Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi

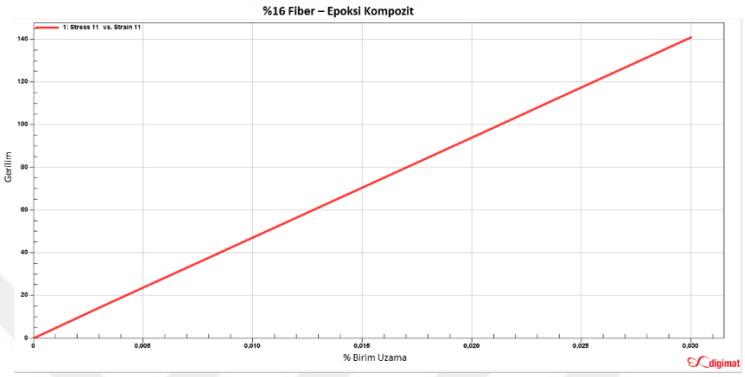
$$k_{0,12} = \begin{bmatrix} 6907,8 & 3591,6 & 3591,6 & 0 & 0 & 0 \\ 3591,6 & 6907,8 & 3591,6 & 0 & 0 & 0 \\ 3591,6 & 3591,6 & 6907,8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1658,1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1658,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1658,1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$



Şekil 5.9 %12 muz lifi - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği

5.2.4. Kütlece %16 Muz Lifi - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi

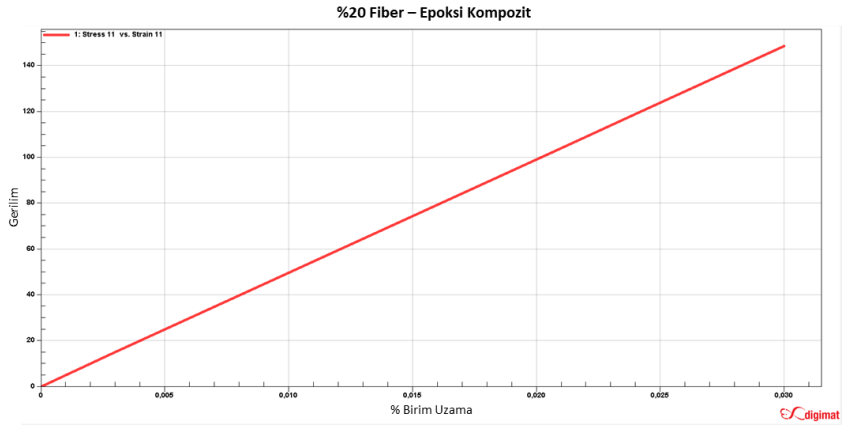
$$k_{0,16} = \begin{bmatrix} 7214,8 & 3710,6 & 3710,6 & 0 & 0 & 0 \\ 3710,6 & 7214,8 & 3710,6 & 0 & 0 & 0 \\ 3710,6 & 3710,6 & 7214,8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1752,1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1752,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1752,1 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$



Şekil 5.10 %16 muz lifi - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği

5.2.5. Kütlece %20 Muz Lifi - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi

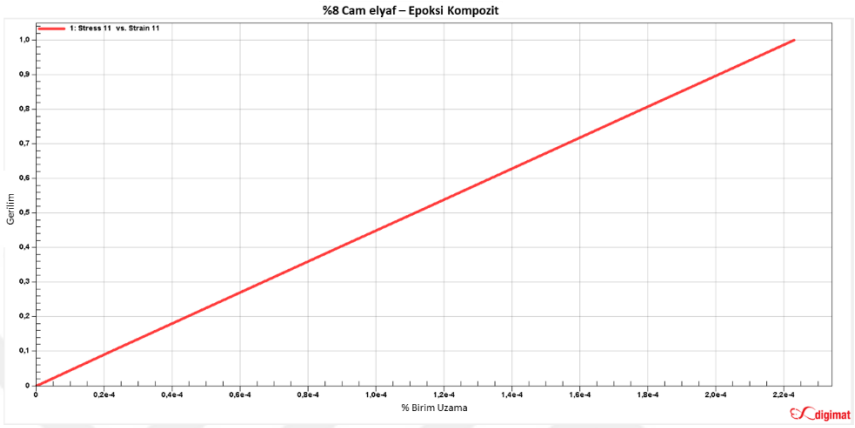
$$k_{0,20} = \begin{bmatrix} 7537,1 & 3835,8 & 3835,8 & 0 & 0 & 0 \\ 3835,8 & 7537,1 & 3835,8 & 0 & 0 & 0 \\ 3835,8 & 3835,8 & 7537,1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1850,7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1850,7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1850,7 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$



Şekil 5.11 %20 muz lifi - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği

5.2.6. Kütlece %8 Cam Elyaf - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi

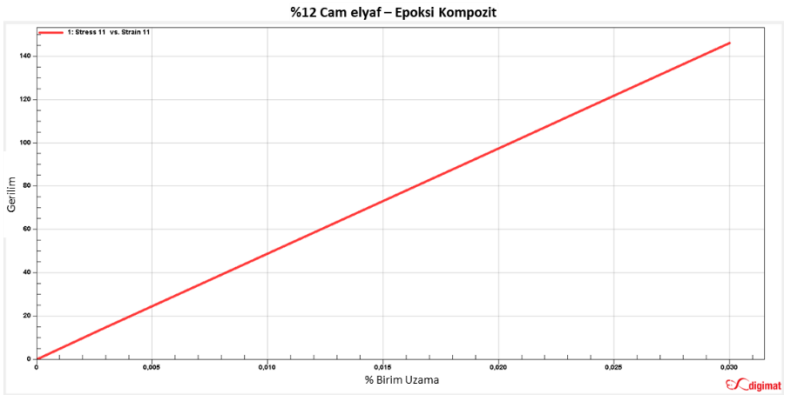
$$k_{0,08} = \begin{bmatrix} 6902,9 & 3555,3 & 3555,3 & 0 & 0 & 0 \\ 3555,3 & 6902,9 & 3710,6 & 0 & 0 & 0 \\ 3555,3 & 3555,3 & 6902,9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1673,8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1673,8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1673,8 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$



Şekil 5.12 %8 cam elyaf - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği

5.2.7. Kütlece %12 Cam Elyaf - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi

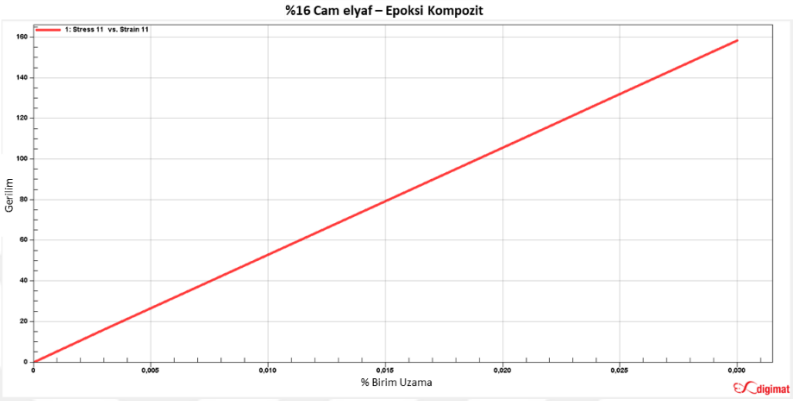
$$k_{0,12} = \begin{bmatrix} 7360 & 3713,1 & 3713,1 & 0 & 0 & 0 \\ 3713,1 & 7360 & 3713,1 & 0 & 0 & 0 \\ 3713,1 & 3713,1 & 7360 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1823,4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1823,4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1823,4 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$



Şekil 5.13 %12 cam elyaf - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği

5.2.8. Kütlece %16 Cam Elyaf - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi

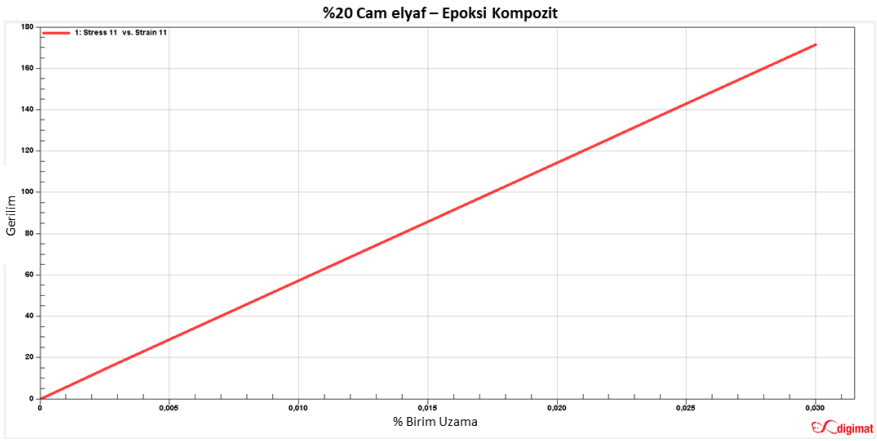
$$k_{0,16} = \begin{bmatrix} 7846,8 & 3881,2 & 3881,2 & 0 & 0 & 0 \\ 3881,2 & 7846,8 & 3881,2 & 0 & 0 & 0 \\ 3881,2 & 3881,2 & 7846,8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1982,8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1982,8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1982,8 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$



Şekil 5.14 %16 cam elyaf - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği

5.2.9. Kütlece %20 Cam Elyaf - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi

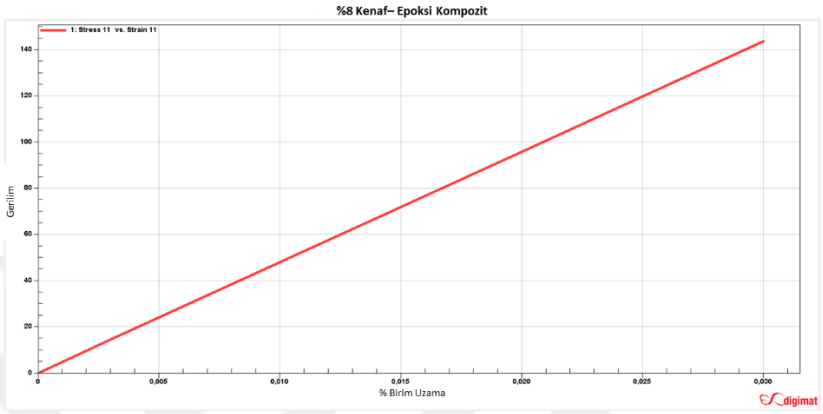
$$k_{0,20} = \begin{bmatrix} 8366,5 & 4060,5 & 4060,5 & 0 & 0 & 0 \\ 4060,5 & 8366,5 & 4060,5 & 0 & 0 & 0 \\ 4060,5 & 4060,5 & 8366,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2153 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2153 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2153 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$



Şekil 5.15 %20 cam elyaf - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği

5.2.10. Kütlece %8 Kenaf - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi

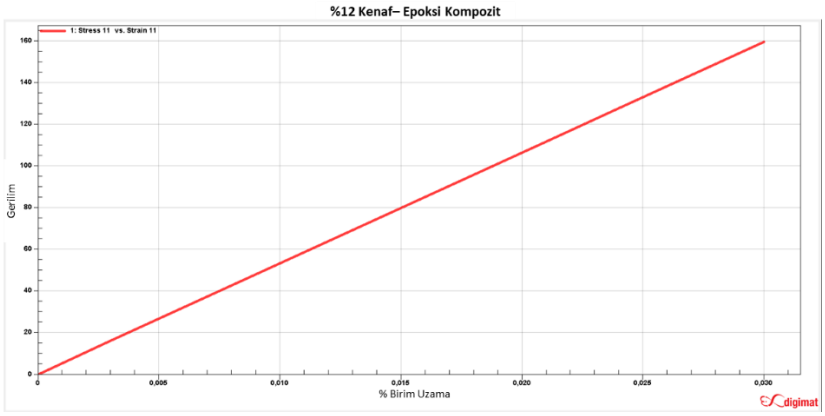
$$k_{0,08} = \begin{bmatrix} 7312,3 & 3734,7 & 3734,7 & 0 & 0 & 0 \\ 3734,7 & 7312,3 & 3734,7 & 0 & 0 & 0 \\ 3734,7 & 3734,7 & 7312,3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1788,8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1788,8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1788,8 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$



Şekil 5.16 %8 kenaf - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği

5.2.11. Kütlece %12 Kenaf - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi

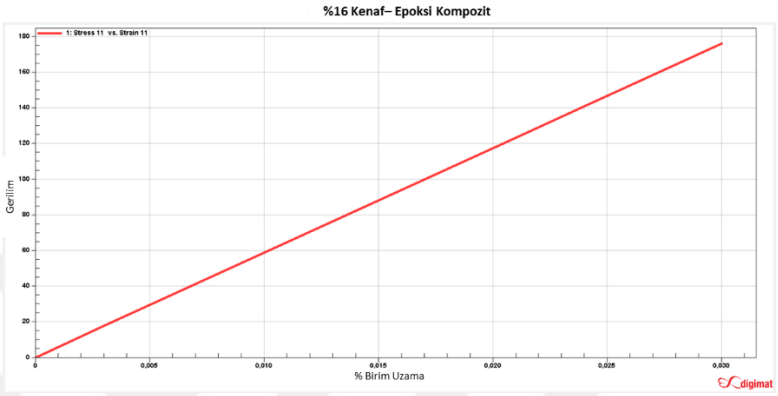
$$k_{0,12} = \begin{bmatrix} 7972 & 3984 & 3984 & 0 & 0 & 0 \\ 3984 & 7972 & 3984 & 0 & 0 & 0 \\ 3984 & 3984 & 7972 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1994 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1994 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1994 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$



Şekil 5.17 %12 kenaf - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği

5.2.12. Kütlece %16 Kenaf - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi

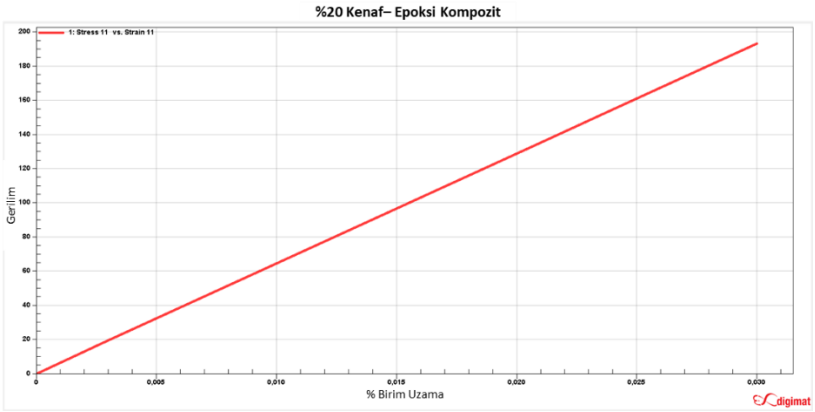
$$k_{0,16} = \begin{bmatrix} 8659,9 & 4245,1 & 4245,1 & 0 & 0 & 0 \\ 4245,1 & 8659,9 & 4245,1 & 0 & 0 & 0 \\ 4245,1 & 4245,1 & 8659,9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2207,4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2207,4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2207,4 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$



Şekil 5.18 %16 kenaf - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği

5.2.13. Kütlece %20 Kenaf - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi

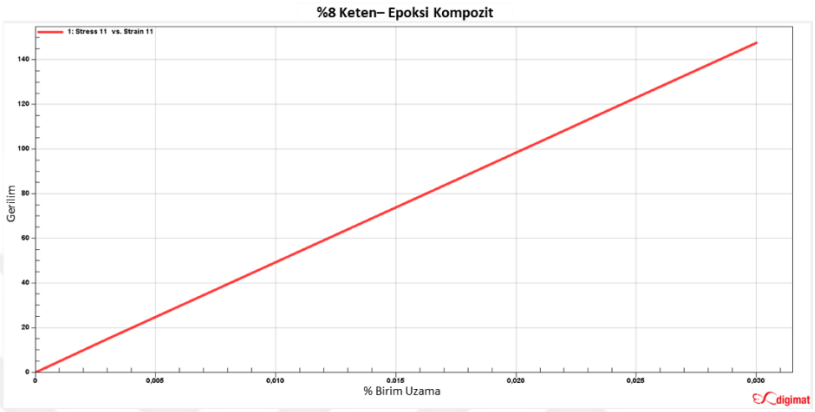
$$k_{0,20} = \begin{bmatrix} 9379,3 & 4519,4 & 4519,4 & 0 & 0 & 0 \\ 4519,4 & 9379,3 & 4519,4 & 0 & 0 & 0 \\ 4519,4 & 4519,4 & 9379,3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2429,9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2429,9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2429,9 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$



Şekil 5.19 %20 kenaf - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği

5.2.14. Kütlece %8 Keten - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi

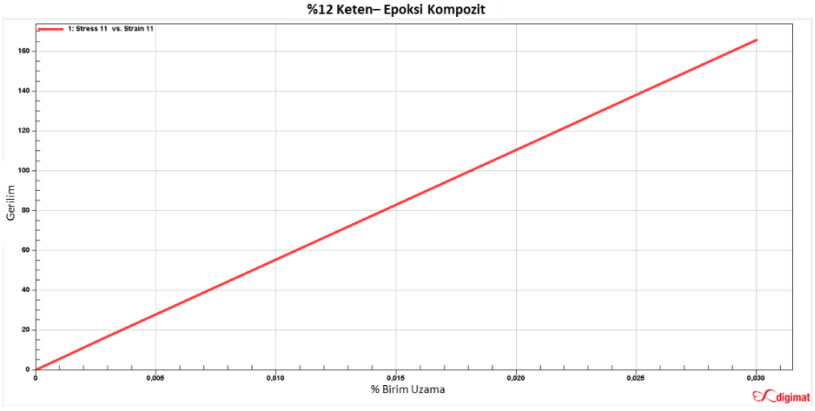
$$k_{0,08} = \begin{bmatrix} 7461,4 & 3780,5 & 3780,5 & 0 & 0 & 0 \\ 3780,5 & 7461,4 & 3780,5 & 0 & 0 & 0 \\ 3780,5 & 3780,5 & 7461,4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1840,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1840,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1840,5 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$



Şekil 5.20 %8 keten - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği

5.2.15. Kütlece %12 Keten - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi

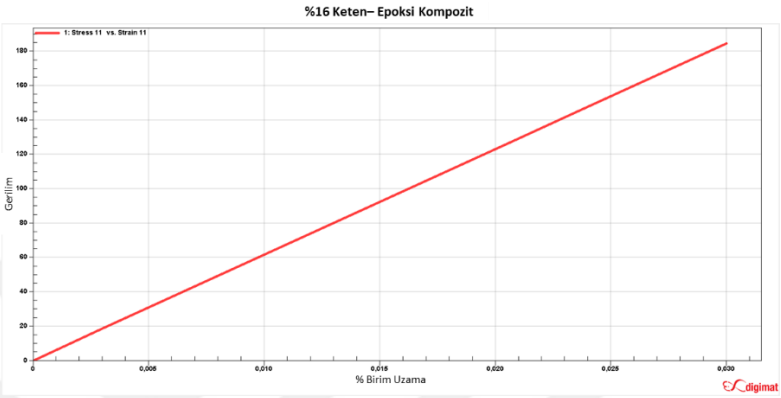
$$k_{0,12} = \begin{bmatrix} 8204,7 & 4055,7 & 4055,7 & 0 & 0 & 0 \\ 4055,7 & 8204,7 & 4055,7 & 0 & 0 & 0 \\ 4055,7 & 4055,7 & 8204,7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2074,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2074,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2074,5 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$



Şekil 5.21 %12 keten - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği

5.2.16. Kütlece %16 Keten - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi

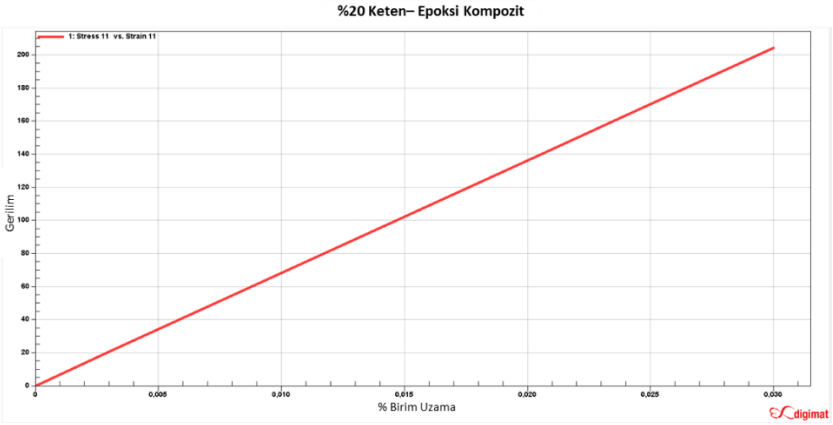
$$k_{0,16} = \begin{bmatrix} 8982,7 & 4344,8 & 4344,8 & 0 & 0 & 0 \\ 4344,8 & 8982,7 & 4344,8 & 0 & 0 & 0 \\ 4344,8 & 3710,6 & 8982,7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2319 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2319 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2319 \end{bmatrix} \quad (5.17)$$



Şekil 5.22 %16 keten - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği

5.2.17. Kütlece %20 Keten - Epoksi Kompozit Rijitlik Matrisi

$$k_{0,20} = \begin{bmatrix} 9799,1 & 4649,3 & 4649,3 & 0 & 0 & 0 \\ 4649,3 & 9799,1 & 4649,3 & 0 & 0 & 0 \\ 4649,3 & 4649,3 & 9799,1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2574,9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2574,9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2574,9 \end{bmatrix} \quad (5.18)$$



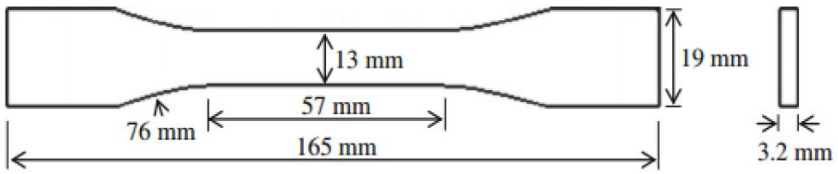
Şekil 5.23 %20 keten - epoksi numunesi gerilim - uzama grafiği

6
STATİK ANALİZ VE YORULMA

6.1. Statik Çekme Testi Analizi

Malzemenin mekanik özelliklerinin tespiti için yapılan standart teslerin en basında çekme testi gelmektedir. Çekme testi ile malzemenin Elastiklik modülü değerine ulaşılırken malzeme kapasitesi üzerinde çekme kuvveti uygulanarak da malzemenin maksimum gerilme dayanımı grafiği elde edilebilir. Literatürde çok çeşitli kütlesel oranlarda ve farklı özelliklerde doğal lif katkılı epoksi kompozit için yapılan mekanik testler mevcuttur. Bu çalışmada uygulanan takviyeler için homojen bir karşılaştırma yapabilmek adına teorik yöntemler üzerinden hesaplamalar yapılmıştır.

Analizlerde ASTM D638 standart çekme testi numunesi kullanılmıştır. Standarttaki numune ölçüleri Şekil 6.1'de görülmektedir.



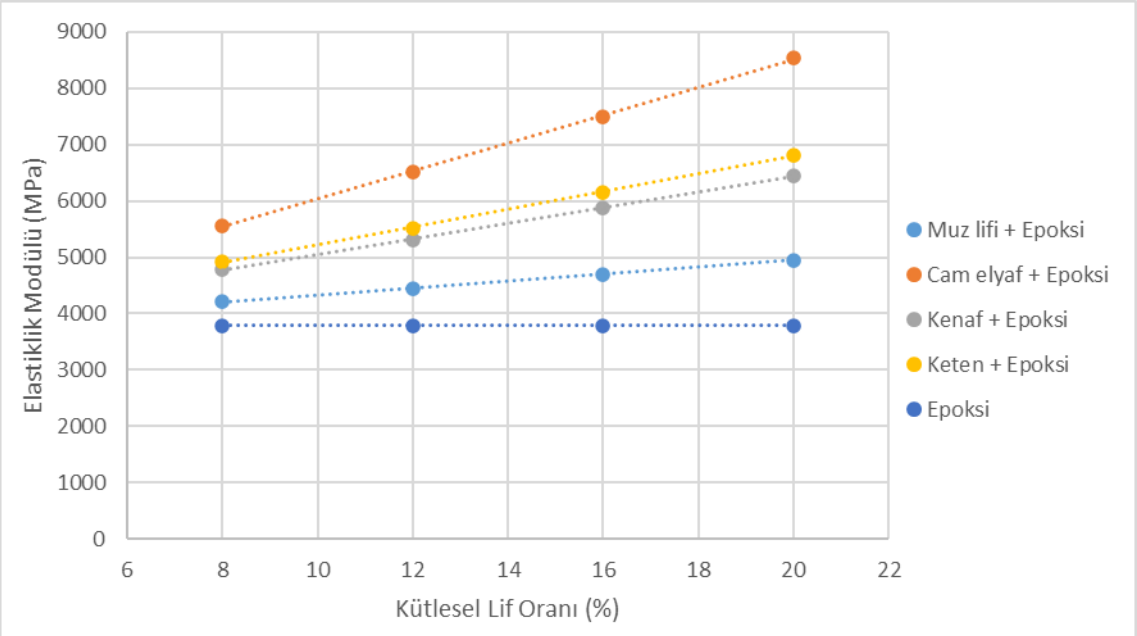
Şekil 6.1 ASTM D638'e göre standart çekme testi numunesi

Tablo 6.1'de analizi yapılan kütlece %8, %12, %16 ve %20 kısa muz lifi, cam elyaf, kenaf ve keten içeren epoksi kompozit malzemenin Digimat yazılımı MF modülü ile hesaplanan mekanik özellikleri verilmiştir.

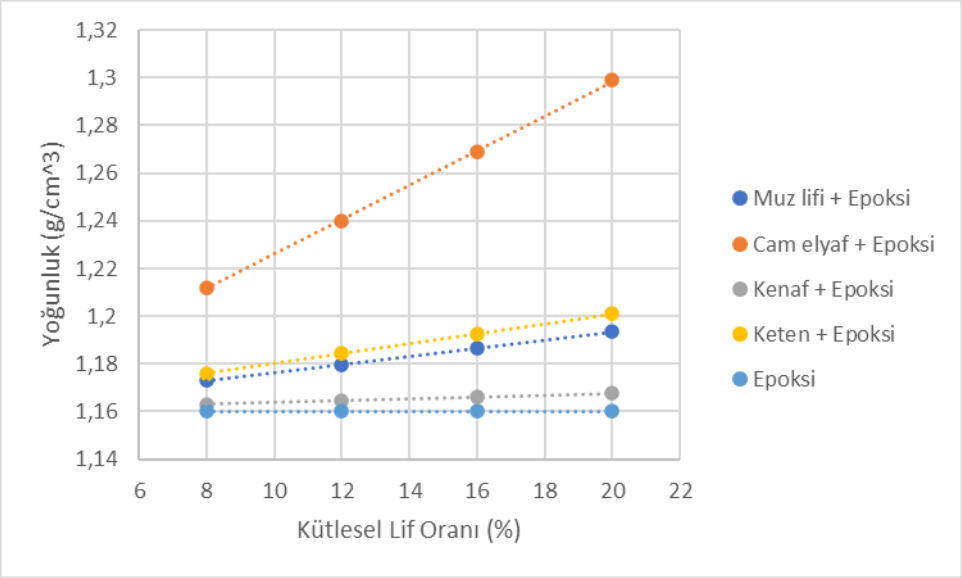
Tablo 6.1 Kompozit numuneler için Digimat MF modülü ile hesaplanan değerler

	Muz lifi + Epoksi				Cam elyaf + Epoksi				Kenaf + Epoksi				Keten + Epoksi			
% Lif Oranı	**%8**	**%12**	**%16**	**%20**	**%8**	**%12**	**%16**	**%20**	**%8**	**%12**	**%16**	**%20**	**%8**	**%12**	**%16**	**%20**
Yoğunluk (g/cm^3)	1,1732	1,1799	1,1867	1,1936	1,212	1,240	1,269	1,299	1,1631	1,1647	1,1662	1,1678	1,1761	1,1844	1,1927	1,2012
Elastiklik Modülü (MPa)	4217,5	4450,6	4694,3	4949,7	5563,1	6523,2	7483,3	8534,9	4787,1	5316,9	5867,1	6440,2	4918,7	5521,5	6149,9	6807
Poisson Oranı	0,35	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,33	0,33	0,34	0,33	0,33	0,33	0,34	0,33	0,33	0,32
Kayma Modülü (MPa)	1568,3	1658,1	1752,1	1850,7	2075,8	2442,5	2811,3	3216,5	1788,8	1994	2207,4	2429,9	1840,5	2074,5	2319	2574,9
Basma Modülü(MPa)	4523,8	4697	4878,7	5069,5	5793,4	6602,3	7376,9	8210,6	4927,2	5313,3	5716,7	6139,4	5007,4	5438,7	5890,7	6365,9

Numunelerin hesaplanan elastiklik modülü karşılaştırması Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.2 Numunelerin elastiklik modülü karşılaştırması



Şekil 6.3 Numunelerin yoğunluk karşılaştırması

6.1.1. Kompozit Malzemenin Gerilme Dayanımının Hesaplanması

Kompozit malzemenin bileşenlerinin mekanik özelliklerinden yola çıkarak maksimum gerilme dayanımının teorik olarak hesaplanması için literatürde bir çok yöntem ortaya atılmıştır. Bu yöntemlerden bazıları Elastiklik modülünün hesaplanmasında kullanılan yöntemlerin, maksimum gerilmeye uyarlanmış hali olmakla birlikte çok daha kompleks teoriler de çalışılmıştır. [24] Tüm bu teorilerin baz aldığı bazı varsayımlar mevcut olmaktadır. Bu varsayımlardan ilki tüm liflerin aynı çekme dayanımına sahip olduğu, ikincisi ise matris ve lif birleşiminin ideal koşullarda ve süreklilikte olduğudur.

Lif ve matris arasında kenetlenme, kayma, gerilim altında meydana gelen dislokasyonlar ve gerilim aktarımı gibi birçok kuvvet aktarım etkeni vardır. Tüm bu etkenlerin hesaba katıldığı tek bir formülizasyona indirgendiğinde Denklem 6.1 ile ifade edilen maksimum gerilme dayanımı denklemi elde edilir. [24]

$$\sigma_c = (1 - V_f)\sigma_m + \frac{V_f \sigma_f}{15}\left\{1 - \frac{d}{l}\left[(V_f^{-1/2} - 1)\frac{E_f}{G_m}\right]^{1/2}\right\} x \frac{4v^{5/2} + (3 - 2v)(1 + v)^{3/2}}{(1 + v)^{3/2}} \quad (6.1)$$

Denklemin kolay ve hatasız hesaplanabilmesi için Excel programı içerisinde formülize edilmiş, parametrelere bağlı olarak matematiksel işlemler otomatik olarak hesaplanmıştır.

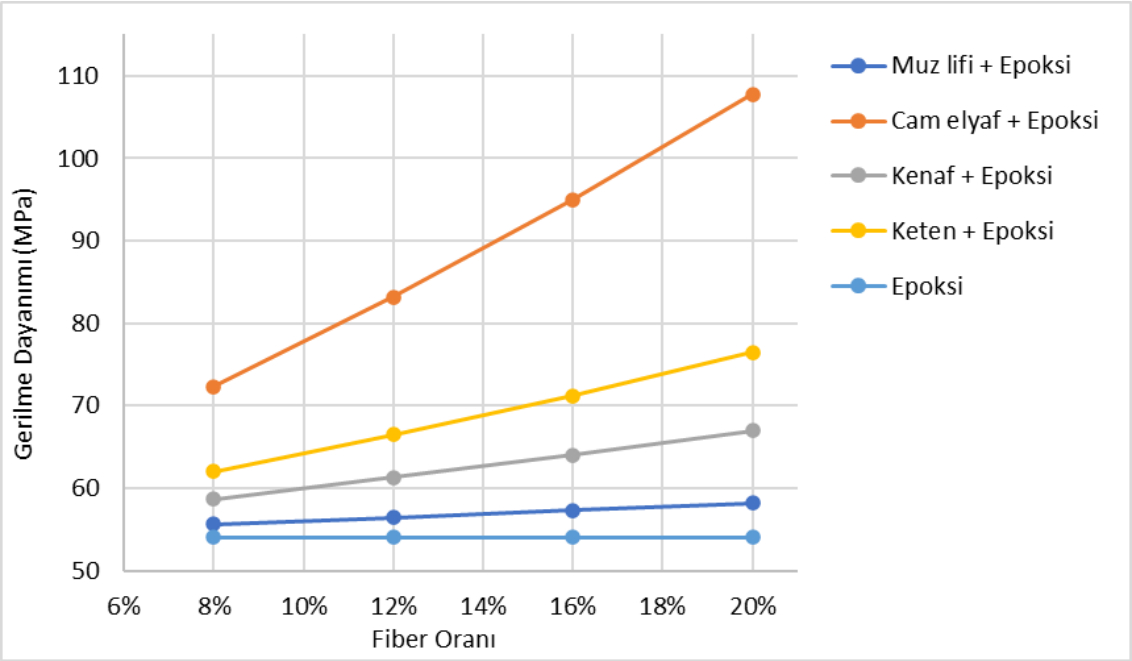
V_f	0,2
σ_f	1500
σ_m	54
d	0,12
l	5
E_f	80000
G_m	2575
v	0,3
σ_c	**80,64**

Şekil 6.4 Otomatik hesaplamalar için oluşturulan Excel tablosu

Bu denklem doğrultusunda hesaplamalar yapıldığında %8, %12, %16 ve %20 oranlarında takviye içeren malzemeler için teorik maksimum gerilme dayanımı Tablo 6.2'deki değerleri almaktadır.

Tablo 6.2 Kompozit numuneler için hesaplanan maksimum gerilme dayanımı

Gerilme Dayanımı (MPa)	Muz lifi + Epoksi	Cam elyaf + Epoksi	Kenaf + Epoksi	Keten + Epoksi
%8	55,6	72,3	58,7	62
%12	56,4	83,2	61,3	66,5
%16	57,3	95	64	71,2
%20	58,2	107,8	67	76,5



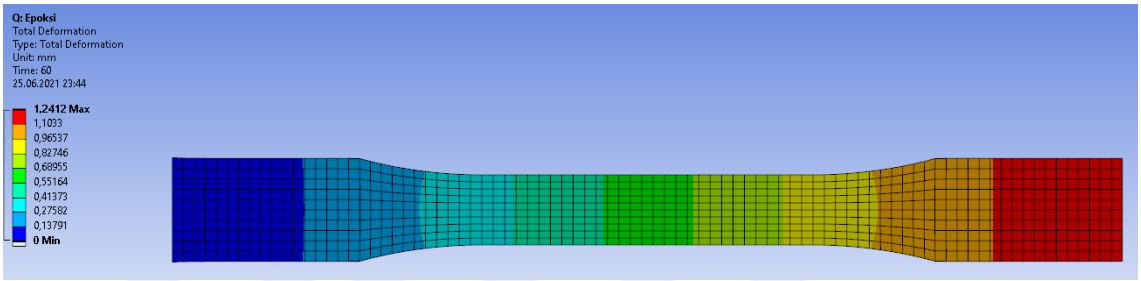
Şekil 6.5 Numunelerin gerilim dayanım değerleri karşılaştırması

6.2. Statik Birim Uzama Analizi

ANSYS ortamında her bir numuneye elastik koşullarda kalması için 1400 N büyüklüğünde bir kuvvet uygulandığında yapılan analiz sonucu uzama miktarları Şekil 6.6, 6.7, 6.8, 6.9 ve 6.10'da belirtilmiştir.

6.2.1. Saf Epoksi Numunesi Birim Uzama Analizi

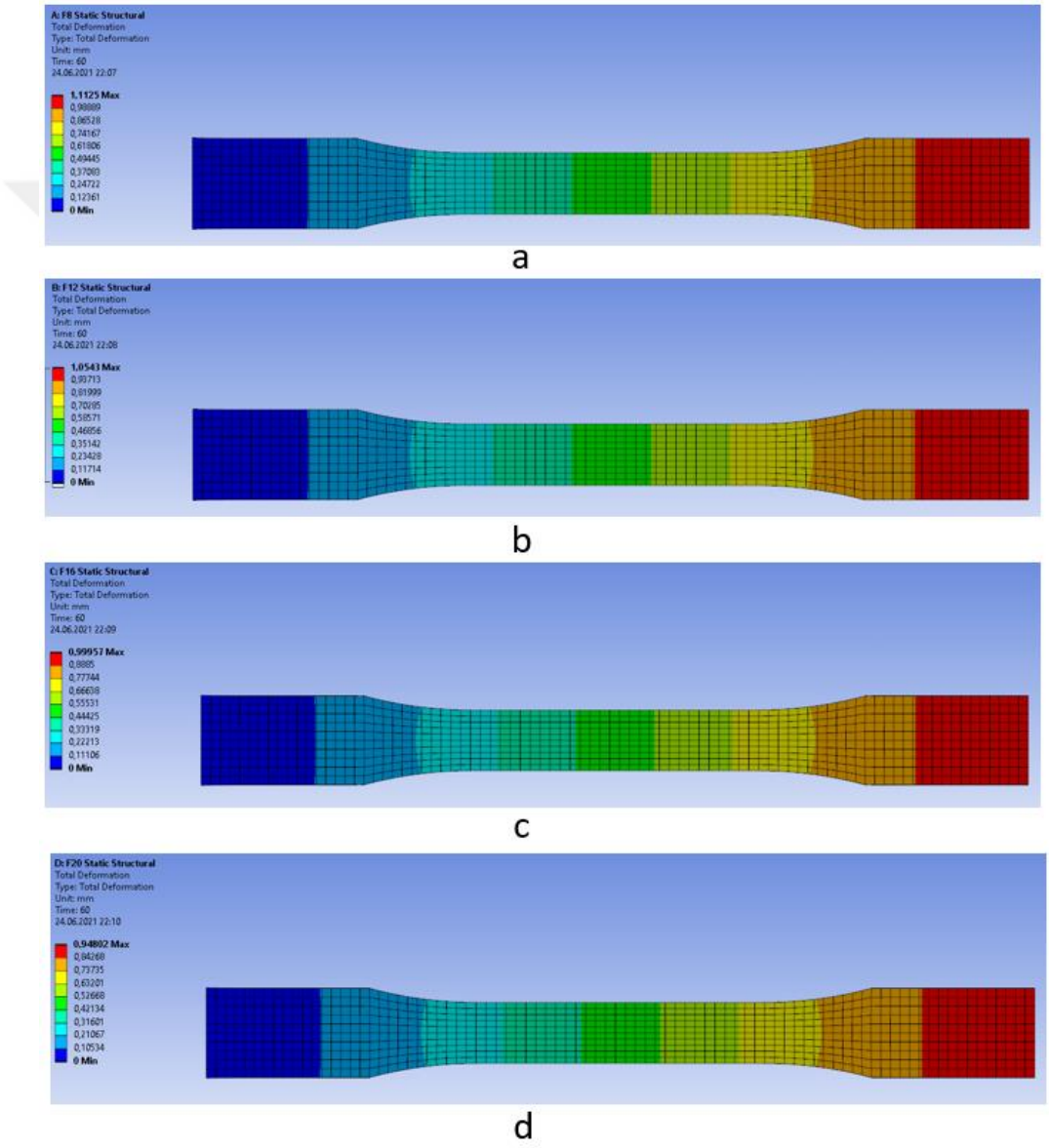
Saf epoksi numunesine kuvvet uygulaması sonrasında 1,24 mm uzama gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 6.6 Saf epoksi numunenin uzama miktarı

6.2.2. Muz Lifi – Epoksi Numunesi Birim Uzama Analizi

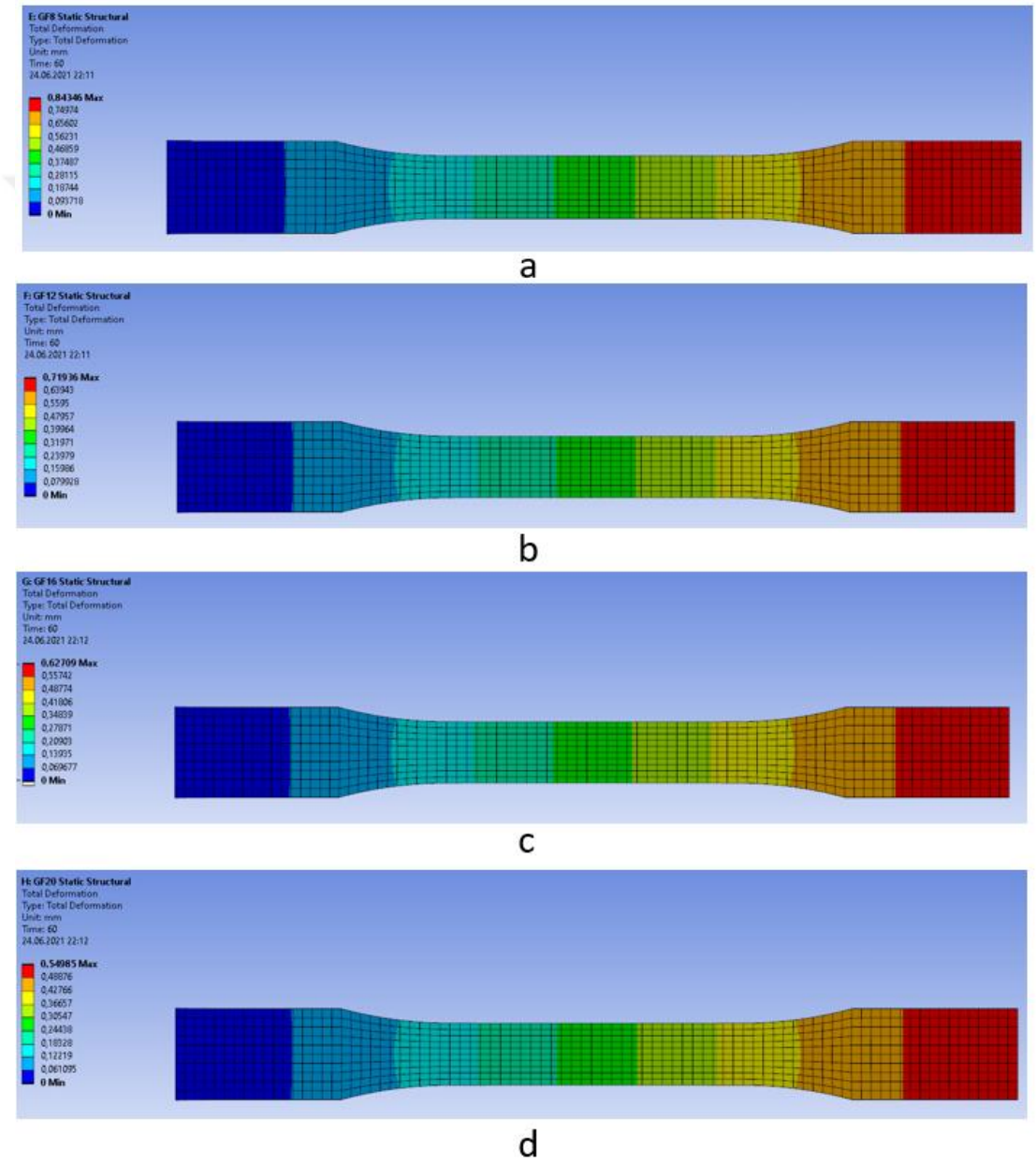
Numunelere kuvvet uygulanması sonrasında %8 muz lifi takviyesi içeren numunenin 1,11 mm uzadığı görülmüştür. %12 muz lifi takviyesi içeren numune için bu değer 1,05 mm'ye, %16 takviye içeren numune için 0,99 mm'ye, %20 takviye içeren numune için 0,95 mm'ye düşmektedir. Takviye oranı arttıkça numunelerin uzama miktarında azalma olduğu görülmektedir. %20 takviye ile %8 takviyeli numune kıyaslandığında uzama miktarında %14'lük bir iyileşme görülmektedir.



Şekil 6.7 Farklı oranlarda muz lifi içeren epoksi kompozitin uzama miktarı (a:%8, b:%12 c:%16 d:%20)

6.2.3. Cam elyaf – Epoksi Numunesi Birim Uzama Analizi

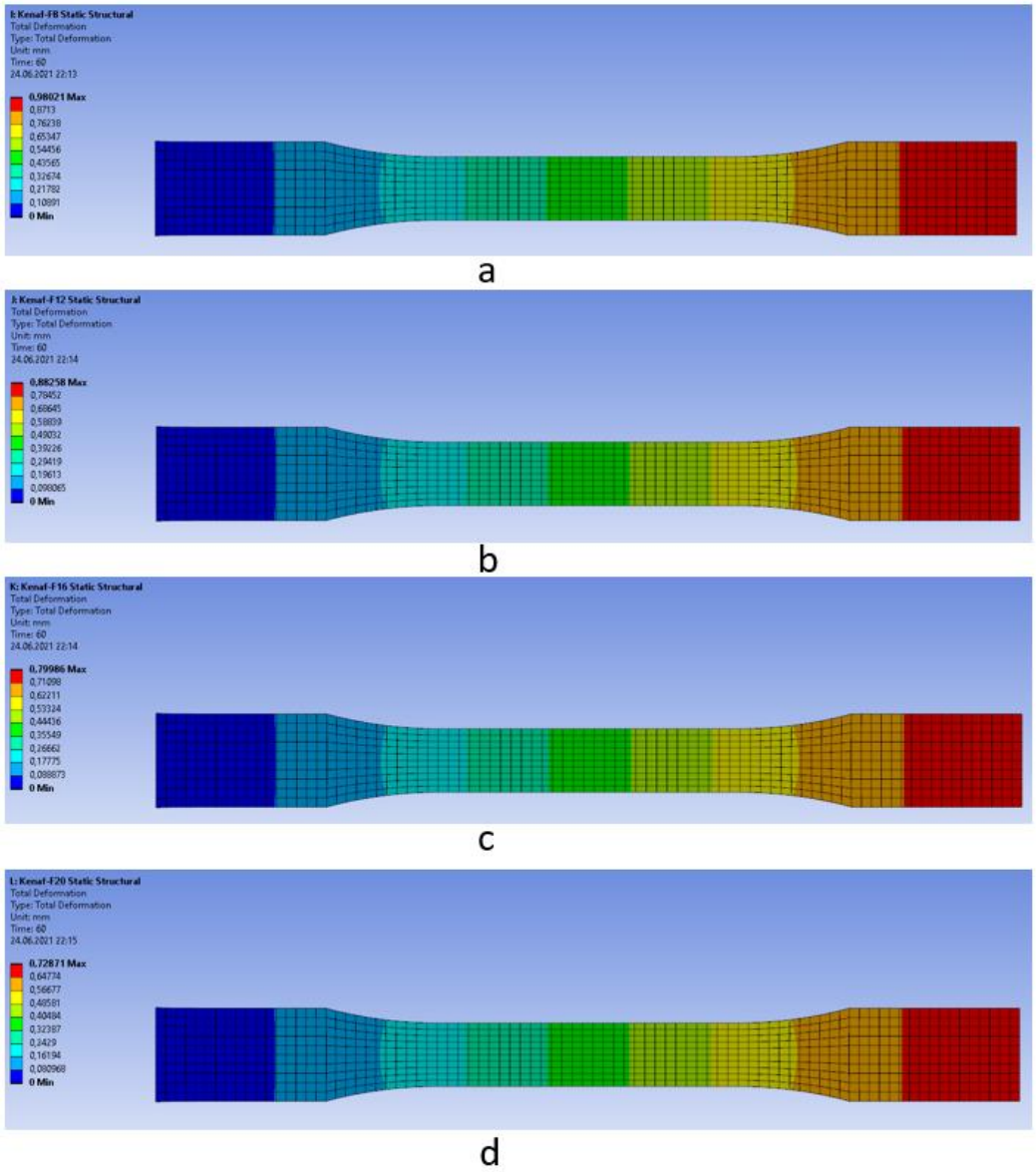
Numunelere kuvvet uygulanması sonrasında %8 cam elyaf takviyesi içeren numunenin 0,84 mm uzadığı görülmüştür. %12 cam elyaf takviyesi içeren numune için bu değer 0,72 mm'ye, %16 takviye içeren numune için 0,63 mm'ye, %20 takviye içeren numune için 0,55 mm'ye düşmektedir. Takviye oranı arttıkça numunelerin uzama miktarında azalma olduğu görülmektedir. %20 takviye ile %8 takviyeli numune kıyaslandığında uzama miktarında %35'lik bir iyileşme görülmektedir.



Şekil 6.8 Farklı oranlarda cam elyaf içeren epoksi kompozitin uzama miktarı (a:%8, b:%12 c:%16 d:%20)

6.2.4. Kenaf – Epoksi Numunesi Birim Uzama Analizi

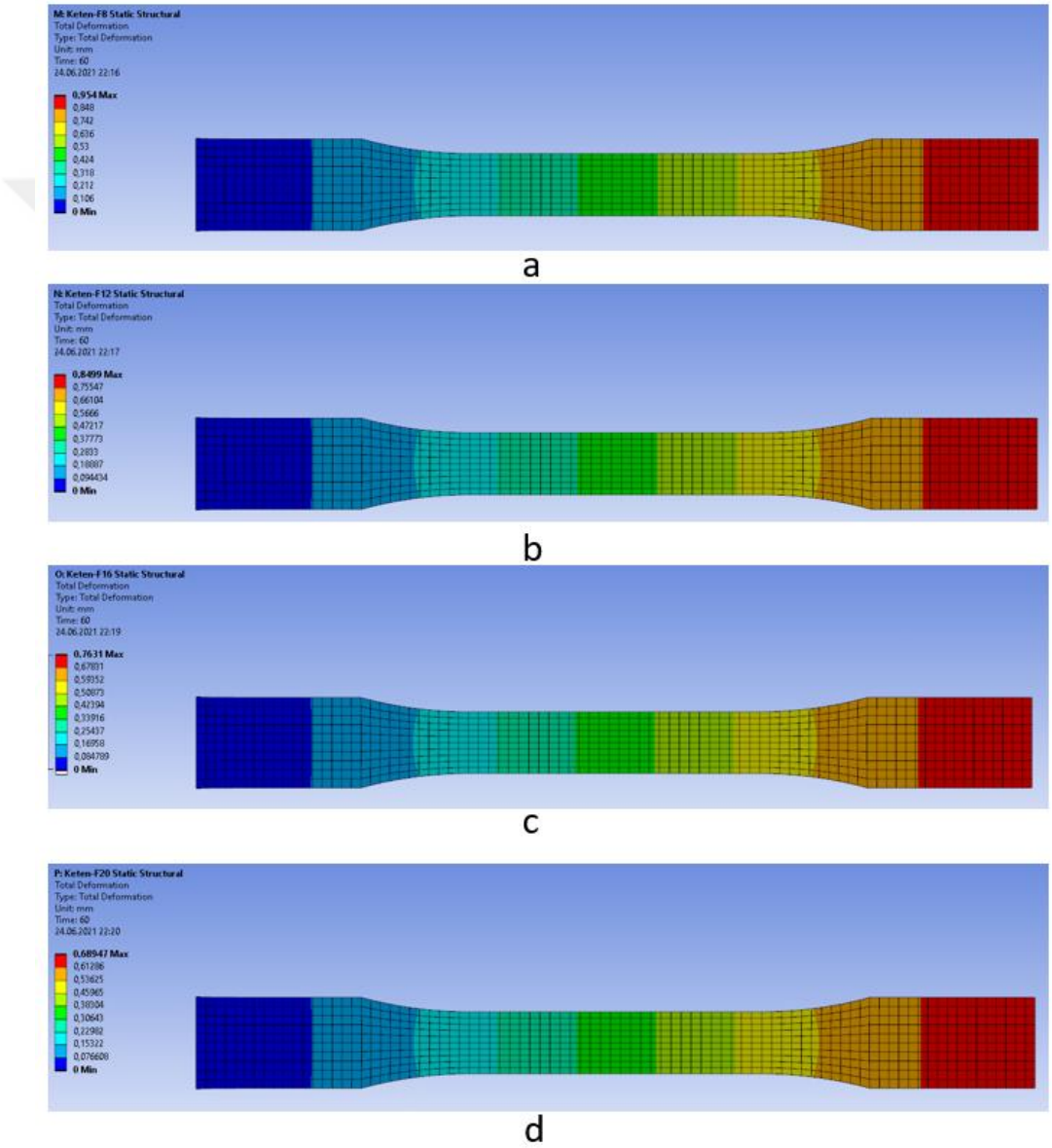
Numunelere kuvvet uygulanması sonrasında %8 kenaf takviyesi içeren numunenin 0,98 mm uzadığı görülmüştür. %12 kenaf takviyesi içeren numune için bu değer 0,88 mm'ye, %16 takviye içeren numune için 0,80 mm'ye, %20 takviye içeren numune için 0,73 mm'ye düşmektedir. Takviye oranı arttıkça numunelerin uzama miktarında azalma olduğu görülmektedir. %20 takviye ile %8 takviyeli numune kıyaslandığında uzama miktarında %18'lik bir iyileşme görülmektedir.



Şekil 6.9 *Farklı oranlarda kenaf içeren epoksi kompozitin uzama miktarı (a:%8, b:%12 c:%16 d:%20)*

6.2.5. Keten – Epoksi Numunesi Birim Uzama Analizi

Numunelere kuvvet uygulanması sonrasında %8 keten takviyesi içeren numunenin 0,95 mm uzadığı görülmüştür. %12 keten takviyesi içeren numune için bu değer 0,85 mm'ye, %16 takviye içeren numune için 0,76 mm'ye, %20 takviye içeren numune için 0,69 mm'ye düşmektedir. Takviye oranı arttıkça numunelerin uzama miktarında azalma olduğu görülmektedir. %20 takviye ile %8 takviyeli numune kıyaslandığında uzama miktarında %27'lik bir iyileşme görülmektedir.



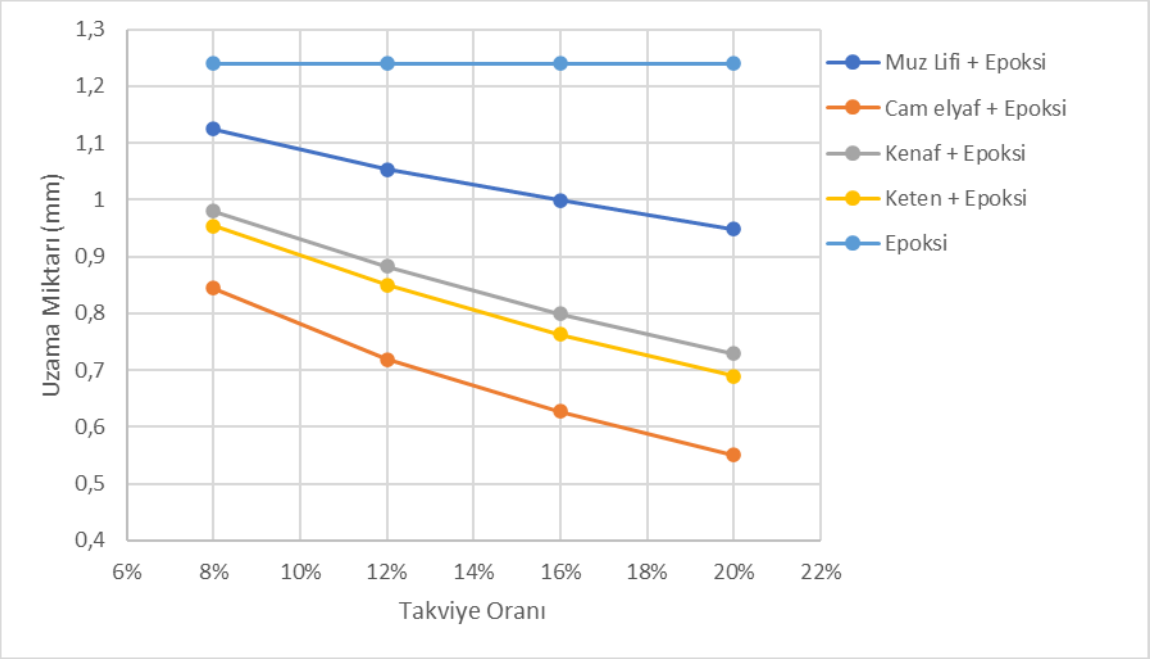
Şekil 6.10 Farklı oranlarda keten içeren epoksi kompozitin uzama miktarı (a:%8, b:%12 c:%16 d:%20)

Çekme testi sonucu numunelerin uzama değerleri Tablo 6.3'te özetlenmiştir.

Tablo 6.3 Çekme testi analizi uzama sonuçları

1400 N Çekme Kuvveti	**Uzama Miktarları (mm)**
%8 Muz lifi Numunesi	1,125
%12 Muz lifi Numunesi	1,054
%16 Muz lifi Numunesi	0,999
%20 Muz lifi Numunesi	0,948
%8 Cam elyaf Numunesi	0,844
%12 Cam elyaf Numunesi	0,719
%16 Cam elyaf Numunesi	0,627
%20 Cam elyaf Numunesi	0,550
%8 Kenaf Numunesi	0,980
%12 Kenaf Numunesi	0,883
%16 Kenaf Numunesi	0,799
%20 Kenaf Numunesi	0,729
%8 Keten Numunesi	0,954
%12 Keten Numunesi	0,850
%16 Keten Numunesi	0,763
%20 Keten Numunesi	0,689
Epoksi	1,24

Numunelerin birim uzama değerlerinin karşılaştırma grafiği Şekil 6.11'de verilmiştir.

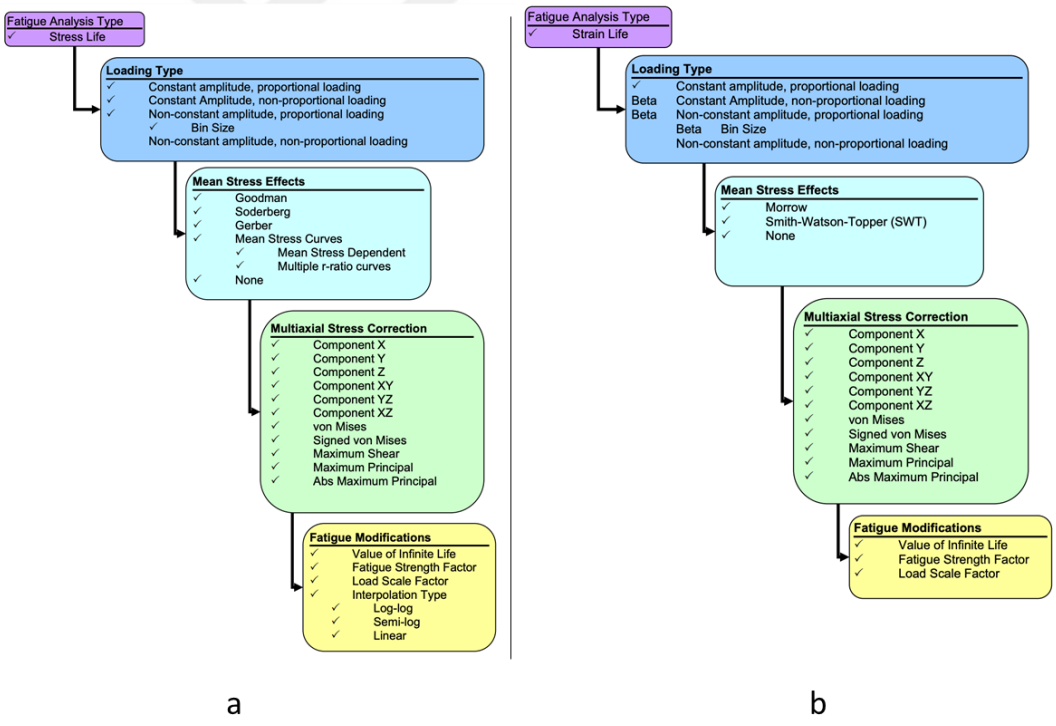


Şekil 6.11 Uzama analizi karşılaştırma grafiği

6.3. Yorulma Analizi

Malzemelerin temel sınıflandırılmasındaki mekanik özellikleri statik koşullar göz önüne alınarak yapılmaktadır. Ancak pratiğe baktığımızda gerçek hayatta birçok malzeme statik olarak dayanabileceği limitlerin çok altına maruz kalmasına ragmen hata ile karşılaşmaktadır. Bunun en temel nedeni malzemenin maruz kaldığı tekrarlı etkilerdir. Bu tekrarlı etkiye yorulma adı verilmektedir. Dolayısıyla pratiğe baktığımızda malzemelerin yorulma dayanımı ve bu dayanımın tespiti için yorulma testi veya yorulma analizi bir hayli önem taşımaktadır. Yorulma testleri uzun süreli gerçekleştirilen ve yüksek çevrimleri simüle eden testler olduğundan maliyetleri oldukça yüksektir. Bu noktada da yorulma sonlu elemanlar analizlerinin önemi oldukça iyi anlaşılmaktadır.

Bir parçanın gerilim/ömür ve uzama/ömür yorulma analizi simülasyonu için karar verilmesi gereken alternatifler Şekil 6.12'de görülmektedir.



Şekil 6.12 a) Gerilim/Ömür, b)Uzama/Ömür yorulma analizi için girdi karar basamakları

Analizi yapılacak olan malzeme ve koşula göre uygun olan ömür dayanım analizi girdi basamakları tercih edilmelidir. Bu çalışmada kompozit malzemelerin gevrek

davranış yapısına uygun olan Gerilim-Ömür tipi yorulma analizleri basamakları kullanılmıştır.

6.3.1. Yükleme Tipi

ANSYS analiz basamaklarında ilk karar verilmesi gereken malzemeye uygulanacak yüklemenin tipinin nasıl olacağıdır. Burada bahsi geçen ömür boyunca uygulanan yükün sabit ya da değişken olup olmayacağı, uygulamanın orantılı veya değişken oranlarda olup olmayacağıdır. Bu çalışma için öngörülen malzeme kullanımı bu yükün sabit değerde ve orantılı yüklemeli olacağı yönündedir. Bu oran analiz için R=0.1 çekme - çekme tipi olacaktır. Standart test koşullarında da bu örüntü sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra R=-1 simetrik çekme – basma tipi yükleme ve R=0-1 çekme – nötr tip yüklemeler de kullanılmaktadır.

6.3.2. Ortalama Gerilim Düzeltme Faktörü

Ansys içerisinde Ömür analizlerinde ortalama gerilmelerin düzeltme faktörü için farklı teoriler mevcuttur. Bu teorilerden Soderberg ve ASME Eliptik gerilim birim uzama grafiğinde malzeme akma gerilmesine kadarki alanı kapsarken Gerber ve Goodman teorileri sünek malzemelerin kopma dayanımına kadarki alanı kapsamaktadır. Kompozit malzemelerde meydana gelen hatalar fiber/matris ayrılması, matris malzemesi kopması gibi genellikle kırılgan malzeme yapısına benzerlik göstermektedir. Bu nedenle bu düzeltme faktörü Soderberg olarak seçilmiştir.

6.3.3. Çok Eksenli Gerilme Düzeltme Faktörü

Analizler sırasında kuvvetin uygulama ekseninin tek eksenli değil de çok eksenli olduğu durumlar için kullanılmaktadır. Mevcut Ömür analizinde yükleme yönü tek eksenli olacağından Von Mises olarak seçilmiştir. Tek eksende uygulanan yüklemelerde bu kısmın hesaplamalara büyük bir etkisi olmamaktadır.

6.3.4. Yorulma Modifikasyonu

Mevcut analizde herhangi bir düzeltme faktörü kullanılmadan malzemenin belirli kuvvetler için ömür çevrim süresi ve emniyet katsayısı parametreleri gözlemlenecektir.

6.3.5. S-N Eğrisi

Sendeckyj [24] metoduna göre S-N test data eğrisi mevcut olmayan malzemeler için belirli parametreler ışığında eğri benzetimi uygulaması yapılabilmektedir. Bu yöntem benzer şekilde kısmi test datasını genele adapte etmede de aktif kullanılmaktadır. Literatürdeki benzer çalışmalarda da kompozit malzemeler için yıllardır Sendecky metodundan daha iyi ve gerçeğe uygun model ortaya atılmamıştır. Son yıllarda ortaya atılan Kim & Zhang [25] modeli de bu modelin bir türevi ve doğrular niteliktedir. Bu çalışmada kullanılan muzlifi-epoksi ve cam elyaf-epoksi kompozit malzemeler için Sendeckyj benzetim yöntemiyle gerilim-ömür dayanım verisi türetilmiştir.

Sendeckyj [24] metoduna göre grafiği formülize etmek istediğimizde malzemeye bağlı α ve β değerlerini içeren aşağıdaki genel denkleme ulaşılmaktadır.

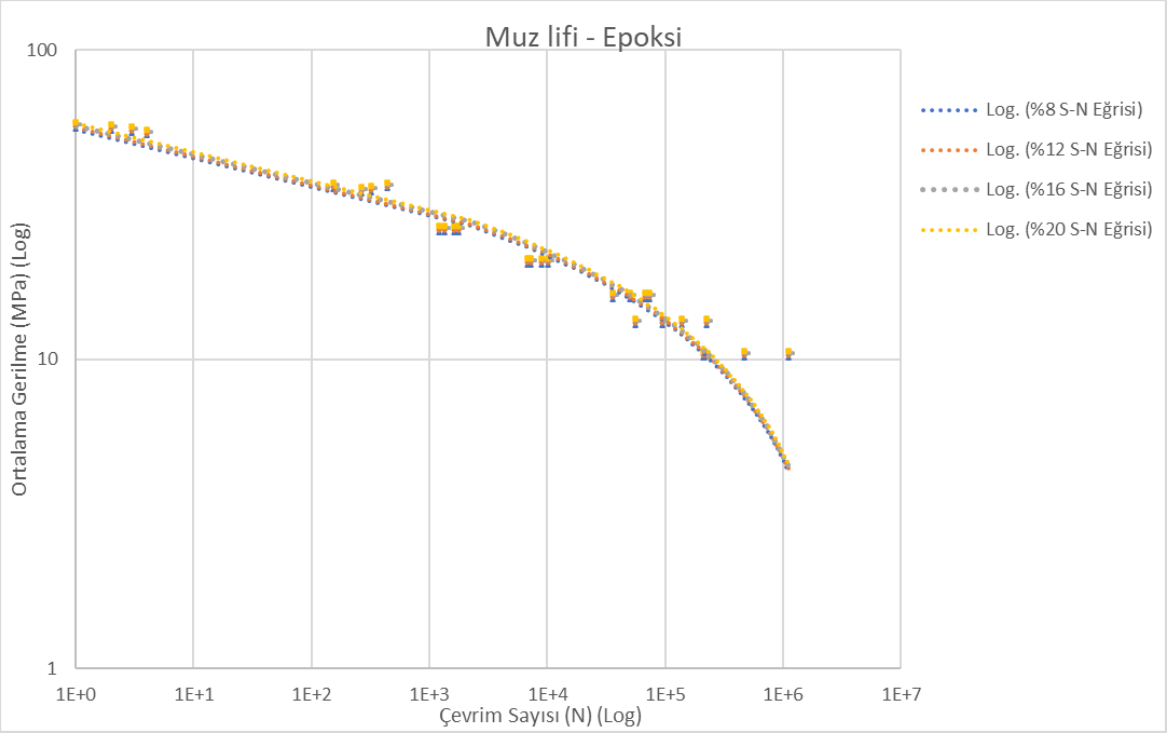
$$\sigma_{max} = \alpha \log N + \beta \tag{6.2}$$

Bu denklemde σ_{max} karşılık gelen çevrim için maksimum gerilme, N çevrim sayısı α ve β ise malzemeye bağlı düzeltme faktörleridir. Denklem 6.1 ve Sendeckyj metodunu her bir numuneye göre uygulayacak olursak α ve β değerleri için Tablo 6.4, Tablo 6.5, Tablo 6.6 ve Tablo 6.7'de belirtilen değerlere ulaşılmaktadır.

Tablo 6.4 Muz lifi - epoksi numunelerine göre α ve β değerleri

Numune	α	β
%8 Muz lifi + Epoksi	-3,651	55,182
%12 Muz lifi + Epoksi	-3,704	55,976
%16 Muz lifi + Epoksi	-3,763	56,87
%20 Muz lifi + Epoksi	-3,822	57,763

Elde edilen bu denklemlere göre muz lifi - epoksi malzemenin S-N grafiği karşılaştırması Şekil 6.13'te verilmiştir.



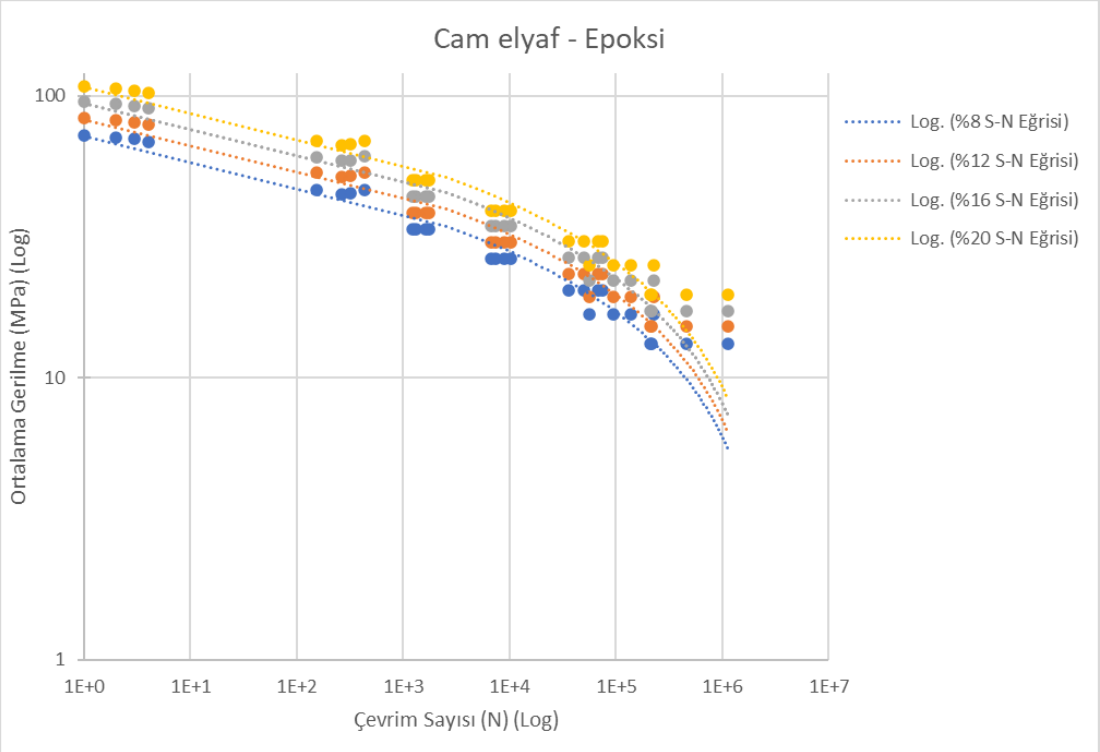
Şekil 6.13 %8, %12, %16 ve %20 muz lifli malzemelerin S-N grafiği (log-log)

Denklem 6.1'i ve Sendeckyj metodunu her bir cam elyaf oranındaki numuneye göre uygulayacak olursak α ve β değerleri için Tablo 6.5'te belirtilen değerlere ulaşılmaktadır.

Tablo 6.5 Cam elyaf - epoksi numunelerine göre α ve β değerleri

Numune	α	β
%8 Cam elyaf + Epoksi	-4,748	71,757
%12 Cam elyaf + Epoksi	-5,464	82,575
%16 Cam elyaf + Epoksi	-6,238	94,286
%20 Cam elyaf + Epoksi	-7,079	106,99

Elde edilen bu denklemlere göre cam elyaf - epoksi malzemenin S-N grafiği karşılaştırması Şekil 6.14'te verilmiştir.



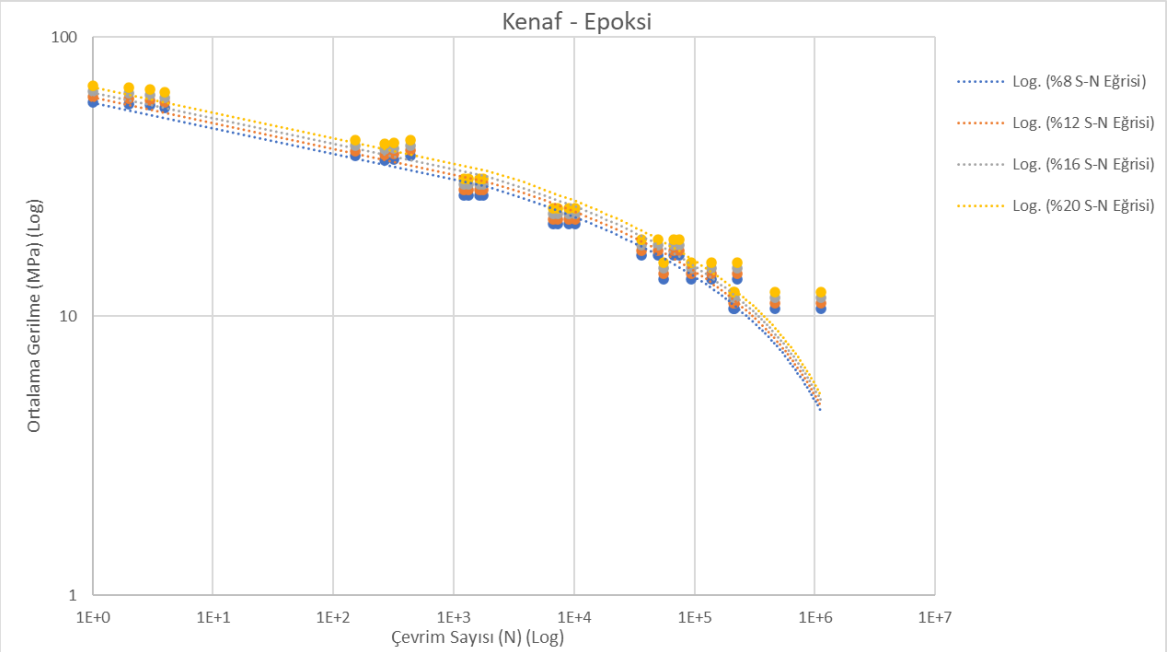
Şekil 6.14 %8, %12, %16 ve %20 cam elyaflı malzemelerin S-N grafiği (log-log)

Denklem 6.1'i ve Sendeckyj metodunu her bir kenaf oranındaki numuneye göre uygulayacak olursak α ve β değerleri için Tablo 6.6'da belirtilen değerlere ulaşılmaktadır.

Tablo 6.6 Kenaf - epoksi numunelerine göre α ve β değerleri

Numune	α	β
%8 Kenaf + Epoksi	-3,855	58,259
%12 Kenaf + Epoksi	-4,025	60,839
%16 Kenaf + Epoksi	-4,203	63,519
%20 Kenaf + Epoksi	-4,4	66,497

Elde edilen bu denklemlere göre kenaf - epoksi malzemenin S-N grafiği karşılaştırması Şekil 6.15'te verilmiştir.



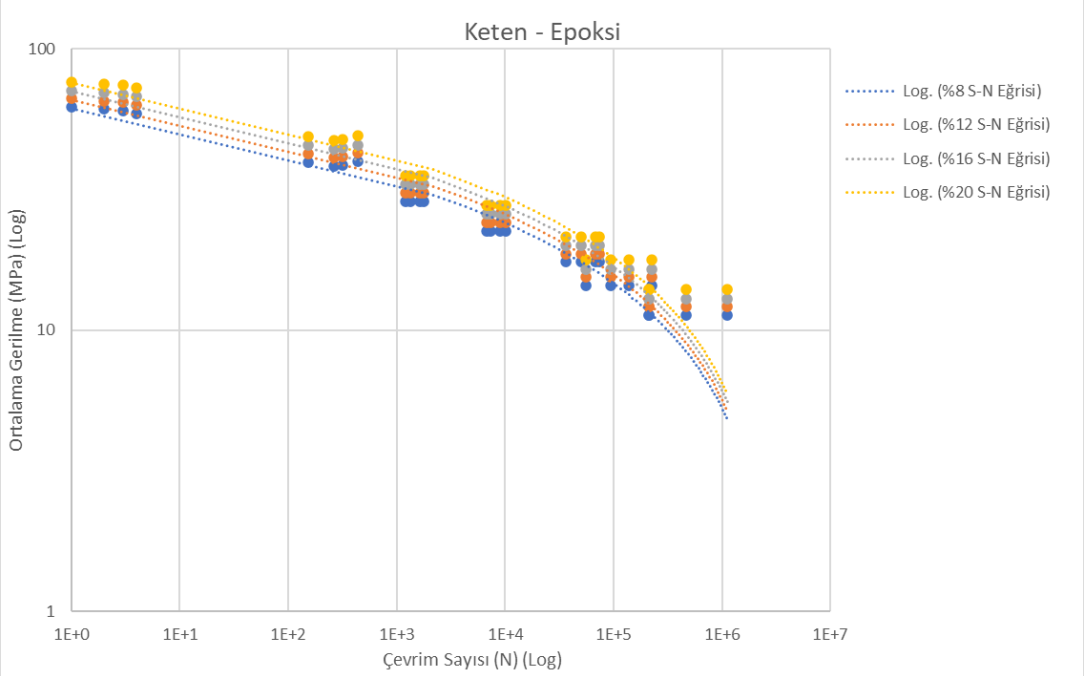
Şekil 6.15 %8, %12, %16 ve %20 kenaflı malzemelerin S-N grafiği (log-log)

Denklem 6.1'i ve Sendeckyj metodunu her bir keten oranındaki numuneye göre uygulayacak olursak α ve β değerleri için Tablo 6.7'de belirtilen değerlere ulaşılmaktadır.

Tablo 6.7 Keten - epoksi numunelerine göre α ve β değerleri

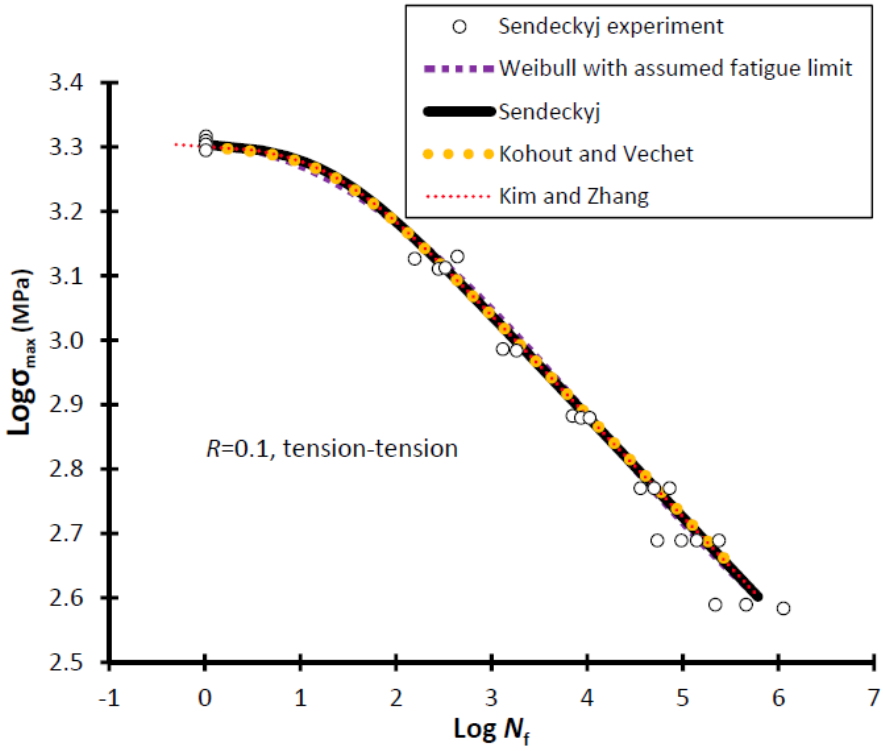
Numune	α	β
%8 Keten + Epoksi	-4,071	61,534
%12 Keten + Epoksi	-4,367	66
%16 Keten + Epoksi	-4,676	70,665
%20 Keten + Epoksi	-5,024	75,925

Elde edilen bu denklemlere göre eten - epoksi malzemenin S-N grafiği karşılaştırması Şekil 6.16'da verilmiştir.



Şekil 6.16 %8, %12, %16 ve %20 ketenli malzemelerin S-N grafiği (log-log)

Kütlesel olarak %8, %12, %16 ve %20 oranlarında muz lifi ve Cam elyaf Epoksi kompozit için referans alınan Sendeckyj ömür testi yaklaşımının diğer metotlar ile karşılaştırması Şekil 6.17'de verilmiştir. Bu grafikten de görüldüğü gibi deneysel veri ile teorik verilerin benzetiminde gerilme dayanımına bağlı olarak benzer yapı gözlenmektedir. Bu beş çalışmada da yaklaşımların birbiri ile iyi örtüştüğü görülmektedir.



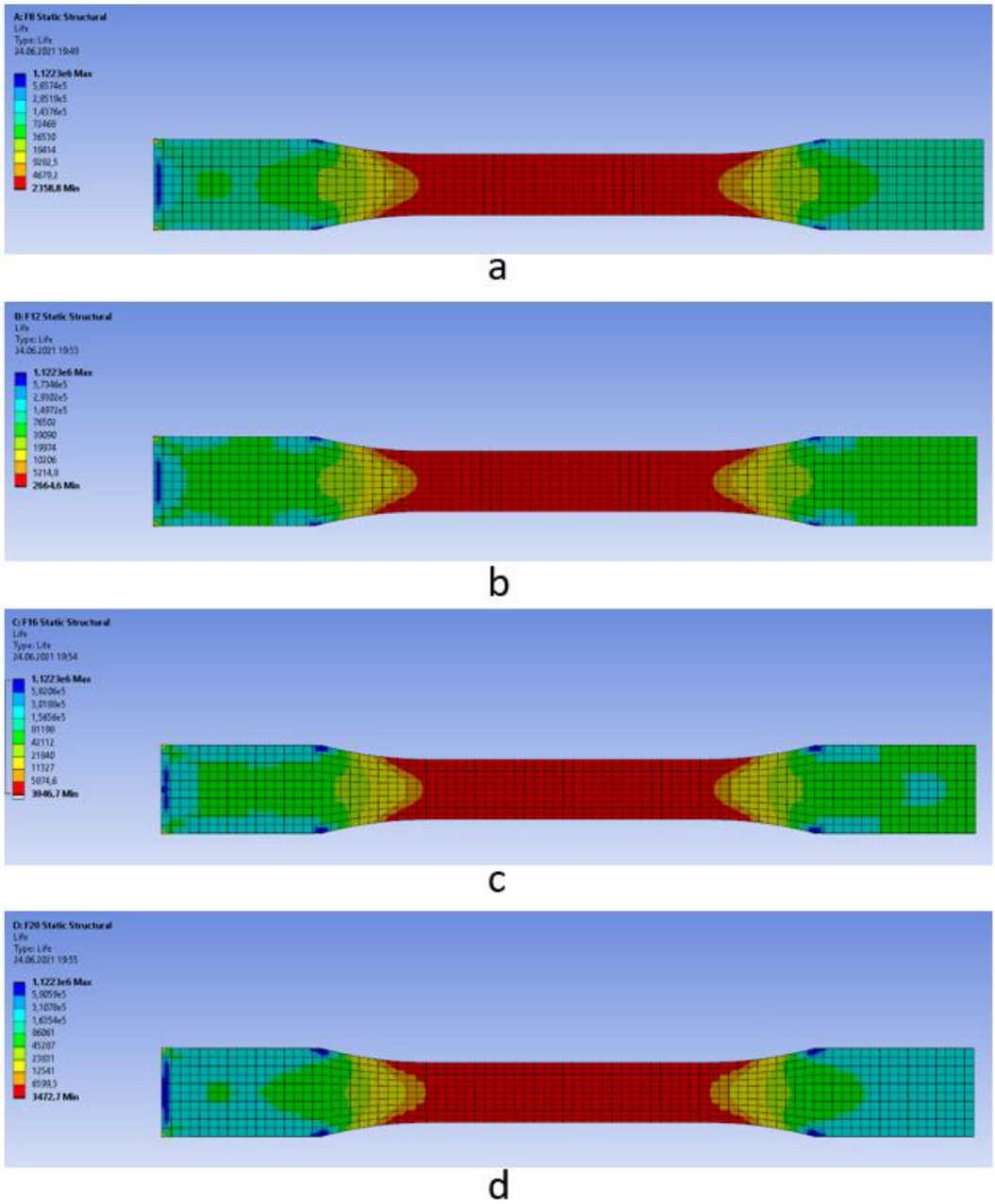
Şekil 6.17 Sendeckyj *[25]*, Kim-Zhang *[26]*, Weibull ve Kohout-Vechet R=0,1 oranlı çekme-çekme ömür testi S-N eğrisi yaklaşımlarının karşılaştırması *[27]*

6.4. Yorulma Analizi Sonuçları

ANSYS ile yapılan yorulma anlizleri her bir takviye tipi ve takviye oranlı numune için ASTM D638 standart test numunesi modeli ile 1400 N'luk sabit yük altında R:0,1 genlikli çekme-çekme tip olarak gerçekleştirilmiştir. Bir çevrim içerisinde uygulanan yük 1400N'a çıkıp, sonrasında 140N'a düşmektedir. Bu çevrim kompozit malzeme dayanımı hata şartlarına düşene kadar ANSYS tarafından sürdürülmektedir. Analiz sonuçlarında belirtilen ömür değeri o bölgede herhangi bir problem meydana gelmeden gerçekleşen çevrim sayısını ifade etmektedir.

6.4.1. Muz Lifi – Epoksi

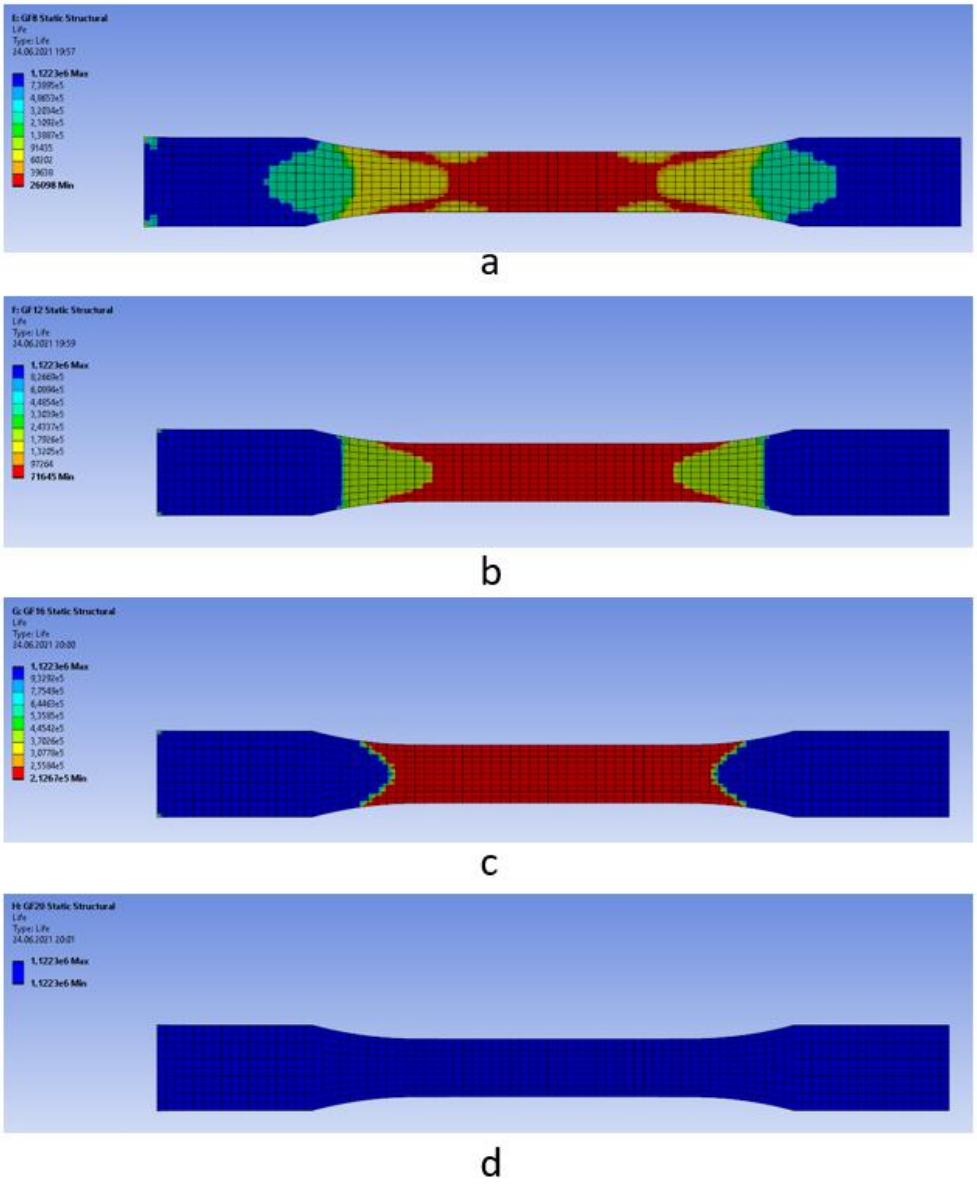
Sırasıyla %8, %12, %16 ve %20 kütlesel oranda muz lifi – epoksi kompozit için ömür analizleri Şekil 6.18'de görülen sonuçları vermektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda %8 takviye oranlı numune için öngörülen ömür 2358 çevrim, %12 takviye oranlı numune için 2664 çevrim, %16 takviye oranlı numune için 3046 çevrim ve %20 takviye oranlı numune için 3472 çevrim olmaktadır.



Şekil 6.18 Muz lifi - epoksi numunesi ömür dayanım analizi sonuçları. a) %8, b)%12, c)%16, d)%20 takviye oranlı numuneler

6.4.2. Cam Elyaf – Epoksi

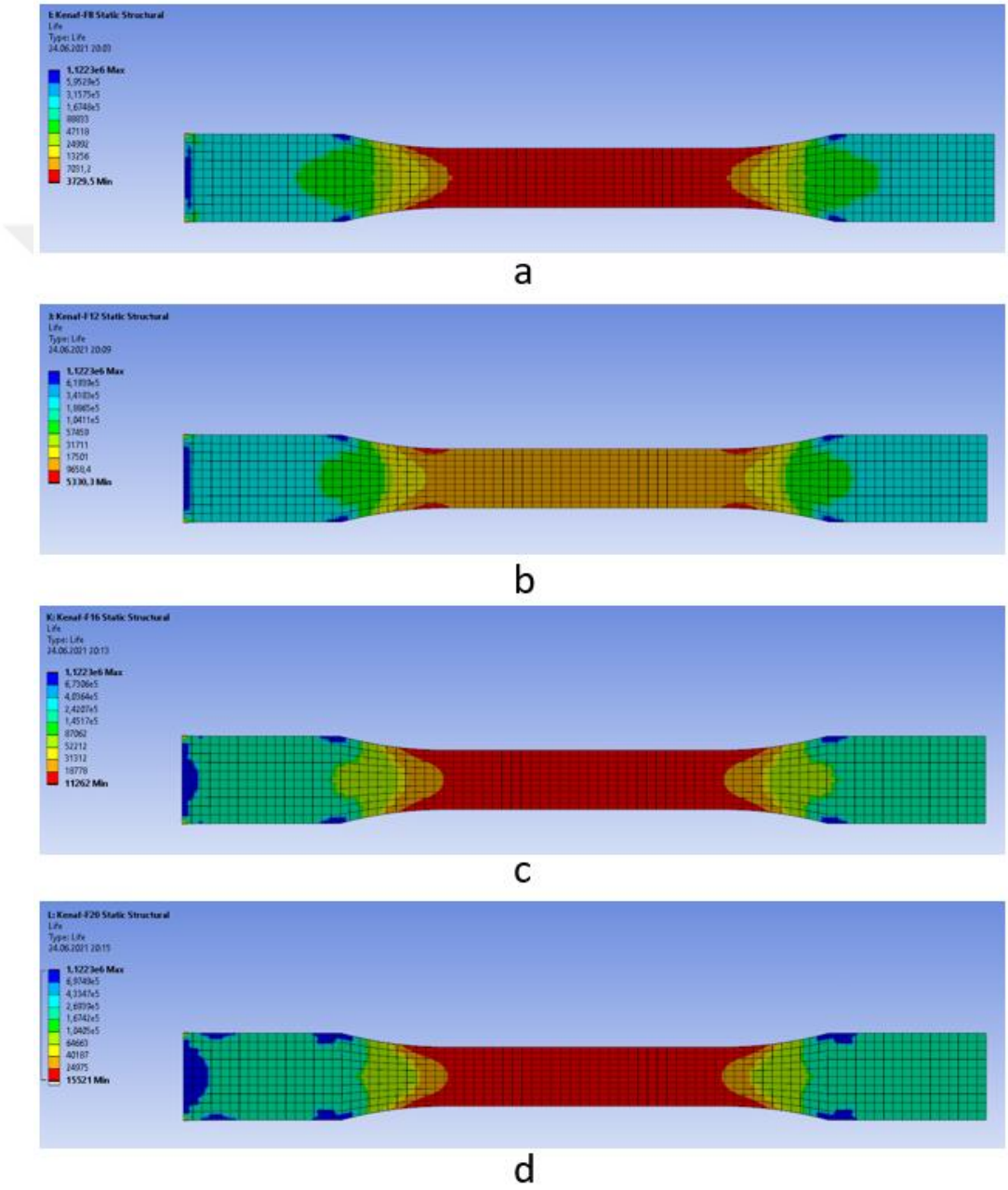
Sırasıyla %8, %12, %16 ve %20 kütlesel oranda cam elyaf – epoksi kompozit için ömür analizleri Şekil 6.19'da görülen sonuçları vermektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda %8 takviye oranlı numune için öngörülen ömür 26098 çevrim, %12 takviye oranlı numune için 71645 çevrim, %16 takviye oranlı numune için 211.267 çevrim ve %20 takviye oranlı numune için 1.122.000 çevrim olmaktadır. 1.000.000 çevrimden fazlasına dayanabilen analizler sonsuz ömür dayanımı olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 6.19 Cam elyaf - epoksi numunesi ömür dayanım analizi sonuçları. a) %8, b)%12, c)%16, d)%20 takviye oranlı numuneler

6.4.3. Kenaf – Epoksi

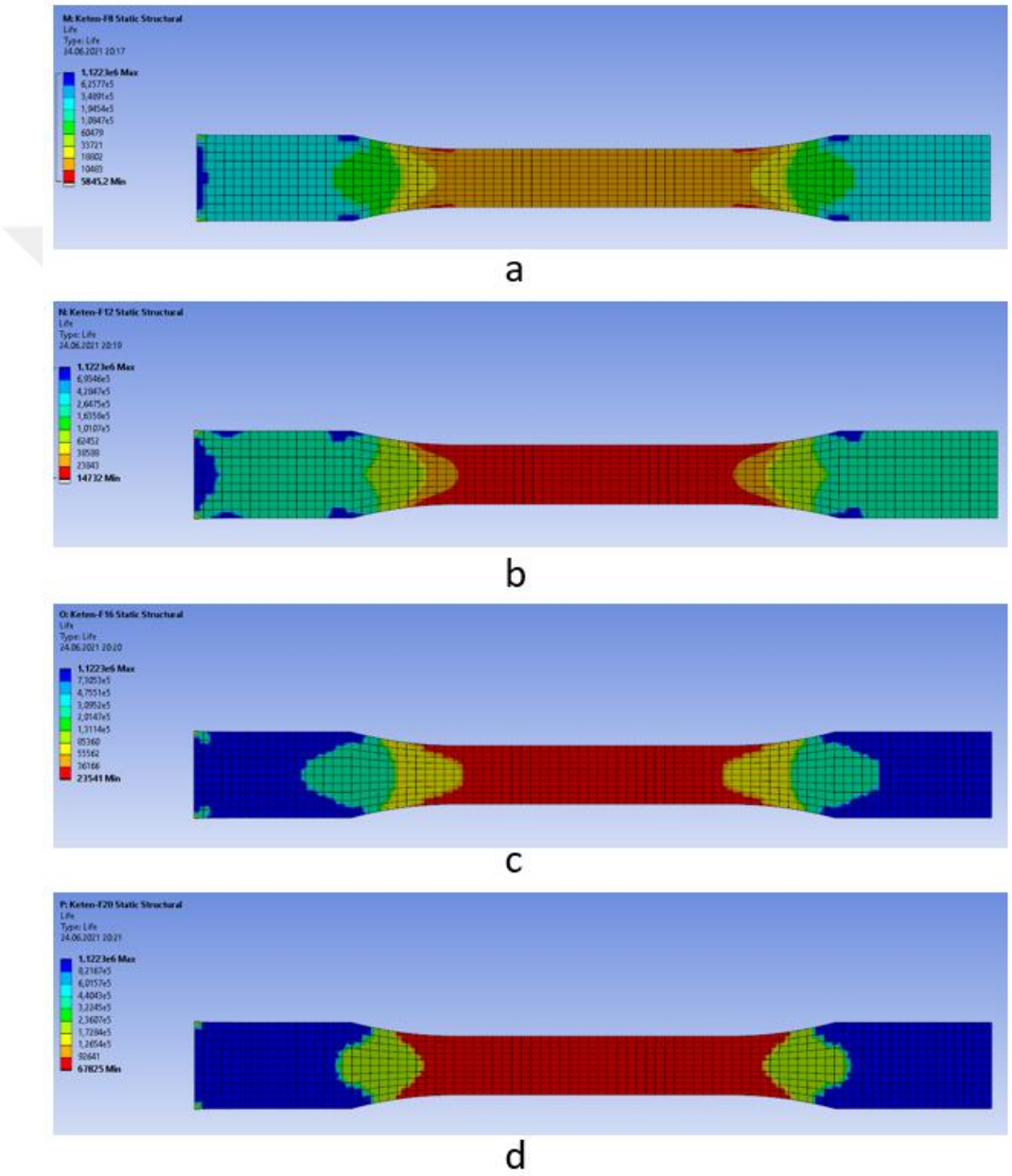
Sırasıyla %8, %12, %16 ve %20 kütlesel oranda kenaf – epoksi kompozit için ömür analizleri Şekil 6.20'de görülen sonuçları vermektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda %8 takviye oranlı numune için öngörülen ömür 3729 çevrim, %12 takviye oranlı numune için 5330 çevrim, %16 takviye oranlı numune için 11262 çevrim ve %20 takviye oranlı numune için 15521 çevrim olmaktadır.



Şekil 6.20 Kenaf - epoksi numunesi ömür dayanım analizi sonuçları. a) %8, b)%12, c)%16, d)%20 takviye oranlı numuneler

6.4.4. Keten – Epoksi

Sırasıyla %8, %12, %16 ve %20 kütlesel oranda keten – epoksi kompozit için ömür analizleri Şekil 6.21'de görülen sonuçları vermektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda %8 takviye oranlı numune için öngörülen ömür 5845 çevrim, %12 takviye oranlı numune için 14732 çevrim, %16 takviye oranlı numune için 23541 çevrim ve %20 takviye oranlı numune için 67825 çevrim olmaktadır.

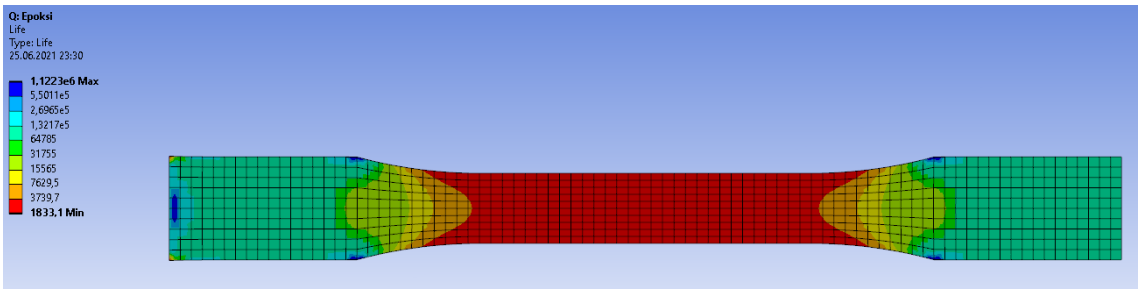


Şekil 6.21 Keten - epoksi numunesi ömür dayanım analizi sonuçları. a) %8, b)%12, c)%16, d)%20 takviye oranlı numuneler

6.4.5. Epoksi

Saf epoksi malzeme için analiz sonucunda öngörülen ömür 1833 çevrim olmaktadır.

Numuneler arasında en düşük ömür dayanımını saf epoksi numunesi vermektedir.



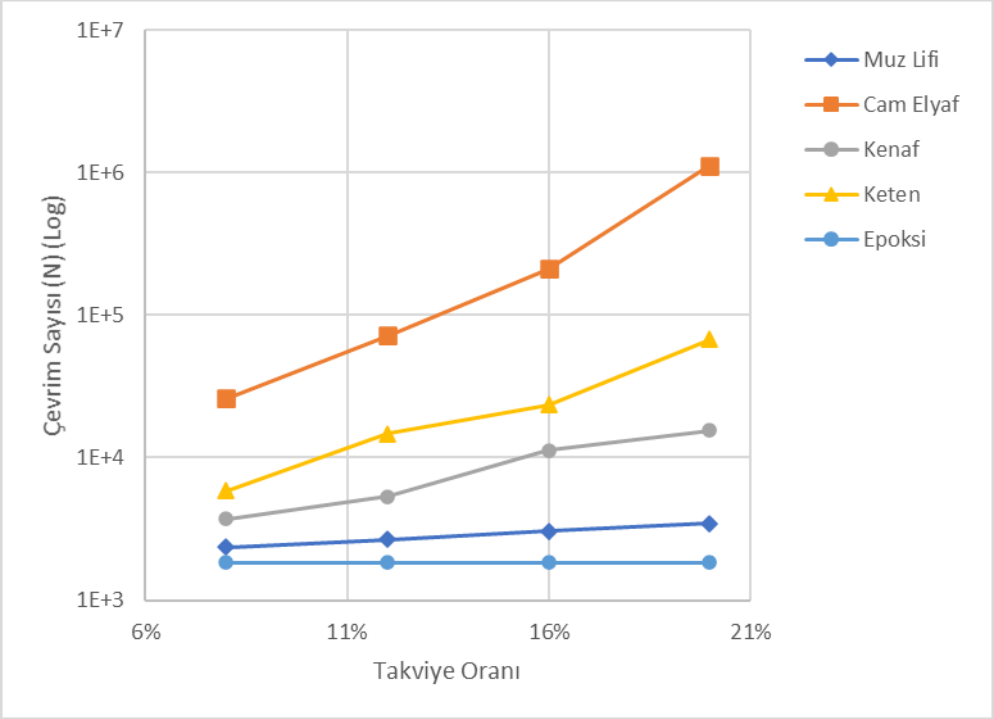
Şekil 6.22 Epoksi numunesi ömür dayanım analizi sonucu

6.5. Analiz Sonuçlarının Karşılaştırması

Ansys ömür analizinde görülen emniyetli çevrim oranları Tablo 6.8'de görülmektedir. Bu değerler doğrultusunda emniyetli ömür tasarım şartını sağlayan tek numune %20 cam elyaf – epoksi olmaktadır.

Tablo 6.8 Ömür dayanım analizi sonuçları

Kompozit	Takviye Oranı	Çevrim Sayısı
Muz Lifi + Epoksi	8%	2358
	12%	2664
	16%	3046
	20%	3472
Cam elyaf + Epoksi	8%	26098
	12%	71645
	16%	211267
	20%	1122000
Kenaf + Epoksi	8%	3729
	12%	5330
	16%	11262
	20%	15521
Keten + Epoksi	8%	5845
	12%	14732
	16%	23541
	20%	67825
Epoksi	%0	1833



Şekil 6.23 Numunelerin ömür dayanımı karşılaştırması

7
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, nihai özellikleri bilinmeyen kompozitin bir araya geldiği bileşenlerinin mekanik özelliklerinin girdisi ile öngörü modeli oluşturulmuştur. Bu öngörü için hesaplamalarda Digimat yazılımı kullanılmıştır. Digimat yazılımı ile 5 mm uzunluklu 0,12 mm çaplı kısa rastgele lif dağılımlı epoksi polimer matrisli kompozitin nihai özellikleri hesaplanmıştır. Fiber malzemesi olarak ayrı ayrı %8, %12, %16 ve %20 kütlesel oranlarda muz lifi, kenaf, keten ve cam elyaf malzemeleri kullanılmıştır.

Digimat yazılımı ile elde edilen mekanik özellikler ve teorik yöntemlerle hesaplanan gerilme dayanımları kullanılarak birim uzama analizleri ve daha sonrasında ise ömür yorulma dayanımı analizleri ANSYS yazılımında gerçekleştirilmiştir.

Öncelik olarak muz lifi, kenaf ve keten doğal liflerinin statik özellikleri cam elyaf ile kıyaslanmıştır. Endüstride cam elyaf kullanımın yerine doğal ve sürdürülebilir alternatifleri değerlendirilmiştir.

Yapılan analizler değerlendirildiğinde tüm numuneler için takviye oranı artışının dayanıma ve malzeme uzama miktarlarına doğrudan olumlu etkisinin olduğu görülmektedir. Bu iyileşme muz lifi için %14, cam elyaf için %35, kenaf için %18 ve keten için %27 oranında olmaktadır.

Yapılan çalışmada doğal alternatiflerin arasında en yüksek mekanik dayanımı keten – epoksi bileşiminin %20 takviye oranlı numunesi vermektedir. Keten – epoksi için 76,5 MPa olan bu maksimum dayanım Kenaf için 67 MPa'a ve muz lifi için de 58,2 MPa'a düşmektedir. Cam elyaf kullanılan numune içinse bu değer 107,8 MPa olarak hesaplanmaktadır. %8 Cam elyaf katkısına alternatif olarak %16 ve %20 keten takviyesi kullanımı da yaklaşık sonuçlar vermektedir. Dolayısıyla bu oranlarda keten, cam elyafa iyi bir alternatif olmaktadır.

R:0,1 oranlı çekme-çekme tip olarak gerçekleştirilen ömür dayanım analizlerinde bu numuneler arasında sonsuz ömür tasarım şartını (hatasız çevrim sayısı ≥ 10^6)

sadece %20 cam elyaf – epoksi numunesi sağlamaktadır. Diğer numuneler sadece daha düşük yük koşullarında emniyetli sayılabilecektir.

Yüksek dayanım beklenmeyen ve herhangi bir yüke maruz kalmayan kozmetik kaplamalı otomobil kapı paneli, pandizot veya yalıtım elemanı parçalar için doğal lifler hala ekonomik ve de geçerli bir alternatif olabilmektedir.

Digimat, kullanıcıya çok çeşitli malzeme ve yapısal örüntü özellikleriyle kompozit oluşturma imkanı vermektedir. Bu çalışmada kullanıldığı gibi hesaplamalar için sabit malzeme değerleri elde edilebileceği gibi çeşitli sonlu elemanlar yazılımları için girdi oluşturabilecek çıktılar da verebilmektedir.

Çalışmada da karşılaşılan bir zorluk olarak, FE modülünde malzeme temsili hacim modeli oluşturulurken rastgele 3 boyutta lif dağılımlı tip istendiğinde %1'den yüksek hacimlerin hesaplanması rastgelelik ilkesi sebebiyle mümkün olmamaktadır. Bunun yanısıra çeşitli örgü tip ve sürekli lifler modellenebilmektedir.

KAYNAKÇA

[1] M. Landervik ve J. Jergeus, Digimat material model for short fiber reinforced plastics at Volvo car corporation, 10th European LS-DYNA Conference 2015, Wurzburg, 2015.

[2] L. Adam ve R. Assaker, Integrated nonlinear multi-scale material modeling of fiber reinforced plastics with digimat: application to short and continuous fiber composites, 5th European Conference on Computational Mechanics, Mont-Saint-Guibert, 2014.

[3] R. Schmitz, B. Alsteens, B. Bidaine, J. Seyfarth ve R. Assaker, Simulation approach to high cycle fatigue of short fiber reinforced and UD composites, Mont-Saint-Guibert, 2014.

[4] T. Malo, L. Adam, R. Assaker, T. Matsumoto ve R. Giacomini, Multi-scale modeling of high cycle fatigue of chopped and continuos fiber composites, 2014.

[5] V. O. Sadykova ve E. I. Kurkin, Application of short fiber reinforced composite materials multilevel model for design of ultra-light aurospace structures, 6th Russian-German Conference on Electric Propulsion and Their Application, Moscow, 2013.

[6] S. S. Shinde, A. Salve ve S. Kulkarni, Theoretical modeling of mechanical properties of woven jute fiber reinforced polyurethanecomposites, 5th International Conference of Materials Processing and Characterization, 2017.

[7] R. Potluri, V. Diwakar, K. Venkatesh ve B. S. Reddy, Analytical model application for prediction of mechanical properties of natural fiber Reinforced composites, 7th International Conference of Materials Processing and Characterization, Hyderabad, 2017.

[8] S. A. H. A. Seman, R. Ahmad ve H. M. Akil, Experimental and numerical investigations of kenaf natural fiber reinforced composite subjected to impact loading, Polymer Composites 2018, Penang, 2018.

[9] L. Biradar, S. Patil ve K. B. Karale, Fiber reinforced plastic durability: nonlinear multi-scale modeling for structural part life predictions, SAE Technical Paper 2019-26-0278, 2019.

[10] T. K. Mulenga, A. U. Ude ve C. Vivekanandhan, Techniques for modelling and optimizing the mechanical properties of natural fiber composites: A Review, Fibers, Botswana, 2021.

[11] M. Alhijazi, Q. Zeeshan, Z. Qin, B. Safaei ve M. Asmael, Finite element analysis of natural fibers composites: A review, Nanotechnology Reviews 2020, 2020.

[12] A. Karakoti, P. Tripathy, V. Kar, K. Jayakrishnan ve M. Rajesh, Finite element modeling of natural fiber-based hybrid composites, Tamil Nadu, 2019.

[13] R. D. S., P. B. Kumar, R. S. Kumar ve B. V. Ramnath, Evaluation of mechanical properties of sugarcane reinforced hybrid natural fibre composites by

conventional fabrication and finite element method, Material Engineering and Application II, Linköping, 2020.

[14]R. M. Abhilash, G. S. Venkatesh ve S. S. Chauhan, Micromechanical modeling of bamboo short fiber reinforced polypropylene composites, Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design, 2020.

[15]N. Şifa, Muz lifi takviyeli kompozit malzemenin üretimi ve termal analizi, Yüksek lisans tezi, İstanbul, 2019.

[16]A. P. Vassilopoulosa ve E. F. Georgopoulos, Computational intelligence methods for the fatigue life modeling of composite materials, Fatigue Life Prediction of Composites and Composite Structures, Kalamata, Elsevier, 2018, p. 349.

[17]Composites, Materials Science and Engineering Introduction, Utah, 2012, p. 577.

[18]M. D. Milan Žmindáka, Computational Modelling of composite materials reinforced by glass fibers, Elsevier, Univerzitná, 2012.

[19]G. Kalaprasad, K. Joseph, S. Thomas ve C. Pavithran, Theoretical modelling of tensile properties of short sisal fibre-reinforced low-density polyethylene composites, Journal Of Materials Science, Kerala, 1997.

[20]R. Gibson, Principles of composite material mechanics, New York: CRC Press, 2015.

[21]M. Haghighat, A. Zadhoush ve S. N. Khorasani, Wiley InterScience, 2004.

[22]F. W ve J. G., Analysis of fiber orientation in the wood-polymer composites (WPC) on selected examples, Advanced Science Technology Journal, cilt 11, no. 3, pp. 122-129, 2017.

[23]M. Software, Digimat user manual, Msc Software, 2017.

[24]Y. T. Zhu, W. R. Blumenthal ve T. C. Lowe, The tensile strength of short fibre-reinforced composites, Journal of Materials Science, cilt I, no. 32, pp. 2037-2043, 1997.

[25]G. Sendeckyj, Fitting models to composite materials fatigue data, Test Methods and Design Allowables for Fibrous Composites, 1961, p. 245.

[26]H. S. Kim ve J. Zhang, Fatigue damage and life prediction of glass/vinyl ester composites, Reinforced Plastic Composites, cilt I, no. 20, pp. 834-848, 2001.

[27]B. I. ve K. H.S., S-N Curve Models for composite materials characterisation: an evaluative review, Journal of composites science, cilt I, no. 6, pp. 50-62, 2018.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. T. Çalışkan, B. Aşçıoğlu Temiztaş, "Doğal elyaf takviyeli kompozitlerde ömrün analitik ve numerik incelenmesi", 5. Uluslararası Makine Mühendisliğinde Gelişmeler Konferansı, s. 610, 17-19 Aralık 2019