T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİYEL TASARIM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KATMANLI KOMPOZİT YAPILARIN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

Hazırlayan
Erkan YILMAZ

Danışman
Prof. Dr. Recep GÜNEŞ

Doktora Tezi

Ağustos 2024
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİYEL TASARIM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KATMANLI KOMPOZİT YAPILARIN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

(Doktora Tezi)

Hazırlayan
Erkan YILMAZ

Danışman
Prof. Dr. Recep GÜNEŞ

Ağustos 2024
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Erkan YILMAZ

İmza

"Katmanlı Kompozit Yapıların Topoloji Optimizasyonu" adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi' ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan	**Danışman**
Erkan YILMAZ	Prof. Dr. Recep GÜNEŞ
İmza	İmza

Endüstriyel Tasarım Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Cem SİNANOĞLU

İmza

TEŞEKKÜR

"Statik ve dinamik yükler altında çalışan mekanik sistemlerin topoloji optimizasyonu" başlıklı bu tez çalışmasının konusunun belirlenmesinde, yürütülmesinde ve sonuçlandırılmasında desteğini esirgemeyen hocam sayın Prof. Dr. Recep GÜNEŞ'e, karşılaşmış olduğum problemlerin çözümünde yardımlarını esirgemeyen hocam sayın Prof. Dr. M. Kemal APALAK'a, tez çalışması boyunca yardımlarını esirgemeyen hocam sayın Prof. Dr. Cem SİNANOĞLUN'a ve emeklerini esirgemeyen tez savunma jüri üyeleri sayın Prof. Dr. Ahmet ERKLİĞ ve sayın Prof. Dr. Ömer Yavuz BOZKURT'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması sırasında analizlerin gerçekleştirilmesinde, deney sistemlerinin hazırlanmasında ve deneylerin yapılmasında yardımıma koşan Arş. Gör. Mevlüt HAKAN'a, Dr. Öğr. Üyesi Emir ESİM'e ve Öğr. Gör. Dr. Muhsin Alcı'ya teşekkürlerimi sunarım. Deney numunelerinin üretilmesinde bilgilerini esirgemeyen Doç. Dr. Murat AYDIN'a ve Doç. Dr. Umut ÇALIŞKAN'a teşekkür ederim.

Hayatımdaki birçok zorlukta yanımda olduğu gibi, bu uzun süreçte de benden desteğini ve sabrını esirgemeyen eşim Havva YILMAZ'a teşekkürü borç bilirim. Hayatım boyunca maddi manevi desteklerini benden hiç esirgemeyen babam Halil YILMAZ'a, annem Ayşe YILMAZA'a, abilerim Hakan ve Ersin YILMAZ'a, ablalarım Serpil ve Serap YILMAZ'a teşekkür ederim.

Erkan YILMAZ

Ağustos 2024, KAYSERİ

KATMANLI KOMPOZİT YAPILARIN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

Erkan YILMAZ

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Ağustos 2024
Danışman: Prof. Dr. Recep GÜNEŞ

ÖZET

Mekanik tasarımlarda en uygun yapıya karar verilebilmesi için geometrik şeklin ve malzemenin belirlenmesi en öncelikli cevaplandırılması gereken sorulardandır. Bu soruların cevaplanabilmesi için mühendislikte temel iki yaklaşım benimsenmiştir. Bunlardan birincisi bir tasarım alanı ve malzeme belirleyip bunun üzerine gerekli analizlerin yapılmasıdır ki bu yöntem çok fazla zaman almaktadır ve buna karşılık en uygun tasarım elde edilemeyebilir. İkinci yaklaşım ise daha kısa sürede en uygun tasarımın elde edilebilmesini sağlayan yapısal optimizasyon yöntemleridir. Bu yöntemlerde iteratif bir yol izleyerek, sistemin çalışma koşullarına ve malzemeye göre en uygun tasarım alanını sunmaktadırlar. Yapısal optimizasyonlarda en yaygın olarak kullanılan yöntem topoloji optimizasyonudur. Bu tez çalışmasının amaçlarından birincisi farklı serim açılarına sahip karbon fiber takviyeli kompozit yapılar üzerine yapısal topoloji optimizasyonu uygulayarak, geometrilerin yük altındaki kuvvet-yer değiştirme ve enerji sönümleme kabiliyetlerinin deneysel olarak tespit edilmesidir. Çalışmanın diğer amacı, kompozit yapıların modal topoloji optimizasyon analizleri ile elde edilen geometrilerin titreşim ve sönüm karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesidir.

Çalışmalarda takviye malzemesi karbon fiber, matris malzemesi reçine olan preprek kompozit lamine yapılar kullanılmıştır. Bu kompozit plakalar sonlu elemanlar yazılımı olan Ansys® programında modellenmiştir. Modellemelerde kullanılan malzeme özellikleri deneysel çalışmalarla elde edilmiştir. İlk kısımda, farklı açılardaki lamine plakalardan oluşan modeller üzerine kütle kriterine göre Yapısal Topoloji Optimizasyonu yapılmış ve buradan elde edilen geometriler üzerine üç nokta eğme deneyleri yapılmıştır. İkinci kısımda, frekans ve kütle kriterlerine göre Modal Topoloji Optimizasyonu yapılmıştır ve buradan elde edilen geometriler üzerine deneyler yapılmıştır. Farklı tasarım

parametrelerine sahip olarak elde edilen modeller talaşlı imalata uygun olacak şekilde düzenlenmişlerdir.

Farklı fiber açı yerleşimine sahip lamine yapılardan oluşan kompozit plakalar ısı kontrollü pres altında kalıp yardımıyla üretilmiştir. Bu plakalardan, optimizasyon sonucunda elde edilen geometriler talaşlı imalat yöntemleri ile üretilmiştir. Yapısal analiz sonucunda elde edilen numuneler üzerine üç nokta eğme testi yapılarak şekilde değiştirme enerjileri incelenmiştir. Modal analiz kapsamında elde edilen numunelerin doğal frekans ve sönümleme davranışları deneysel olarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapısal optimizasyon, Topoloji optimizasyonu, Fiber takviyeli kompozitler, Yapısal analiz, Modal analiz, Doğal frekans, Enerji sönümleme.

TOPOLOGY OPTIMIZATION OF LAMİNATED COMPOSİTE STRUCTURE

Erkan YILMAZ

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
PhD Thesis, August 2024
Supervisor: Prof. Dr. Recep GÜNEŞ

ABSTRACT

In mechanical design, determining the geometric shape and material is among the most critical questions that need to be answered to decide on the most suitable structure. To address these questions, two fundamental approaches are adopted in engineering. The first approach involves defining a design space and material, followed by conducting the necessary analyses. However, this method is time-consuming and may not always lead to the optimal design. The second approach involves structural optimization methods, which allow for the attainment of the most suitable design in a shorter time. These methods follow an iterative process, providing the most appropriate design space according to the system's operating conditions and the material. Among these, topology optimization is the most commonly used method in structural optimizations. One of the objectives of this thesis is to experimentally determine the force-displacement and energy absorption capabilities of geometries under load by applying structural topology optimization to carbon fiber-reinforced composite structures with different ply orientations. The other objective of the study is to experimentally determine the vibration and damping characteristics of the geometries obtained through modal topology optimization analyses of composite structures.

In the studies, prepreg composite laminated structures were used, where the reinforcement material is carbon fiber, and the matrix material is resin. These composite plates were modeled using the finite element software, Ansys®. The material properties used in the modeling were obtained through experimental studies. In the first part, Structural Topology Optimization was performed on models consisting of laminated plates at different angles based on the mass criterion, and three-point bending tests were conducted on the geometries obtained. In the second part, Modal Topology Optimization

was carried out based on frequency and mass criteria, and experiments were conducted on the geometries obtained. The models obtained with different design parameters were adjusted to be suitable for machining.

Composite plates, consisting of laminated structures with different fiber angle orientations, were produced under a heat-controlled press using a mold. The geometries obtained through optimization of these plates were produced using machining methods.. The deformation energies of the samples obtained from the structural analysis were examined by conducting three-point bending tests. The natural frequencies and damping behaviors of the samples obtained from the modal analysis were experimentally examined.

Keywords: Structural optimization, Topology optimization, Structural analysis, Fiber reinforced composites, Modal analysis, Natural frequency, Energy absorption

İÇİNDEKİLER

KATMANLI KOMPOZİT YAPILARIN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK iii
KABUL VE ONAY iv
TEŞEKKÜR v
ÖZET vi
ABSTRACT viii
İÇİNDEKİLER x
TABLOLAR LİSTESİ xii
ŞEKİLLER LİSTESİ xiii
GİRİŞ 1

1. BÖLÜM
GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Tezin Konusu ve İçeriği 5
1.2. Topoloji Optimizasyonu 6
1.2.1 Optimizasyon Teorisi 7
1.3. Kompozit Malzeme Mekaniği 13
1.3.1 Laminanın Mikromekanik Analizi 13
1.3.2 Laminanın Makromekanik Analizi 14
1.4. Şekil Değiştirme Enerjisi 19
1.5. Sönüm Oranı 21
1.5.1. Logaritmik Azalma Metodu (Logarithmic Decrement) 21
1.5.2. Yarım Güç Bant Genişliği Metodu (Half-Power Bandwidth Method) ... 22
1.6. Literatür çalışması 23

2. BÖLÜM
DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEMLER

2.1. Kompozit Plakaların Üretimi 33
2.1.1. Vakum Yöntemi ve Plaka Üretimi 33
2.1.2. Sıcak Pres Yöntemi 36
2.1.3. Kompozit Plakaların Üretimi 37

2.1.4. Deney Numunelerinin İmalatı 41
2.2. Kompozit Malzeme Karakterizasyonu 46
2.2.1 Yanma Testi..... 46
2.2.2. Çekme Testleri 47
2.3. Sayısal Yöntemler 49
2.3.1. Tersine Mühendislikle Mekanik Malzeme Özelliklerinin Tespiti..... 50
2.3.2. Statik Yükler Altında Topoloji Optimizasyonu..... 52
2.3.3. Modal Analiz ve Topoloji Optimizasyonu..... 71
2.4. Deneysel Yöntemler 77
2.4.1. Üç Nokta Eğme Deneyleri..... 77
2.4.1. Doğal Frekans Deneyleri..... 79
3. BÖLÜM
BULGULAR
3.1. Çekme Deneyleri ve Malzeme Karakterizasyonu 82
3.2. Üç Nokta Eğme Deney Bulguları..... 86
3.2.1. Test Numunelerinin Kuvvet-Yer Değiştirme Grafikleri..... 87
3.2.1. Test Numunelerinin Enerji Absorbe Özellikleri..... 94
3.3. Modal Analiz ve Topoloji Optimizasyonu 97
4. BÖLÜM
TARTIŞMA SONUÇ VE ÖNERİLER
4.1. Sonuç ve Yorumlar 106
4.2. Öneriler ve Planlanan Çalışmalar 108
KAYNAKÇA 109
ÖZGEÇMİŞ..... 116

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Karbon fiber lifleri ve kumaş özellikleri 37
Tablo 2.2. Takviye ve Matris özellikleri 51
Tablo 3.1. Karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin mekanik özellikleri 86
Tablo 3.2. Doğal titreşim frekansı analiz ve deneysel sonuçları 104

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil. G. 1.1. Sırasıyla Boyut, Şekil ve Topoloji Optimizasyonu 2
Şekil. G.1.2. Kompozit yapıların takviye malzemesine göre sınıflandırılması 3
Şekil 1.1. Dama tahtası hatası ve filtreleme 12
Şekil 1.2. Hacim elemanda gerilme ve gerinme pozitif yüzeylerdeki yönleri 15
Şekil. 1.3. Normal Gerilme Durumu 17
Şekil. 1.4. Kayma gerilmesi 18
Şekil. 1.5. Şekil değiştirme enerjisi 20
Şekil. 1.6. Gerilme şekil değiştirme grafiği 20
Şekil 1.7. Kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirme grafiği 21
Şekil 1.8. Doğal titreşimli sistemin zaman ivme grafiği 22
Şekil 1.9. Doğal titreşimli sistemin frekans ivme grafiği 23
Şekil 2.1. Vakum yöntemi 34
Şekil 2.2. Vakum yöntemi ile prepreg kompozit üretimi 35
Şekil 2.3. Prepreg plaka üretim kalıbı 37
Şekil 2.4. 20 katmanlı kompozit plaka 38
Şekil 2.5. Kalıp içerisine yerleştirilmiş kompozit plaka 38
Şekil 2.6. Kürleme işlemi 39
Şekil 2.7. Isı kontrolü pres 40
Şekil 2.8. Üretilen kompozit plakaların serim açıları 41
Şekil 2.9. Deneme üretimleri 42
Şekil 2.10. Plakaların CNC tezgâha bağlanması ve işlenmesi a) işleme öncesi, b) işleme sonrası 43
Şekil 2.11. Üç nokta eğme testi numuneleri 44
Şekil 2.12. Modal test numuneleri 45
Şekil 2.13. Yanma testleri ve grafiği 46
Şekil 2.14. 2B-DGK yöntemi ve çekme testleri 48
Şekil 2.15. ASTM D3039 ve ASTM D3518 çekme numune ölçüleri 49
Şekil 2.16. Tersine mühendislikle malzeme özelliklerinin tespit edilmesi 51
Şekil 2.17. Statik sınır şartları (t=6 mm) 53

Şekil 2.18. Serim açısı $[0°]_{10S}$ olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi 53
Şekil 2.19. Serim açısı$[0°]_{10S}$, kütle kriteri %80 olan model 54
Şekil 2.20 Serim açısı $[0°]_{10S}$, kütle kriteri %80 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi 55
Şekil 2.21. Serim açısı $[0°]_{10S}$, kütle kriteri %70 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi 55
Şekil 2.22. Serim açısı $[0°]_{10S}$, kütle kriteri %70 olan model 56
Şekil 2.23. Serim açısı $[0°]_{10S}$, kütle kriteri %60 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi 56
Şekil 2.24. Serim açısı$[0°]_{10S}$, kütle kriteri %60 olan model 57
Şekil 2.25. Serim açısı $[90°]_{10S}$ olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi 58
Şekil 2.26. Serim açısı $[90°]_{10S}$, kütle kriteri %80 olan model 58
Şekil 2.27. Serim açısı $[90°]_{10S}$, kütle kriteri %80 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi 58
Şekil 2.28. Serim açısı$[90°]_{10S}$, kütle kriteri %70 olan model 59
Şekil 2.29. Serim açısı $[90°]_{10S}$, kütle kriteri %70 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi 60
Şekil 2.30. Serim açısı $[90°]_{10S}$, kütle kriteri %60 olan model 60
Şekil 2.31. Serim açısı $[90°]_{10S}$, kütle kriteri %60 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi 61
Şekil 2.32. Serim açısı $[0°/90°]_{5S}$ olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi 62
Şekil 2.33. Serim açısı $[0°/90°]_{5S}$, kütle kriteri %80 olan model 62
Şekil 2.34. Serim açısı $[0°/90°]_{5S}$, kütle kriteri %80 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi 63
Şekil 2.35. Serim açısı$[0°/90°]_{5S}$, kütle kriteri %70 olan model 63
Şekil 2.36. Serim açısı $[0°/90°]_{5S}$, kütle kriteri %70 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi 64
Şekil 2.37. Serim açısı $[0°/90°]_{5S}$, kütle kriteri %60 olan model 64

Şekil 2.38. Serim açısı $[0°/90°]_{5S}$, kütle kriteri %60 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi 65
Şekil 2.39. Serim açısı $[-45°/45°]_{5S}$ olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi 66
Şekil 2.40. Serim açısı $[-45°/45°]_{5S}$, kütle kriteri %80 olan model 66
Şekil 2.41. Serim açısı $[-45°/45°]_{5S}$, kütle kriteri %80 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi 67
Şekil 2.42. Serim açısı $[-45°/45°]_{5S}$, kütle kriteri %70 olan model 67
Şekil 2.43. Serim açısı $[-45°/45°]_{5S}$, kütle kriteri %70 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi 68
Şekil 2.44. Serim açısı $[-45°/45°]_{5S}$, kütle kriteri %60 olan model 68
Şekil 2.45. Serim açısı $[-45°/45°]_{5S}$, kütle kriteri %60 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi 69
Şekil 2.46. Tek yönlü fiber serim açısına sahip %60 kütle kriterine uygulanmış topoloji optimizasyon şekilleri 70
Şekil 2.47. Farklı fiber serim açılarına sahip modellerin topoloji optimizasyonu 71
Şekil 2.48. Modal analiz numune boyutları ve sınır şartları 72
Şekil 2.49. Serim açısı $[0°]_{10S}$, maksimum doğal frekans kriterine göre elde edilen model 73
Şekil 2.50. Serim açısı$[0°]_{10S}$, kütle kriteri %56'ya göre elde edilen model 74
Şekil 2.51. Serim açısı$[90°]_{10S}$, maksimum doğal frekans kriterine göre elde edilen model 74
Şekil 2.52. Serim açısı$[90°]_{10S}$, kütle kriteri %56'ya göre elde edilen model 75
Şekil 2.53. Serim açısı$[0°/90°]_{5S}$, maksimum doğal frekans kriterine göre elde edilen model 75
Şekil 2.54. Serim açısı$[0°/90°]_{5S}$, kütle kriteri %56'ya göre elde edilen model 76
Şekil 2.55. Serim açısı$[-45°/45°]_{5S}$, maksimum doğal frekans kriterine göre elde edilen model 76
Şekil 2.56. Serim açısı$[-45°/45°]_{5S}$, kütle kriteri %56'ya göre elde edilen model 77
Şekil 2.57. Üç nokta eğme ve merkezleme aparatı 78
Şekil 2.58. Aparat ve test numunesi merkezleme 78
Şekil 2.59. Üç nokta eğme deneyi 79

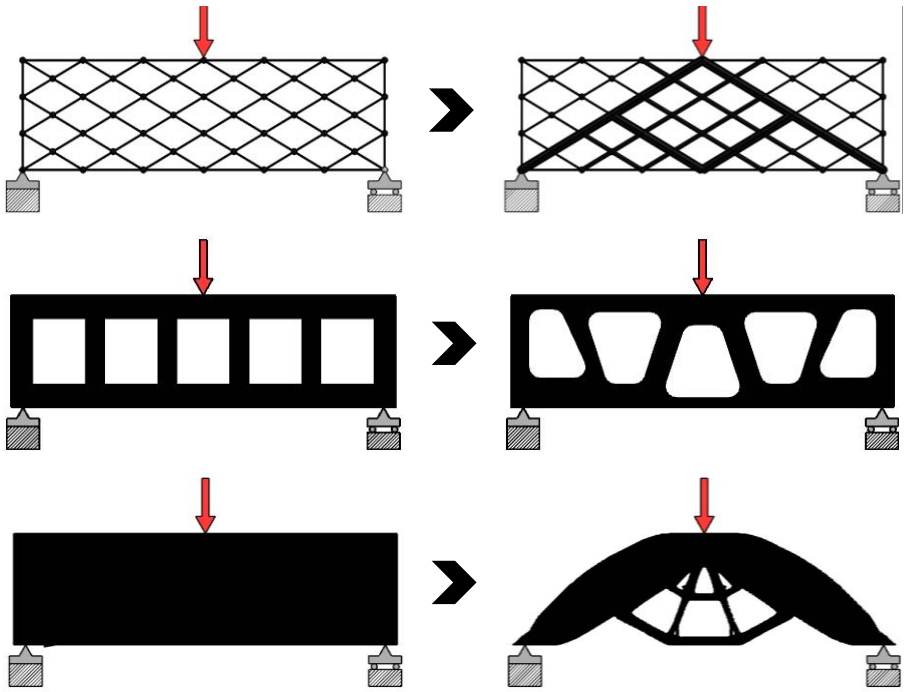
Şekil 2.60. Doğal titreşim frekansı test düzeneği 80
Şekil 2.61. Numunelerin test sistemine bağlanma konumları 81
Şekil 2.62. Test numunesi merkezleme aparatı 81
Şekil 3.1. Çekme testi numuneleri 83
Şekil 3.2. Fiber yönünde çekme deneyi ve tersine mühendislik gerilme-gerinme eğrileri 84
Şekil 3.3. Fiber yönünde dik çekme deneyi gerilme-gerinme eğrileri 84
Şekil 3.4. Fiber yönüne ile 45 derecelik açı yapan numuneler için çekme deneyi gerilme-gerinme eğrileri 85
Şekil 3.5. Serim açısı $[0^o]_{10S}$ olan numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafiği 88
Şekil 3.6. Serim açısı $[0^o/90^o]_{5S}$ olan numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafiği 89
Şekil 3.7. Serim açısı $[-45^o/45^o]_{5S}$ olan numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafiği 90
Şekil 3.8. Serim açısı $[90^o]_{10S}$ olan numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafiği 90
Şekil 3.9. Farklı serim açılarındaki optimizasyon yapılmamış geometrinin kuvvet-yer değiştirme grafiği 91
Şekil 3.10. %80 kütle oranına göre optimize edilmiş geometrinin kuvvet-yer değiştirme grafiği 92
Şekil 3.11. %70 kütle oranına göre optimize edilmiş geometrinin kuvvet-yer değiştirme grafiği 92
Şekil 3.12. %60 kütle oranına göre optimize edilmiş geometrinin kuvvet-yer değiştirme grafiği 93
Şekil 3.13. Serim açısı $[0^o]$ olan numuneler tarafından a) absorbe edilen enerjiler b) özgül absorbe edilen enerji değerleri 94
Şekil 3.14. Serim açısı $[90^o]$ numuneler tarafından a) absorbe edilen enerjiler b) özgül absorbe edilen enerji değerleri 95
Şekil 3.15. Serim açısı $[-45^o/45^o]$ numuneler tarafından a) absorbe edilen enerjiler b) özgül absorbe edilen enerji değerleri 96
Şekil 3.16. Serim açısı $[0^o/90^o]$ numuneler tarafından a) absorbe edilen enerjiler b) özgül absorbe edilen enerji değerleri 97
Şekil 3.17. Serim açısı $[0^o]_{10S}$ olan test numunelerinin doğal titreşim frekans grafikleri 99
Şekil 3.18. Serim açısı $[0^o]_{10S}$ olan test numunelerinin sönüm grafikleri 99

Şekil 3.19. Serim açısı $[0^o/90^o]_{5S}$ olan test numunelerinin doğal titreşim frekans grafikleri 100
Şekil 3.20. Serim açısı $[0^o/90^o]_{5S}$ olan test numunelerinin sönüm grafikleri 101
Şekil 3.21. Serim açısı $[-45^o/45^o]_{5S}$ olan test numunelerinin doğal titreşim frekans grafikleri 102
Şekil 3.22. Serim açısı $[-45^o/45^o]_{5S}$ olan test numunelerinin sönüm grafikleri..... 102
Şekil 3.23. Serim açısı $[90^o]_{10S}$ olan test numunelerinin sönüm grafikleri 103
Şekil 3.24. Serim açısı $[90^o]_{10S}$ olan test numunelerinin sönüm grafikleri 104

GİRİŞ

Mühendislik uygulamalarında optimum yapının belirlenebilmesi cevaplandırılması gereken en önemli sorulardan bir tanesidir. Performans ve malzeme verimliliği arayışı yapısal optimizasyon yöntemlerinin gelişmesini sağlamıştır. Yapısal optimizasyon yöntemleri, malzeme dağılımını ve tasarım alanını iteratif bir yaklaşımla elde etmeyi amaçlayan güçlü matematiksel alt yapılara sahip yöntemlerdir. Bu yöntemler rijit mekanik alanında tasarım alanı içerisindeki malzeme dağılımını hızlı ve etkili bir şekilde optimum geometriyi elde edebilmek için geliştirilmişlerdir [1]. Bu avantajlarından dolayı yapısal optimizasyonlar akışkanlar mekaniği, termodinamik, enerji, akustik ve optik vb. alandaki problemlere cevap verebilmek için de geliştirilmişlerdir [2]. Yapısal optimizasyonlar amaç fonksiyonlarına göre boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu olmak üzere farklı başlıklar altında toplanmışlardır. Kafes yapı optimizasyonu (Truss optimizasyonu) olarak da bilinen boyut optimizasyonunun amaç fonksiyonu yapıların kesit alanlarını optimize etmek üzerine geliştirilmiştir [3]. Bu yöntemde tasarım alanı sınırlarına müdahale edilmez ve aynı zamanda tasarım alanından malzeme eklemesi veya çıkartılması yapılmaz. Boyut optimizasyonu kafes yapılarının optimize edilmesinde diğer yöntemlere göre basit ve daha etkili bir yöntemdir. Şekil optimizasyonu isminden de anlaşılacağı gibi tasarım geometrisinin şeklini optimize etmektedir. Şekil optimizasyonunda boyut optimizasyonunda olduğu gibi tasarım sınırlarını değiştirmeden geometri içerisindeki malzeme dağılımını optimize eder. Bu yöntem, tasarım alanında tamamen kaldırma veya ekleme yapmadan sadece bu alanların sınırlarına kısıtlı oranlarda müdahale ederek hedef fonksiyonuna ulaşmayı amaçlamaktadır. Topoloji optimizasyonu, yapısal optimizasyonla içerisinde en fazla kullanım alanına sahip olan yöntemdir. Diğer yöntemlerden farklı olarak başlangıç tasarım alanının yapılandırılmasına gerek duymadan verilen sınır şartlarını karşılayabilecek en uygun geometriyi önermektedir [4]. Bu yöntemde başlangıç geometrisi sınırlarının dışına çıkmadan tasarım alanı içinde en uygun malzeme dağılımını sağlamaktadır. Topoloji optimizasyonunda amaç, belirtilen çalışma

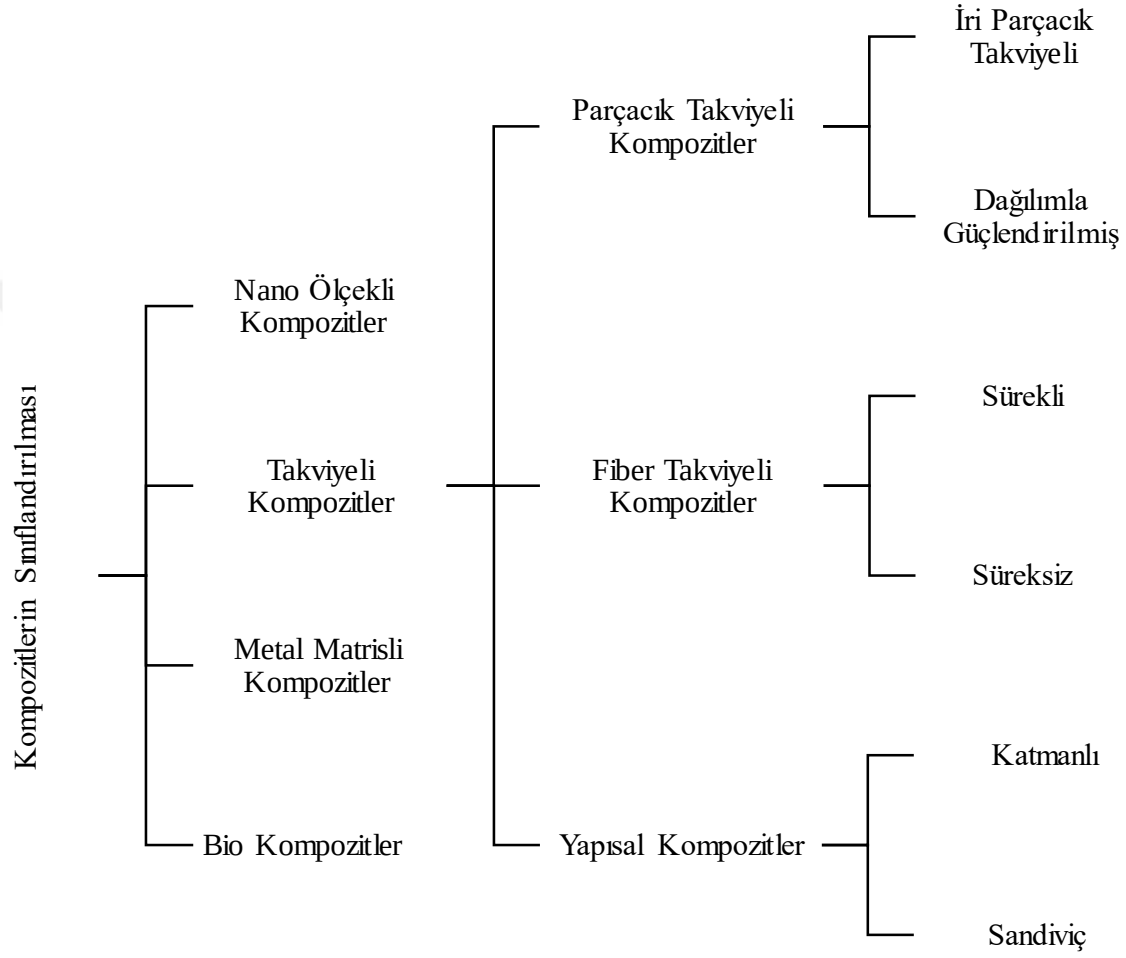
koşullarında tasarım alanının esnekliğini (compliance) minimize ederek en uygun malzeme dağılımını tespit etmektir.



Şekil. G. 1.1. Sırasıyla Boyut, Şekil ve Topoloji Optimizasyonu

Kompozit yapılar farklı özelliklere sahip ve birbiri içerisinde çözünmeyen malzemelerin bir araya gelmesiyle oluşur. Kompozit malzemeler matris ve takviye olmak üzere iki temel yapıdan oluşmaktadır. Kompozit malzemeleri üretmek izotropik malzemeleri üretmekten daha zordur fakat matris ve takviye malzemelerinin bir biri içerisinde çözünmemesi birçok malzemenin bir arada kullanılabilmesi sağlamaktadır, bu sayede istenilen özelliklerde özel malzemeler elde edilebilmektedir. Kompozit yapıların, farklı yönlerde farklı özelliklere sahip olmaları, düşük yoğunluk, korozyon direnci, yüksek mukavemet, darbe dayanımı, rijitlik ve ısıl iletkenlik en önemli kılan özelliklerindendir. Örneğin, polimer matris ile kullanılan kompozit takviyeli malzemeler yüksek mukavemet sağlarlar, farklı bileşenler olarak çimento matrisli demir takviyeli beton yapılarda kompozitlerin farklı kullanım alanlarındandır. Burada takviye malzemesi yük taşıyıcı elemanlardır ve matris malzemesi takviye elemanlarını bir arada tutmasını, dış etmenlerden etkilenmemesini ve yapının istenilen geometrik şekilde olmasını sağlamaktadır. Takviyeli kompozit malzemeler takviye türüne göre parçacık, fiber, yapısal takviyeli olmak üzere üç ana başlık altında incelenmektedir. Parçacık takviyeli

kompozitler düşük maliyetli ve yüksek aşınma direncine sahiptirler [5]. Örnek olarak beton yapı içerisinde kullanılan çakıl taşları yapının dayanımını artırmaktadır, araçlarda kullanılan fren diskleri içerisinde kullanılan metal malzemeler de aşınma direncini ve sürtünme kabiliyetlerini artırmaktadır.



Şekil. G.1.2. Kompozit yapıların takviye malzemesine göre sınıflandırılması [6]

Fiber takviyeli kompozitler malzemeler, sentetik ve doğal olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır. Cam, karbon, bazalt, kevlar gibi sentetik fiberler yüksek mukavemet, rijitlik, sıcaklık dayanımı, korozyon ve aşınma direnci gibi yüksek mekanik özellikler sergilemektedirler. Bunun yanında kimyasal olarak geliştirilmiş fiberler darbe tokluğu, yorulma direnci göstermektedirler ve bunlara ek olarak düşük maliyetli olmaları, ulaşılabilme kolaylığı ve doğada geri dönüşebilir olmalarından dolayı mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedirler [7]. Yapısal kompozit malzemeler, iki veya daha fazla plakaların üst üste birleştirilmesi ile meydana gelmektedir. Katmanlı (laminated) kompozitler olarak isimlendirilen yapılarda kompozit tabakalar tek yönlü, iki yönlü ve

çok yönlü olmaktadırlar. Lamine yapılarda fiber takviyeleri ve katmanlar aynı matris elemanı ile birleştirilmektedir. Fiber yönlerinde yüksek mekanik özellikler sergilerken diğer yönlerde daha düşük mekanik özelliklere sahip olmaktadırlar. Katmanlardaki fiber serim açıları değiştirildikçe farklı mekanik dayanımlar elde edilebilir. Örneğin bir katmandaki fiber açıları 30 veya 45 derece açılarla yerleştirilirse buradaki kesme yüklerine karşı daha yüksek bir dayanım elde edilebilir. Lamine kompozit yapılar üretim kontrol kolaylığı, farklı özellikler kazandırabilmesi, istenilen kalınlıkta üretim gibi avantajlı kullanım alanına sahiptirler. Bunun yanında lamine yapıların katmanlar arası mekanik özelliklerinin zayıf olması, üretim esnasında katmanlar arası boşlukların kalması, yanlış açı yönlendirilmesi, hasarlı lifler ve kalınlık farklılıkları gibi dezavantajları vardır [8].

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Tezin Konusu ve İçeriği

Bu tez konusunun amacı, topoloji optimizasyonu yöntemini kullanarak, farklı yönlerde yerleştirilerek üretilmiş karbon fiber takviyeli lamine kompozit plakaların statik ve modal davranışlarının sayısal ve deneysel olarak araştırılmasıdır. Kompozit yapılar hem malzeme hem de üretim açısından yüksek maliyetli olmalarından dolayı tasarımlarda kullanılan yapıların optimum olması önemlidir. Topoloji optimizasyonu bir tasarım için en iyi malzeme dağılımını önerdiği için kompozit yapılarda da önemli bir rol almaktadır.

Birçok çalışmada topoloji optimizasyonu ile kompozit yapılar sayısal olarak çalışılmaktadır. Fakat kompozit malzemelerin yapısı itibariyle kararsız yapılar bünyesinde barındırmaktadır. Kompozit yapıların bu özelliklerinden dolayı sayısal olarak çalışılan bir modelin doğruluğunun deneysel olarak test edilmesi gereksinimini doğurmaktadır. Bu çalışmada fiber takviyeli kompozit plakalar sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak modellenmiş ve bu model üzerine statik ve dinamik yükler altında topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Sonrasında elde edilen geometriler üretilerek bunlar üzerine deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Tez çalışması statik ve modal analizler olmak üzere iki ana başlık altında yapılmıştır. Statik yükleme koşullarında plakalara üç nokta eğme testleri yapılmıştır. Sonlu elemanlar programı olan Ansys® yazılımında ilk olarak analizler yapılmış ve bu analizler sonucuna göre yine aynı programda kütle kriterine göre topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonucunda önerilen modeller talaşlı imalat yöntemleri ile üretilmiştir. Üretilen bu modeller üzerine üç nokta eğme testleri yapılarak, fiber açılarının ve kütle oranlarının enerji sönümleme özellikleri incelenmiştir. Modal analiz çalışmalarında ise, ilk olarak Ansys programında modeller üzerine modal analizler yapılmış ve bu analizlerin

sonuçları ışığında kütle ve frekans kriterine göre ayrı ayrı topoloji optimizasyonu analizleri yapılmıştır. Analiz ve optmizasyon sonucunda önerilen modeller talaşlı imalat yöntemleri ile üretilerek bunların doğal titreşim frekansları ve sönüm oranları deneysel olarak incelenmiştir.

Sayısal ve deneysel çalışmalar sonucunda fiber yerleşim açılarının, kütle ve frekans kriterlerinin modeller üzerindeki etkileri tespit edilmiştir.

1.2. Topoloji Optimizasyonu

Tasarım alanı içerisinde malzeme dağılımının optimum kullanılma isteği bir çok yapısal optimizasyon yönteminin gelişmesini sağlamıştır. Topoloji optimizasyonu çalışma şartlarına en uygun geometriyi belirleyebilmek için kullanılan en etkili sayısal yöntemlerden birisidir ve literatürde bu yöntem üzerine birçok çalışma mevcuttur. Topoloji optimizasyonunu kabaca çalışma prensibinde dış girdi olarak, problemin çözümü için kapsamlı bir başlangıç geometrisi tanımlanır ve kısıtlama fonksiyonları için sınır şartları tanımlanır. Sonraki aşamada iteratif bir yaklaşımla sonlu elemanlar yöntemleri ve optimizasyon algoritmaları kullanılarak gerekli olmayan alanlar çıkartılır. Bu iterasyonlarda karar fonksiyonu esneklik matrisinin (compliance) minimize edilmesine dayanmaktadır. Hedef fonksiyonunun değeri yakınsandığı zaman iterasyonlar sonlandırılır ve tasarıma en uygun malzeme dağılımı elde edilir. Topoloji optimizasyonu yönteminin başlangıcı, 1988 yılında yayınlanan ve malzeme kaldırma prensibine göre çalışan yoğunluk metodu olarak da bilinen Homojenizasyon Metodudur, bu yöntemde tasarım alanı farklı yoğunluk oranlarına sahip alt elemanlardan oluşmaktadır. Yoğunluk değerleri 0 (boşluk=beyaz) ile 1 (dolu=siyah) arasında değişmektedir. Hedef fonksiyonunu elde edebilmek için esneklik (compliance) değerini minimize ederek maksimum rijitlik değerine ulaşmayı amaçlamaktadır [1]. Daha sonralarında *Cezalandırmalı Katı İzotropik Malzeme* (Solid Isotropic Material with Penalization-SIMP) metodu geliştirilmiştir. Bu yöntemde mikro elemanlara atanan yoğunluk değerine bir ceza (p) katsayısı uygulanarak, eleman yoğunluklarının 0 veya 1 değerlerine yaklaşmasını sağlamışlardır ($E_i = x_i^p E_0$). Bu sayede yoğunluk değeri $0 < \rho < 1$ arasında kalan gri eleman sayısı önemli oranda azalmakta ve daha net bir sonuç sağlamaktadır. Aynı zamanda damalı yapının engellenmesi için bir filtreleme algoritması da sunmuşlardır. Bu filtreleme algoritması mikro elemanların birbirleri ile noktasal olarak

birleşimlerini engellemektedir. Her bir mikro elemanın yoğunluk değeri hesaplanırken sadece sonlu elemanlar çözümüne bağlı kalmadan aynı zamanda çevresindeki elemanların yoğunluklarını da hesaba katan bir filtreleme geliştirmişlerdir. Bu yöntem topoloji optimizasyonunun temelini oluşturmaktadır ve topoloji optimizasyonu yapan programların da kullandığı yöntemdir [2].

Yapıların şekil ve yerleşim optimizasyonu için tek yönlü bir evrimsel süreç olan Evrimsel Yapısal Optimizasyon (Evolutionary Structural Optimization-ESO) yöntemi diğer yöntemlerden farklı olarak gerilme değerleri üzerinden bir optimizasyon yapmaktadır ve sadece eleman eksilterek tek yönde süreç ilerlemektedir. Sonlu eleman analizinden sonra elde edilen gerilme dağılımına bakarak, belirli bir gerilme değerinin altında kalan elemanlar tasarım alanından çıkartılmaktadır [9]. Çift Yönlü Evrimsel Yapısal Optimizasyon (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization-BESO) yöntemi ESO yöntemine benzer fakat farklı olarak hem malzeme eksiltme hem de malzeme ekleme prensibine göre çift yönlü çalışmaktadır. Sonlu elemanlar çözümlerinde von Mises kriterine göre gerilme değerinin düşük olduğu alanlardan malzeme eksiltip, gerilme değerinin yüksek olduğu alanlara malzeme ekleme prensibine göre çalışmaktadır [10]. Topoloji optimizasyonu için geliştirilen diğer bir yöntem ise Seviye Kümesi Metodudur (Level Set Method- LSM), bu yöntemi diğerlerinden ayıran en önemli özelliği skaler bir çözüme dayalı olmasıdır. Karmaşık problemlerde daha fazla esneklik, tasarım alanının sınırlarının da iyi belirlenmesini öngörmekte ve otomasyona uygun bir çözüm sunmaktadır [11]. Çalışmalar sadece izotropik malzemeler için değil, ortotropik özelliklere sahip malzemeler içine yapılmıştır. Geliştirilen Cezalandırmalı Katı Ortotropik Malzeme (Solid Orthotropic Material with Penalization-SOMP) yönteminde optimizasyon sürecinde sadece malzemenin dağılımı değil aynı zamanda fiberlerin yönlendirilmesi de optimize edilmektedir [12].

1.2.1 Optimizasyon Teorisi

Optimizasyon, bir problemin en iyi çözümünü bulmak demektir. Bir problemin çözümünde değişken sayısı denklem sayısına eşitse tek bir çözüm vardır. Eğer değişken sayısı denklem sayısından fazla ise çok sayıda çözüm vardır. Optimizasyon yöntemleri bu şekilde birden fazla çözümün olduğu durumlarda en iyi çözümü elde etmek için kullanılır.

$$X = \{X_1, X_2, X_3, \ldots . X_n\} \qquad Tasarım\ Değişkenleri \tag{1.1}$$

$$f_1(x), f_2(x) \qquad Hedef\ Fonksiyonları \tag{1.2}$$

$$\left.\begin{array}{ll} g_j(x) \leq 0 & j = 1, 2, 3, \ldots m \ \rightarrow \ Eşitsizlikler \\ l_j(x) \leq 0 & j = 1, 2, 3, \ldots m \ \rightarrow \ Eşitlikler \\ x_i^l \leq x_i \leq x_i^u 0 & i = 1, 2, 3, \ldots n \ \rightarrow \ Sınır\ Şartları \end{array}\right\} Kısıtlamalar \tag{1.3}$$

Yukarıda tasarım değişkenleri, hedef fonksiyonları ve kısıtlardan oluşan standart bir optimizasyon formülü verilmiştir. Burada asıl amaç hedef fonksiyonlarını minimize ve/veya maksimize etmektir. Özellikle yapısal optimizasyon problemlerinde olduğu gibi birden fazla hedef fonksiyonunun olduğu ve birini minimize etme diğerini de maksimize etmek gerektiğinde, hedef fonksiyonunu her ikisini de yapabilecek şekilde tekil fonksiyona düşürmek gerekmektedir. Tekil hedef fonksiyonunu elde etmek için basit iki yöntem kullanılmaktadır.

$$\left.\begin{array}{l} f_1(X) \ \rightarrow \ Minimize \\ f_2(X) \ \rightarrow \ Maksimize \end{array}\right\} Çoklu\ Hedef \tag{1.4}$$

Burada minimize edilmek istenilen $f_1(X)$ hedef fonksiyonu gerilme, yer değiştirme gibi değerler olabilir, $f_2(X)$ hedef fonksiyonu ise problemin yük taşıma kapasitesi olabilir. Böyle her iki durumunda olduğu problemlerde;

$$f_1(X)/f_2(X) \qquad \rightarrow Minimize \qquad Bölme\ yöntemi \tag{1.5}$$

$$\left.\begin{array}{l} w_1 f_1(X) + w_2\left(-f_2(X)\right) \\ w_1 + w_2 = 1 \end{array}\right\} \rightarrow \ Minimize \qquad Toplama\ Yöntemi \tag{1.6}$$

Bölme yönteminde maksimize edilmek istenilen fonksiyon $f_2(X)$, minimize edilmek istenilen $f_2(X)$ fonksiyonuna bölünerek tekil bir minimize hedef fonksiyonu elde edilir. Toplama yönteminde ise maksimize edilme istenilen fonksiyon eksi değerle çarpılır ve her iki hedef fonksiyonu toplamları bir olan ağırlık değerleri ile çarpılarak toplanarak minimize hedef fonksiyonu elde edilir. Toplama yönteminde ağırlık değerleri sayesinde fonksiyonların önem dereceleri de değiştirilebilir.

Optimizasyon yaklaşımı yapısal optimizasyonlar için aşağıda gösterildiği gibi tanımlanmaktadır. Burada hedef fonksiyonları için verilen parametreler, kısıtlar için verilmemelidir. Esneklik (compliance) değerini minimize etmek isteniyorsa, kısıt fonksiyonlarına esneklik verilmemesi gerekir.

$X = \{X_1, X_2, X_3, \ldots . X_n\}$ *Geometri ve Malzeme Parametreleri,*

$$\left.\begin{matrix} f_1(X) \rightarrow Minimize \\ f_2(X) \rightarrow Maksimize \end{matrix}\right\} Hedef\ fonk.$$ *Kütle, esneklik, rijitlik, şekil, gerilme, vb.*

$g_j(x) \leq 0$ Hacim, gerilme, şekil değiştirme, vb.

$l_j(x) \leq 0$ $F = K.U$

$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u 0$ Sınır şartları

1.2.2 Topoloji Optimizasyonu Teorisi

Yapısal optimizasyon, yapıların yükleme koşullarına en iyi şekilde dayanabilecek geometrileri önermektedir. Yazılım ve uygulamalarda kullanılan en yaygın yöntem SIMP metodudur. Yoğunluk metodu olarak da bilinen bu yöntem, sonlu elemanlar, optimizasyon kriteri ve filtreleme ana adımlarından meydana gelen bir çevrim şeklinde ilerlemektedir. Tasarım alanı kübik elemanlara bölünür ve elamanların yoğunlukları ile elastik modülü arasında bir bağ kurulur.

$$E_i = E_i(x_i) = x_i^p E_0 \qquad x_i \in]0, 1] \qquad (1.7)$$

$$E_i = E_i(x_i) = E_{min} + x_i^p (E_0 - E_{min}) \qquad x_i \in]0, 1] \qquad (1.8)$$

Burada x_i elemanların yoğunluğu (tasarım değişkeni), E_0 dolu malzemenin elastiklik modülü, E_i elemanların elastiklik modülü ve p ise cezalandırma katsayısıdır. Her bir eleman için yoğunluk tanımlanır ve yoğunlukları elastiklik modül ile ilişkilendiren bir eşitlik verilmektedir. Burada sonlu elemanlar çözümü ile her bir elemanın yoğunluğu 0 boş (beyaz) ile 1 dolu (siyah) arasında değişmektedir. Arada kalan ($0 < x_i < 1$) gri elemanlar için ise p>1 olacak şekilde bir ceza katsayısı uygulanarak eleman yoğunlukları

0 ile 1 değerine yakınlaşması sağlanmaktadır. Denklem 1.8'de boşluk elemanın değeri olan 0 sonlu elemanlar çözümünde rijitlik matrisinde tekilliğe sebep olmasından dolayı, boşluk elemanın elastiklik modülü E_{min} olarak tanımlanır [2].

Statik problemler için topoloji optimizasyonunun temel matematiksel formülü şu şekilde özetlenebilir:

$$c(x) = U^T K U = \sum_{e=1}^{N} E_e(x_e)\, u_e^T k_0 u_e \tag{1.9}$$

$$V(x)/V_0 = f \tag{1.10}$$

$$KU = F \tag{1.11}$$

$$0 \leq x \leq 1 \tag{1.12}$$

Burada *c* esneklik (compliance), *U* yer değiştirme vektörü, *K* küresel rijitlik matrisi, *F* kuvvet vektörü, V_0 tasarım hacmi (başlangıç hacmi), $V_{(x)}$ hedef hacim, *f* hacim oranı. İşlemler ilk olarak sonlu elemanlar çözümü ile başlar. Burada verilen başlangıç değerlerine göre bir yer değiştirme elde eder ve bu yer değiştirme değeri topoloji optimizasyonunun hedefi olan *f* oranına ulaşabilmek için esneklik değerini minimize etmek için kullanılır.

Optimizasyon işleminin temel ikinci adımı optimizasyon kriteri şu şekilde formüle edilmiştir:

$$x^{k+1} = x^k + m\nabla c^k(x) \tag{1.13}$$

Denklem 1.13 türev tabanlı optimizasyon algoritması gösterilmektedir. Burada x^k iterasyondaki mevcut yoğunluk, m iterasyon adımı, c'de yoğunluğa bağlı hedef fonksiyonu olan esnekliği (compliance) göstermektedir. İterasyon süreci x^{k+1} ve x^k değerleri arasındaki fark tanımlanmış bir değere ulaşıncaya kadar devam eder. Türev tabanlı algoritmalar lokal minimum veya maksimum noktalarına takılabilirler. Bunların önlenebilmesi için kısıt fonksiyonlarının dikkatli bir şekilde tanımlanması gerekmektedir.

$$\frac{\partial c(x)}{\partial x_e} = -p x_e^{p-1}(E_0 - E_{min}) u_e^t k_0 u \tag{1.14}$$

$$\frac{\partial V}{\partial x_e} = v_e \tag{1.15}$$

Denklem 1.14 daha önceden tanımlanmış olan esneklik fonksiyonunun, denklem 1.15 ise hacmin türevidir.

$$\lambda = \frac{(l_2 + l_1)}{2} \tag{1.16}$$

$$\frac{l_2 - l_1}{l_1 + l_2} > 0{,}003 \tag{1.17}$$

Burada λ lagrange çarpanıdır, hacim kısıtı sağlanmamışsa $l_1 = \lambda$ alınır, hacim kısıtı sağlanmışsa $l_2 = \lambda$ olarak devam eder. İşlem 1.17' de gösterilen şart sağlandığında istenilen λ değerine ulaşılmıştır.

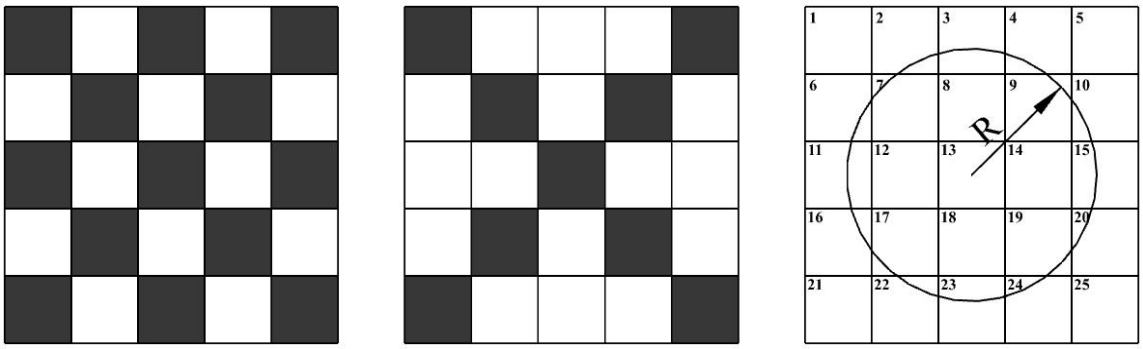
$$B_e = \frac{-\frac{\partial c(x)}{\partial x_e}}{\lambda \frac{\partial V(x)}{\partial x_e}} \tag{1.18}$$

Denklem 1.18'de hem esneklik hem de hacim kısıtına göre optimizasyon gerçekleşmektedir.

$$x_e^{Yeni} = \begin{cases} max(0, x_e - m), & eğer\ x_e B_e^{\eta} \leq max(0, x_e - m) \\ min(1, x_e + m), & eğer\ x_e B_e^{\eta} \geq max(0, x_e - m) \\ x_e B_e^{\eta}, & yoksa \end{cases} \tag{1.19}$$

Optimizasyon algoritması yeni yoğunluk değerlerini tespit etmek için eşitlik 1.19'da güncellenmiştir ve üç ayrı durumda değerlendirmektedir. $m = 0{,}2$ pozitif hareket limiti, $\eta = 0{,}5$ sönüm katsayısı olarak tanımlanmıştır. Sonlu elemanların ve optimizasyon algoritmalarının vermiş olduğu yanıtlar fiziki uygulamalar için uygun olmayabilir Elemanlara tanımlanan yoğunluk ve malzeme eksiltme sonucunda Şekil 1.1'de görüldüğü gibi noktasal temasların olduğu bir yapı oluşabilmektedir. Bunun önüne geçebilmek için bir düzenleme tekniği geliştirilmiştir. Her bir eleman belirli bir R yarıçapında daire içerisindeki kalan elemanların yoğunluğuna bağlı olarak yeniden bir yoğunluk ataması

yapılmakta ve fiziksel zorluk oluşturacak damalı yapının ortadan kalkması sağlanmaktadır [2].



Şekil 1.1. Dama tahtası hatası ve filtreleme

$$\frac{\widehat{\partial c}}{\partial x_e} = \frac{1}{\max(\gamma, x_e)\sum_{i\in N_e} H_{ei}} \sum_{i\in N_e} H_{ei}\, x_i \frac{\partial c}{\partial x_i} \tag{1.20}$$

$$N_e = \{i : dist(e,i) \le R\} \tag{1.21}$$

$$H_{ei} = R - dist(e,i) \tag{1.22}$$

$$\tilde{x}_e = \frac{1}{\sum_{i\in N_e} H_{ei}} \sum_{i\in N_e} H_{ei} x_e \tag{1.23}$$

Denklem 1.23'te bir filtreleme işlemi yapılmaktadır ve N_e eleman kümesi tanımlanan R yarıçapı içerisinde kalan alan, H_{ei} yoğunluğu hesaplanan elemanın diğer elemana olan uzaklığı, $\tilde{x}_e$'de filtre uygulanmış yeni yoğunluk değeridir.

Modal analizin temel amacı, yapının doğal frekanslarını, titreşim modlarını ve bunların özelliklerini belirlemektir. Modal analiz optimizasyonu problemlerinde optimizasyon süreci, statik problemlerde izlenilen sürecin aynısıdır. Modal analiz optimizasyonunda farklı olarak problemin doğası gereği amaç fonksiyonu değişmesi gerekmektedir. Statik problemlerde amaç fonksiyonu esnekliği minimize etmek için kullanılırken, öz frekans optimizasyonunda titreşim frekansını maksimize etmek için kullanılır. Modal analiz olarak isimlendirilen problemler için topoloji optimizasyonunun amaç fonksiyonu şu şekilde özetlenebilir:

$$\max_j \omega_j^2(x) \tag{1.24}$$

$$\int_{\Omega} x dV - \overline{V} \leq 0 \tag{1.25}$$

$$\left[K - \omega_j^2 M\right]\phi_j = 0 \qquad j = 1, \ldots, m \tag{1.26}$$

$$\phi_j M \phi_k = \delta_{jk} \qquad j, k = 1, \ldots, m \tag{1.27}$$

Burada ω_j doğal açısal frekans, ϕ_j j modunun özvektörü, V hacim, $\overline{V}$ hacim oranı, M kütlesel matris, δ_{jk} kronocker delta. Amaç fonksiyonu (1.24) doğal frekansı maksimize etmeyi hedeflemektedir.

1.3. Kompozit Malzeme Mekaniği

Kompozit malzeme mekaniği, birbiri içinde çözünemeyen malzemelerin belirli şartlarda bir araya getirilerek oluşturduğu yapıları incelemektedir. Kompozit malzemeler doğası gereği geleneksel malzemelere göre üstün mekanik özellikler sergilemektedirler ve ayrıca ihtiyaç duyulan gereksinimleri karşılayabilecek şekilde üretilebilme özelliği sayesinde yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Kompozit malzemelerin Şekil G.2'de gösterildiği gibi birçok çeşidi bulunmaktadır, burada fiber takviyeli katmanlı kompozitler incelenecektir. Fiber takviyeli kompozit yapılar genellikle farklı yönlerde laminaların üst üste sıralanması şeklinde oluşan katmanlı bir yapıdır. Bu yapıların mekanik özelliklerinin tespit edilmesi izotropik malzemelere göre daha zor ve maliyetlidir. Katmanlı kompozit yapıların mekanik davranışlarını belirleyebilmek için laminanın makromekanik ve mikromekanik özelliklerinin incelenmesi gerekmektedir.

1.3.1 Laminanın Mikromekanik Analizi

Fiber ve matrislerden oluşan kompozit laminaların mekanik özellikleri yönden bağımsız değildir ve bu sebepten dolayı farklı yönlerdeki mekanik özelliklerinin tespit edilmesi gerekmektedir. kompozit yapıyı oluşturan fiber ve matris oranlarına göre kompozit laminanın kütle ve hacim oranının belirlenmesi gerekmektedir. Bu bileşenlerinin hacim oranları şu şekilde tespit edilmektedir:

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \tag{1.28}$$

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \tag{1.29}$$

$$V_f + V_m = 1 \tag{1.30}$$

$$v_f + v_m = v_c \tag{1.31}$$

Burada v_f fiberin, v_m matrisin ve v_c kompozitin hacim değerleridir. Kompozit yapının belirlenmesi gereken diğer bir özelliği ise farklı yönlerdeki mekanik özellikleridir. Boylamasına Elastiklik modülü hesaplaması aşağıdaki eşitlikler ile gösterilmiştir. *F* kuvvet, σ gerilme, *A* kesit alanı, *E* elastiklik modülü ve ε birim şekil değiştirmedir.

$$F_c = F_f + F_m \tag{1.32}$$

$$F = \sigma A \tag{1.33}$$

$$\sigma = E\varepsilon \tag{1.34}$$

$$E_1 \varepsilon_c A_c = E_f \varepsilon_f A_f + E_m \varepsilon_m A_m \tag{1.35}$$

Denklemler (1.33) ve (1.32) kompozit, fiber ve matris için yazılıp, denklem (1.31)' de yerine yazıldığında denklem (1.34) elde edilir. E_1 boyuna elastiklik modülü, E_2 enine elastiklik modülü, v_{12} major poison oranı ve G_{12} düzlem kayma modülüdür.

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \tag{1.36}$$

$$\frac{1}{E_2} = \frac{v_f}{E_f} + \frac{v_m}{E_m} \tag{1.37}$$

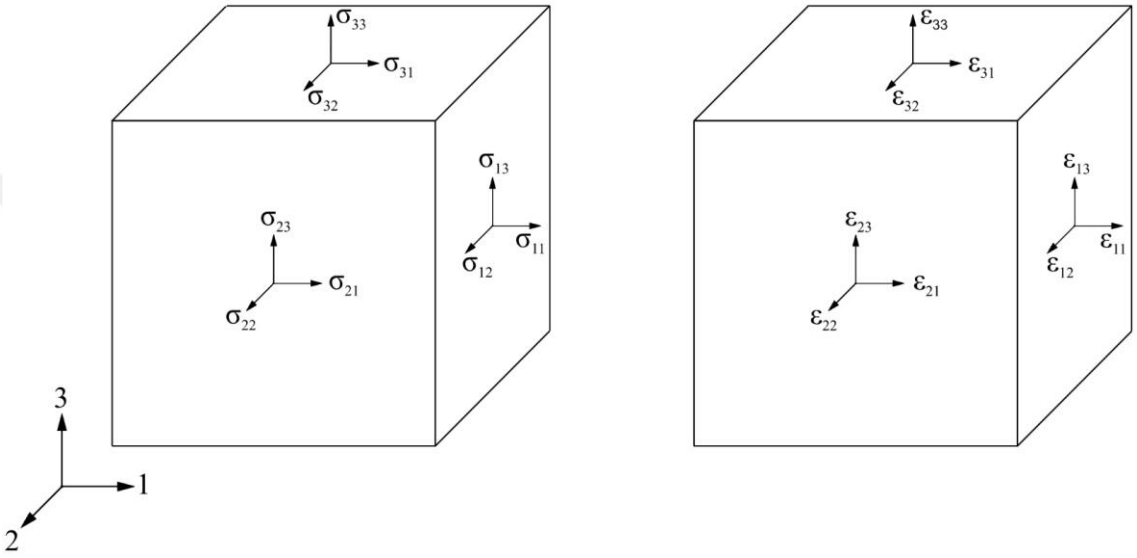
$$v_{12} = v_f V_f + v_m V_m \tag{1.38}$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{v_f}{G_f} + \frac{v_m}{G_m} \tag{1.39}$$

1.3.2 Laminanın Makromekanik Analizi

Katmanlı kompozitler, ince yapıya sahip laminaların kalınlıkları boyunca istiflenmesi ile oluşur. Burada plakaların davranışlarını anlayabilmek için öncelikle tek tek katmanların davranışlarının belirlenmesi gerekmektedir. Laminanın makromekanik analizi, birden fazla farklı yönlerde yönlenmiş katmanlardan oluşan kompozitin bir noktasındaki gerilme ve şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi incelemektedir. Laminanın makro mekanik analizi, bazı varsayımlar doğrultusunda yapılmaktadır bunlar;

- Her katman ince ve eşit kalınlıktadır ve Hooke yasası uygulanır.
- Her katman düzlem gerilme hali mevcuttur.
- Her katman homojen bir malzeme olarak kabul edilir.
- Laminant yapı mükemmel bir şekilde bağlanmış laminalardan oluşur.



Şekil 1.2. Hacim elemanda gerilme ve gerinme pozitif yüzeylerdeki yönleri

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl} \tag{1.40}$$

Denklem 1.40'da genelleştirilmiş Hooke kanununun indis notasyonunda, gerilme ve şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi göstermektedir. σ_{ij} gerilme tensörü, ε_{kl} gerinme tensörü ve C_{ijkl} dördüncü dereceden rijitlik matrisini göstermektedir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{21} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1131} & C_{1112} & C_{1132} & C_{1113} & C_{1121} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2231} & C_{2213} & C_{2232} & C_{2213} & C_{2221} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3331} & C_{3312} & C_{3332} & C_{3313} & C_{3321} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2331} & C_{2312} & C_{2332} & C_{2313} & C_{2321} \\ C_{3111} & C_{3122} & C_{3133} & C_{3123} & C_{3131} & C_{3112} & C_{3132} & C_{3113} & C_{3121} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1231} & C_{1212} & C_{1232} & C_{1213} & C_{1221} \\ C_{3211} & C_{3222} & C_{3233} & C_{3223} & C_{3231} & C_{3212} & C_{3232} & C_{3213} & C_{3221} \\ C_{1311} & C_{1322} & C_{1333} & C_{1323} & C_{1331} & C_{1312} & C_{1332} & C_{1313} & C_{1321} \\ C_{2111} & C_{2122} & C_{2133} & C_{2123} & C_{2131} & C_{2113} & C_{2132} & C_{2113} & C_{2121} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{32} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} \end{Bmatrix} \tag{1.41}$$

Rijitlik matrisi, malzeme simetrisine sahip olduğu için, matrisin son üç satır ve sütun silinebilir ve denklem 1.42'deki halini alır.

$$\begin{Bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\\ \sigma_{33}\\ \sigma_{23}\\ \sigma_{31}\\ \sigma_{12}\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1131} & C_{1112}\\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2231} & C_{2213}\\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3331} & C_{3312}\\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2331} & C_{2312}\\ C_{3111} & C_{3122} & C_{3133} & C_{3123} & C_{3131} & C_{3112}\\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1231} & C_{1212}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \varepsilon_{33}\\ \varepsilon_{23}\\ \varepsilon_{31}\\ \varepsilon_{12}\end{Bmatrix} \tag{1.42}$$

Rijitlik matrisi olan $[C]$'nin tersi alındığında, topoloji optimizasyonundan amaç fonksiyonu olarak kullanılan esneklik (compliance) matrisi $[S]$ elde edilir.

$$[C]^{-1} = [S] \tag{1.43}$$

$$\begin{Bmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \varepsilon_{33}\\ \varepsilon_{23}\\ \varepsilon_{31}\\ \varepsilon_{12}\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}S_{1111} & S_{1122} & S_{1133} & S_{1123} & S_{1131} & S_{1112}\\ S_{2211} & S_{2222} & S_{2233} & S_{2223} & S_{2231} & S_{2213}\\ S_{3311} & S_{3322} & S_{3333} & S_{3323} & S_{3331} & S_{3312}\\ S_{2311} & S_{2322} & S_{2333} & S_{2323} & S_{2331} & S_{2312}\\ S_{3111} & S_{3122} & S_{3133} & S_{3123} & S_{3131} & S_{3112}\\ S_{1211} & S_{1222} & S_{1233} & S_{1223} & S_{1231} & S_{1212}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\\ \sigma_{33}\\ \sigma_{23}\\ \sigma_{31}\\ \sigma_{12}\end{Bmatrix} \tag{1.44}$$

Anizotropik malzeme için rijitlik tensörü $C_{ij} = C_{ji} = 0$ olduğu için, 21 bağımsız sabitten, 9 bağımsız sabite düşer.

$$\begin{Bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\\ \sigma_{33}\\ \sigma_{23}\\ \sigma_{13}\\ \sigma_{12}\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & 0 & 0 & 0\\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & 0 & 0 & 0\\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & C_{2323} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{3131} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1212}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \varepsilon_{33}\\ \varepsilon_{23}\\ \varepsilon_{31}\\ \varepsilon_{12}\end{Bmatrix} \tag{1.45}$$

Esneklik matrisi;

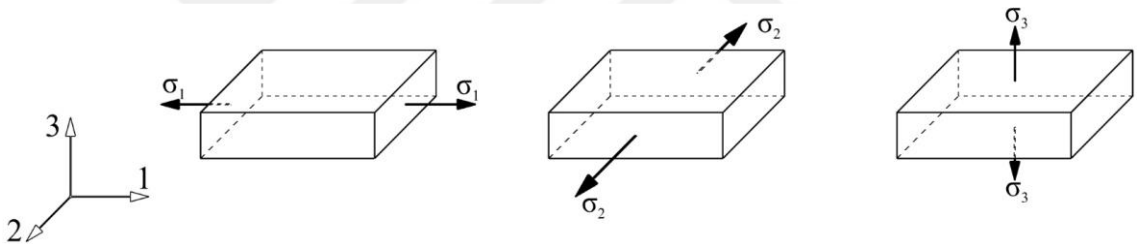
$$\begin{Bmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \varepsilon_{33}\\ \varepsilon_{23}\\ \varepsilon_{31}\\ \varepsilon_{12}\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}S_{1111} & S_{1122} & S_{1133} & 0 & 0 & 0\\ S_{2211} & S_{2222} & S_{2233} & 0 & 0 & 0\\ S_{3311} & S_{3322} & S_{3333} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & S_{2323} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{3131} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{1212}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\\ \sigma_{33}\\ \sigma_{23}\\ \sigma_{31}\\ \sigma_{12}\end{Bmatrix} \tag{1.46}$$

$$11 \rightarrow 1,\ 22 \rightarrow 2,\ 33 \rightarrow 3,\ 23 \rightarrow 4,\ 31 \rightarrow 5,\ 12 \rightarrow 6 \tag{1.47}$$

İndis notasyonunda 1.47'daki kısaltmalar uygulandığı zaman 1.48 ve 1.49 matrisleri elde edilir.

$$\begin{Bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \sigma_4\\ \sigma_5\\ \sigma_6\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0\\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0\\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66}\end{bmatrix} \begin{Bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \varepsilon_4\\ \varepsilon_5\\ \varepsilon_6\end{Bmatrix} \tag{1.48}$$

$$\begin{Bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \varepsilon_4\\ \varepsilon_5\\ \varepsilon_6\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0\\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0\\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66}\end{bmatrix} \begin{Bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \sigma_4\\ \sigma_5\\ \sigma_6\end{Bmatrix} \tag{1.49}$$



Şekil. 1.3. Normal Gerilme Durumu

Cisme Şekil 1.3'te gösterildiği gibi σ_1 yönünde çekme gerilmesi uygulandığında, 1 yönünde uzama diğer yönlerde kısalma meydana gelir. Bu durumda gerilme ve gerinmeler;

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix}\sigma_{11} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix} \tag{1.50}$$

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix}\varepsilon_1 & 0 & 0\\ 0 & -v_{12}\varepsilon_1 & 0\\ 0 & 0 & -v_{13}\varepsilon_1\end{bmatrix} \tag{1.51}$$

Genel durum için 1.49, 1.50 ve 1.51 eşitliklerine göre esneklik matrisi, malzemenin elastiklik modülleri ve poison oranları cinsinden tanımlanmış olur.

$$\varepsilon_i = S_{ij}\sigma_j \tag{1.52}$$

σ_1 yönünde çekme gerilmesine maruz kaldığında;

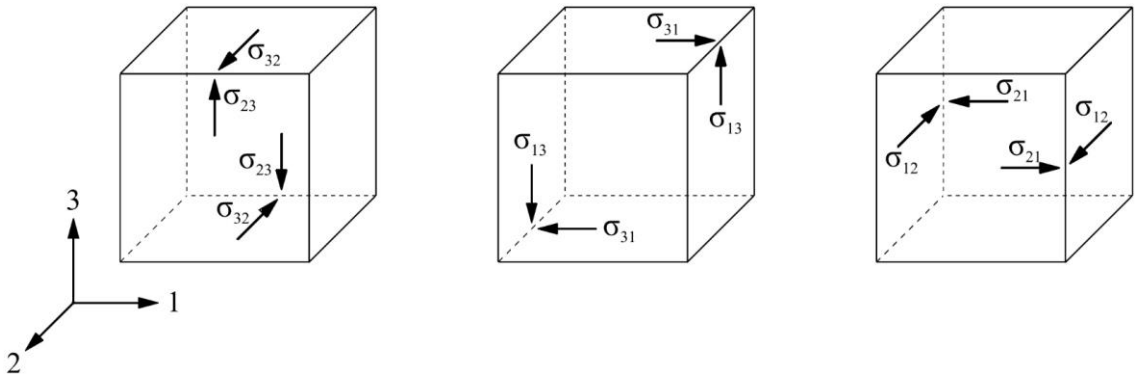
$$S_{11} = \frac{1}{E_1}, \qquad S_{21} = \frac{-v_{12}}{E_1}, \qquad S_{31} = \frac{-v_{13}}{E_1} \tag{1.53}$$

σ_2 yönünde çekme gerilmesine maruz kaldığında;

$$S_{12} = \frac{-v_{21}}{E_2}, \qquad S_{22} = \frac{1}{E_2}, \qquad S_{32} = \frac{-v_{23}}{E_2} \tag{1.54}$$

σ_3 yönünde çekme gerilmesine maruz kaldığında;

$$S_{13} = \frac{-v_{31}}{E_3}, \qquad S_{23} = \frac{-v_{32}}{E_3}, \qquad S_{33} = \frac{1}{E_3} \tag{1.55}$$



Şekil. 1.4. Kayma gerilmesi

Cisim sadece kayma gerilmesine maruz olduğu durumlarda kayma şekil değiştirmesi, kayma gerilmesinin kayma modülüne oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$\gamma_{12} = \frac{\sigma_{12}}{G_{12}}, \qquad \gamma_{23} = \frac{\sigma_{23}}{G_{23}}, \quad \gamma_{31} = \frac{\sigma_{31}}{G_{31}} \tag{1.56}$$

Ortotoropik malzemeler için oluşturulan esneklik [S] ve rijitlik [C] matrislerindeki değerler, termodinamiğin birinci yasası gereğince pozitif olması gerekmektedir. Bunun için (1.57) ve (1.59) deki matrislerin köşegen değerlerinin pozitif olmalıdır [5].

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-v_{12}}{E_2} & \frac{-v_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-v_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{-v_{23}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-v_{13}}{E_1} & \frac{-v_{12}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \tag{1.57}$$

$$\nabla = \frac{1-v_{12}v_{21}-v_{23}v_{32}-v_{13}v_{31}-2v_{21}v_{32}v_{13}}{E_1E_2E_3} \tag{1.58}$$

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{1-v_{23}v_{32}}{E_2E_3\nabla} & \frac{v_{21}+v_{31}v_{23}}{E_2E_3\nabla} & \frac{v_{31}+v_{21}v_{32}}{E_2E_3\nabla} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{v_{21}+v_{31}v_{23}}{E_2E_3\nabla} & \frac{1-v_{13}v_{31}}{E_1E_3\nabla} & C_{23} = \frac{v_{32}+v_{12}v_{31}}{E_1E_3\nabla} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{v_{31}+v_{21}v_{32}}{E_2E_3\nabla} & C_{23} = \frac{v_{32}+v_{12}v_{31}}{E_1E_3\nabla} & \frac{1-v_{12}v_{21}}{E_1E_2\nabla} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \tag{1.59}$$

Esneklik matrisi köşegen elemanlarının pozitif değer olabilmesi için;

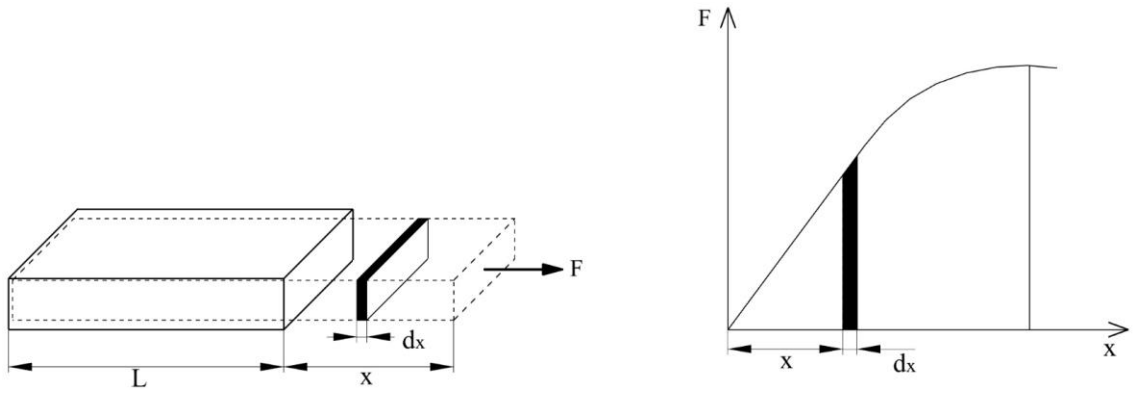
$$E_1 > 0, \quad E_2 > 0, \quad E_3 > 0, \quad G_{12} > 0, \quad G_{23} > 0, \quad G_{31} > 0 \tag{1.60}$$

Rijitlik matrisi köşegen elemanlarının pozitif değer olabilmesi için;

$$1 - v_{23}v_{32} > 0, \quad 1 - v_{13}v_{31} > 0, \quad 1 - v_{12}v_{21} > 0, \quad \nabla > 0 \tag{1.61}$$

1.4. Şekil Değiştirme Enerjisi

Şekil değiştirme enerjisi, bir cismin düşük hızda kuvvetlerin etkisi altında elastik olarak deforme olabilmesi için depoladığı enerjidir ve aynı zamanda sistemin yük altındaki absorbe ettiği enerjiyi de göstermektedir.

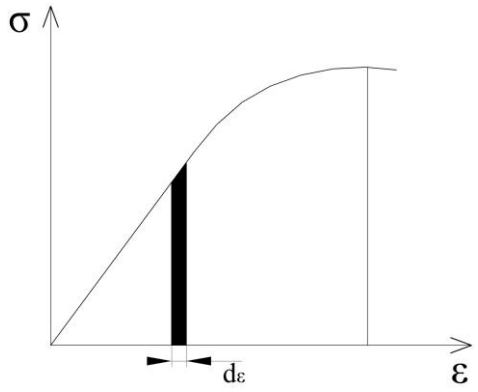


Şekil. 1.5. Şekil değiştirme enerjisi

Normal kuvvetlerin etkisi altında kalan bir cismin şekil değiştirme enerjisi, kuvvet-deformasyon eğrisi altında kalan alana eşittir.

$$U = \int F d_x \tag{1.62}$$

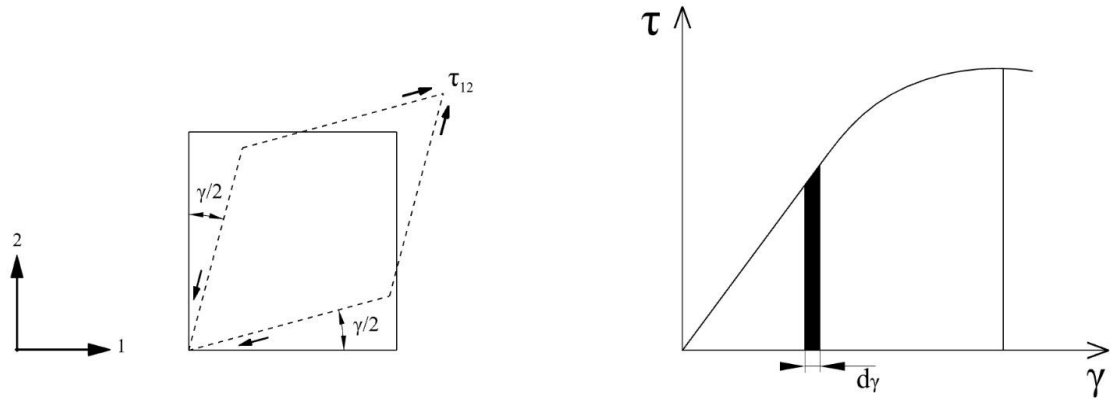
Şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu, cismin boyutlarından bağımsız olarak malzeme özelliklerine göre değerlendirmemizi sağlamaktadır. Bunun için normal gerilme halinde cismin gerilme-şekil değiştirme eğrisi altında kalan alanın integrali, şekil değiştirme enerjisi yoğunluğunu verecektir.



Şekil. 1.6. Gerilme şekil değiştirme grafiği

$$U = \int \sigma d_\varepsilon \tag{1.63}$$

Bir cisim düzlem kayma gerilmesine maruz kaldığı durumlarda şekil değiştirme enerjisi kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirmesi grafiğinin altındaki alanın integrali ile hesaplanmaktadır.



Şekil 1.7 Kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirme grafiği

$$U = \int \tau d_\gamma \tag{1.64}$$

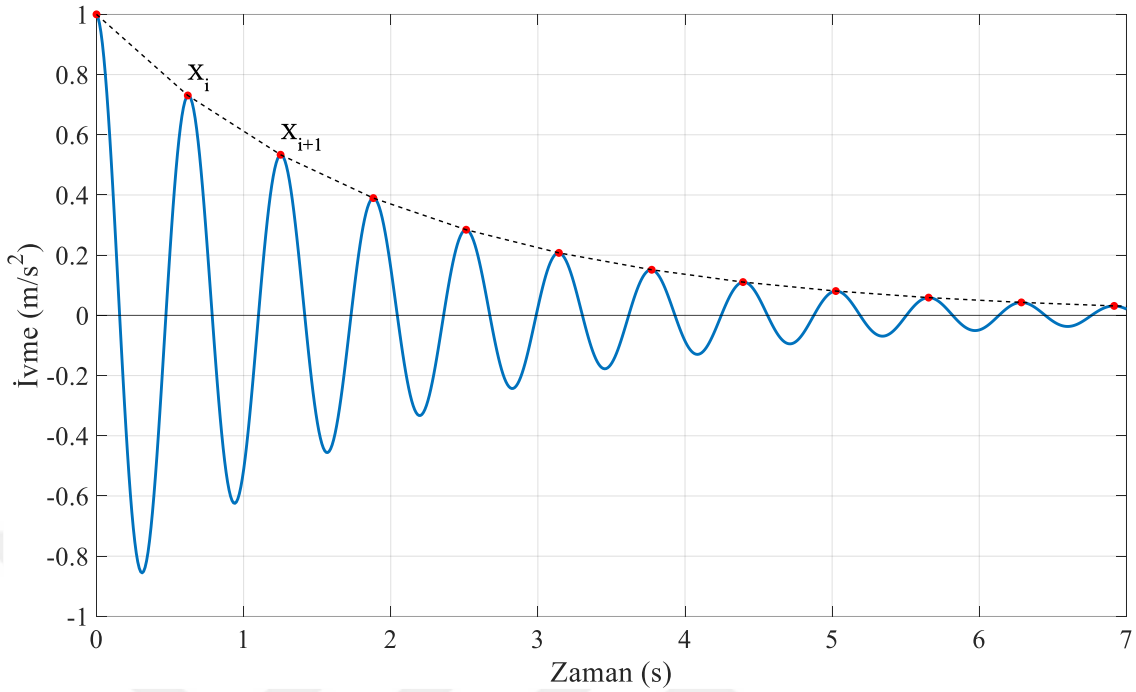
Burada sistemlerin şekil değiştirme enerjileri, sistemin absorbe ettiği enerjiyi de göstermemektedir. Bir sistemin absorbe ettiği enerji miktarının daha net anlaşılabilmesi için, sistemin kütlesinden bağımsız olması gerekmektedir. Sistemin yük altında absorbe ettiği enerjinin kütlesine oranı, sistemin kütleden bağımsız olmasını sağlamaktadır ve Spesifik Absorbe Enerji olarak isimlendirilir ve denklem 1.64 ile hesaplanır.

$$SAE = \frac{U}{m} \tag{1.64}$$

1.5. Sönüm Oranı

1.5.1. Logaritmik Azalma Metodu (Logarithmic Decrement)

Logaritmik azalma (Logaritmik Dekrement), serbest titreşim durumundaki bir sistemin sönüm katsayısını belirleyebilmek için kullanılan yöntemlerden birisidir. Sönümlü bir sistemde titreşimin genliği logaritmik olarak zamana bağlı azalmaktadır. Serbest titreşim esnasında, salınımın maksimum olduğu ardışık tepe noktaları kullanılarak sönüm katsayısı hesaplanabilmektedir. Sönüm oranı denklem 1.65'te gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir. Burada, ζ sönüm oranını, X_i pik noktalarını ve n de tekrar sayısını göstermektedir.



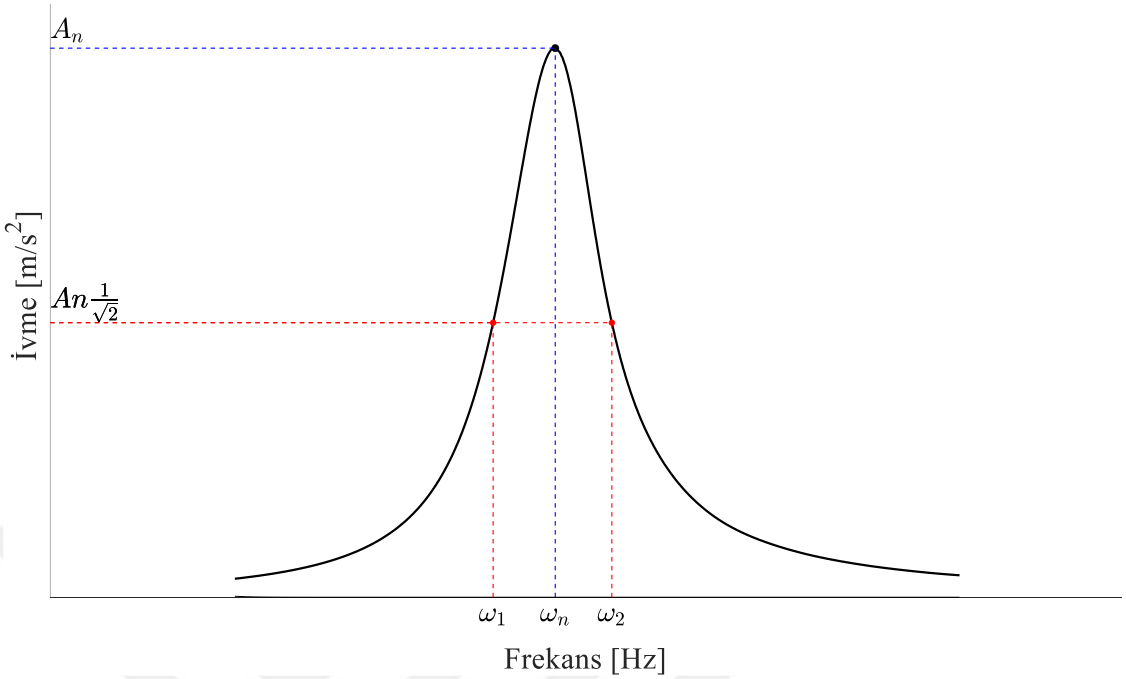
Şekil 1.8 Doğal titreşimli sistemin zaman ivme grafiği

$$\delta_n = ln\frac{X_i}{X_i+n} = n\frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \tag{1.64}$$

1.5.2. Yarım Güç Bant Genişliği Metodu (Half-Power Bandwidth Method)

Bu yöntemle serbest titreşim halindeki bir sistemin sönüm oranı, doğal titreşim frekansı değerleri kullanılarak hesaplanabilmektedir. Yarım güç bant genişliği metodu sistemlerin titreşim genlik değerinin ve/veya tabaka kalınlığının düşük olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Doğal titreşim durumundaki sistemden alınan veriler FFT (Fast Fourier Transform) yardımıyla frekans ve ivme verilerine dönüştürülmektedir. Sitemin birinci moduna karşılık gelen frekans-ivme pik değerinden, denklem 1.65'te gösterildiği gibi sönüm değeri hesaplanabilmektedir. Şekil 1.7'de ki grafikte gösterildiği gibi *An* doğal frekans değerine (birinci mod) karşılık gelen ivme değeri $1/\sqrt{2}$ ile çarpılır, burada elde edilen ivme değerinden y eksenine dik çizilen doğru ile doğal frekans eğrisini kestiği noktalar bulunur. Son olarak denklem 1.65'te gösterildiği gibi sönüm oranı hesaplanır.

$$\zeta = \frac{\omega_2-\omega_1}{\omega_n} \tag{1.65}$$



Şekil 1.9 Doğal titreşimli sistemin frekans ivme grafiği

1.6. Literatür çalışması

Topoloji optimizasyonu farklı malzemeler, yöntemler ve çalışma şartları için literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Tez kapsamında fiber takviyeli laminant kompozit malzeme kullanılarak, farklı serim açılarında, statik ve modal analizler yapılmıştır.

Eckrich et al.[13], anizotropik malzemeler için hem topolojiyi hem de fiber yönelimlerini aynı anda hesaba katarak optimize edebilecek bir yöntem sunmuşlardır. Bu yöntemde Puck's hasar kriterini kullanarak yapının belirtilen yüklere dayanabilecek şekilde ağırlığını azaltmaktadır. Bu yöntem aynı zamanda dilatasyon hassasiyeti filtresi kullanarak, fiber demet genişliklerini de hesaplamaktadır. Filtre yarıçapının büyümesi ile yapının iç desteklerinin daha sade ve daha büyük ölçekli almasını sağlamaktadır. Fiber yollarını belirleyebilmek için kümeleme ve akış çizgisi algoritmaları kullanmışlardır. Eleman yönelimlerini bir vektör alanı olarak tanımlayan ve bu alan içerisindeki elemanların vektörlerine ortalama bir yönelim açısı ve yönelim vektörü tanımlayarak fiber yollarını belirlemişlerdir. Sayısal olarak yapılan bu çalışmada geliştirilen optimizasyon algoritması, hem topoloji hem de fiber yolları için bir çözüm sunmaktadır, bununla birlikte fiber demetlerinin birleşim noktalarında bir süreksizliğin oluşabileceğini ve bu bölgelerin desteklenerek güçlendirilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır.

Bruns ve Tortorelli [14], çalışmalarında düşük yoğunluğa sahip elemanları sistematik olarak çıkartıp yeniden ekleyen bir yöntem sunmuşlardır. Bu yöntemde malzeme yoğunluğu dağıtımını doğrusal olmayan bir sayısal yöntemle optimize etmektedir. Malzeme yoğunluğunun sıfır değere sahip olması sayısal çözümlemede tekilliğe sebebiyet vermesinden dolayı, malzeme yoğunluk değerine pozitif olacak şekilde çok küçük bir sayı değeri atanmıştır. Sayısal olarak önemli fakat yapısal olarak önemli olmayan elemanların tasarım alanından çıkartılmasını kolaylaştırmışlardır. Doğrusal olmayan elastik analizlerin çözüm süresini kısaltmış ve üç boyutlu problemlerin çözümü için kolaylıkla uygulanabilirliğini sunmuşlardır.

Schmidt et al. [15], çalışmalarında yoğunluk tabanlı topoloji optimizasyonu yöntemi üzerine hassasiyete dayalı izotropik fiber takviyeli yapılarda birden fazla yük durumunu göz önünde bulundurarak üç boyutlu malzeme yönelim optimizasyonu için hassasiyete dayalı bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde yol eğrilerinin düzenlenmesi ve uzunluklarının optimize edilebilmesi için bir filtreleme geliştirmişlerdir. Yöntemin, yerel hacim kısıtlamalarının yanı sıra uyumlu mekanizma optimizasyonu ile de uyumlu olduğu gösterilmiştir. Önerilen yöntemde aynı zamanda her bir eleman için anizotropi oranını belirleyen ek bir tasarım değişkeni eklenmiş ve böylece malzeme türü seçimi optimizasyon sürecine dahil edilmiştir.

Völkl et al. [16], çalışmalarında iki farklı algoritmayı bir arada kullanarak fiber takviyeli kompozit malzemelerin optimizasyonu için yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde başlangıçta tasarım alanı izotropik malzeme kabulü yapılarak sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmektedir. Bu analiz sonucunda elde edilen gerilme tensörleri ilk algoritma için girdi olarak kullanılır ve elemanların şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu hesaplanır. Bu hesaplanan değerler ikinci algoritma için girdi olarak kullanılır ve buradan fiber yönelimlerini optimize etmektedir. Elde edilen yeni bilgiler ile yeniden bir sonlu eleman analizi yapar ve algoritma yakınsayıncaya kadar çevrim devam eder. Bu yaklaşım, rijitlik problemlerinde tek yük ve düzlem gerilim durumları için tutarlı ve hızlı sonuçlar sunmaktadır. Daha karmaşık parçalar için rijitlik açısından öneri sağlar.

Nomura et al. [17], anizotropik malzeme kullanılan bir yapıda, eleman yoğunluklarını ve yönlerini eş zamanlı olarak yapabilen bir optimizasyon yöntemi önermişlerdir. Yönlendirme vektörünün kartezyen bileşenleri tasarım değişkeni olarak kullanılmıştır.

Önerilen yöntemde sürekli yönlendirme ve ayrı açı kümeleri kullanılarak yapılan tasarımları desteklemektedir. Yapılan çalışmada yoğunluk ve yönelimin optimizasyonunun tek yükleme durumu ve sürekli açı optimizasyonu için daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Hoglund ve Smith [18], statik yükler altında ki yapıların bir fiber açı yönüne ek olarak optimum malzeme dağıtımını hesaplayan sürekli fiber açı optimizasyonu yaklaşımı için bir topoloji optimizasyonu yöntemi sunmaktadır. Bu çalışmada belirli bir hacim oranına ulaşmak için rijitliği maksimize eden, gardiyan tabanlı bir optimizasyon algoritması ile optimum eleman yoğunlukları ve fiber açısı belirleyen bir çözüm sunmuşlardır. Tasarım gardiyanlarını verimli bir şekilde hesaplamak için adjoint tasarım hassasiyetlerini kullanmışlardır. Optimizasyon sonucunda elde edilen geometriler eklemeli imalat yöntemi ile üretmiş ve test etmişlerdir. Hem yoğunluk hem de açı optimizasyonu yapılarak elde edilen numuneler, sadece yoğunluk optimizasyonu yapılarak elde edilen numunelere göre daha rijit olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir.

Zhou ve Li [19], çalışmalarında, çoklu yük durumları için gerilme kısıtlaması yaparak bir optimizasyon yöntemi geliştirmişlerdir. Fiber takviyeli kompozit için malzeme modeli olarak kafes benzeri sürekli yapılar kullanmışlardır. Düğüm noktalarındaki yoğunlukları ve yönelimleri tasarım değişkeni olarak almışlardır. Bu yöntemde, her yük durumu için öncelikle fiber yönlerini ana gerilim yönleri ile hizalanmış ve daha sonra fiber yoğunluklarını fiber yönleri boyunca oluşan gerilmelere göre tanımlamıştır. Sonraki adımda, çoklu yük durumları altındaki fiber yoğunlukları ve yönleri, elastiklik matrisini her bir tek yük durumu için tanımlanan optimum yapıların elastik matrisine yaklaşması için kısıtlayarak optimizasyon işlemi gerçekleştirmiştir. Son olarak, optimize edilmiş tasarım alanındaki eleman dağılımlarına, fiber yoğunluklarına ve yönelimlerine göre yapıyı çizgisel olarak oluşturmuşlardır.

Mehl et al. [20], çalışmalarında fiber takviyeli kompozit yapılarda, hem fiber takviyesini hem de kırpıntı kompozit destekli matrisin malzemesini aynı anda optimize eden hibrit yöntemler sunmuşlardır. İlk olarak belirlenen tasarım alanı izotropik olarak optimizasyon yapılarak bir ön geometri elde edilmektedir. Bu yapı anizotropik malzemenin tasarım hacmi olarak kabul edilmekte ve fiberlerin yönelimleri belirlenmektedir. Son işlemde hem fiber takviyesinin hem de matris malzemesinin rijitliği birlikte ele alınarak

optimizasyon yapılır. Katı malzemenin anizotropisinin dikkate alınması, düğüm bölgelerinde çok eksenli gerilim durumlarının meydana gelmesi ve bu durumun anizotropik malzemede düşük sertliğe yol açmasından dolayı daha az destek ve dolayısıyla daha az bağlantıya sahip daha basit yapıların elde edilmesini sağlamaktadır.

Safonov [21], üç boyutlu eklemeli imalat ile üretilen fiber takviyeli kompozit yapıların topoloji optimizasyonu üzerine sayısal bir çalışma yapmıştır. Bu yöntem kompozit yapılardaki yoğunluk dağılımını ve yerel takviye katmanını aynı anda hesaplayarak optimize etmeyi mümkün kılmaktadır. Yoğunluk dağılımını bulmak için dinamik sistemler yöntemini, lokal minimum ile uyumlu fiber yönelimlerini ana gerilmeler yönünde hizalamak için döndürülmesi yöntemlerini birleştirmektedir. Algoritmalar alt program olarak, Abaqus sonlu elemanlar programı içine eklenti olarak atanmıştır. Önerilen algoritma, anizotropik ve yarı izotropik malzemelerin başlangıç geometrileriyle neredeyse aynı rijitliğe sahip daha düşük hacimde optimize edilmiş geometriler elde edilebilmesini göstermiştir.

Jantos et al. [22], anizotropik üç boyutlu yapılar için malzeme yönelimini ve topoloji optimizasyonunu eş zamanlı yapan bir yöntem önermişlerdir. Diğer yöntemlerden farklı olarak fiber yönlendirmelerinde kullanılan algoritma, üç Euler açısı kümesi tarafından tanımlanmış üç boyutlu bir çevrime tabi tutulur ve bu sayede fiber yönleri sürekli olarak açısal optimizasyona tabi tutulur. Tasarım alanı ise eş zamanlı olarak SIMP yöntemi ile optimize edilir. Ortotropik malzeme için uygulanan Euler açıları kümesi için bir eşleme şeması türetilmiştir. Fiber yönlendirme filtresinin, fiberlerin eğriliği üzerinde sayısal bir model geliştirmişlerdir ve bu model yapılan sayısal çalışmalar ile desteklenmiştir. Topoloji optimizasyonu ve fiber oryantasyonu için basit bir algoritma geliştirmişlerdir ve bu algoritma temelli olan malzeme yönlendirme filtresi tasarım değişkenleri için uygulanan güncelleme şemasından bağımsız olduğu için diğer yöntemlere kolaylıkla uygulanabilir.

Ostanin et al. [23], topoloji optimizasyonu için sınır elemanı yöntemi modeli yeni bir optimizasyon algoritması sunmuşlardır. Önerdikleri yöntemin sonlu elemanlar yöntemi kullanarak çözüm yapan algoritmalardan daha hızlı ve sınırlandırmalardan bağımsız olduğunu savunmuşlardır. Sınır elemanı yöntemine dayalı büyük ölçekli topoloji optimizasyonu modeli, doğrudan sınır elemanı formülasyonu ve elemanlardan bağımsız

çoklu havuz yöntemini kullanır ve bu sayede sonlu elemanlar yöntemlerinde oluşan *Dama Tahtası Hatasının* meydana gelmemesidir.

Xie et al. [24], çalışmalarında çeşitli yükler altında fiber takviyeli kompozitlerin frekans tepkileri için bir topoloji optimizasyonu sunmuşlardır. Topoloji optimizasyonunu ve fiber yönelimlerini birlikte optimize edebilmek için, . *Heaviside polinom interpolasyon Şemasının Cezalandırılması* (HP-PIS) ve *Rasyonel Yaklaşık Malzeme Cezalandırılması* (RAMP) tekniklerini birleştirmişlerdir. Frekans tepkisi için önerilen topoloji optimizasyon prosedürünün genelliği ve sağlamlığı, belirli bir uyarma frekansı ve frekans bandı için çeşitli sayısal problemler aracılığıyla doğrulamışlardır. Sonuç olarak, önerdikleri yöntemin fiber takviyeli kompozit yapıların frekans tabanlı dinamik topoloji optimizasyonunu çözmek için önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermişlerdir.

Ypsilantis et al. [25], çalışmalarında fiber takviyeli kompozit yapıların tasarımında değişen mekanik özellikleri içeren bir sağlam (robust) topoloji optimizasyonu geliştirmişlerdir. Kompozit lamina sabitlerindeki değişiklik, eş zamanlı olarak malzeme dağılımı ve fiber yönelimi optimizasyonu yapılmıştır. Lamina mekanik özelliklerindeki değişkenlik, Karhunen-Loéve serisi genişlemesi ile tasarım alanında homojen bir rastgele alan olarak tanımlanmış ve bu kompozit yapının stokastik sonlu eleman analizine dahil edilmiştir. Sunulan yöntem, esneklik (compliance) fonksiyonunun minimize edilmesi amacıyla adım adım formüle edilmiştir. Geliştirilen bu yöntemde farklı rastgele alan seçimlerinin kirişlerin tahmin edilen topolojisi üzerinde etkin olduğu sayısal örneklerle desteklenmiştir.

Yoon [26], bu çalışmasında dinamik yapıların dinamik rijitlik matrisini azaltmak için mod süperpozisyon, Ritz vektör ve yarı statik Ritz vektör yöntemlerini birleştirerek frekans alanında bir topoloji optimizasyonu geliştirmiştir. Sayısal olarak yapılan çalışmada, bu şemaların dinamik yapılar için topoloji optimizasyonunu verimli bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Mevcut araştırma doğrusal olmayan geçici yapılar ve dalga kılavuzu tasarımı için tasarım problemlerine genişletilebileceğini savunmaktadır. Ayrıca, topoloji optimizasyonu için, hem modal hem de Ritz vektörlerinin avantajlarını birleştiren yeni bir yöntemin yararlı olacağını önermiştir.

Zhao et al. [27] çalışmalarında bir frekans aralığında harmonik uyarımlar altında orantılı olarak sönümlenen yapılar için etkili bir topoloji optimizasyon yöntem sunmuşlardır.

Amaç fonksiyonu olarak, yapıların yer değiştirmesini, hızını ve ivme tepkilerini almışlardır. Önerilen bu yöntemde optimizasyon sürecinde tasarım değişkenleri değiştikçe yapısal frekans tepkilerinin uyarlanabilir doğru bir şekilde hesaplanabilir olduğunu bulmuşlardır. Bir frekans aralığındaki yapısal frekans tepkilerinin ivme genliği dikkate alınarak yapılan optimizasyon sonucunda, mühendislik uygulamalarında kullanılamayacak yapıların ortaya çıkabileceğini göstermişlerdir. Bu problemin çözümü için, amaç fonksiyonu olarak yapının statik tepkisini alan bir optimizasyon süreci önermişlerdir ve bu önerilen yöntemin gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılabilir olduğunu sayısal örneklerle sunmuşlardır.

Ding et al. [28], çalışmalarında fiber destekli lamine kompozit malzeme kullanarak belirli bir frekans bandında yapısal frekans tepkisini azaltmak için ayrık malzeme optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Bu geliştirilen yöntem, belirli genlik ve frekans aralığında harici sinüzoidal mekanik yük tarafından uyarılan yapının dinamik esnekliğini minimize etmeyi amaçlamaktadır. Sonuç olarak düşük frekans aralıklarında fiber açılarının optimizasyonu ve sönümleme elemanının düzeni, hacmin azaltılması dışında önemli bir etkiye sahip değildir. Fakat yüksek frekans aralıklarında hem fiber malzemesinin hem de sönümleme malzemesinin etkileri önemli ölçüde görülmektedir. Bütün frekans değerleri için, sönümleme malzemesinin optimizasyonunun rezonans pik noktalarını etkilediği fakat doğal frekansın değişiminde etkisinin olmadığı sonucuna varmışlardır.

Chu et al. [29] çalışmalarında, yükleme belirsizliği altında fiberle takviyeli kompozit yapılar için, fiber açılarını ve malzeme dağılımını eş zamanlı olarak değerlendiren bir topoloji optimizasyon yöntemi geliştirmişlerdir. Malzeme dağılımını belirlemek için SIMP yöntemini kullanmışlar ve fiber oryantasyonu için de yeni bir şema geliştirilmişlerdir. Yük büyüklüğü ve yönü belirsizliklerini ele almak için probabilistik dağılımlarla kullanılmışlardır. Sonuç olarak, sayısal örneklerle de desteklenen bu çalışmada sunulan yöntem belirsiz yükleme koşulları için hem malzeme dağılımı hem de fiber oryantasyonlarının başarılı bir şekilde elde edildiğini savunmuşlardır.

Jog [30] çalışmasında, periyodik yükler altında çalışan yapıların topoloji optimizasyonunu incelemiştir. Titreşimin mininize edilebilmesi için genel ve bölgesel olmak üzere iki kıstas önermiştir. Genel olan tüm yapıdaki titreşimi azaltmayı amaçlarken, bölgesel olan sadece belirli noktalardaki titreşimi azaltmayı amaçlamaktadır.

Bu optimizasyon sayesinde dinamik yüklere maruz kalan yapının titreşim değerlerinin, statik durumdaki tepkisine yaklaşıldığı savunulmaktadır. Sonuç olarak bu çalışmada, tekrarlı yüklere maruz kalan yapıların titreşimlerinin azaltılması ve gerçek zamanlı uygulamalarda gürültü seviyelerinin düşürülmesi için etkili çözümler sunulmaktadır.

Du ve Olhoff [31], yapıların serbest titreşimlerinin çoklu öz frekanslarla ilişkili topoloji optimizasyon problemlerini ele almak için bir yöntem geliştirilmiş ve söz konusu öz frekansların çoklu veya tek olmasından bağımsız olacak şekilde uygulamışlardır. Topoloji optimizasyonundaki tasarım hedefleri, yapıların ardışık iki öz frekansını maksimum yapmaktır. Sonuç olarak titreşimli yapıların topoloji optimizasyonunda çoklu öz frekansların önemli olduğunu belirtmişlerdir. Aynı zamanda yapısal frekans rezonanslarını dış uyarım frekanslarından uzaklaştırılmasına ve yüksek titreşim seviyelerinden kaçınılmasını sağlamaktadır. Yapısal rezonans frekanslarını dış uyarım frekanslarından uzağa taşımamıza ve böylece yüksek titreşim ve gürültü seviyelerinden kaçınmamıza olanak sağladığına tanıklık etmektedir.

Kang et al. [32] çalışmalarında farklı kabuk malzemelerinden yapılan katmanlı yapıların sönümleme katmanlarının topoloji optimizasyonunu incelemişlerdir. Bu çalışmada, yapısal titreşimin en aza indirilebilmesi için sönümleyici malzemenin optimum dağılımını belirlemeyi amaçlanmaktadır. Bu önerilen yöntem, optimizasyon denklemlerinin indirgenmiş bir mod uzayına dönüştürülmesini ve karmaşık mod süperpozisyonu ile bir durum uzayı yaklaşımının kullanılmasını içermektedir. Sonuç olarak sönümleme katmanlarının topoloji optimizasyonu, kabuk yapılardaki titreşim genliklerini etkili bir şekilde azalttığını doğrulamaktadır ve sayısal örneklerde bunu desteklediğini göstermişlerdir.

Lui ve Zhang [33] çalışmalarında büyük ölçekli problemlerin harmonik tepkilerini, mod yer değiştirme yöntemi (Mode Displacement Method-MDM), mod hızlandırma yöntemi (Mode Acceleration Method-MAM) ve tam yöntem (Full Method-FM) metotlarını karşılaştırmalı bir topoloji optimizasyonu önermişlerdir. Büyük ölçekli topoloji optimizasyonu problemlerinde MAM ve FM yöntemlerinin doğruluk ve yakınsama açısından güvenilir olduğu fakat MDM yönteminin doğruluk ve yakınsama açısından yetersiz olduğunu göstermişlerdir. Yapılan sayısal analizlerde belirli bir frekansta harmonik uyarım durumlarında FM yönteminin diğer yöntemlere göre daha başarılı

olduğunu, birden fazla frekanslı harmonik uyarım altındaki optimizasyon problemi için, MAM yönteminin hesaplama doğruluğunun ve verimliliğinin daha iyi olduğunu savunmuşlardır.

Duan et al. [34] çalışmalarında büyük ölçekli kompozit kafes yapılarının temel frekans kısıtlamalı bir optimizasyon yöntemi geliştirmişlerdir. Bu çalışmada polinom interpolasyon (Polynomial Material Interpolation-PLMP) şemasının optimizasyon için zayıf kalan yönlerini güçlendirerek, alan atalet momenti-yoğunluk interpolasyonu şeması geliştirmişlerdir. Önerilen yöntem kısıt olarak temel doğal frekansı belirli bir değerin üstünde alarak, kafes yapısının makro topoloji optimizasyonunu ve kompozit malzeme seçimi optimizasyonunu eş zamanlı yapabilmektedir. Sonuç olarak önerilen yöntem kompozit kafes yapılarının optimize edilmesinde ve yapı maliyetinin önemli ölçüde düşmesini sağlamaktadır.

Liu at al [35] çalışmalarında çift yönlü evrimsel yapısal optimizasyon (BESO) yöntemine dayalı olarak periyodik yükler altında dinamik yapıların topoloji optimizasyonu için bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu optimizasyon yönteminde amaç fonksiyonu tek veya çoklu uyarma frekansları altında dinamik esnekliği (compliance) en aza indirmektir ve farklı durumlar için dört farklı topoloji optimizasyon problemi sunulmuştur. Duyarlılık analizinde, zorlanmış titreşimi sonlu eleman analizine dayalı olarak çözülmektedir. İki ve üç boyutlu örnekler üzerinde yapılan çalışmalarda, önerilen yöntemin herhangi bir yük altında dinamik yapıların topoloji optimizasyonu için genişletilebilir olduğunu göstermişlerdir.

Zhang et al. [36] çalışmalarında Hibrit Hücresel Otomatlar (Hybrid Cellular Automata-HCA) ve Analitik Hiyerarşi Süreci (Analytic Hierarchy Process-AHP) yöntemlerini birleştirerek çok eksenli rastgele titreşim için çok amaçlı bir topoloji optimizasyon yöntemi önermişlerdir. Geliştirilen bu yöntemin amacı çok eksenli rastgele titreşimlere karşı yapısal direnci artırmak ve yorulma ömrünü uzatmaktır. Farklı şartlar altında çalışan konsol kirişi ve mafsal için çalışmanın doğruluğu test edilmiştir. Konsol kirişi üzerine yapılan çalışmada optimize edilmiş geometrinin güçlü titreşim direnci gösterdiğini ve rastgele titreşim yüklerinin etkisini etkili bir şekilde azaldığı görülmüştür. Mafsal üzerine yapılan testlerde de optimize edilmiş yapının yorulma ömrünün etkili bir şekilde arttığı görülmüştür.

Yang et al. [37] yaptıkları çalışmada fiber takviyeli kompozit malzemeden eklemeli imalatla baskı yolu optimizasyonunu yapan bir yöntem geliştirmiş ve optimize edilen yapıları eklemeli imalat ile üreterek deneysel çalışmalar yapmışlardır. bu yöntemde hem malzeme dağılımı hem de fiber yoları optimize edilebilmektedir. Geliştirdikleri yöntem ile üretilen numunelerin mevcut yöntemlere göre rijitliğinin ve rijitliğin ağırlığa oranının büyük bir oranda iyileştiğini deneysel olarak göstermişlerdir. Aynı zamanda üretimdeki yapı içerisindeki boşlukların da daha az olduğunu belirtmişlerdir.

Fedulov et al [38], çalışmalarında topoloji optimizasyonunu ve sürekli fiber takviyeli kompozitlerin fiber yönlerini optimize eden bir algoritma geliştirmişlerdir ve bu algoritmayı Abaqus sonlu elemanlar programında uygulamışlardır. Önerilen yöntem karmaşık yapıya sahip modellerin optimizasyonuna olanak tanımaktadır. Kompozit fiber koekstürüzyon baskı tekniği kullanılarak üretilen kompozit parçaların optimizasyonu için bir algoritma önerilmiş ve pratik kullanım için Abaqus yazılımında uygulanmıştır. Yerel malzeme yönelimli iki boyutlu ve üç boyutlu konsolların rijitlik optimizasyonu için sayısal çalışmalar yapılmış ve bunlar karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntem kullanılarak endüstriyel kompozit parçanın tasarımının tüm aşamaları gösterilmiştir.

Chen ve Ye [39], çalışmalarında eklemeli imalat ile üretilen karbon fiber takviyeli kompozit parçaların yüksek yük taşıma kapasitesi için topoloji optimizasyonu ve fiber yollarını öneren bir optimizasyon yöntemi geliştirmişlerdir. İlk olarak maksimum gerilimi sınırlamak ve yapısal esnekliği en aza indirmek için bir yöntem uygulamışlardır. Daha sonra optimize edilmiş model için fiber yönlerini belirlemişlerdir. Farklı malzemeler kullanarak elde edilen modeller eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş ve yöntemin doğruluğu deneysel olarak test edilmiştir.

Fernandes et al. [40] çalışmalarında, sertlik için optimize edilmiş üç farklı geometrinin eklemeli imalat ile üretilebilirliğini ve performanslarını incelemişlerdir. Bu geometrileri, sürekli karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin topolojisi ve elyaf yerleşimi optimizasyonu yoluyla elde etmişlerdir. Optimize edilmiş modeller, eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş ve parçaların yer değiştirmeleri dijital görüntü korelasyonu kullanılarak belirlenmiştir. Optimize edilmiş geometriler ile optimize edilmemiş geometriler karşılaştırılmıştır ve optimize edilmiş geometrilerde büyük bir iyileşme olduğu görülmüştür.

Gao et al. [41], çalışmalarında belirsiz rastgele yüklere maruz kalan yapıların topoloji optimizasyonu için bir yöntem sunmaktadırlar. Bu yöntem, karşılaşılabilecek en kötü durum için, esnekliği (comliance) istatiksel bir yaklaşımla hesaplar. Bunun için esnekliğin istatistiksel özelikleri olan, birinci (ortalama) ve ikinci (standart sapma) dereceden momentlerini hesaplar. Aralık duyarlılık analizi ile belirsiz sistem girdi değerlerinin sonuçlar üzerine etkisini inceler ve sistemin hangi girdi değerlerine daha duyarlı olduğunu belirler. Bu çalışma, belirsiz durumlar için yapısal topoloji optimizasyonu için çözüm sunmaktadır. Önerilen yöntemle, belirsizliklerin etkilerini dikkate alarak güvenilir ve dayanıklı yapısal tasarımların elde edilmesi amaçlanmıştır.

Seabra et al. [42], çalışmalarında ticari optimize edilmiş bir parçayı, bir eklemeli imalat yöntemi olan seçici lazer eritme (Selective Laser Sintering-SLM) yöntemi ile üretip test etmişlerdir. İlk olarak uçak destek parçasının topoloji optimizasyonunu yapmışlardır. Optimize edilen geometri SLM yöntemi ile üretilmiş ve deneysel olarak test edilmiştir. Deneysel testler ve sonlu elemanlar analiz sonuçları birbirini desteklemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda optimize edilmiş geometri, güvenlik faktörünün artığı ve önemli bir ölçüde ağırlık azaldığı görülmüştür.

2. BÖLÜM

DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEMLER

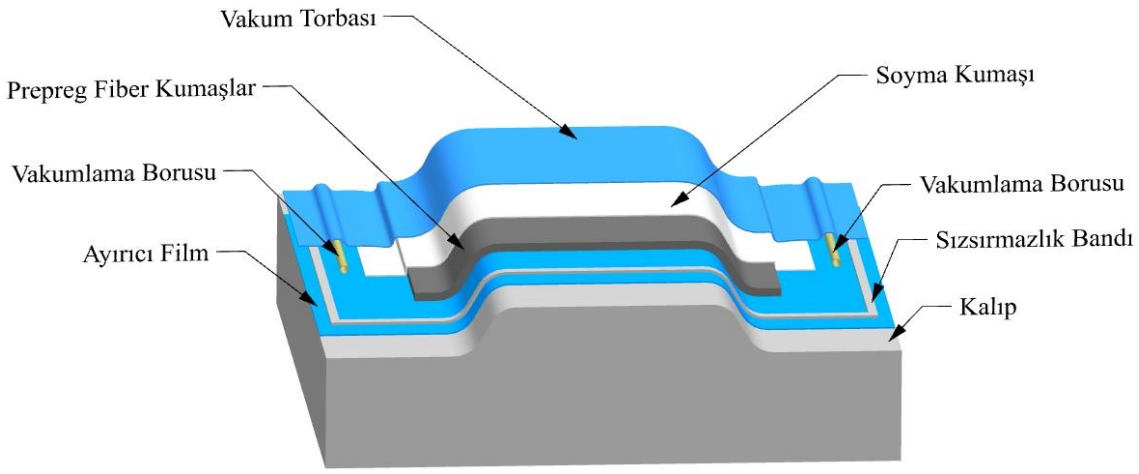
Bu bölümde ilk olarak fiber takviyeli kompozit plakaların üretimi, malzeme karakterizasyonu ve deney numunelerinin hazırlanmasından bahsedilmiştir. Devamında sayısal analizler kapsamında, statik ve modal topoloji optimizasyonu anlatılmıştır. Son olarak kompozit plakaların üç nokta eğme ve modal analiz davranışları deneysel olarak incelenmiştir.

2.1. Kompozit Plakaların Üretimi

Kompozit plakaların üretimleri için birçok yöntem mevcuttur. Bunlardan en önemlileri vakum infüzyon yöntemi ve kalıp yöntemidir. Bu çalışmada her iki yöntemle de plaka üretimi gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta kompozit plakalar üretimleri vakum infüzyon yöntemi ile yapılmış ve ön denemeler bu plakalar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Fakat plaka kalınlıklarından kaynaklanan kürlenme problemlerinden dolayı bu üretim yönteminden vazgeçilmiş ve kalıp yardımı ile ısı kontrollü pres altında plaka üretimleri gerçekleştirilmiştir.

2.1.1. Vakum Yöntemi ve Plaka Üretimi

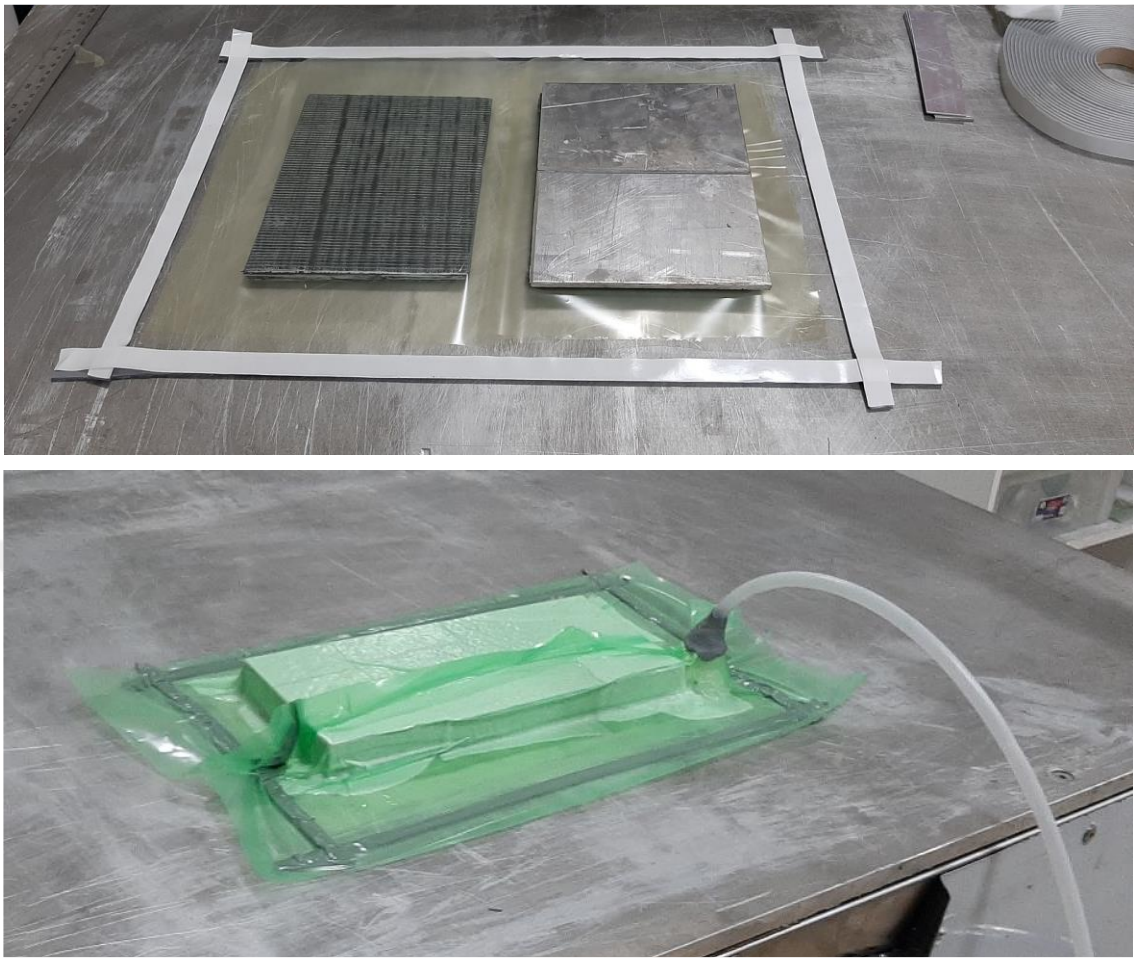
Prepreg kompozit malzemeler, kompozit plaka üretiminde çok sıklıkla tercih edilen ve otomasyon sistemlerine de adaptasyonu kolay olan malzemelerdir. Prepreg (pre-impregnated) matris elemanı daha önceden kompozit destek malzemesine emdirilmiş kumaşlara verilen isimdir. Prepreg kumaşlar genellikle destek elemanı olarak karbon, cam veya aramid fiberlerden, matris elemanı olarak da termoset veya termoplastik elemanlardan oluşmaktadır. Prepreg kumaşlar yapısal olarak, dokuma, tek veya çok yönlü olarak bulunmaktadır. Vakumlama yöntemi ve otoklavsız kürleme tekniği kullanmak, düşük maliyetli ve yüksek kaliteli kompozit malzeme üretimi için seçilen bir yöntemdir [43].



Şekil 2.1. Vakum yöntemi

Vakum yönteminde, kalıp üzerine ayırıcı film serilir ve etrafı sızdırmazlık bandı ile çevrelenir. Bunların üzerine prepreg fiber kumaşlar yerleştirilir ve bunun üzerine sırası ile soyma kumaşı, besleme/vakum boruları ve en son olarak vakum torbası serilir. Vakum yardımı ile prepreg malzeme içerisindeki hava boşlukları uzaklaştırılır ve prepreg kumaş kalıbın şeklini alır. Vakumlama işlemi ile birlikte kürleme işlemi de yapılır.

Bu çalışma için gerekli olan kompozit plaka üretimleri ilk olarak vakum yöntemi kullanılarak yapılmıştır. İlk kompozit plakalar, lamina kalınlığı 0.3 mm olan prepreg kumaşlardan 16 katman kullanılarak üretilmiştir.



Şekil 2.2. Vakum yöntemi ile prepreg kompozit üretimi

Vakum yöntemi için kullanılan sıcak masa sisteminde sıcaklık sadece tek yüzeyden verilebilmektedir. Bunun için prepreg kompozit kumaşların üzerine hem düz durabilmeleri hem de alt taraftaki sıcaklığı üst tarafa iletebilmek için metal parçalar yerleştirilmiştir. Fakat mevcut sistemde plaka kalınlığından dolayı, matris malzemesi için tavsiye edilen kürleme zamanında istenilen sonuç alınamamıştır ve kürleme prosesi uzatılmıştır. Üretim sonrasında kompozit plakaların alt ve üst yüzeylerinde kürlenme sağlanabilmiştir.

Bu kompozit plaka için Ansys programında modelleme ve %60 kütle kriterine göre topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Önerilen modeller talaşlı imalata uygun bir şekilde güncellenerek CNC tezgâhında işlenmişlerdir. Elde edilen numunelere düşük hızda üç nokta eğeme testleri yapılmıştır.

Bu yapılan ön çalışmalar neticesinde şu sonuçlara varılmıştır; plaka kalınlıklarının düşürülmesi vakum yönteminin bu kalınlıktaki numuneler ve kullanılan reçine için kürleme zamanı açısından uygun olmadığı, prepreg malzemenin laminant kalınlığının fazla olduğu ve üç nokta eğme aparatının bu numunelerin testi için uygun olmadığı.

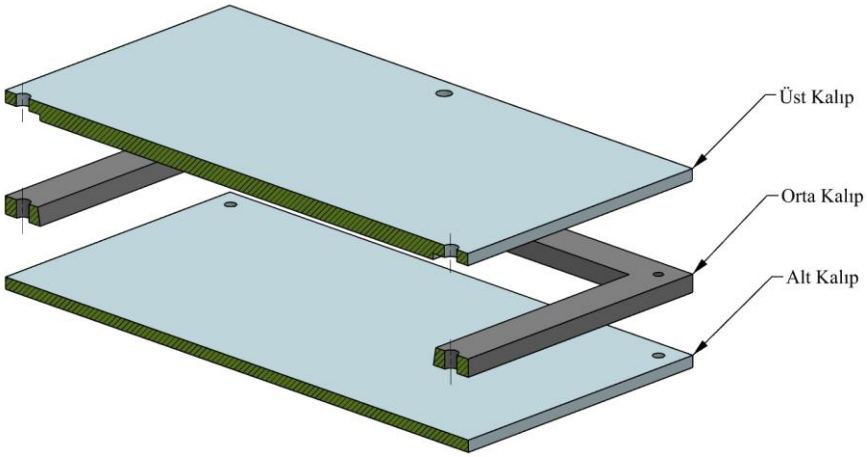
Bu veriler sonucunda laminant kalınlığı 0.3 mm olan karbon fiber destekli tek yönlü prepreg kumaş seçilmiştir, katman sayısı 20 olarak belirlenmiştir, üretim yöntemi olarak kalıp içerisinde sıcak pres yöntemi seçilmiştir ve numuneleri dengeli test edebilmek için üç nokta eğme aparatı tasarlanıp üretilmiştir.

2.1.2. Sıcak Pres Yöntemi

Sıcak pres belirli boyutlardaki kompozit plakaların üretilebilmesi için seçilen en uygun yöntemlerden bir tanesidir. Isı ve basınç kontrolünün daha iyi yapılabildiği ve matris malzemesinin hem termoset hem de termoplastik olan kompozitler için uygun bir yöntemdir. Vakum yönteminden en önemli dezavantajı boyutları belirli sınırlar içerisinde olan kompozitlerin üretilebilmesidir.

Tez çalışmasında kullanılan karbon fiber destekli kompozit plakalar sıcak pres altında, kalıp yardımı ile üretilmişlerdir. Plakaların daha kontrollü üretilebilmesi için ilk olarak kalıp üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu kalıp 1 mm, 2 mm ve 6 mm kalınlığında plakalar üretebilecek şekilde tasarlanmıştır. Burada 6 mm kalınlığındaki numuneler deneysel terslerde kullanılmak için üretilmiştir. Malzeme karakterizasyonu için kullanılan 1 mm ve 2 mm kompozit plakalar için kalıp içerisine, yine kalıp malzemesi ile aynı malzemeden üretilmiş plakalar kullanılmıştır.

Prepreg kullanılarak yapılan sıcak pres üretimleri yüksek sıcaklık ve basınç altında kürlemeyi ve kalıbı uygun sıcaklığa soğuttuktan sonra çıkarmayı içerir. Endüstriyel uygulamalarda, kürleme süresini kısaltmak için hızlı kürlenen reçine matrisi ve yüksek kürleme sıcaklığı kullanılır. İşlem süresini azaltmak için yapılan bu adımlar kompozit laminatların katmanları arasında iç kalıntı gerilimlerin oluşmasına sebebiyet vermektedir [44]. Gerilmelerin oluşmaması için kürleme adımlarına dikkat edilmesi ve özellikle sürelerin uzun tutulması gerekmektedir. Bunlara ek olarak kalıp ile üretimlerde, kompozit ürünler belirli bir sıcaklığa belirli bir sürede düşürülmeden kalıptan çıkartılmamalıdır.



Şekil 2.3. Prepreg plaka üretim kalıbı

Şekil 2.3'de test numunelerinin üretimi için kullanılan kalıp gösterilmektedir. Karbon fiber destekli prepreg laminantlar belirli açılarda istiflenerek kalıp içerisine yerleştirilmiştir. Kalıpla üretimin birçok avantajı vardır. Bunlar, üretilen tüm plakaların boyutsal tamlıklarının aynı olması, kürleme işleminde sıcaklık dağılımının daha kontrollü yapılabilmesi, basınç altında yapılan üretimlerde yüksek basınç altında fiberlerin ezilmesinin önlenmesi başlıca avantajlarındandır. Bu kalıp 0.3 mm laminant boyutlarında 20 katman kalınlıktaki kompozit plakaların üretilebilmesi için tasarlanmıştır. Tasarım sayesinde kompozit laminalar 6 mm'den daha fazla sıkıştırılmaya zorlanmamaktadır.

2.1.3. Kompozit Plakaların Üretimi

Ön deneme sonuçlarına göre elde edilen bilgiler ışığında, deneysel çalışmalarda kullanılacak test numuneleri ve malzeme karakterizasyon numuneleri sıcak pres altında kalıplama yöntemi ile üretilmiştir. Karbon fiber destekli kumaşın özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Karbon fiber lifleri ve kumaş özellikleri

Özellikler	Değerler
Reçine Tüketimi (g/m^2)	346
Laminant Ağırlığı (g/m^2)	646
Dokuma	Tek Yön
Ağırlık (g/m^2)	300
Çekme Dayanımı (MPa)	3950
Elastisite Modülü (GPa)	238
Yoğunluk (g/m^3)	1.76

Sıcak pres altında kalıp ile kompozit plakaların üretimi şu aşamalardan oluşmaktadır:

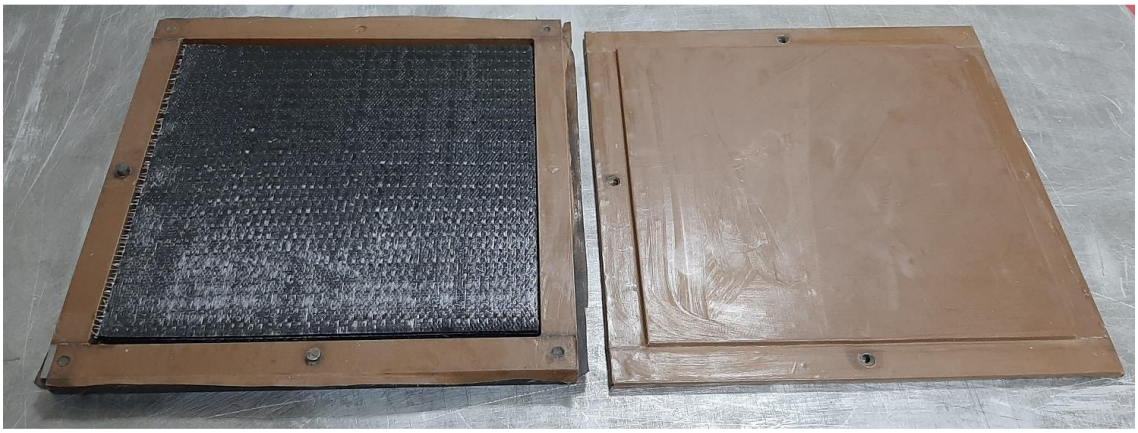
1. Karbon fiber destekli, termoset matrisli prepreg kumaştan 250x250 mm boyutlarında 20 adet parça kesilmiştir. Prepreg kumaşlarda matris reçinesi daha önceden kumaş içerisine emdirildiği için yabancı madde yapışma ihtimali yüksektir. Bu yüzden kesim esnasında yapı içerisindeki süreksizlikler oluşmaması için ortam kirleticilerine dikkat edilmelidir.

2. Kesilen parça prepreg laminantlar, fiber yönü açısına göre 20 katman istiflenmişlerdir.



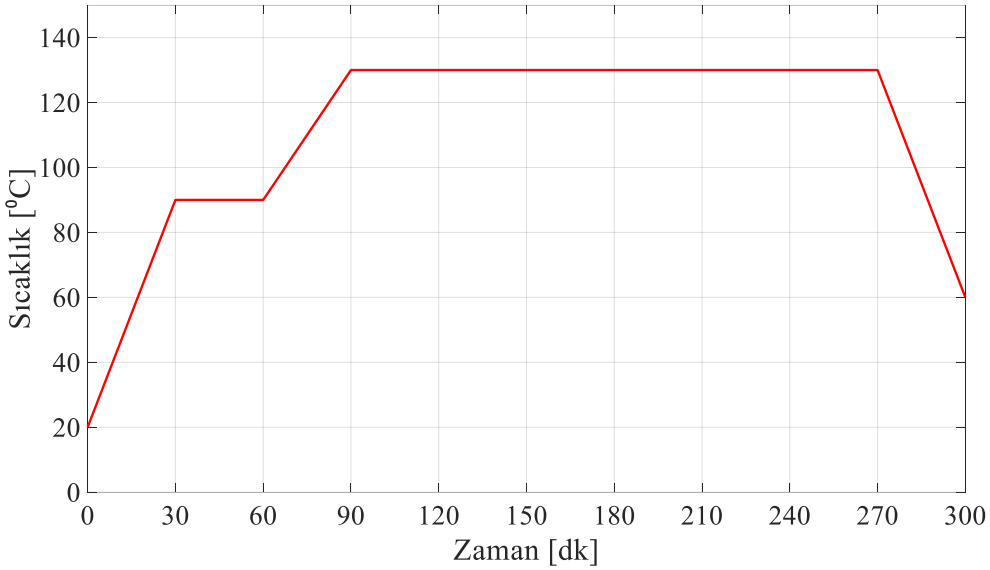
Şekil 2.4. 20 katmanlı kompozit plaka

3. Elde edilen kompozit laminantlar kalıp içerisine, katmanların kaymamasına dikkat edilerek yerleştirilmiştir ve kalıp kapatılmıştır.



Şekil 2.5. Kalıp içerisine yerleştirilmiş kompozit plaka

4. Kalıp düzeneği, alt ve üst tabladan ısıtma desteği olan sıcak pres içerisine yerleştirilmiş ve ön ısıtma yapılmıştır. Kalıp pres yardımı ile sıkıştırılmış ve Şekil 2.6'da gösterilen kürleme işlemi yapılmıştır.



Şekil 2.6. Kürleme işlemi

- Kalıp 30 dakikada 90 °C sıcaklığa çıkartılmıştır.
- Kalıp sıcaklığı dışarıdan da ölçülerek sabit 90 °C sıcaklıkta 30 dakika bekletilmiştir.
- Kalıp sıcaklığı 130 °C sıcaklığa çıkartılmıştır.
- Kalıp 130 °C sıcaklıkta 60 dakika bekletilmiştir.
- Sıcak presin ısı desteği kesilmiş ve kalıp yavaş yavaş soğumaya bırakılmıştır.

Prepreg üretimindeki en önemli noktalardan bir tanesi kürleme sonrasında kompozit plakaların kalıptan çıkartılma süresidir. Eğer kalıp sıcakken kalıptan kompozit plaka çıkartılırsa çarpılma sorunları ile karşılaşılabilir. Bunun için plakalar kalıp içerisinde belirli bir sıcaklığa (25-40 °C) düşürülmeden çıkartılmamalıdır.



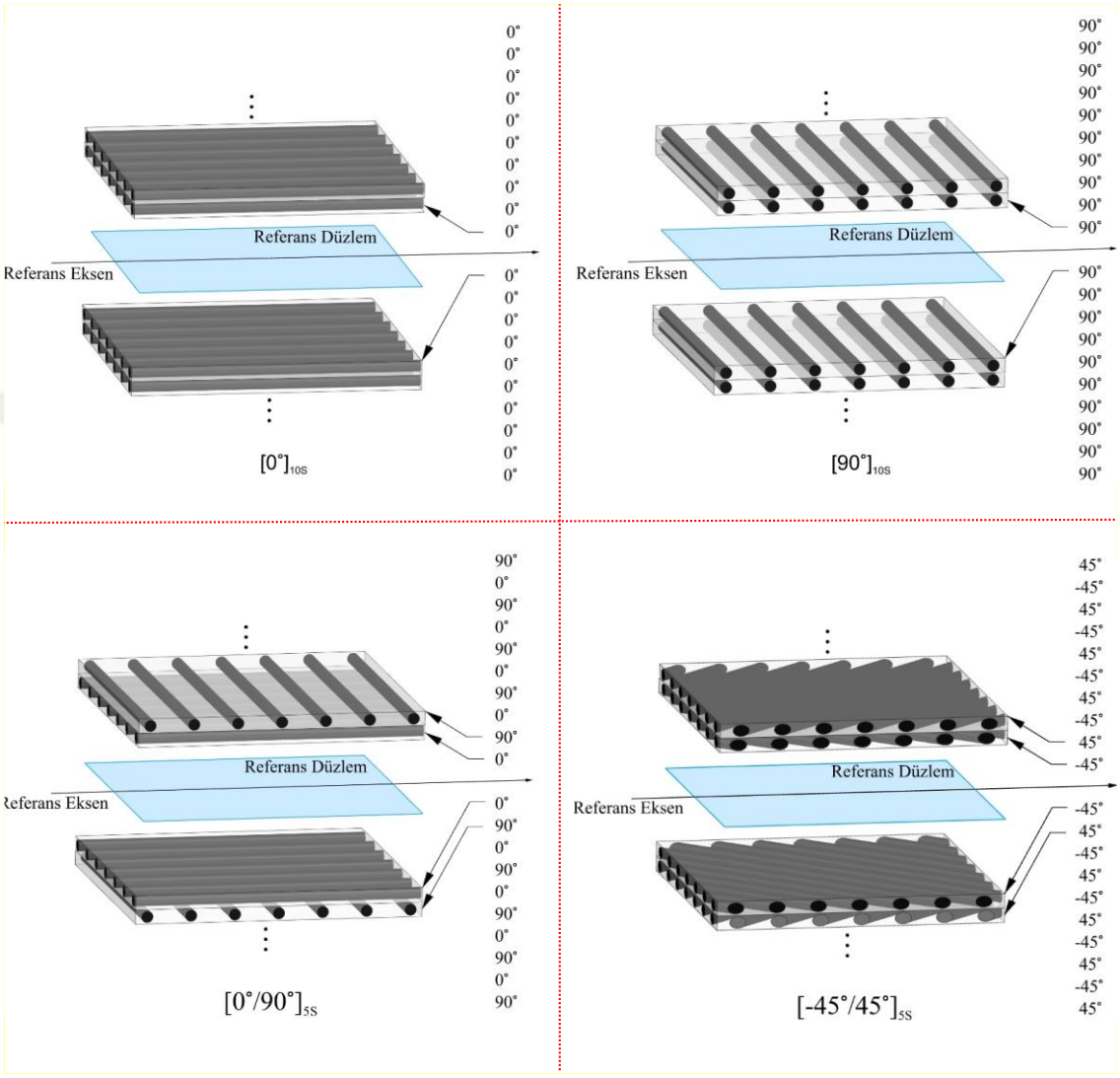
Şekil 2.7. Isı kontrolü pres

Laminant, birbiri üzerine yerleştirilmiş lamina gruplarına verilen isimdir. Her bir lamina, yeri, malzemesi ve referans eksenine yaptığı açı ile tanımlanmaktadır [5]. Bu tez çalışmasında üretilen kompozit plakalar (laminantlar) orta referans düzlemine göre simetrik olarak üretilmişlerdir. Aynı zamanda laminalar arasında fiber destek elemanı ve matris elemanı da değişmemektedir. Şekil 2.8'de detayları gösterildiği üzere kompozit laminantlar, serim açılarında değişiklik yapılarak farklı dört plaka olarak üretilmiştir.

$$[\beta_1/\beta_2/\beta_3/\beta_4]_{aS} \tag{2.1}$$

Şekil 2.8'de laminant kodlaması gösterilmiştir. Denklem 2.1'de gösterilen laminant kodlama sistemi, referans düzleminin üzerindeki yerleşim düzenini göstermektedir. Burada β_i fiberlerin yerleşim açısını, S değeri laminantın referans eksenine göre simetrik

olduğunu ve *a* değeri, köşeli parantez içerisinde gösterilen açı guruplarının tekrar sayısını göstermektedir.



Şekil 2.8. Üretilen kompozit plakaların serim açıları

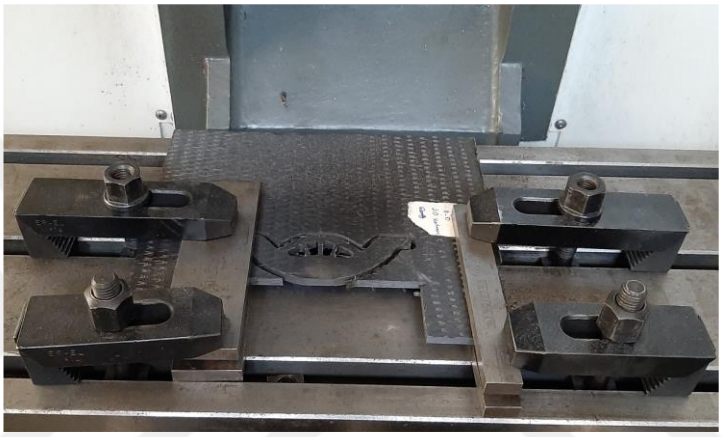
2.1.4. Deney Numunelerinin İmalatı

Sıcak pres ve kalıplama yöntemi ile üretilen plakalardan statik ve modal deneyler için numuneler üretilmiştir. Ansys programında yapılan topoloji optimizasyonu sonucunda önerilen geometriler, talaşlı imalat yöntemi ile üretilebilecek şekilde yorumlanmış ve CNC (Computer Numeric Control) tezgâhında işlenmiştir.

Fiber destekli kompozit malzemelerin talaşlı imalatında yaşanan en büyük problemlerden birisi deleminasyondur. Fiber takviyeli kompozit yapılarda, kesme kuvvetleri, takım türü/boyutları, ilerleme hızı, takım dönme hızı, talaş derinlikleri vb. birçok işleme

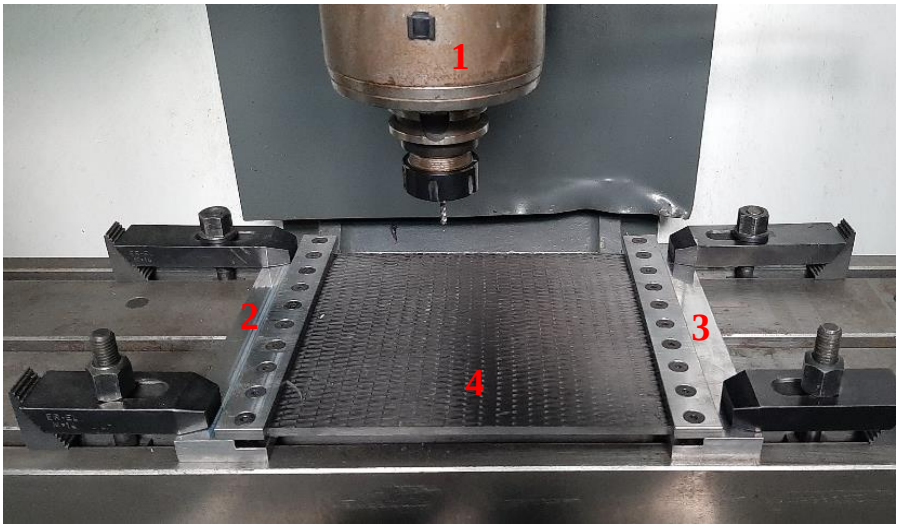
parametresi kompozit plakaların yüzey düzgünlüğünü ve laminalar arası deleminasyonu önemli ölçüde etkilemektedir. Talaşlı imalat ile fiber takviyeli kompozitlerin imalatında bu parametrelerin hepsinin bir arada değerlendirilmesi gerekmektedir. Literatürde yapılan deneysel çalışmalar bu parametrelerden bazılarına ışık tutabilmektedir [45, 46].

Yapılan birçok ön denemenin ardından 4 mm çapında düz uçlu freze ile kesme parametreleri 250 mm/dk ilerleme, 4000 devir/dk dönme hızı ve 1 mm talaş derinliği olarak belirlenmiştir.

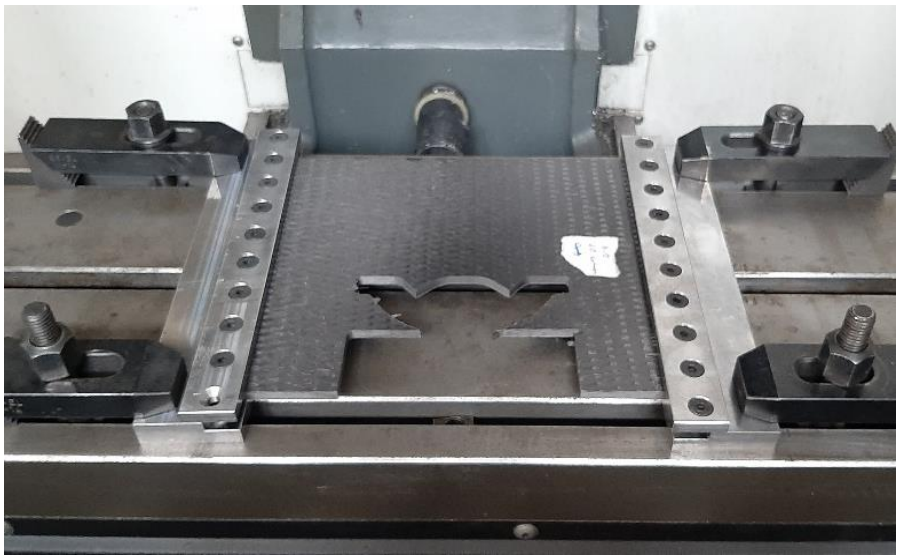


Şekil 2.9. Deneme üretimleri

İmalat kompozit plakaların işlenmesinde sadece bu parametrelerin belirlenmesi yeterli olmamaktadır. Plakaların işleme tablasına bağlanma yöntemi, imalat esnasında istenmeyen titreşimlerin oluşmasında önemli rol oynamaktadır. Deney numunelerinin kolay ve kontrol edilebilir şekilde bağlanabilmesi için plakalara özel bağlama aparatı üretilmiştir. Bu sayede titreşim ve bağlamadan kaynaklı olumsuzlukların önüne geçilmiştir.



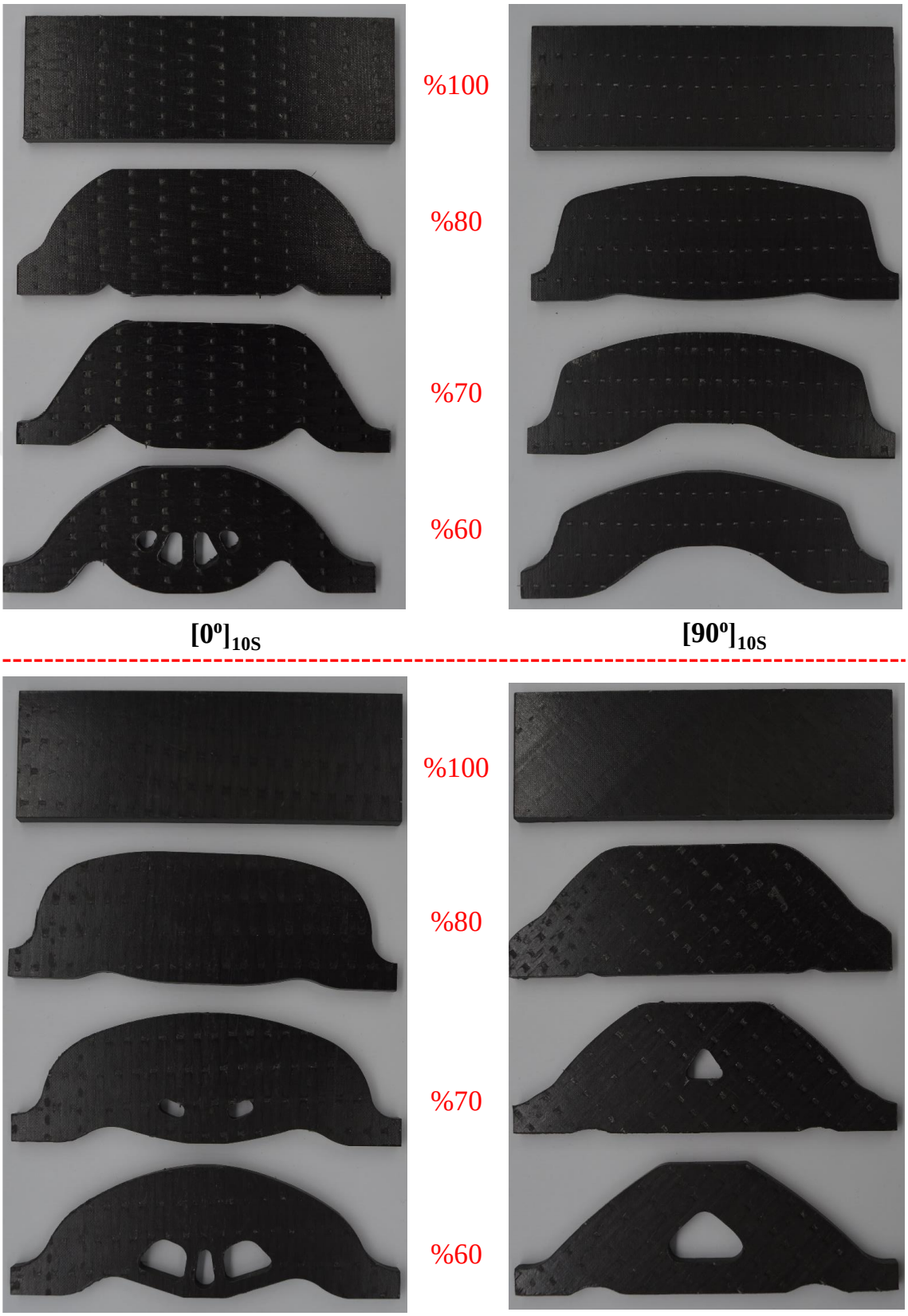
a



b

Şekil 2.10. Plakaların CNC tezgâha bağlanması ve işlenmesi a) işleme öncesi, b) işleme sonrası

Kompozit plakaların CNC tezgâhında talaşlı imalat ile işlenmesi Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Burada 1 iş mili, 2ve 3 plakaların tezgâha bağlanması için yapılan özel bağlama aparatları, 4 kompozit plakalar. Topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilen tasarım alanları, talaşlı imalata ve özellikle 4 mm çapındaki takım ile işlenebilecek şekilde güncellenmiştir. Bu güncellenen modeller dikkatli bir şekilde CNC tezgâhında işlenmiş ve deneyler yapılmıştır.



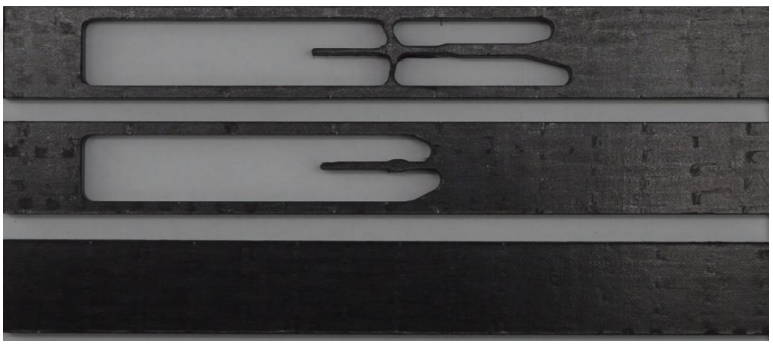
Şekil 2.11. Üç nokta eğme testi numuneleri



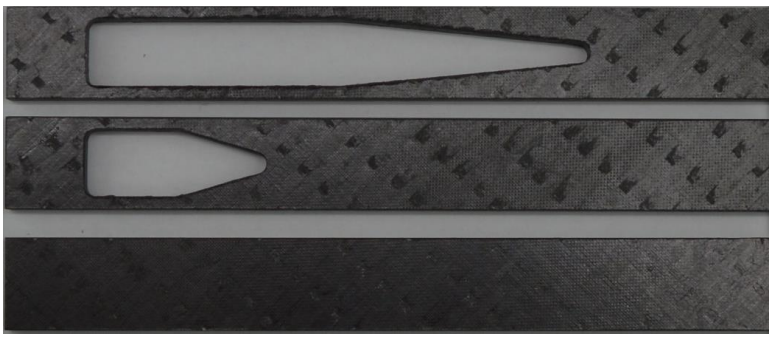
$[0^o]_{10S}$



$[90^o]_{10S}$



$[0^o/90^o]_{5S}$



$[-45^o/+45^o]_{5S}$

Şekil 2.12. Modal test numuneleri

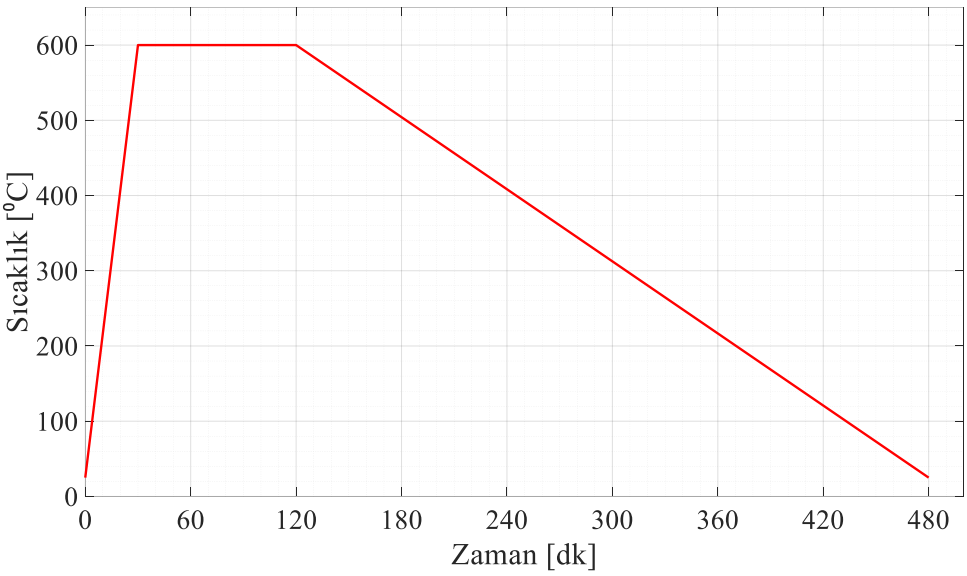
Şekil 2.11-12'de deneylerde kullanılacak olan test numuneleri gösterilmektedir. Bu numuneler topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilmiş geometrilerdir.

2.2. Kompozit Malzeme Karakterizasyonu

2.2.1 Yanma Testi

Fiber takviyeli kompozit bir malzeme takviye ve matris bileşenlerinden oluşur, bu malzemenin özelliklerinin belirlenebilmesi için fiber ve takviye oranlarının belirlenmesi gerekmektedir. Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin belirlenebilmesi için birçok yöntem mevcuttur. Bu çalışma kapsamında ASTM D 3171 -9 standardına göre yanma testleri yapılmıştır [47].





Şekil 2.13. Yanma testleri ve grafiği

Prepreg kumaşların malzeme karakterizasyonu için gerekli olan karbon fiber ve matris oranlarının belirlenebilmesi için reçine yakma deneyleri Şekil 2.13'te gösterilen grafiğe göre yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda % 45.6 matris, % 55.4 karbon fiber olduğu belirlenmiştir.

2.2.2. Çekme Testleri

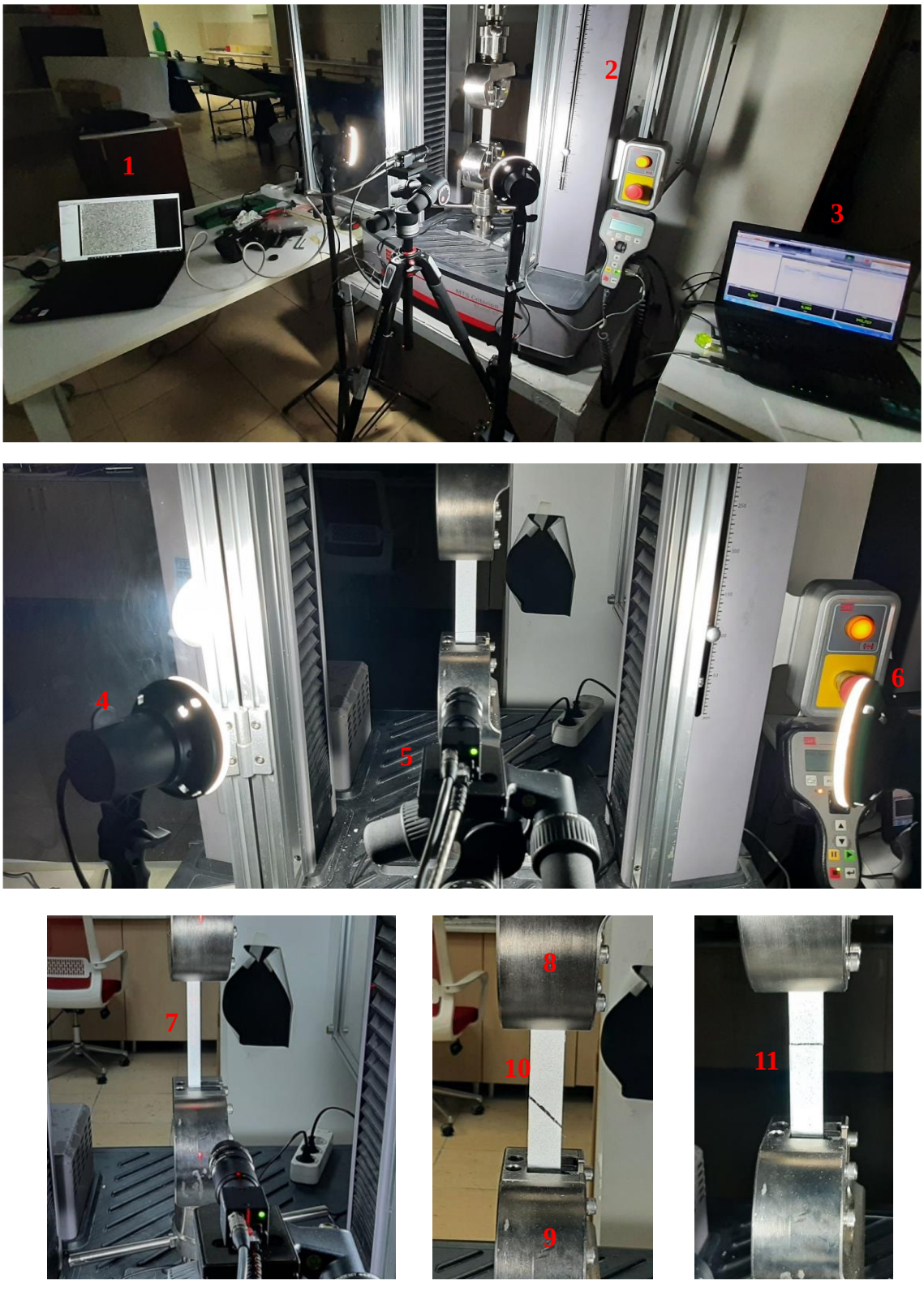
Çekme testi bir malzemenin mekanik özelliklerini tespit edebilmek için kullanılan en temel testlerden bir tanesidir. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin çekme testleri için kullanılan birçok test standardı mevcuttur. Bu çalışma kapsamında çekme testlerinde ASTM D3039 [48] standardına göre fiber yönünde (0^o), fiber yönüne dik (90^o) ve ASTM D3518 [49] standardına göre fiber yönüne 45 derecelik açı yapacak şekilde üretilen numuneler üzerine çekme testleri yapılarak farklı yönlerdeki mekanik özellikler tespit edilmiştir. Fiber yönündeki numuneler 4 katman (toplam 1 mm kalınlık), diğer numuneler ise 8 katman (toplam 2 mm kalınlık) preprek kumaş kullanılarak kalıp yardımı ile sıcak pres altında üretilmişlerdir. Üretilen plakalar disk testere yarımı ile istenilen boyutlara getirilmiştir.

Deney esnasında çekme çeneleri, numuneleri sıktıkları yerde hasara sebebiyet vermekte ve yanlış sonuçlar alınmasına neden olmaktadır. Bu sebeple çekme çenelerinin numuneler üzerinde hasara sebep olmaması için [0°/90°] yerleşim açısına sahip kompozit plakalardan oluşan pabuçlar Araldate yapıştırıcısı kullanılarak çekme numunelerine yapıştırılmıştır.

Çekme testlerinde gerinme değerlerini tespit edebilmek için iki boyutlu dijital görüntü korelasyonu yöntemi kullanılmıştır (2B-DGK). Bu yöntemin temel ölçüm prensibi, yüzey üzerindeki görüntülerin piksel seviyesindeki yer değiştirmelerini belirlemektir. Bu nedenle ölçüm yapılacak yüzeyin homojen görüntüsü küçük gri noktalar oluşturulacak şekilde değiştirilmesi gerekmektedir. Dijital görüntü korelasyonu programları bu yüzeyde oluşturulan gri tonlamalardan alt kümeler oluşturur. Deforme olmuş şeklin ve deforme olmamış şeklin alt kümelerinin merkezlerinin farkı korelasyon algoritmaları yardımıyla hesaplanır ve bu fark düzlem içi yer değiştirmeyi verir [50].

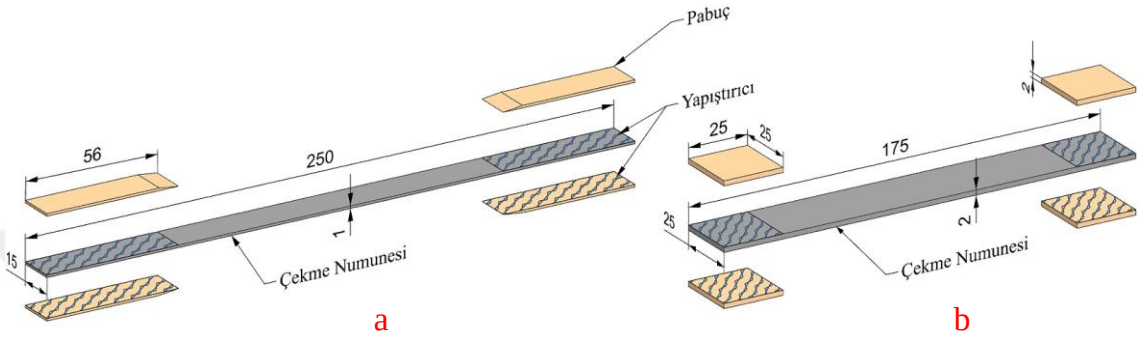
Kompozit test numuneleri siyah renkte olduklarından 2B-DGK yöntemi kullanılamaz, bunun için yüzeyin rengi önce beyaz boya ile kaplanır ve kuruduktan sonra siyah boya

ile yüzeyde düzensiz küçük noktalar oluşturulur. Bu sayede yüzey üzerindeki şekil değişimi dijital görüntü korelasyonu yöntemi ile tespit edilebilir.



Şekil 2.14. 2B-DGK yöntemi ve çekme testleri

Şekil 2.14'de 2B-DGK yöntemi ile çekme deneyi gösterilmektedir. Burada; 1 Gom Correlate görüntü işleme, 2 MTS çekme cihazı, 3 çekme cihazından verilerin işlendiği bilgisayar, 4-6 ışık kaynakları, 5 kamera, 7 fiber yönündeki test numunesi, 8 çekme cihazı kuvvet uygulama çenesi, 9 çekme cihazı sabit çene, 10 fiber yönü 45 derece olan test numunesi ve 11 fibere dik yönde olan test numunesi.



Şekil 2.15. ASTM D3039 ve ASTM D3518 çekme numune ölçüleri

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, sadece tek yönde çekme testi yapılarak elde edilemez. Burada fiber yönünde, fiber yönüne dik ve fiber yönü ile 45 derece açı yapacak şekilde üretilen numunelere çekme deneyleri yapmak gerekir [51]. ASTM D3039 standartlarına göre fiber yönündeki ve fiber yönüne dik çekme numuneleri hazırlanmış ve çekme deneyleri yapılmıştır. ASTM D3518 standartlarına göre fiber yönü ile 45 derecelik acı yapacak şekilde test numuneleri hazırlanmış ve çekme testleri yapılmıştır. Fiber yönünde ki numuneler a şekline göre, fiber yönüne dik ve fiber yönü ile 45 derecelik açı yapan numuneler b şekline göre üretilmiştir. Deneyler MTS çekme cihazında yapılmıştır deneyler sonucunda E_{11}, E_{22} yönlerindeki elastik modülleri ve $\boldsymbol{n}_{12}$ yönündeki poison oranı hesaplanarak elde edilmiştir.

2.3. Sayısal Yöntemler

Topoloji optimizasyonu yöntemi son kullanım için olan geometriyi veremez, sadece belirlenen kısıt ve amaç fonksiyonu ışığında en uygun geometriyi sunar [2]. Bu elde edilen optimize geometriler kullanım amacına ve özellikle üretim yöntemine göre güncellenmesi gerekmektedir. Ortotropik malzemeler için yapılan topoloji optimizasyon yöntemleri iki aşamalı olmaktadır. Bunların birincisi yoğunluk dağılımı olarak, verilen kısıtlamalara göre malzemenin tasarım alanındaki dağılımının optimize edilmesidir. Literatürde yapılan çalışmaların birçoğu SIMP (Solid Isotropic Material with

Penalization) metodu kullanılarak yapılmasını önermiştir [16–18]. İkinci aşama da optimize edilen geometri için ana gerilme yönlerinde fiberlerin yönlendirilmesidir. Bu yöntemler matematiksel olarak mümkün olsa da üretim maliyetleri ve son ürün olarak kullanımında birçok olumsuz durum mevcuttur. Bunların en önemlisi fiber birleşim noktalarındaki süreksizliklerdir.

Bu tez çalışmasında farklı serim açılarında üretilen (Şekil 2.8.) karbon takviyeli kompozit plakalarda topoloji optimizasyonu çalışılmıştır. Bu kapsamda optimum malzeme dağılımını elde etmek için Ansys sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Bu çalışmalar statik ve modal olmak üzere iki ana başlık altında incelenmiştir. Statik çalışmalar üç nokta eğme durumunda modellerin tepkisi, modal analizde ise sistemin doğal frekansı özellikleri incelenmiştir. Statik ve modal analizler için problemin gereksinimlerine göre farklı geometri ve boyutlar kullanılmıştır.

2.3.1. Tersine Mühendislikle Mekanik Malzeme Özelliklerinin Tespiti

Çekme testi ile elde edilen düzlem içi mekanik özellikler, fiber takviyeli kompozit malzemenin mekanik özelliklerini belirlemekte yeterli değildir. Düzlem dışı mekanik özelliklerin tespit edilebilmesi için basma ve kesme gibi daha birçok deneyin yapılması gerekmektedir. Tespit edilemeyen malzeme özellikleri tersine mühendislik yöntemleri ile bulunabilmektedir. Tersine mühendislik yöntemi çok fazlı bileşenlerden oluşan malzemelerin lineer olmayan mekanik davranışlarını elde edebilmek için etkili bir yöntemdir. Bu yöntem çok fazlı malzemelerin, makroskobik performansını faz özelliklerine ve mikro yapı tanımına göre hesaplamak için kullanılan bir ortalama alan homojenleştirme yazılımıdır. Tersine mühendislik programı, gerçekçi mikro yapıları temsil bir hacim elemanı olarak üretmek için kullanılan bir sonlu elemanlar yaklaşımıdır. Burada hesaplamalar için kullanılan ilk veriler ortotropik karbon liflerin ve izotropik bağlayıcı matrisin fiziksel ve mekaniksel özellikleridir [52].

Tersine mühendislikle malzeme karakterizasyonu aşamaları Şekil 2.16'da şematik olarak gösterilmektedir. Heterojen yapı aşamasında malzemeyi oluşturan fazların özellikleri tanımlanmaktadır. Bir sonraki aşamada kompozit kumaşın özellikleri (tek yönlü, dokuma vb.) ve hacim/kütle oranları, fiber yönelimleri, fiber çapı gibi özellikler tanımlanarak homojen temsili birim hacim elemanı oluşturulur. Bu aşamadan sonra kompozit malzemenin mekanik özellikleri hesaplanabilir fakat doğruluk oranı düşük olacaktır. Bu

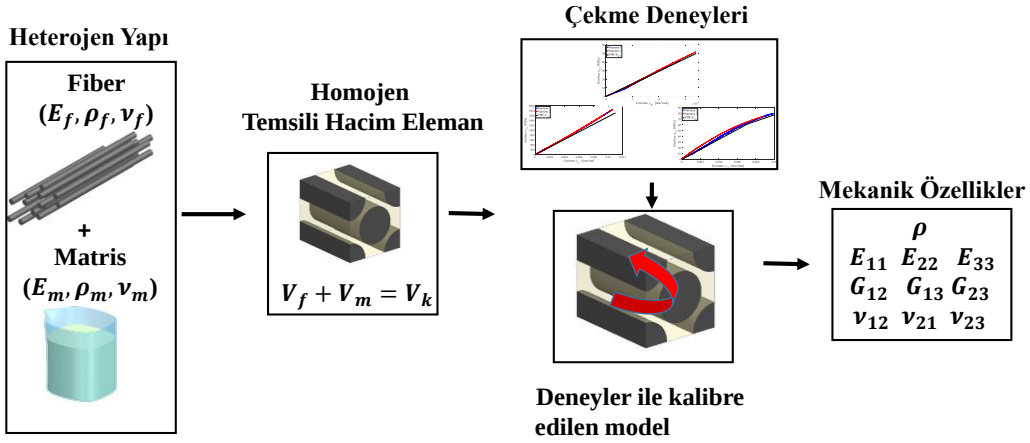
yüzden bir sonraki aşamada deneysel veriler yüklenerek model optimize edilir. Optimize edilen modelin mekanik özellikleri ile deney verileri karşılaştırılır ve farklar var ise optimize işlemine devam edilir. Bu işlem deneysel veriler ile tersine mühendislikle elde edilen (TME-E) değerler örtüşünceye kadar devam ettirilir.

Takviye fazı elastik malzeme modeli ve izotropik malzeme olarak tanımlanmıştır. Matris fazı için elasto-plastik malzeme modeli ve J2 plastisite modeli seçilmiştir. Tedarikçi firma tarafından verilen malzeme özellikleri tanımlanmıştır.

Tablo 2.2. Takviye ve Matris özellikleri

Özellikler	Karbon Lifleri	Matris
Elastisite Modülü (GPa)	238	3.7
Poisson Oranı	0.24	0.3
Yoğunluk (g/m^3)	1.76	1.29

Takviye fazı elastik malzeme modeli ve izotropik olarak tanımlanmıştır. Matris fazı için elasto-plastik malzeme modeli ve J2 plastisite modeli seçilmiştir. Tedarikçi firma tarafından verilen malzeme özellikleri kullanılarak temsili hacim eleman oluşturulmuştur. Sonraki aşamada çekme deneylerinden elde edilen gerilme-gerinme değerleri tersine mühendislik programına yüklenmiştir ve kompozit yapının mekanik özellikleri tespit edilmiştir.



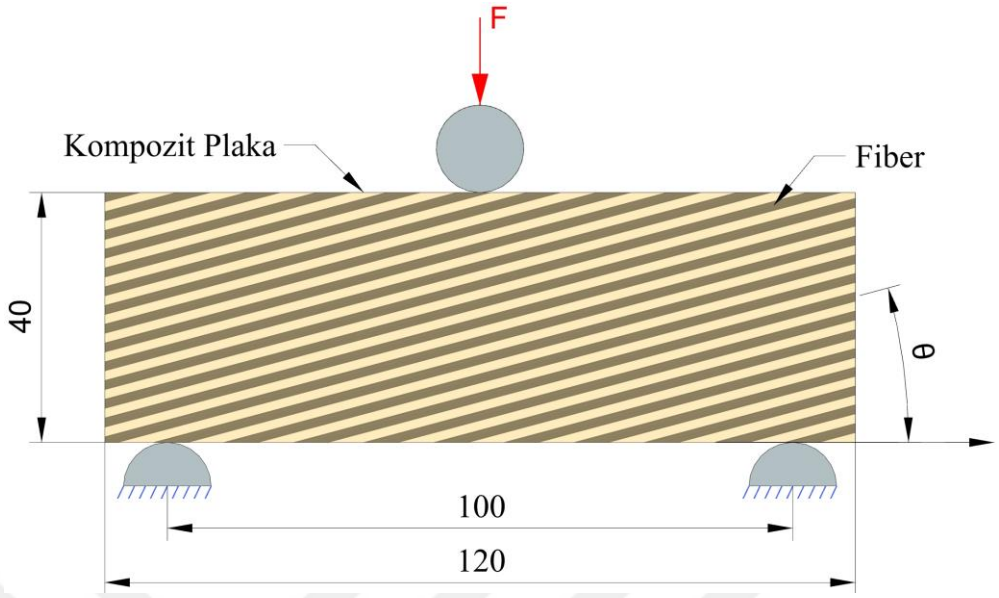
Şekil 2.16. Tersine mühendislikle malzeme özelliklerinin tespit edilmesi

İki fazlı malzeme modeline göre tersine mühendislik programında hesaplamalar yapılmıştır. Tersine mühendislik programı tarafından önerilen malzeme özellikleri, deneyler sonucunda elde edilen değerler ile karşılaştırılarak program parametreleri değiştirilmiş ve deney sonucunda elde edilen değerlerle örtüşünceye kadar hesaplamalara devam edilmiştir. Sonuçlar yakınsak bir değer aldığında deneyler sonucunda elde edilemeyen mekanik özellikler tersine mühendislik programı ile elde edilmiş ve Ansys sonlu elemanlar programına aktarılmıştır ve sayısal analizlerde bu değerler kullanılmıştır.

2.3.2. Statik Yükler Altında Topoloji Optimizasyonu

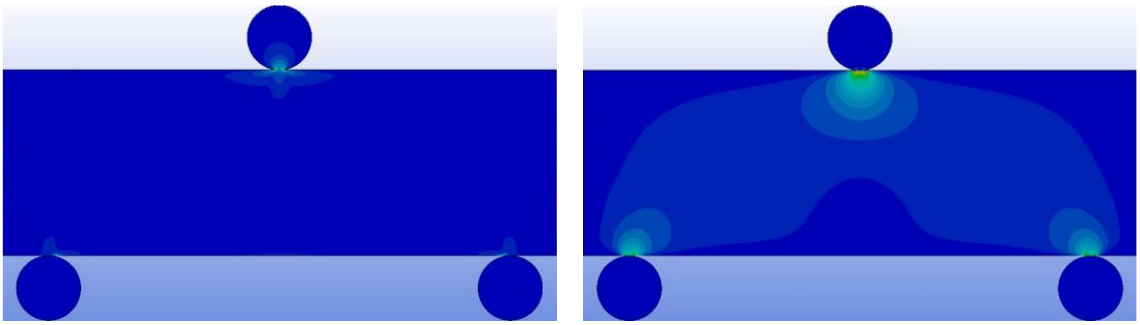
Topoloji optimizasyonunda en fazla kullanılan modellerden bir tanesi düzlem içi üç nokta eğmeye maruz kalan yapılardır. Bu yapılarda hem kayma hem de normal gerilmeye oluşmaktadır. Bu çalışma kapsamında Şekil 2.17'de gösterildiği gibi bir model üzerinde sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde ilk olarak yapısal analizler yapılarak yapı elemanlarındaki gerilme ve yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre yapı için belirlenen kütle kısıtına göre en uygun geometri topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilmiştir. Statik yüklemeler 14 mm çapındaki pim tarafından düşük hızda uygulanıştır.

Analiz ve deneylerde kullanılan kompozit plakalar 6 mm kalınlığında ve 20 katmandan meydana gelmektedir. Topoloji optimizasyonu analizleri, toplamda 20 katmanı oluşturan laminaların fiber açılarını, katman kalınlıklarını ve mekanik özelliklerini dikkate alabilecek şekilde iki boyutlu olarak yapılmış ve modeller buna göre elde edilmiştir. Yapılan analizlerdeki temel değişkenler fiber açıları ve bu fiber serim açısındaki kütle kısıtıdır. Kütle kısıtı, topoloji optimizasyonunda sonucunda hedef fonksiyonu olarak sonuç geometrisinin kütlesinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.



Şekil 2.17. Statik sınır şartları (t=6 mm)

Şekil 2.17'de üç nokta eğme sayısal analizlerde kullanılan başlangıç geometrisi ve sınır şartları gösterilmektedir. Burada kullanılan kompozit plakanın toplam kalınlığı 6 mm'dir. Fiber serim açısı θ olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.18. Serim açısı $[0°]_{10S}$ olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi

Şekil 2.18'de Ansys sonlu elemanlar programında serim açısı $[0°]_{10S}$ olan kompozit plakaya yapılan statik analiz sonuçlarına göre, a von Mises gerilmesinin, b de von Mises gerinmesinin dağılımı gösterilmektedir. Şekil 2.19-22-24'de gösterilen optimizasyon sonuçları, buradaki gerilme ve gerinme dağılımlarına göre elde edilmiştir.

Yoğunluk kriterine göre optimize edilmiş geometriler şu şekilleri tanımlanmıştır;

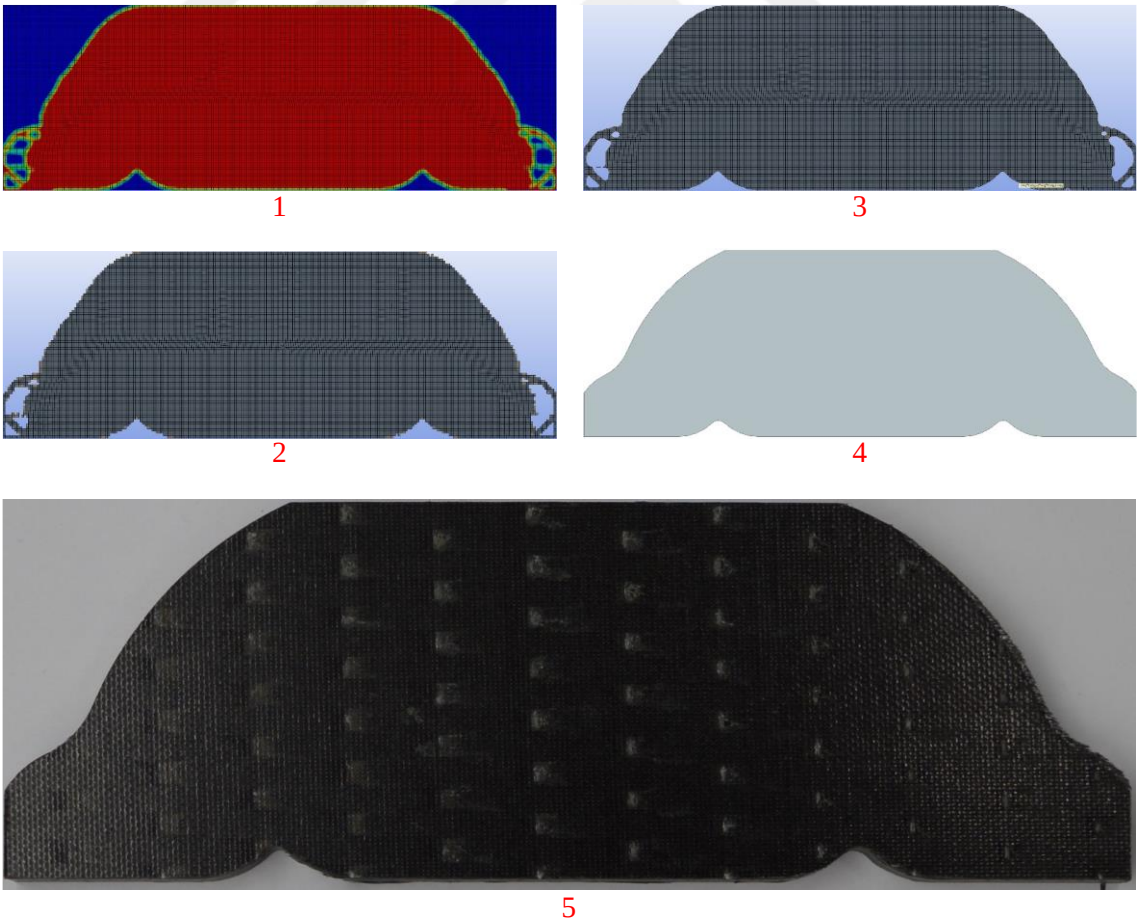
- Şekil 2.19-1'de gösterilen kırmızı renk yoğunluğu 1 olan dolu elemanları, mavi yoğunluğu 0 olan boşluk elemanlarını ara renkler ise yoğunluk değeri 0 ile 1 arasında kalan elamanları temsil etmektedir.

- Şekil 2.19-2'de, filtreleme işlemi uygulanarak ara yoğunluk değerlerinin 0 veya 1 değerine getirilmiş görüntüsü.

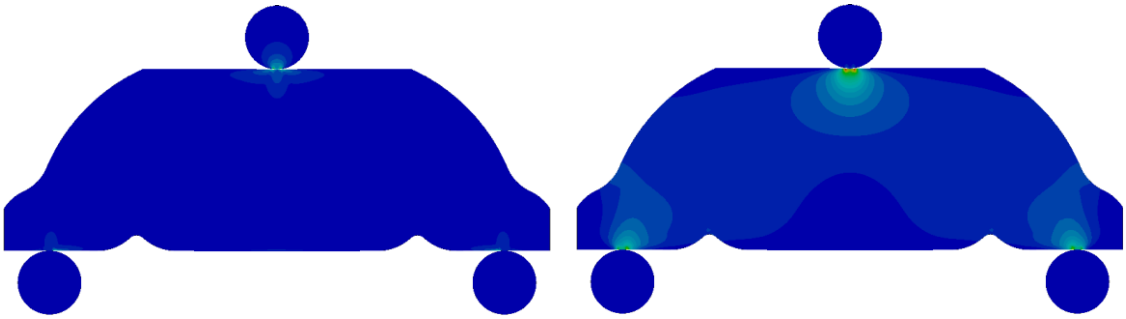
- Şekil 2.19-3'de şeklin sınırında olan elemanların köşelerinin, yapının genel topolojisine uyum sağlayacak şekilde güncellenmiş hali.

- Şekil 2.19-4'de önerilen topolojik geometrinin talaşlı imalat ile üretilebilir halde güncellenmiş modelin göstermektedir.

- Şekil 2.19-5'te kompozit olarak üretilmiş ve önerilen modele göre imal edilmiş resmi görünmektedir.



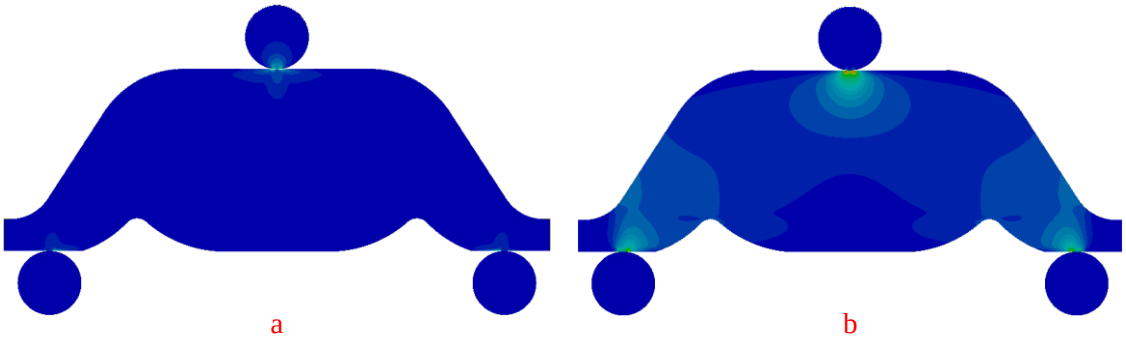
Şekil 2.19. Serim açısı$[0°]_{10S}$, kütle kriteri %80 olan model



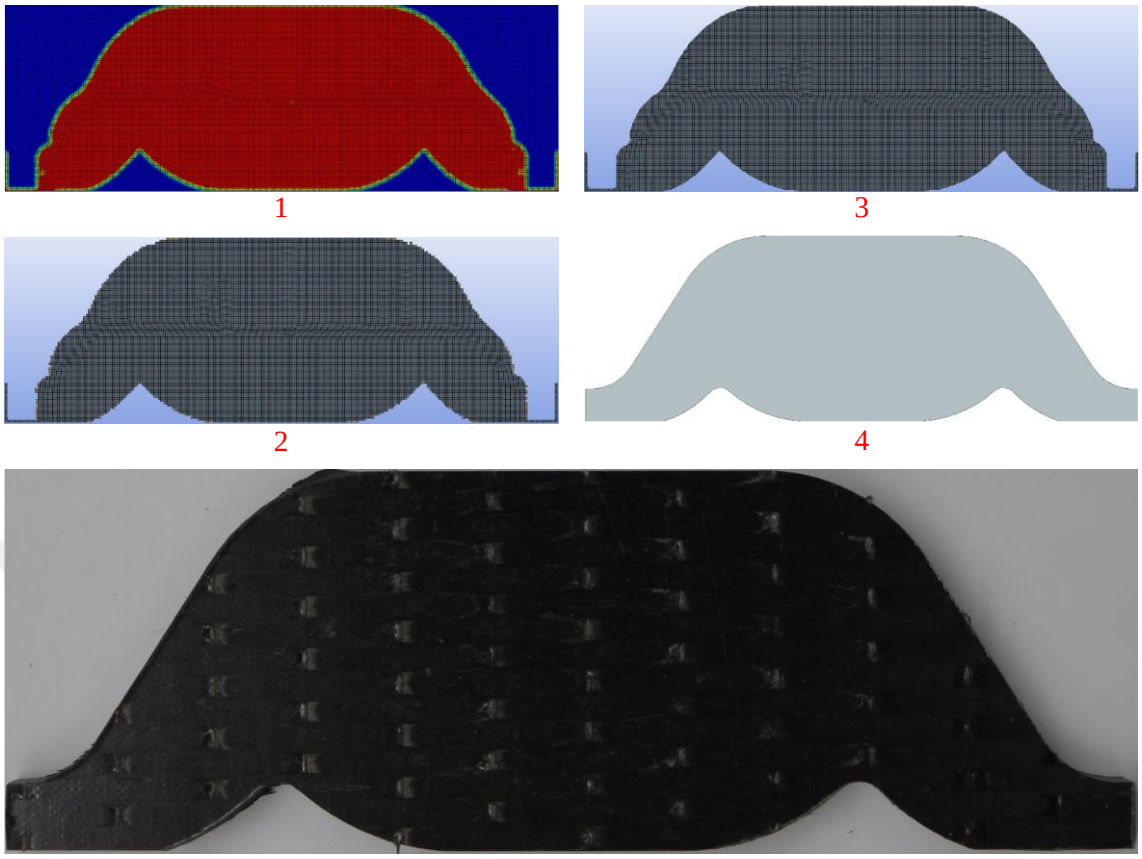
Şekil 2.20. Serim açısı $[0°]_{10S}$, kütle kriteri %80 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi

Şekil 2.19'da serim açısı $[0°]_{10S}$ olan ve %80 hedef kütle kriterine göre yapılmış topoloji optimizasyonu modelleri (1-3) ve üretilen model (4-5) görülmektedir. Burada %100 dolu malzemenin kütlesi 43.348 gr, %80 kütle kriterine göre yapılan optimizasyon sonucunda çıkan numunenin kütlesi 35.555 gr (%80.6) olarak ölçülmüştür. Şekil 2.20'de % 80 kütle kriterine göre optimize edilmiş geometrinin sonuçlarına göre, a von Mises gerilmesinin, b de von Mises gerinmesinin dağılımı gösterilmektedir.

Şekil 2.21'de % 70 kütle kriterine göre optimize edilmiş geometrinin a şeklinde gerilme, b şeklinde gerinme dağılımı gösterilmektedir. Şekil 2.22'de serim açısı$[0°]_{10S}$ olan ve %70 hedef kütle kriterine göre yapılmış topoloji optimizasyonu modelleri (1-3) ve üretilen model (4-5) görülmektedir. Burada %100 dolu malzemenin kütlesi 43.348 gr, %70 kütle kriterine göre yapılan optimizasyon sonucunda çıkan numunenin kütlesi 30.971 gr (%70.2) olarak ölçülmüştür.

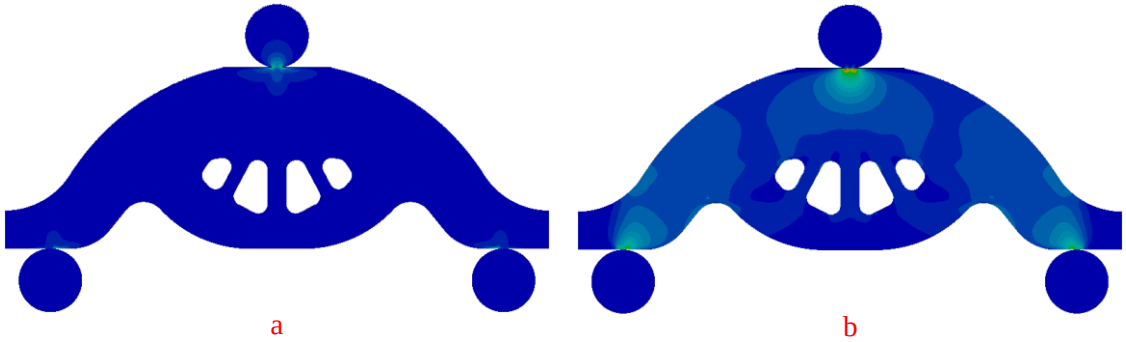


Şekil 2.21. Serim açısı $[0°]_{10S}$, kütle kriteri %70 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi

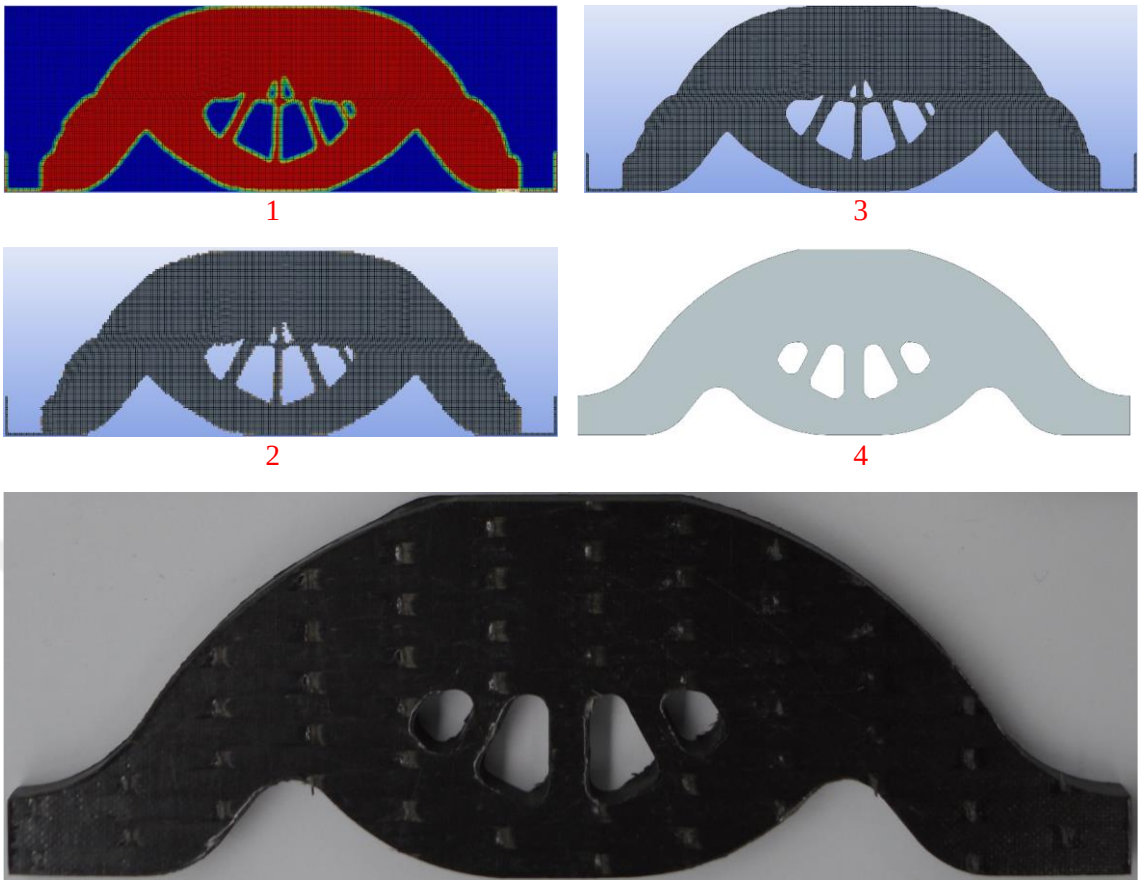


Şekil 2.22. Serim açısı $[0°]_{10S}$, kütle kriteri %70 olan model

Şekil 2.23'de % 60 kütle kriterine göre optimize edilmiş geometrinin a şeklinde gerilme, b şeklinde gerinme dağılımı gösterilmektedir. Şekil 2.24'de serim açısı$[0°]_{10S}$ olan ve %60 hedef kütle kriterine göre yapılmış topoloji optimizasyonu modelleri (1-3) ve üretilen modeli (5) görünmektedir. Burada %100 dolu malzemenin kütlesi 43.348 gr, % 60 numunenin kütlesi 25.947 gr (%59.85) olarak ölçülmüştür.



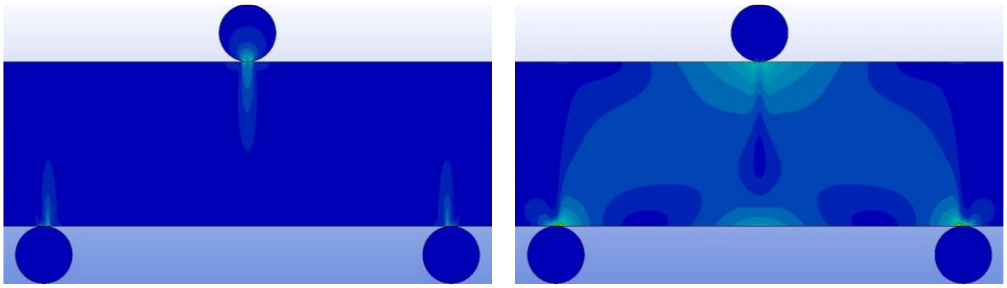
Şekil 2.23. Serim açısı $[0°]_{10S}$, kütle kriteri %60 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi



Şekil 2.24. Serim açısı$[0°]_{10S}$, kütle kriteri %60 olan model

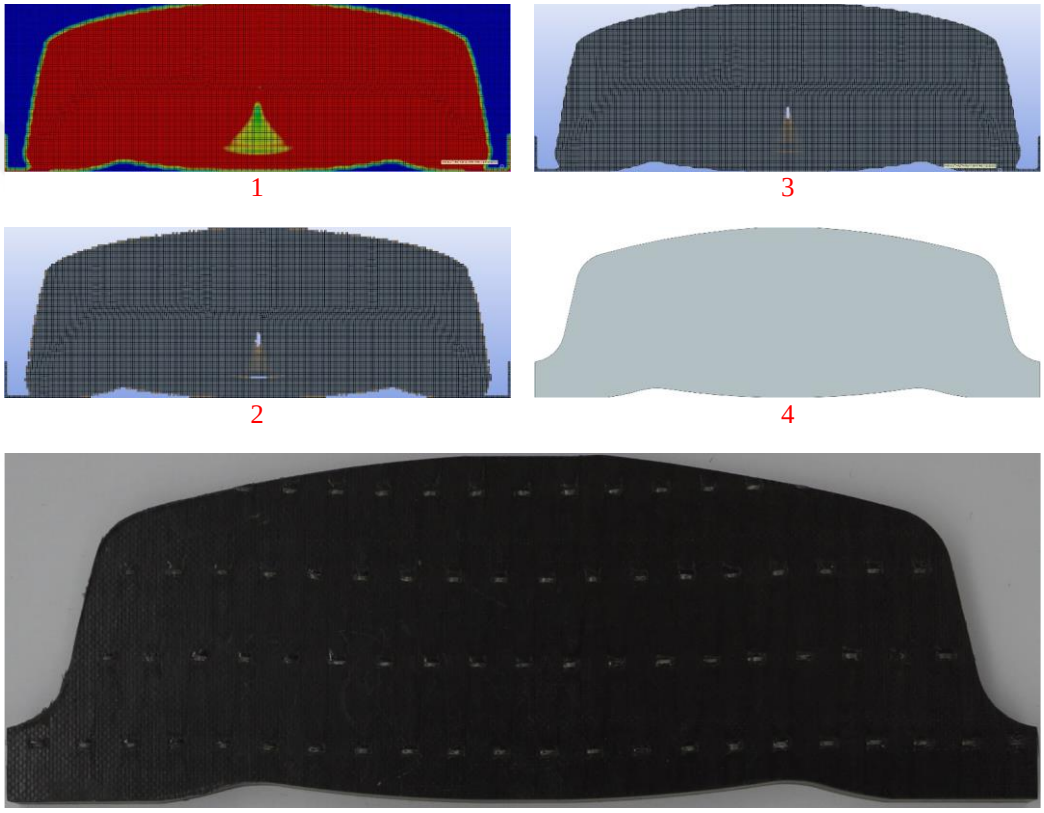
Şekil 2.18-20-21 ve 23'de $[0°]_{10S}$ serim açısına sahip optimize edilmiş ve edilmemiş geometrilerin statik analiz sonuçları görülmektedir. Bu yapılarda fiber yönünden kaynaklı hem gerilme hem de gerinme değerlerinin yükün uygulandığı ve destek bölgelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu numunelerde matris elemanına daha düşük yük gelmektedir bu sayede rijitlik değeri daha yüksek olmaktadır.

Şekil 2.25'de Ansys sonlu elemanlar programında serim açısı $[90°]_{10S}$ olan kompozit plakaya yapılan statik analiz sonuçlarına göre, a von Mises gerilmesinin, b von Mises gerinmesinin dağılımı gösterilmektedir. Şekil 2.26-28-30'da gösterilen optimizasyon sonuçları, buradaki von Mises gerilmesi ve von Mises gerinmesi dağılımlarına göre elde edilmiştir.



a b

Şekil 2.25. Serim açısı $[90°]_{10S}$ olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi

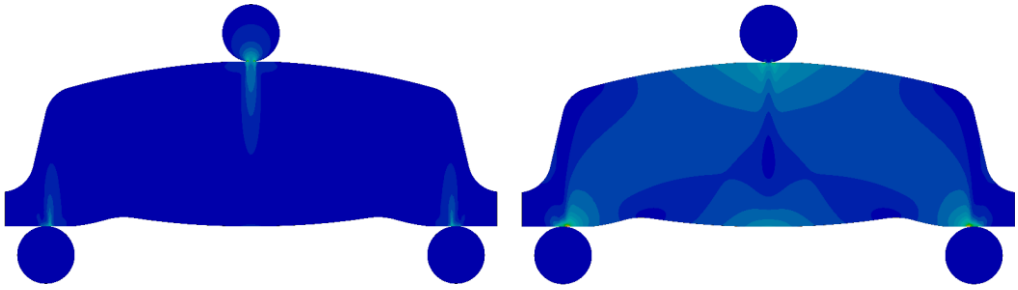


1 3

2 4

5

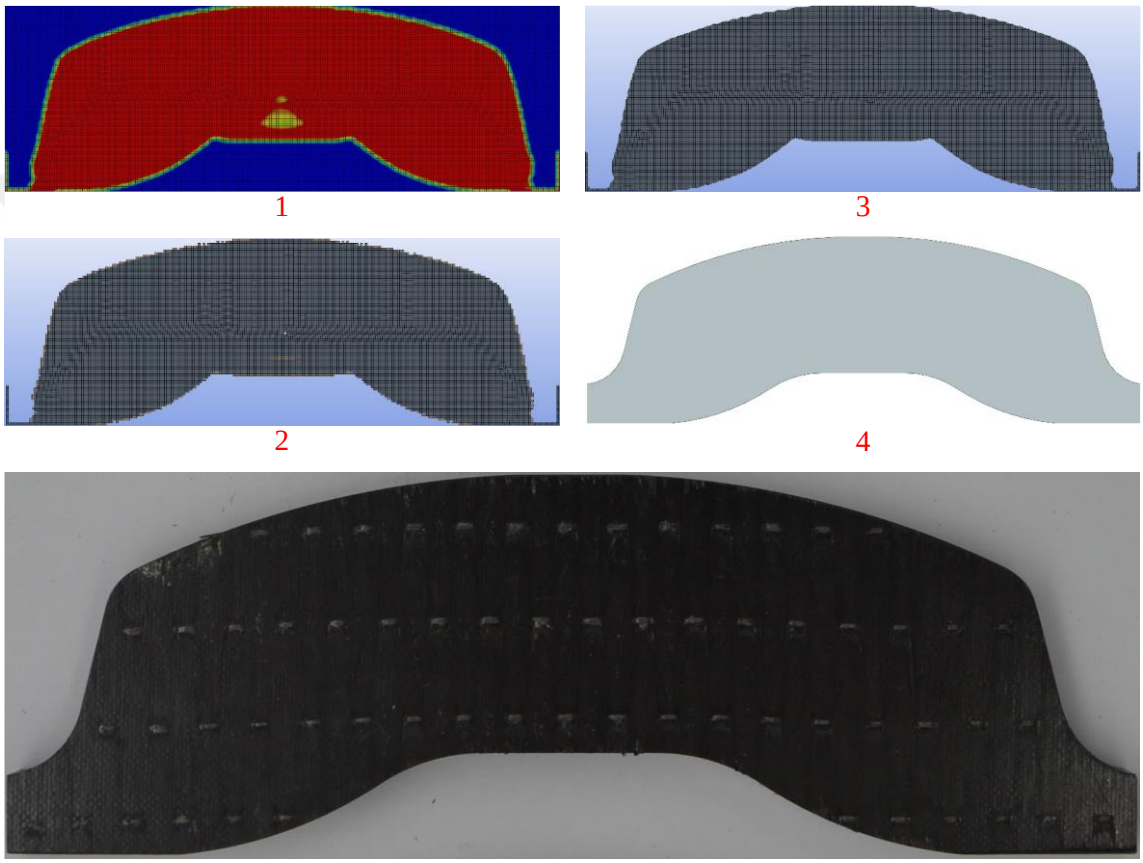
Şekil 2.26. Serim açısı $[90°]_{10S}$, kütle kriteri %80 olan model



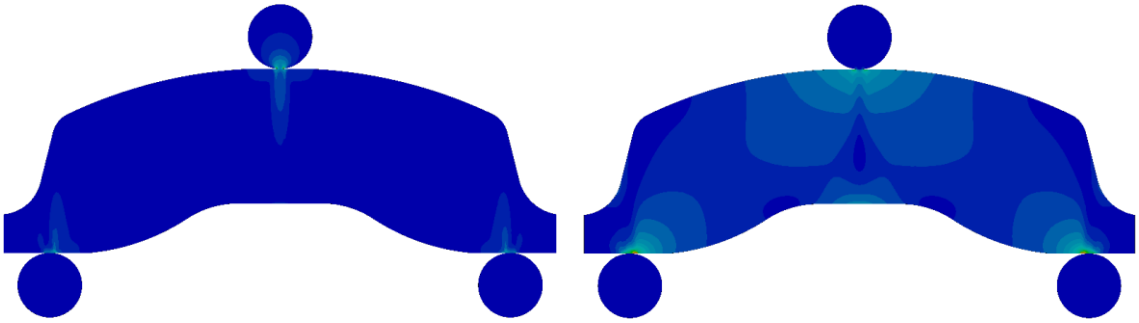
a b

Şekil 2.27. Serim açısı $[90°]_{10S}$, kütle kriteri %80 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi

Şekil 2.26'da serim açısı $[90°]_{10S}$ olan ve %80 hedef kütle kriterine göre yapılmış topoloji optimizasyonu modelleri (1-3) ve üretilen modeli (4-5) görünmektedir. Burada %100 dolu malzemenin kütlesi 43.272 gr, %80 kütle kriterine göre yapılan optimizasyon sonucunda çıkan numunenin kütlesi 35.431 gr (%81.9) olarak ölçülmüştür. Şekil 2.27'de % 80 kütle kriterine göre optimize edilmiş geometrinin a şeklinde von Mises gerilmesi, b şeklinde von Mises gerinmesi dağılımı gösterilmektedir.



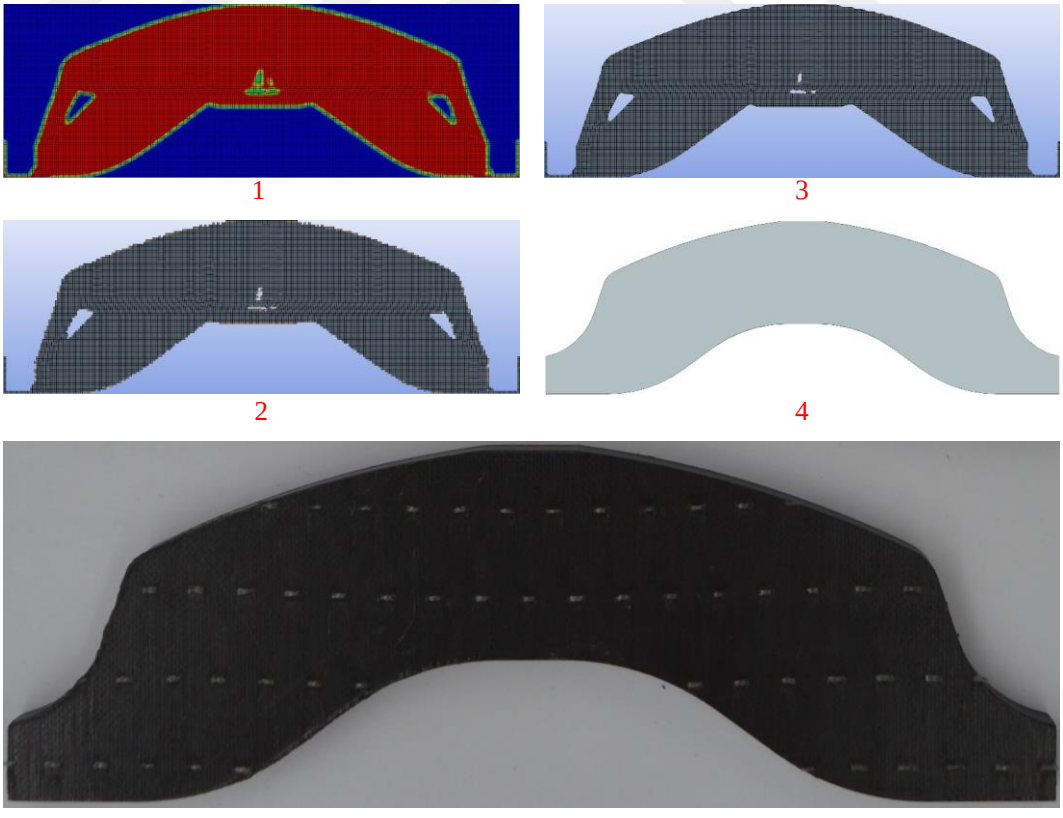
Şekil 2.28. Serim açısı$[90°]_{10S}$, kütle kriteri %70 olan model



a b

Şekil 2.29. Serim açısı $[90°]_{10S}$, kütle kriteri %70 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi

Şekil 2.28'de serim açısı$[90°]_{10S}$ olan ve %70 hedef kütle kriterine göre yapılmış topoloji optimizasyonu modelleri (1-3) ve üretilen modeli (4-5) görünmektedir. Burada %100 dolu malzemenin kütlesi 43.272 gr, %70 kütle kriterine göre yapılan optimizasyon sonucunda çıkan numunenin kütlesi 30.179 gr (%69.7) olarak ölçülmüştür. Şekil 2.29'da % 70 kütle kriterine göre optimize edilmiş geometrinin a şeklinde von Mises gerilme, b şeklinde von Mises gerinme dağılımı gösterilmektedir.



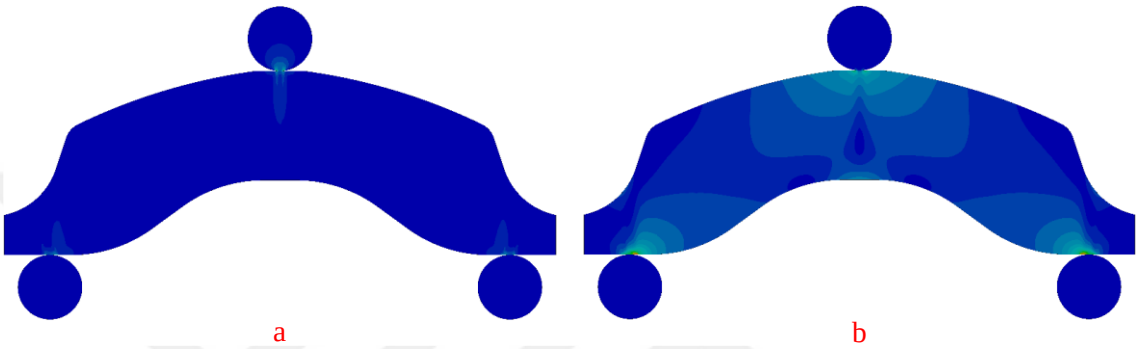
1 3

2 4

5

Şekil 2.30. Serim açısı $[90°]_{10S}$, kütle kriteri %60 olan model

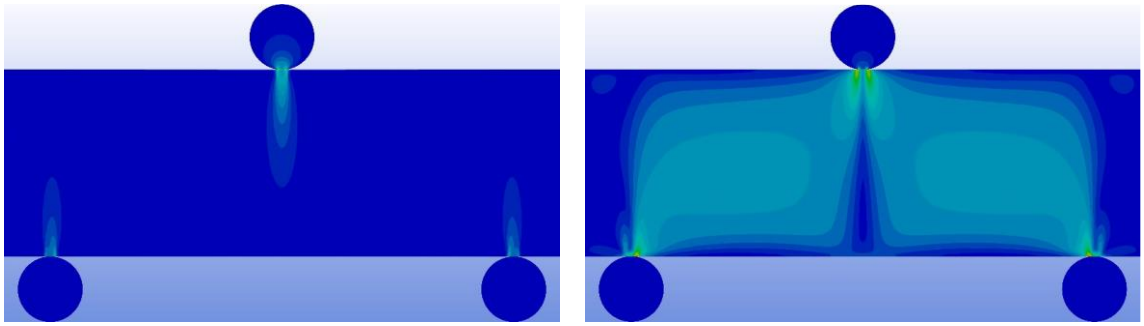
Şekil 2.30'da serim açısı $[90°]_{10S}$ olan ve %60 hedef kütle kriterine göre yapılmış topoloji optimizasyonu modelleri (1-3) ve üretilen modeli (4-5) görünmektedir. Burada %100 dolu malzemenin kütlesi 43.272 gr, %60 kütle kriterine göre yapılan optimizasyon sonucunda çıkan numunenin kütlesi 25.669 gr (%59.3) olarak ölçülmüştür. Şekil 2.31'de % 70 kütle kriterine göre optimize edilmiş geometrinin a şeklinde von Mises gerilmesi, b şeklinde von Mises gerinme dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 2.31. Serim açısı $[90°]_{10S}$, kütle kriteri %60 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi

Şekil 2.25-27-29 ve 31'de $[90°]_{10S}$ serim açısına sahip optimize edilmiş ve edilmemiş geometrilerin statik analiz sonuçları görülmektedir. Burada uygulanan yükün büyük bir kısmı matris elemanı tarafından taşınmaktadır ve bu özellik yapılan deneylerde kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin lineer davranış göstermesi ile desteklenmektedir. Matris elemanı hem kesme gerilmesine hem de kayma gerilmesine maruz kalmaktadır. Bu geometrilerde en alt orta noktada gerilme değerleri maksimum olmaktadır ve bu noktadan itibaren kopmalar meydana gelmektedir.

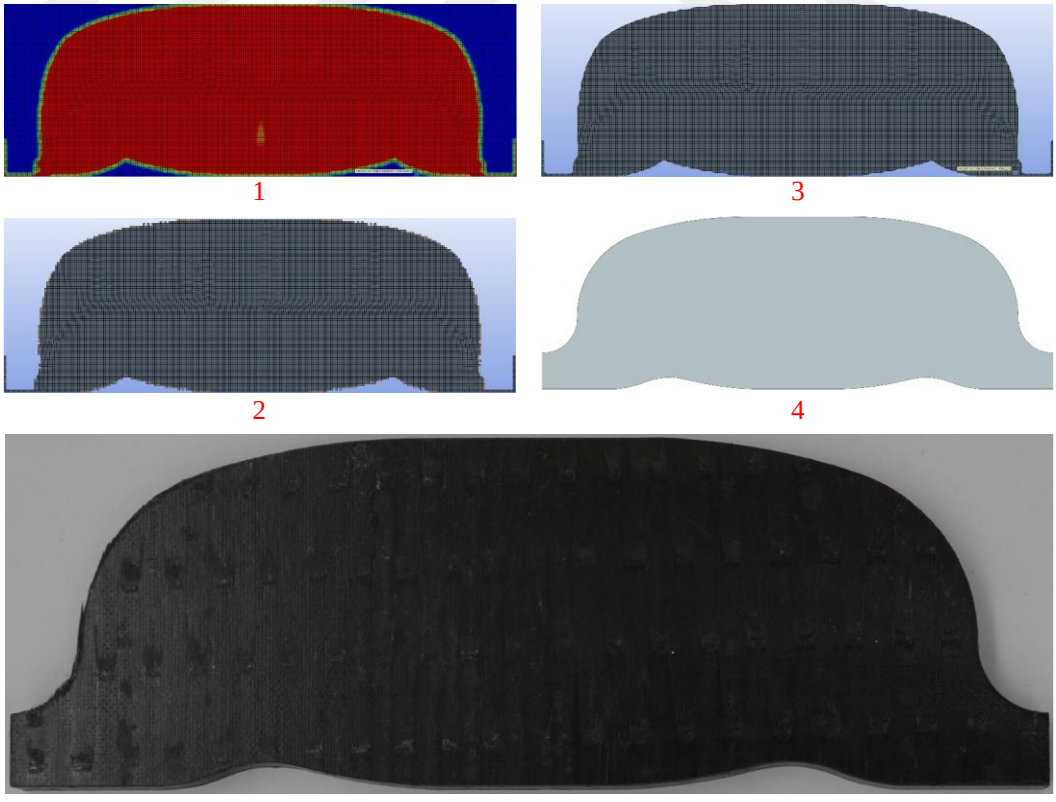
Şekil 2.32'de Ansys sonlu elemanlar programında serim açısı $[0°/90°]_{5S}$ kompozit plakaya yapılan statik analiz sonuçlarına göre, a von Mises gerilmesinin ve b de von Mises geriniminin dağılımı gösterilmektedir. Şekil 2.33-35-37'de gösterilen optimizasyon sonuçları, buradaki gerilme ve gerinme dağılımlarına göre elde edilmiştir.



a b

Şekil 2.32. Serim açısı $[0°/90°]_{5S}$ olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi

Şekil 2.33'de serim açısı $[0°/90°]_{5S}$ olan ve %80 hedef kütle kriterine göre yapılmış topoloji optimizasyonu modelleri (1-3) ve üretilen modeli (4-5) görünmektedir. Burada %100 dolu malzemenin kütlesi 43.053 gr, %80 kütle kriterine göre yapılan optimizasyon sonucunda çıkan numunenin kütlesi 34.894 gr (%81) olarak ölçülmüştür. Şekil 2.34'de % 80 kütle kriterine göre optimize edilmiş geometrinin a şeklinde von Mises gerilme, b şeklinde von Mises gerinme dağılımı gösterilmektedir.



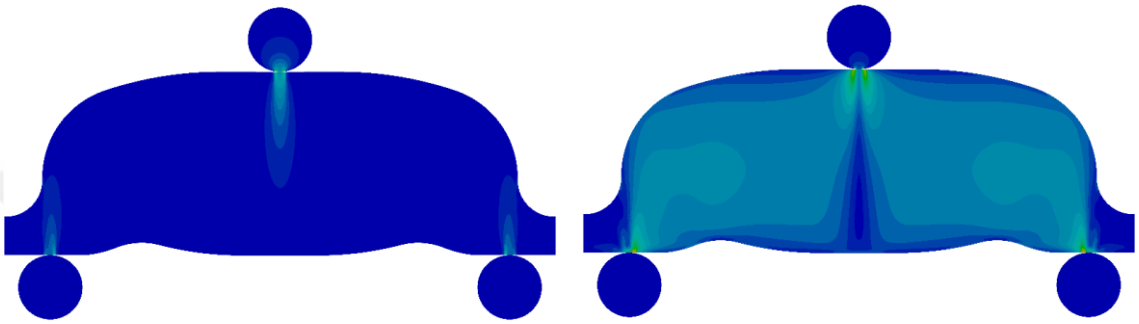
1 3

2 4

5

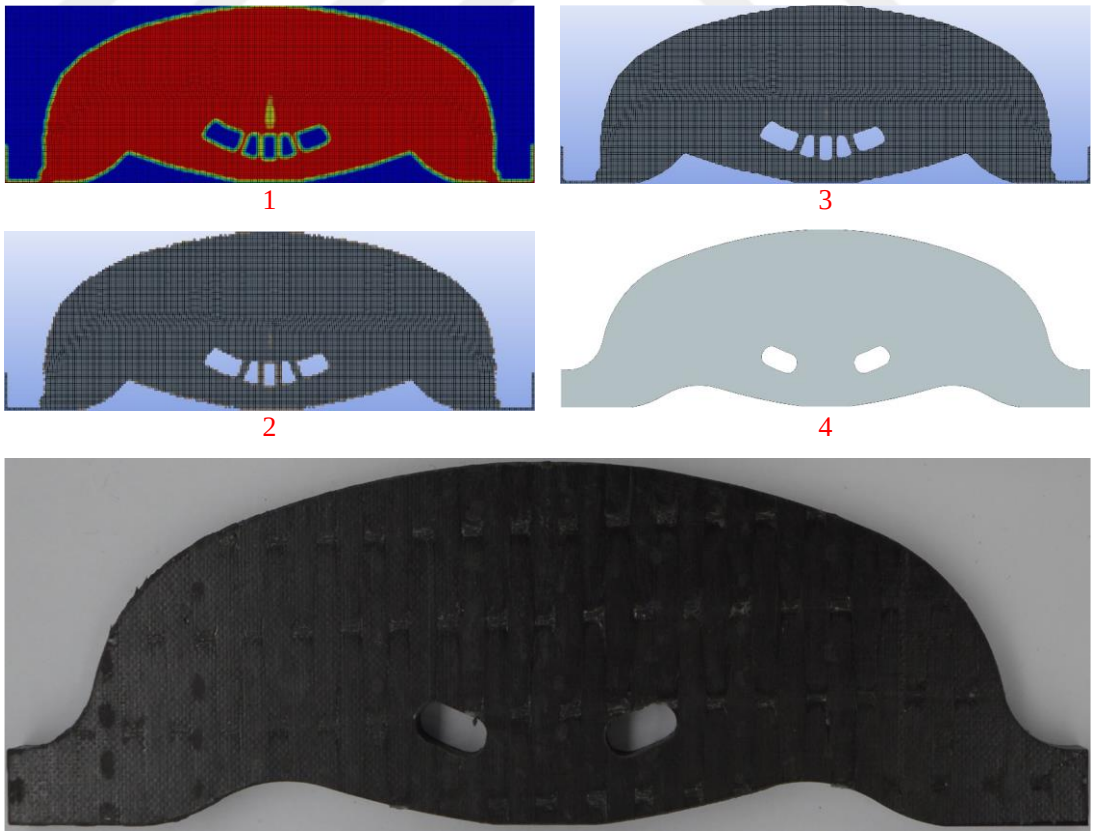
Şekil 2.33. Serim açısı $[0°/90°]_{5S}$, kütle kriteri %80 olan model

Şekil 2.35'de serim açısı $[0°/90°]_{5S}$ olan ve %70 hedef kütle kriterine göre yapılmış topoloji optimizasyonu modelleri (1-3) ve üretilen modeli (4-5) görünmektedir. Burada %100 dolu malzemenin kütlesi 43.053 gr, %70 kütle kriterine göre yapılan optimizasyon sonucunda çıkan numunenin kütlesi 30.550 gr (%70.9) olarak ölçülmüştür. Şekil 2.36'da % 70 kütle kriterine göre optimize edilmiş geometrinin a şeklinde von Mises gerilme, b şeklinde von Mises gerinme dağılımı gösterilmektedir.



a b

Şekil 2.34. Serim açısı $[0°/90°]_{5S}$, kütle kriteri %80 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi

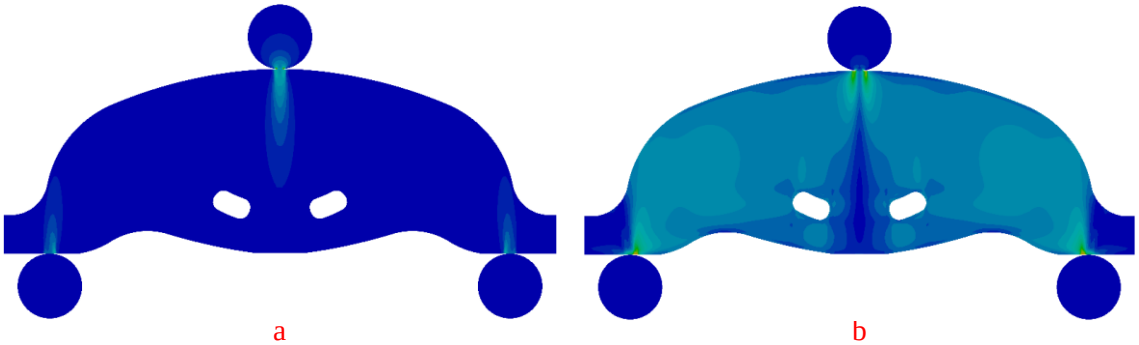


1 3

2 4

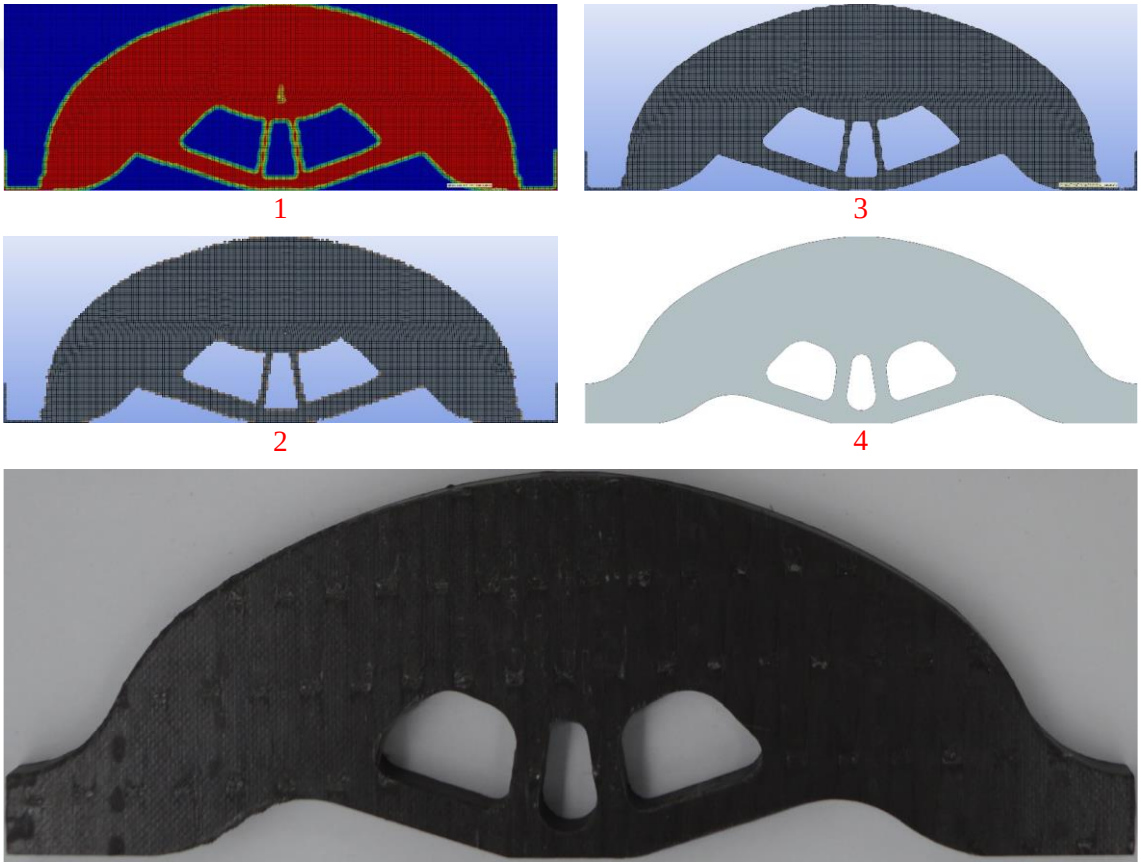
5

Şekil 2.35. Serim açısı$[0°/90°]_{5S}$, kütle kriteri %70 olan model



a b

Şekil 2.36. Serim açısı $[0°/90°]_{5S}$, kütle kriteri %70 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi

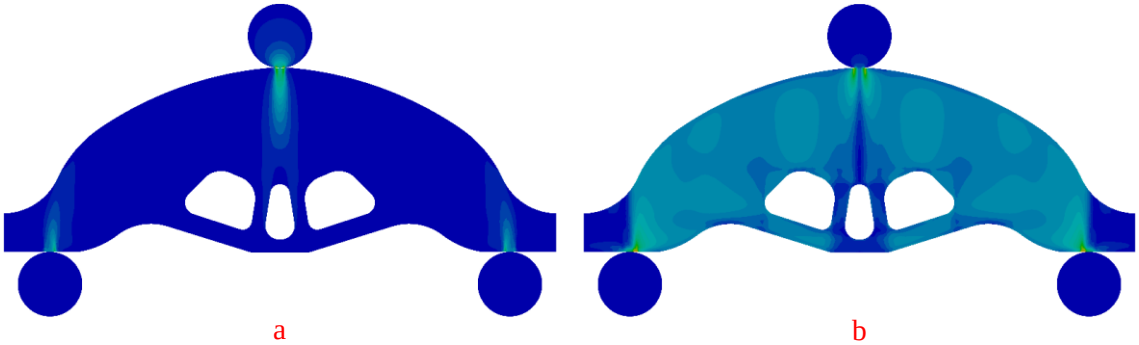


1 3

2 4

5

Şekil 2.37. Serim açısı $[0°/90°]_{5S}$, kütle kriteri %60 olan model

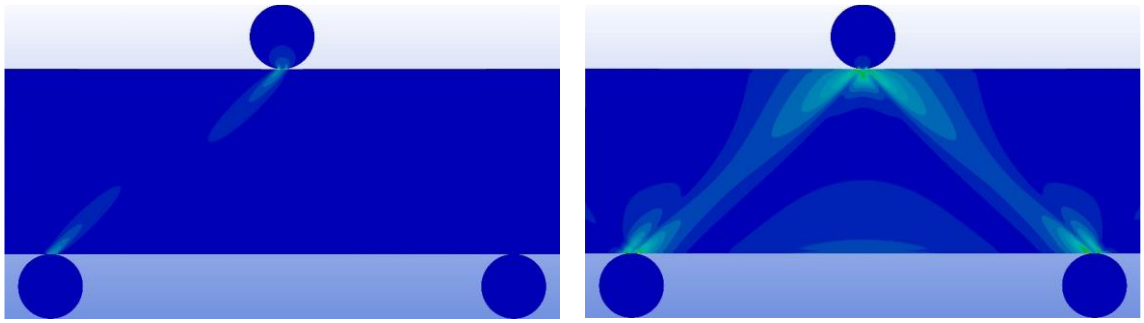


Şekil 2.38. Serim açısı $[0°/90°]_{5S}$, kütle kriteri %60 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi

Şekil 2.37'de serim açısı $[0°/90°]_{5S}$ olan ve %60 hedef kütle kriterine göre yapılmış topoloji optimizasyonu modelleri (1-3) ve üretilen modeli (4-5) görünmektedir. Burada %100 dolu malzemenin kütlesi 43.053 gr, %60 kütle kriterine göre yapılan optimizasyon sonucunda çıkan numunenin kütlesi 25.782 gr (%59.9) olarak ölçülmüştür. Şekil 2.38'de % 60 kütle kriterine göre optimize edilmiş geometrinin a şeklinde von Mises gerilme, b şeklinde von Mises gerinme dağılımı gösterilmektedir.

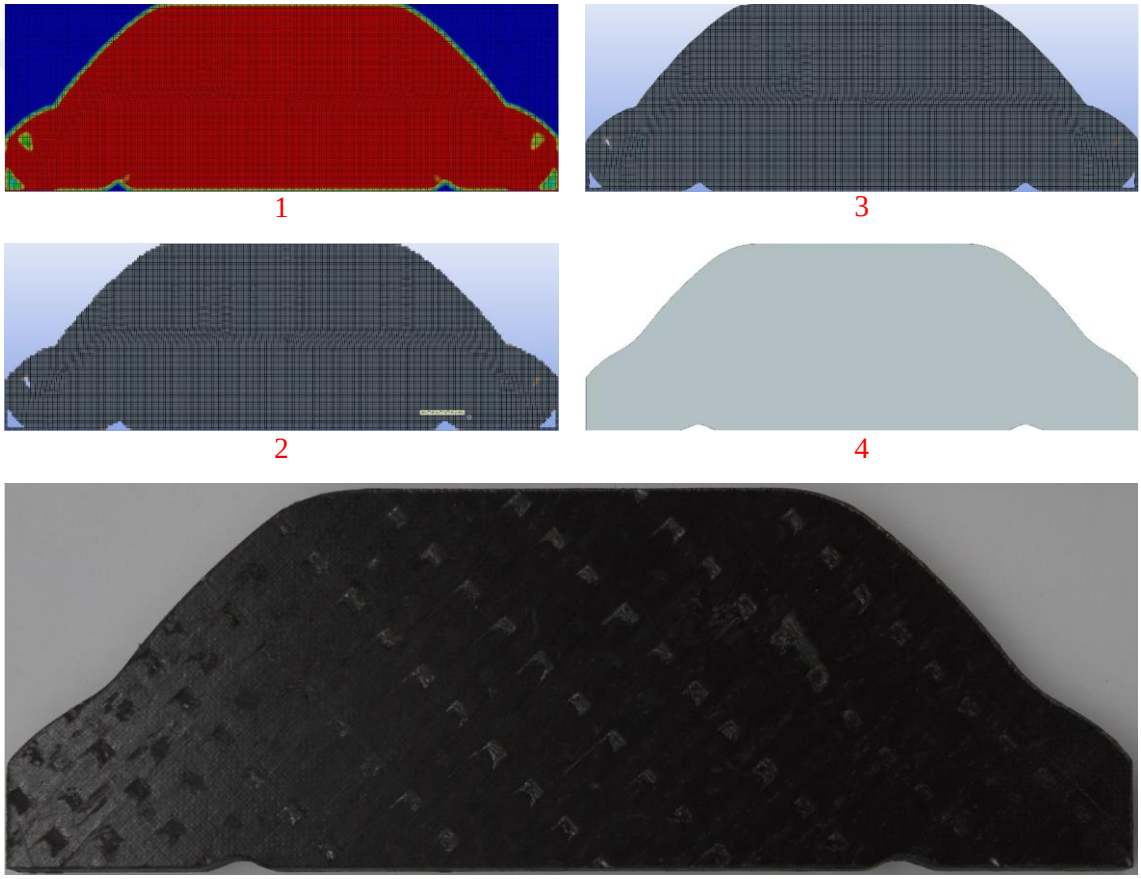
Şekil 2.32-34-36 ve 38'de $[0°/90°]_{5S}$ serim açısına sahip optimize edilmiş ve edilmemiş geometrilerin statik analiz sonuçları görülmektedir. 0 ve 90 derece ile yerleştirilen kompozit fiberler uygulanan yükün geometrinin bir noktasında yığılmasını önlemektedir. Burada 0 derecelik açı ile yerleştirilen fiberler hem kesme hem de normal kuvvetlere karşı koyabilmektedir ve 90 derecelik açı ile yerleştirilen fiberler yüklerin belirli bir noktalarda yoğunlaşmamasını ve geometrinin diğer bölgelerine doğru dağıtılmasını sağlamaktadır. Şekil değişimi, rijitlik ve enerji sönümü açısından $[0°]_{10S}$ serim açısına sahip numuneler ile benzer özellik göstermektedirler.

Şekil 2.39'da Ansys sonlu elemanlar programında serim açısı $[-45°/45°]_{5S}$ kompozit plakaya yapılan statik analiz sonuçlarına göre, a von Mises gerilmesinin ve b de von Mises geriliminin dağılımı gösterilmektedir. Şekil 2.40-42-44'de gösterilen optimizasyon sonuçları, buradaki von Mises gerilmesi ve von Mises gerinmesi dağılımlarına göre elde edilmiştir.



a b

Şekil 2.39. Serim açısı $[-45°/45°]_{5S}$ olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi



1 3

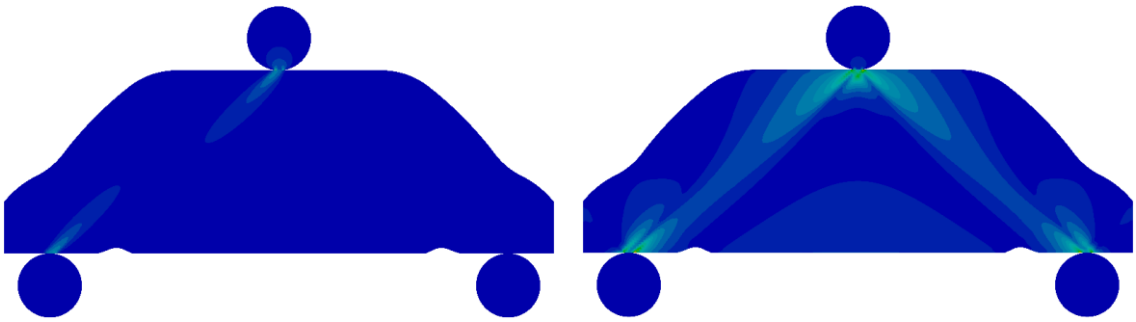
2 4

5

Şekil 2.40. Serim açısı $[-45°/45°]_{5S}$, kütle kriteri %80 olan model

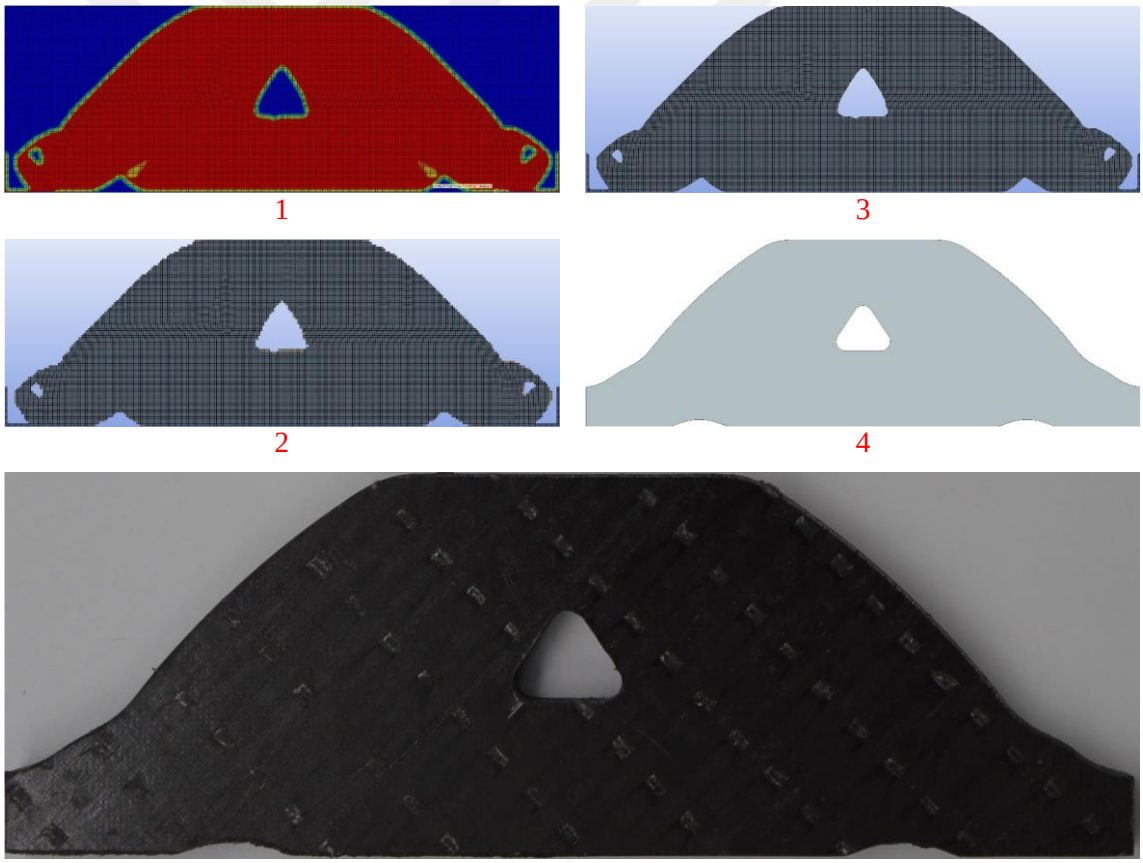
Şekil 2.40'da serim açısı $[-45°/45°]_{5S}$ olan ve %80 hedef kütle kriterine göre yapılmış topoloji optimizasyonu modelleri (1-3) ve üretilen modeli (4-5) görünmektedir. Burada %100 dolu malzemenin kütlesi 43.348 gr, %80 kütle kriterine göre yapılan optimizasyon sonucunda çıkan numunenin kütlesi 34.728 gr (%80.1) olarak ölçülmüştür. Şekil 2.41'de

% 80 kütle kriterine göre optimize edilmiş geometrinin a şeklinde von Mises gerilmesi, b şeklinde von Mises gerinmesi dağılımı gösterilmektedir.



a b

Şekil 2.41. Serim açısı $[-45°/45°]_{5S}$, kütle kriteri %80 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi



1 3

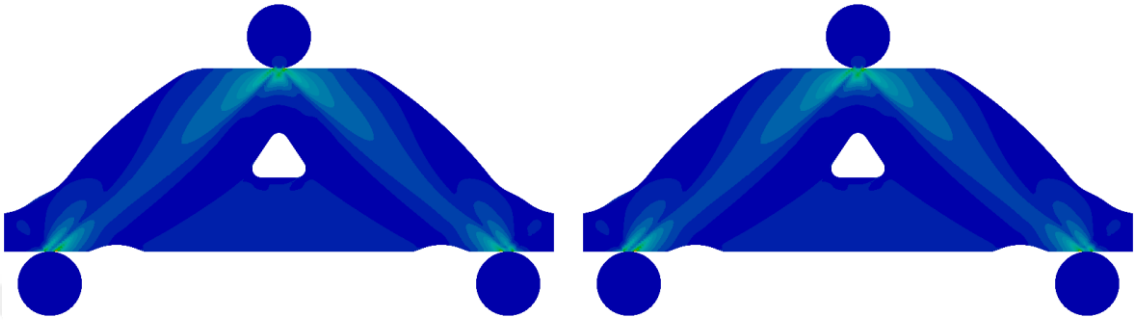
2 4

5

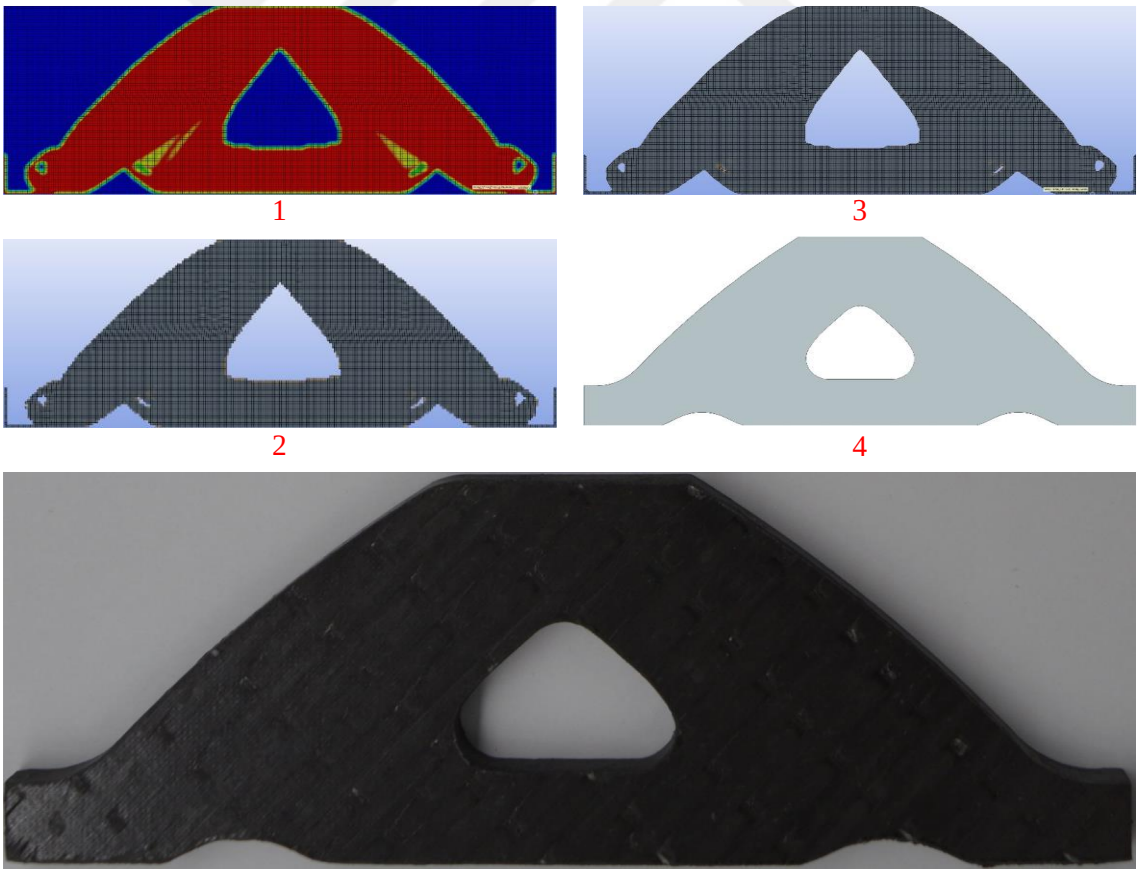
Şekil 2.42. Serim açısı $[-45°/45°]_{5S}$, kütle kriteri %70 olan model

Şekil 2.42'de serim açısı $[-45°/45°]_{5S}$ olan ve %70 hedef kütle kriterine göre yapılmış topoloji optimizasyonu modelleri (1-3) ve üretilen modeli (4-5) görünmektedir. Burada

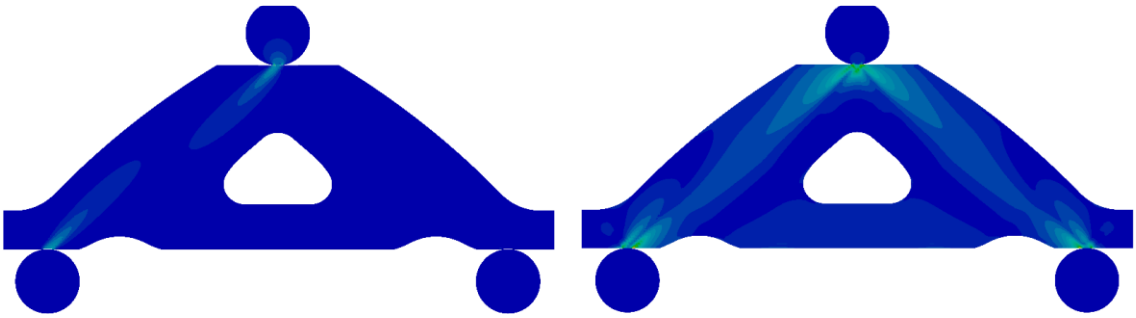
%100 dolu malzemenin kütlesi 43.348 gr, %70 kütle kriterine göre yapılan optimizasyon sonucunda çıkan numunenin kütlesi 30.296 gr (%69.9) olarak ölçülmüştür. Şekil 2.43'de % 70 kütle kriterine göre optimize edilmiş geometrinin a şeklinde von Mises gerilmesi, b şeklinde von Mises gerinmesi dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 2.43. Serim açısı $[-45°/45°]_{5S}$, kütle kriteri %70 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi



Şekil 2.44. Serim açısı $[-45°/45°]_{5S}$, kütle kriteri %60 olan model



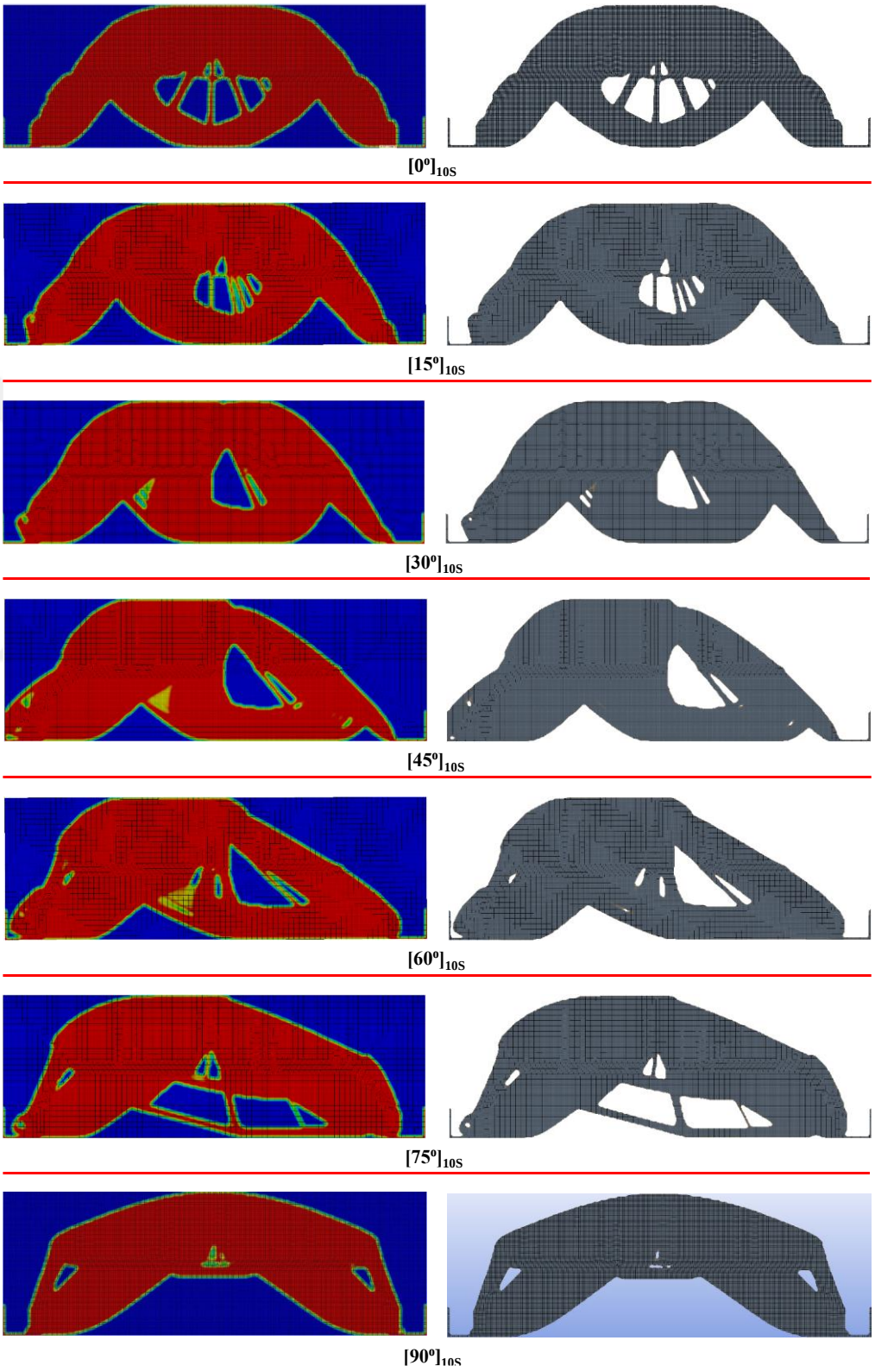
Şekil 2.45. Serim açısı $[-45°/45°]_{5S}$, kütle kriteri %60 olan numunenin statik analiz sonucu a) von Mises gerilmesi, b) von Mises gerinmesi

Şekil 2.44'de serim açısı $[-45°/45°]_{5S}$ olan ve %60 hedef kütle kriterine göre yapılmış topoloji optimizasyonu modelleri (1-3) ve üretilen modeli (4-5) görünmektedir. Burada %100 dolu malzemenin kütlesi 43.348 gr, %60 kütle kriterine göre yapılan optimizasyon sonucunda çıkan numunenin kütlesi 25.947 gr (%59.9) olarak ölçülmüştür. Şekil 2.45'de % 60 kütle kriterine göre optimize edilmiş geometrinin a şeklinde von Mises gerilmesi, b şeklinde von Mises gerinme dağılımı gösterilmektedir.

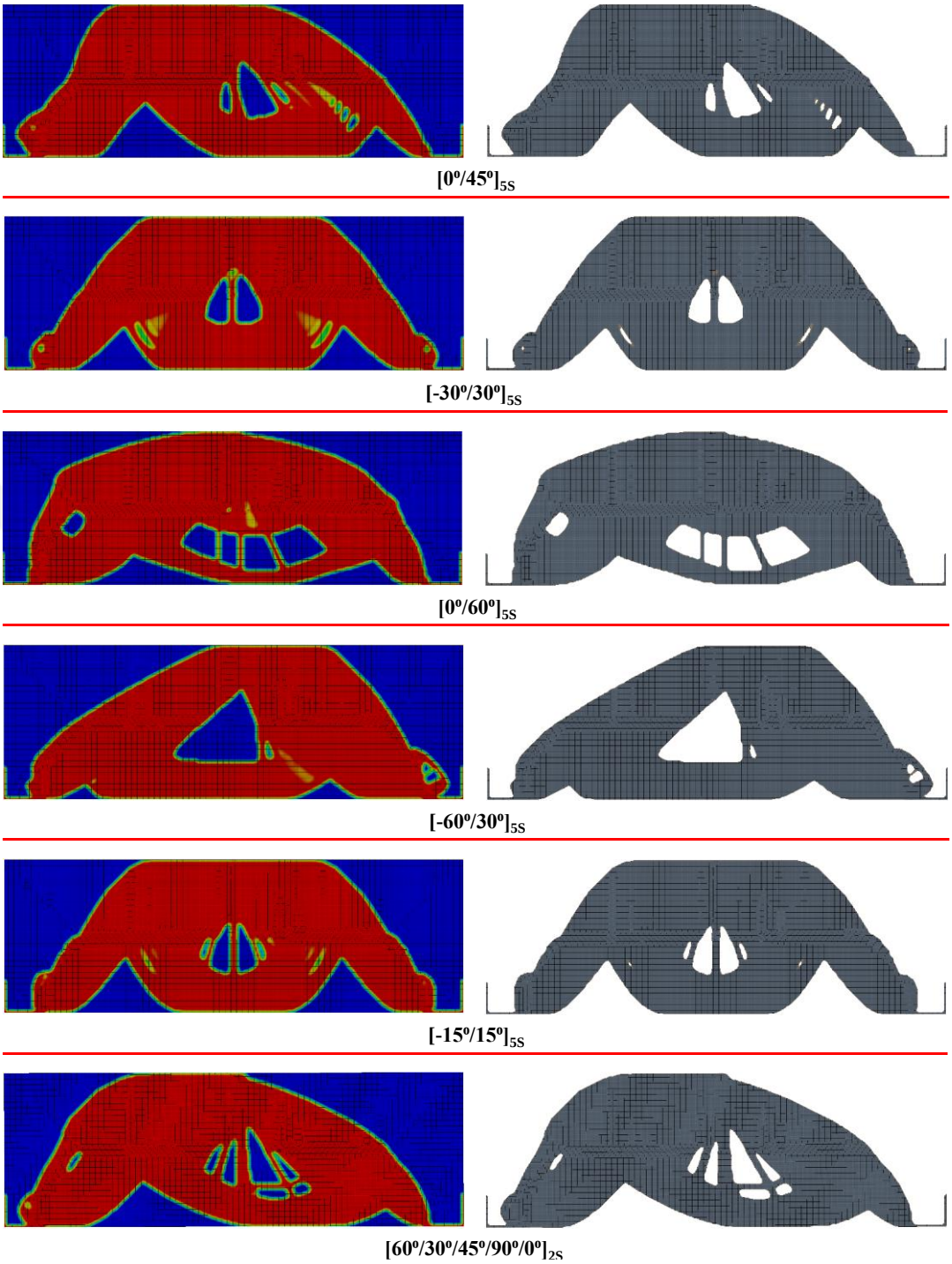
Şekil 2.39-41-43 ve 45'de $[-45°/45°]_{5S}$ serim açısına sahip optimize edilmiş ve edilmemiş geometrilerin statik analiz sonuçları görülmektedir. Uygulanan yükler karşısında numunelerde oluşan kesme ve kayma kuvvetleri kompozit fiber liflerinin açı değişimine zorlamaktadır. Bu serim açısındaki fiberler kesme ve normal kuvvetlerinin etkisinin azalmasını sağlamakla birlikte, matris elemanlarının daha fazla yüke maruz kalmaktadır. bu yapılan sayısal analizlerde matris elemanlarına en fazla yük $[90°]_{10S}$ serim açısına sahip numunelerine, ikinci sırada ise $[-45°/45°]_{5S}$ serim açısına sahip numunelere gelmektedir. Bu serim açısındaki matris elemanları viskoelastik davranış göstermektedirler.

Fiber destekli kompozit bir yapı içerisindeki fiber açı yerleşimleri sistemin rijitlik özelliklerini önemli ölçüde değiştirmektedir [18]. Topoloji optimizasyonun amaç fonksiyonu esnekliği minimize etmek yani rijitliği maksimize etmek olduğundan, yapı içerisindeki fiber yönelimleri optimize edilen geometri üzerinde önemli etki göstermektedir. Şekil 2.46'da serim açısı tek yönlü olan yapıların topoloji optimizasyonunu verilmektedir ve Şekil 2.47'de çok yönlü serim açısına sahip yapıların

topoloji optimizasyonu verilmektedir. Bu analizlerden topoloji optimizasyonunda fiber serim açısının sonuç geometrisi açısından önemli olduğu görülmektedir.



Şekil 2.46. Tek yönlü fiber serim açısına sahip %60 kütle kriterine uygulanmış topoloji optimizasyon şekilleri



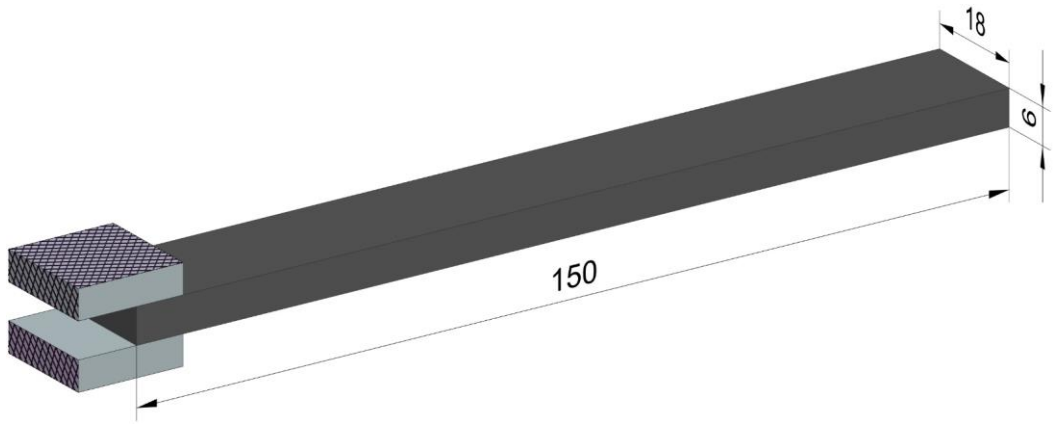
Şekil 2.47. Farklı fiber serim açılarına sahip modellerin topoloji optimizasyonu

2.3.3. Modal Analiz ve Topoloji Optimizasyonu

Modal analiz, bir yapının titreşim özelliğini belirlemek için kullanılır ve tüm dinamik analiz türlerinin başında gelmektedir. Bir sistemin doğal frekansı ile çalışma şartlarından dolayı oluşan doğal frekansın çakışması sonucunda rezonans oluşur. Modal analiz yapının, doğal frekanslarını belirlenmesini ve bu sayede rezonans titreşiminden

kaçınılmasını sağlamaktadır. Kompozit malzemeler yüksek mekanik özelliklerine sahiptirler fakat darbe enerjisini sönümlemede zayıftırlar. Modal test yöntemi kompozit malzemelerin dinamik mekanik özelliklerini belirlemekte etkili, düşük maliyetli, kullanışlı bir yöntemdir [53].

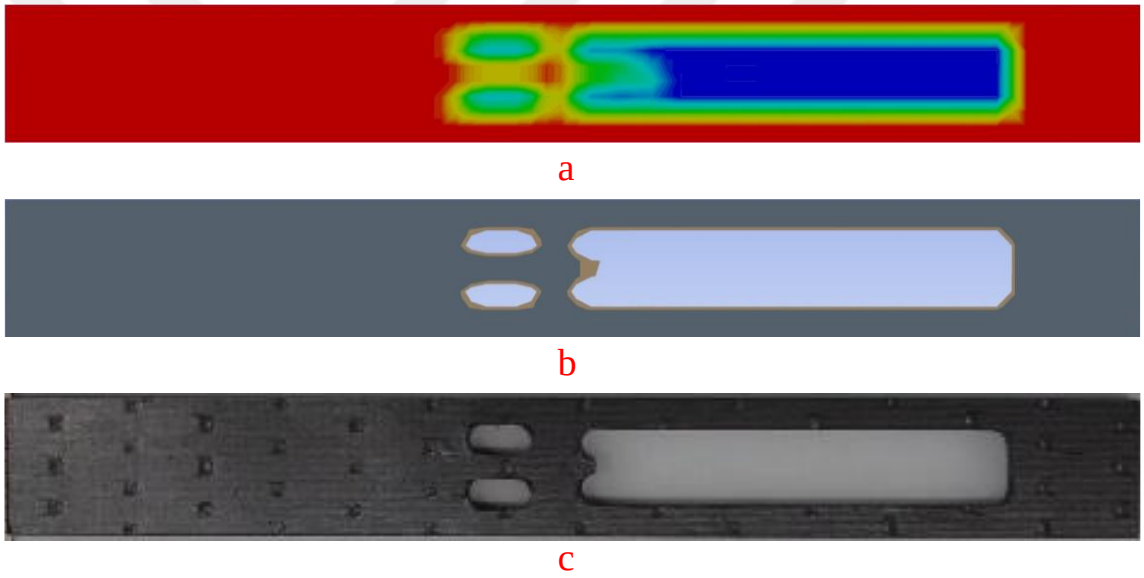
Statik yüklemeler altında çalışan sistemlerde doğal titreşim frekansının optimize edilmesi, daha iyi tasarımların elde edilmesini sağlamaktadır [54]. Bu sebepten dolayı üretilen kompozit plakaların doğal titreşim frekansı ve sönüm oranlarının da belirlenmesi, tasarım açısından büyük önem arz etmektedir. Malzemelerin titreşim karakteristiklerinin belirlenebilmesi için, bu çalışma kapsamında üretilen kompozit malzemelerin, Ansys sonlu elemanlar programında modal analizleri yapılmış ve bu analizler doğrultusunda kütle ve frekans kriterine göre modal topoloji optimizasyonları gerçekleştirilmiştir. Modal topoloji optimizasyonlarında frekans kriteri, doğal titreşim frekansını maksimum yapmaya çalışmakta ve kütle azaltma oranına kendi karar vermektedir. Kütle frekansı ise doğal titreşim frekansını maksimum değerde tutabilecek şekilde kullanıcı tarafından belirlenen kütle oranına düşmeyi sağlamaktadır. Kütleye göre modal topoloji optimizasyonunda hedef kütleye ulaşabilmek için program ilk olarak boyun kısaltılmasını önermektedir. Doğal titreşim frekansı deneylerini aynı sınır şartlarında yapılamamasına sebep olmaktadır. Test numunelerinin deney esnasında kullanılacak olan bölgeleri ve dış sınırları optimize alanından çıkartılmıştır ve belirlenen bölgenin optimize edilmesi sağlanmıştır. Bu kısıtlar çerçevesinde ve üretim yöntemi de düşünülerek kütle kriteri %56 olacak şekilde ayarlanmıştır. Analizler Şekil 2.48'de gösterildiği gibi ankastre kiriş olarak gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonucunda program tarafından önerilen geometriler güncellenerek talaşlı imalat ile üretilmiştir.



Şekil 2.48. Modal analiz numune boyutları ve sınır şartları

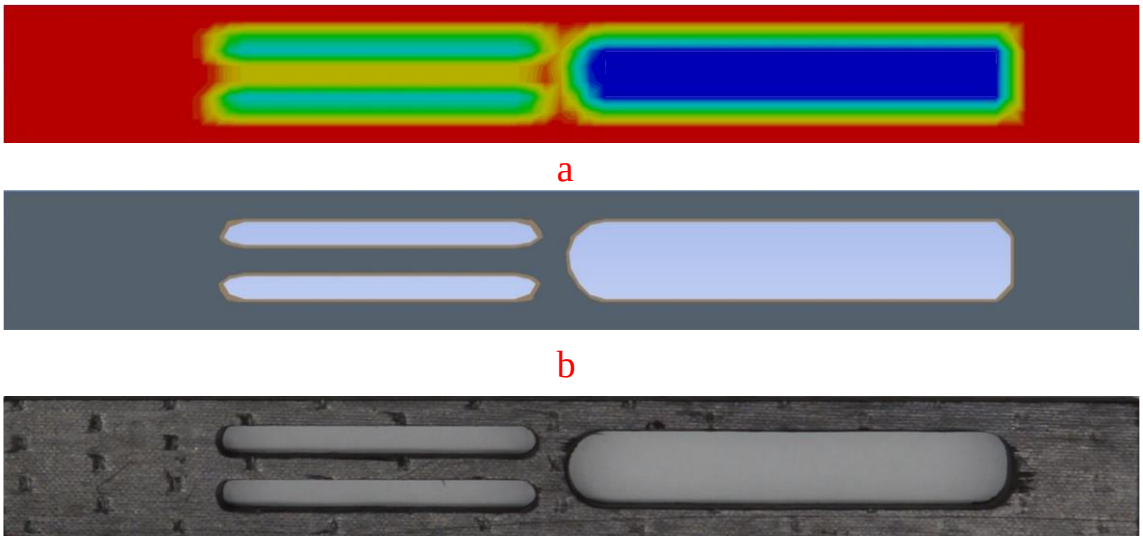
Farklı yerleşimlere sahip kompozit plakalar üzerine yapılan modal analiz sonuçlarına göre elde edilen geometriler aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Statik topoloji optimizasyonunda olduğu gibi;

- Şekil 2.49- a'da kırmızı dolu, mavi silinebilir alanları temsil etmektedir ve ara renkler yoğunluğu 0 ile 1 arasında kalan elemanları temsil etmektedir.
- Şekil 2.49 b'de filtreleme işlemi sonrasında önerilen geometriyi göstermektedir.
- Şekil 2.49 c'de önerilen geometrinin talaşlı imalata göre güncellenmiş ve üretilmiş halini göstermektedir.

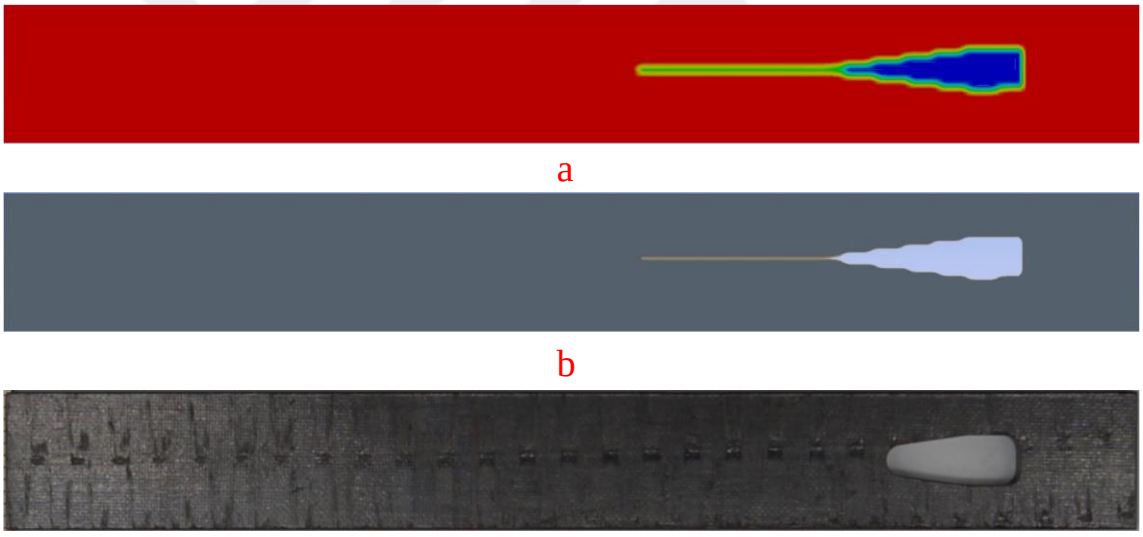


Şekil 2.49. Serim açısı $[0°]_{10S}$, maksimum doğal frekans kriterine göre elde edilen model

Şekil 2.49-50'de gösterilen modeller $[0°]_{10S}$ açısal yerleşime sahip modeller üzerine yapılan modal analiz sonucuna göre önerilen topolojileri göstermektedir. Şekil 2.49'da amaç fonksiyonu maksimum frekansa göre seçilmiştir ve optimizasyon sonucu kütle değeri 18.442 gr olarak ölçülmüştür. Şekil 2.50'de gösterilen modelde amaç fonksiyonu kütle kriterine göre seçilmiştir ve optimizasyon sonucu kütle değer 16.299 gr olarak ölçülmüştür.

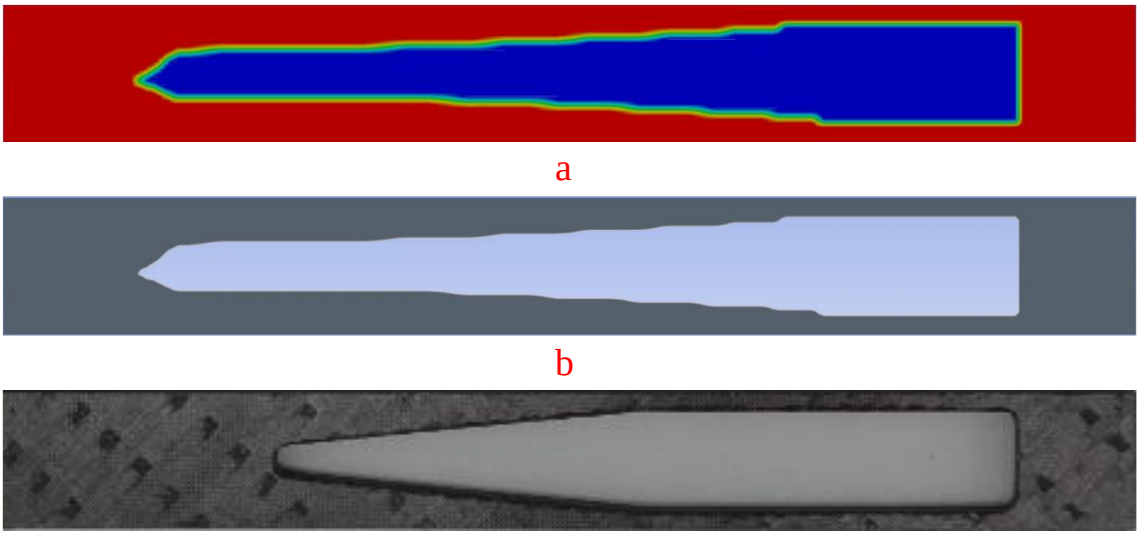


Şekil 2.50. Serim açısı$[0°]_{10S}$, kütle kriteri %56'ya göre elde edilen model



Şekil 2.51. Serim açısı$[90°]_{10S}$, maksimum doğal frekans kriterine göre elde edilen model

Şekil 2.51-52'de gösterilen modeller $[90°]_{10S}$ açısal yerleşime sahip modeller üzerine yapılan modal analiz sonucuna göre önerilen topolojileri göstermektedir. Şekil 2.51'de amaç fonksiyonu maksimum frekansa göre seçilmiştir ve optimizasyon sonucu kütle değeri 23.714 gr olarak ölçülmüştür. Şekil 2.52'de gösterilen modelde amaç fonksiyonu kütle kriterine göre seçilmiştir ve optimizasyon sonucu kütle değeri 14.751 gr olarak ölçülmüştür.



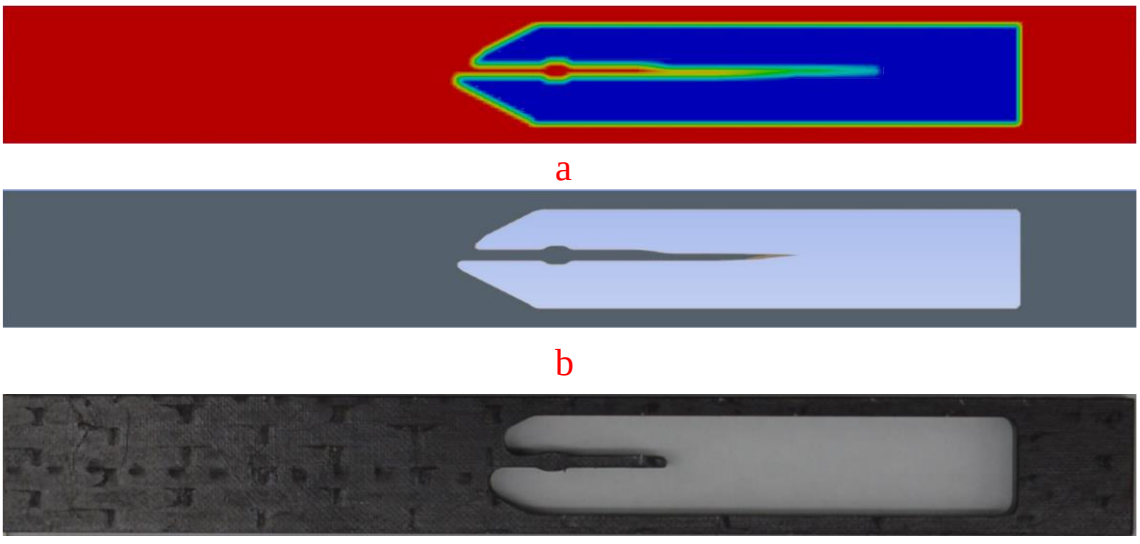
a

b

c

Şekil 2.52. Serim açısı$[90°]_{10S}$, kütle kriteri %56'ya göre elde edilen model

Şekil 2.53-54'de gösterilen modeller $[0°/90°]_{5S}$ açısal yerleşime sahip modeller üzerine yapılan modal analiz sonucuna göre önerilen topolojileri göstermektedir. Şekil 2.53'de amaç fonksiyonu maksimum frekansa göre seçilmiştir ve optimizasyon sonucu kütle değeri 16.781 gr olarak ölçülmüştür. Şekil 2.54'de gösterilen modelde amaç fonksiyonu kütle kriterine göre seçilmiştir ve optimizasyon sonucu kütle değeri 14.681 gr olarak ölçülmüştür.

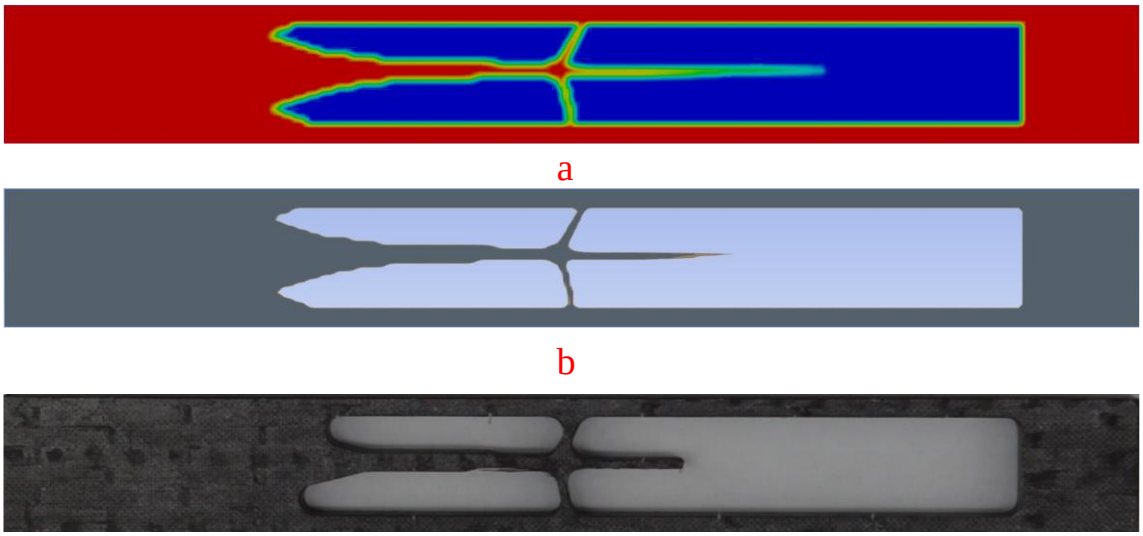


a

b

c

Şekil 2.53. Serim açısı$[0°/90°]_{5S}$, maksimum doğal frekans kriterine göre elde edilen model



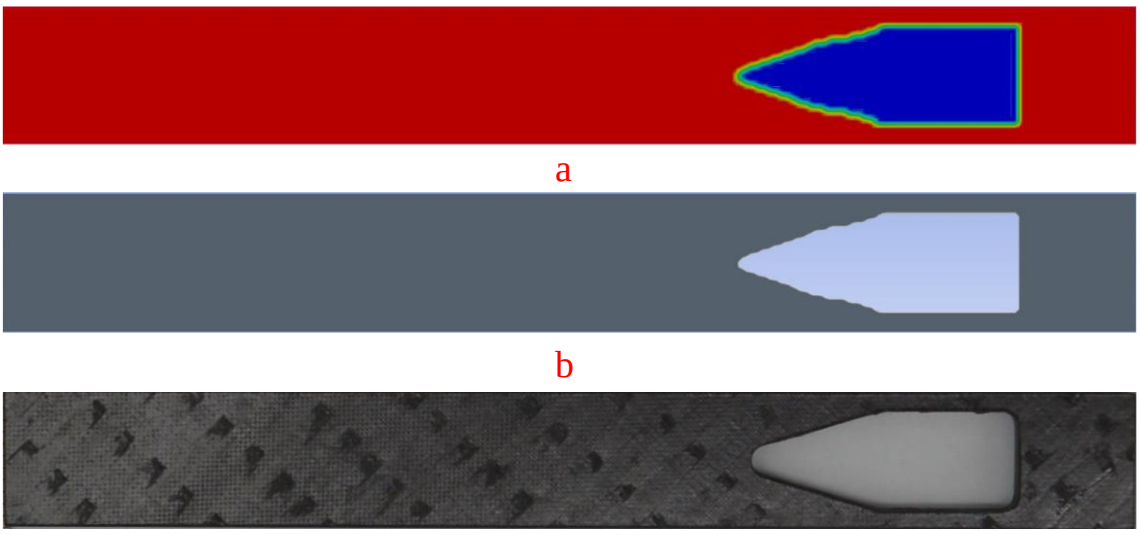
a

b

c

Şekil 2.54. Serim açısı$[0°/90°]_{5S}$, kütle kriteri %56'ya göre elde edilen model

Şekil 2.55-56'de gösterilen modeller $[-45°/45°]_{5S}$ açısal yerleşime sahip modeller üzerine yapılan modal analiz sonucuna göre önerilen topolojileri göstermektedir. Şekil 2.55'de amaç fonksiyonu maksimum frekansa göre seçilmiştir ve optimizasyon sonucu kütle değeri 20.854 gr olarak ölçülmüştür. Şekil 2.56'de gösterilen modelde amaç fonksiyonu kütle kriterine göre seçilmiştir ve optimizasyon sonucu kütle değeri 14.875 gr olarak ölçülmüştür.

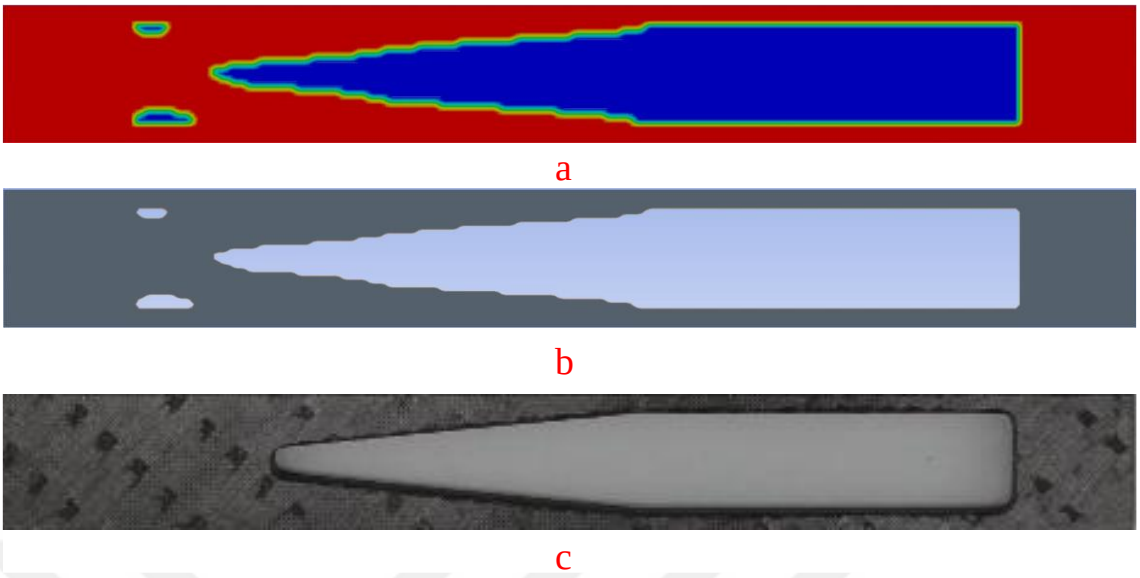


a

b

c

Şekil 2.55. Serim açısı$[-45°/45°]_{5S}$, maksimum doğal frekans kriterine göre elde edilen model



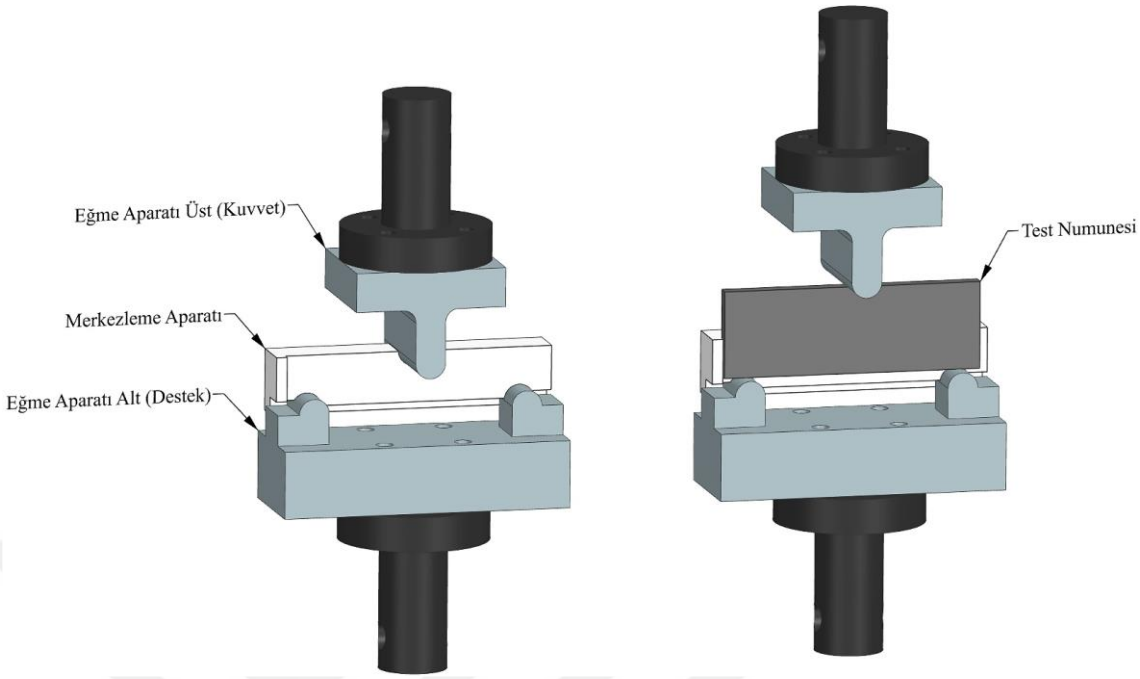
Şekil 2.56. Serim açısı$[-45°/45°]_{5S}$, kütle kriteri %56'ya göre elde edilen model

2.4. Deneysel Yöntemler

Bu çalışmada üç nokta eğme deneyleri ve modal analiz deneyleri yapılmıştır. Üç nokta eğme deneyleri, farklı serim açılarında üretilen kompozit plakaların şekil değiştirme enerjilerinin tespit edilebilmesi için yapılmıştır. Modal analiz deneyleri bu üretilen plakaların doğal frekanslarını tespit edebilmek için yapılmıştır.

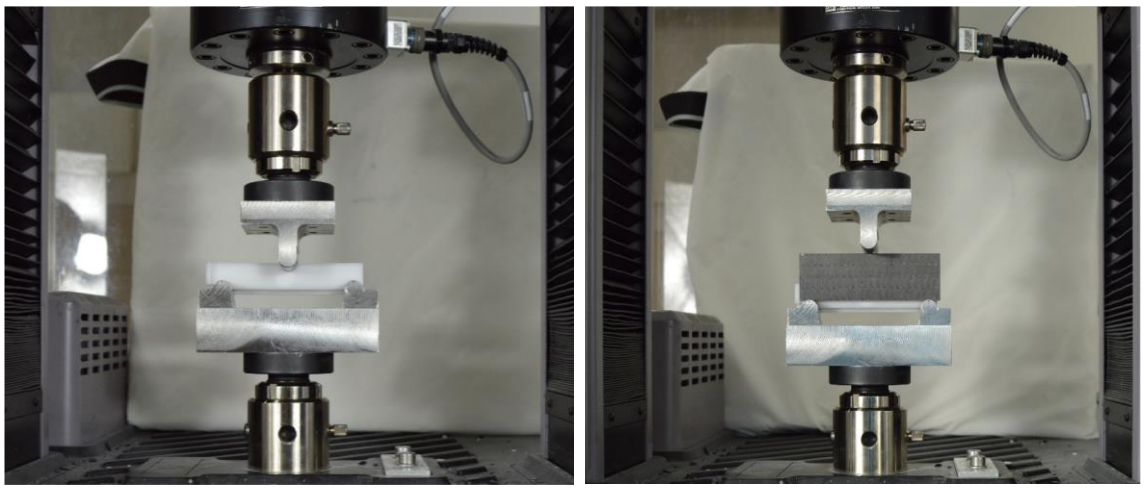
2.4.1. Üç Nokta Eğme Deneyleri

Üç nokta eğme deneyleri, eğilme yüklerine karşı malzemenin eğilme mukavemetini ve rijitliğini belirlemek için yapılmaktadır. Üç nokta eğilme testlerinde kalınlık boyunca farklı gerilme ve gerinme değerleri elde edildiği için topoloji optimizasyonu çalışmaları için yaygın bir kullanım alanına sahiptir [55]. Bu çalışmada eğilme testleri, topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilen geometrilerin şekil değiştirme enerjileri kapasitelerini belirlemek ve karşılaştırmak için yapılmıştır. Üç nokta eğme testi 2 mm/dk hızda ve ASTM D790 standardına göre gerçekleştirilmiştir [56]. Şekil 2.57'de gösterilen üç nokta eğme aparatı bu standarda göre tasarlanıp imal edilmiştir.



Şekil 2.57. Üç nokta eğme ve merkezleme aparatı

Şekil 2.57'de gösterildiği gibi eğme aparatı test numuneleri için tekrardan tasarlanmış ve üretilmiştir. Burada merkezleme aparatı, eğme aparatının alt ve üst çenelerini çekme deney sistemine bağlarken merkezlenmesini sağlamaktadır. Yine merkezleme aparatı test numunelerinin eğme aparatına merkezli olacak şekilde yerleştirilmesini sağlamaktadır. Bu sayede bütün test numuneleri aynı şartlarda ve aynı noktadan yük tatbik edilebilmesi sağlanmış ve her iki alt destek noktasına eşit yük dağılımı uygulanması gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.58. Aparat ve test numunesi merkezleme

MTS çekme cihazına üç nokta eğme testleri şu adımlarda gerçekleştirilmiştir.

1. Merkezleme aparatı kullanılarak test edilecek numune merkezli bir şekilde yerleştirilir.

2. Üst aparat test numunesine, yüksek bir ön kuvvet uygulamadan yavaş bir şekilde temas edinceye kadar indirilir.



Şekil 2.59. Üç nokta eğme deneyi

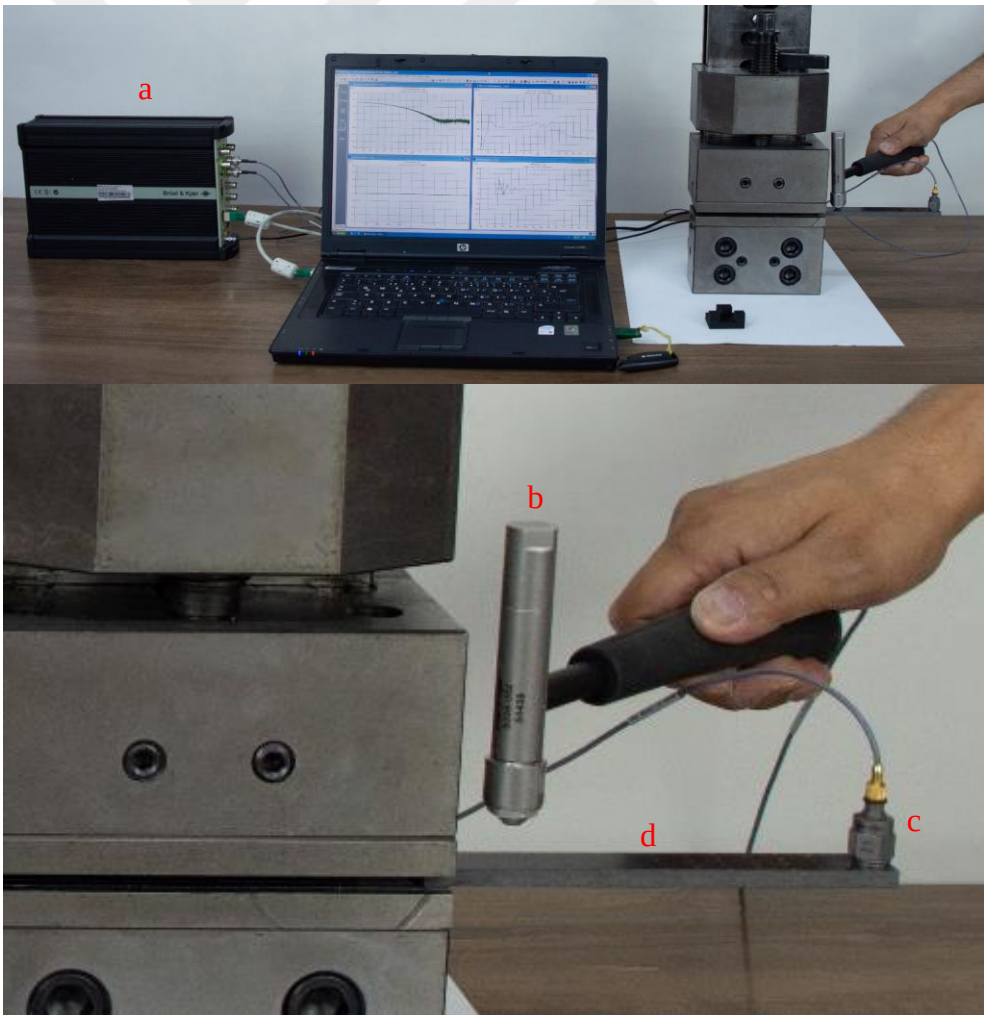
3. Merkezleme aparatı alınıp, 2 mm/dk hızda üç nokta eğme testi başlatılır ve kuvvet-sehim değerleri cihaz tarafından kaydedilir.

4. Test numuneleri plastik olarak deforme olmaya başlayınca test sonlandırılır.

2.4.1. Doğal Frekans Deneyleri

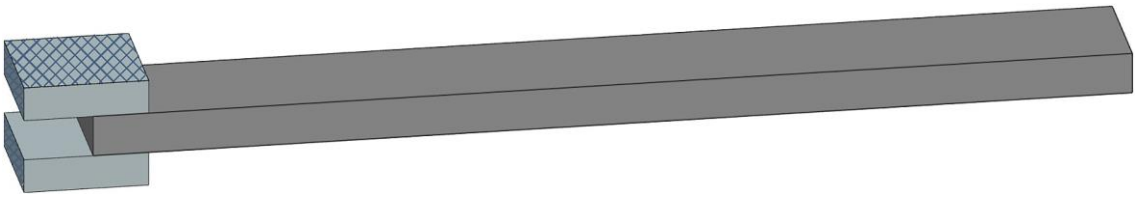
Her malzemenin ve sistemin doğal titreşim frekansı olarak bilinen titreşim frekansı ve genliği vardır. Karmaşık sistemlerin her türlü ortam şartında doğal frekanslarının tespiti gelişmiş ölçüm sistemleri ve sayısal yöntemlerle mümkündür [57]. Bu çalışma kapsamında farklı açılarda üretilen fiber takviyeli kompozitlerin optimizasyon yapılmış ve yapılmamış numunelerin doğal titreşim frekanslarını tespit edilebilmesi için sayısal ve deney çalışma yapılmıştır ve ölçümler için bir deney düzeneği kurulmuştur. Bu sistem bileşenleri Şekil 2.60'da gösterilmiştir, burada; a Brüel&Kjaer veri toplama ünitesi, b piezoelektirik kuvvet dönüştürücüsü (darbe çekici), c tek yönlü ivme dönüştürücüsü ve d deney numunesidir.

Titreşim testleri için deneysel düzenek Şekil 2.60'da gösterilmiştir. Burada numuneler (Şekil 2.60-d) CNC tezgâhlar için üretilen özel bir mengeneye (ankastre kiriş olarak) bağlanmıştır. Sisteme sinyal girişi, darbe çekici olarak isimlendirilen (Şekil 2.60-b) piezoelektirik kuvvet dönüştürücüsü tarafından yapılmıştır. Darbe çekici sistemin serbest olarak titreşmesini sağlamaktadır. Sistemin titreşim tepkisini ölçebilmek için tek yönlü ivme dönüştürücüsü (Şekil 2.60-c, Brüel&Kjaer) numunenin sol uç kısmına takılmıştır ve darbe çekici ile oluşturulan titreşimlerin ölçümünü sağlamaktadır. Deney sisteminde hem ivme hem de kuvvet sinyalleri veri toplama (Şekil 2.60-a, Brüel&Kjaer) ünitesi tarafından alınıp, bilgisayara kaydedilmiştir. Elde edilen bu veriler ile sistemin doğal frekansı ve sistemin kuvvet sönümü hesaplanmıştır. Her bir deney için 10 tekrarlı çekiç darbesinin ortalaması alınarak yapılmıştır [53]. Deneyler esnasında sensör kablolarının ölçümü etkilememesi için serbest bir şekilde yerleştirilmiştir.



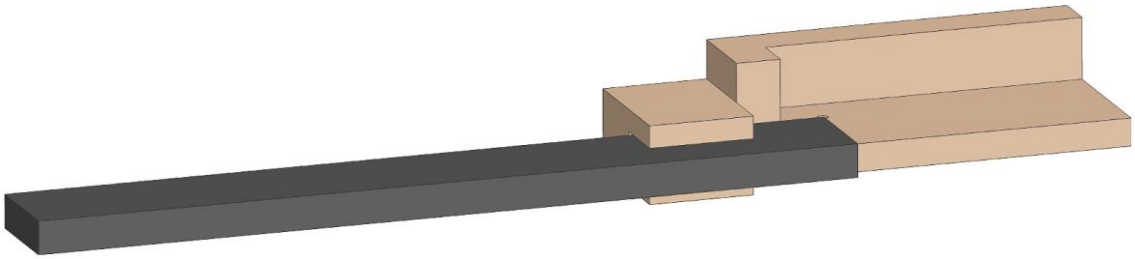
Şekil 2.60. Doğal titreşim frekansı test düzeneği

Optimize edilmemiş (%100 dolulukta) ve optimize edilmiş (kütle ve frekans kriterine göre) test sönüm oranları ve doğal frekansları deneysel olarak ölçülmüştür.



Şekil 2.61. Numunelerin test sistemine bağlanma konumları

Her bir deney için numunelere darbe çekici ile 10 tekrarlı vuruş yapılmış ve sonuçlar bunların otalamasını alarak hesaplanmıştır. Doğal titreşim deneylerinde test numuneleri ölçümlerde farklılıklar olmaması açısından bağlantı aparatı kullanılarak (Şekil 2.62) mengeneye sabitlenmişlerdir. Test numunelerinin Şekil 2.60'da gösterildiği gibi sol uç kısmına tek yönlü ivme dönüştürücü bağlanmıştır. Sonraki aşamada Şekil 2.60'da gösterildiği gibi darbe çekici ile numunenin sağ üst bölgesine 10 tekrarlı vuruş yapılmıştır. Darbe kuvvetleri 5 kN ile 50 kN arasında olabilmesi için program tarafından kısıtlama yapılmıştır. Bu kuvvetlerin altında veya üzerinde olan vuruşlar hesaba katılmamaktadır. Kuvvet aralığı ön denemelerde tespit edilmiş ve tüm deneyler için kullanılmıştır.



Şekil 2.62. Test numunesi merkezleme aparatı

Deneyler sonucunda elde edilen ivme zaman değerleri deney cihazı tarafından işlenerek doğal titreşim frekansları belirlenmiştir. Buradan elde edilen frekans-ivme grafiklerinden, yarım bant genişliği metodunu kullanarak sönüm değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplama ve sonuçlar bir sonraki bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

3. BÖLÜM

BULGULAR

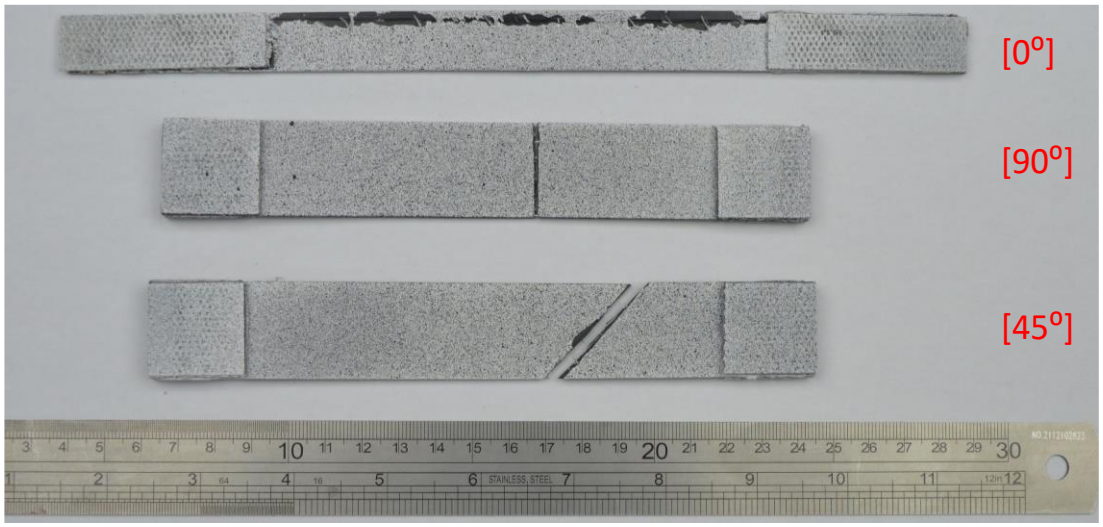
Bu bölümde ilk olarak, çalışmalarda kullanılan karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin mekanik özeliklerinin tespit edilebilmesi için yapılan deney ve tersine mühendislik sonuçları incelenmiştir. Bir sonraki aşamada kompozit plakaların açı farklılıklarının ve optimize edilmiş geometrilerinin statik ve dinamik şartlardaki etkileri tespit edilmiştir.

Statik yükleme (düşük hızlarda) şartlarında yapılan ve amaç fonksiyonu esnekliği (compliance) minimize etmek, hedef fonksiyonu kütle kısıtlaması olan topoloji optimizasyonu ile elde edilen farklı geometrileri, üç nokta eğme testine tabi tutarak elde edilen kuvvet-sehim değerlerinden şekil değiştirme enerjileri hesaplanmış ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

Çalışmanın diğer aşamasında farklı serim açılarına sahip plakaların doğal frekansları Ansys® sonlu elemanlar programı kullanılarak tespit edilmiş ve bu kurulan deneysel düzenekte doğrulanmıştır. Sonrasında bu test numunelerine topoloji optimizasyonu yapılarak yeni geometriler elde edilmiştir. Bu önerilen geometriler üretim yöntemine göre güncellenerek talaşlı imalat yöntemi ile plakalardan kesilmiştir. Bu üretilen numuneler deneysel olarak test edilmiş ve veriler işlenerek doğal titreşim frekansları ve sönüm oranları tespit edilmiştir.

3.1. Çekme Deneyleri ve Malzeme Karakterizasyonu

Fiber takviyeli kompozit plakalarının mekanik özelliklerinin tespit edilebilmesi için çekme testi ve tersine mühendislik olmak üzere iki yöntem kullanılmıştır. Çekme testleri ile elde edilen veriler doğrultusunda tersine mühendislik yöntemi ile kompozit malzemenin tüm mekanik özellikleri tespit edilebilmiştir.

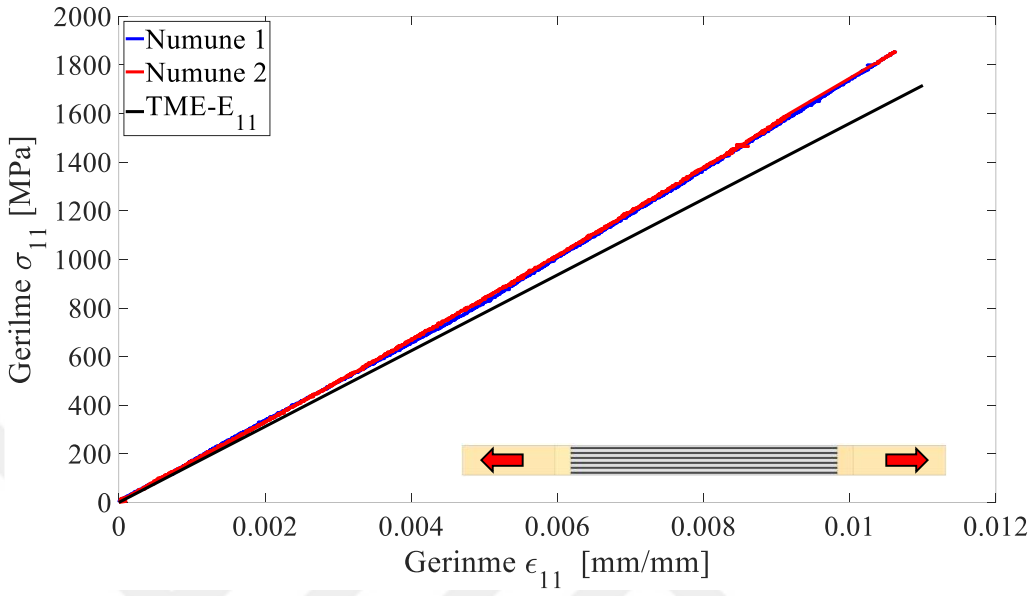


Şekil 3.1. Çekme testi numuneleri

ASTM D3039 ve ASTM D3518 standartlarına göre yapılan çekme testleri sonucunda çekme yönündeki gerilmeler elde edilmiş ve çekme deneyi ile eş zamanlı yapılan iki boyutlu dijital görüntü korelasyonu yöntemiyle de gerinim değerleri elde edilmiştir. Çekme cihazından gerinim değerleri deneysel olarak tespit edilememektedir, bu yüzden gerinim değerlerini bulabilmek için iki boyutlu dijital görüntü korelasyonu yöntemi kullanılmıştır ve test numuneleri bu yöntem için hazırlanmıştır.

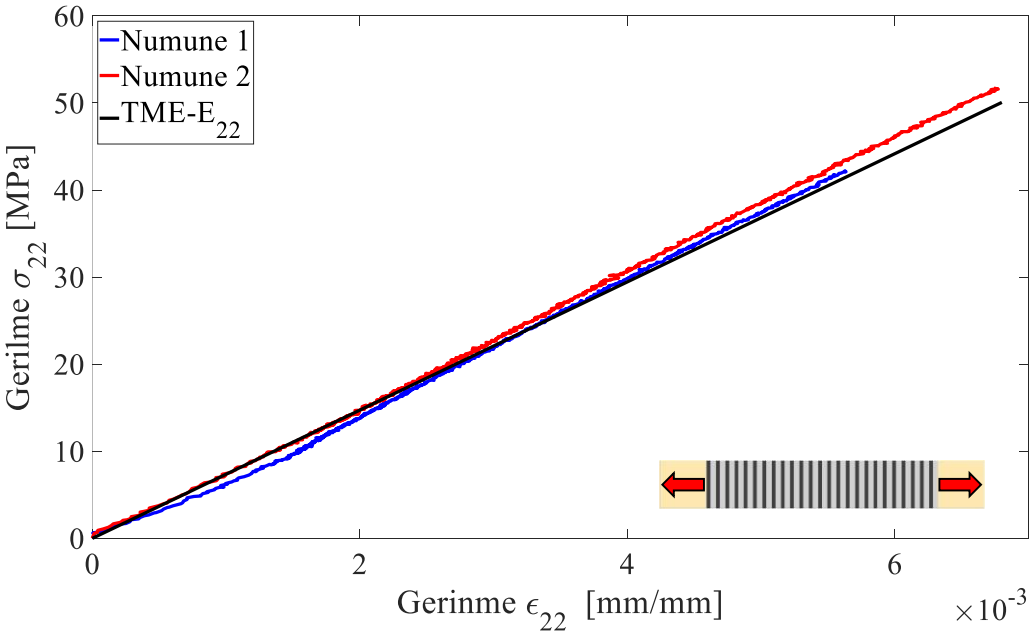
Şekil 3.2'de fiber yönünde ([0°]) yapılan çekme testi ile σ_{11}, ε_{11} değerlerinden E_{11} elastisite modülü ve en-boy birim şekil değiştirme oranlarından majör Poisson oranı ν_{12} elde edilmiştir. Ortotropik bir malzemeyi tanımlayabilmek için bu özellikler yeterli değildir. Bu deneyler sonucunda elde edilen gerilme-gerinme eğrileri tersine mühendislik programına aktarılarak hesaplamaların deneysel değerler üzerinden yapılması sağlanmıştır. Fiber yönündeki çekme testlerinin yapılabilmesi için gereken kuvvet miktarı diğer yönler için gereken kuvvetten daha yüksektir. Fiber yönündeki test numuneleri diğer numuneler göre daha ince ve uzundur. Bu geometrik özellik test numunelerinin hazırlanmasını ve üretilebilmesini zorlaştırmaktadır. Katmanlar arasındaki açı farklılıkları, boyutlandırma esnasındaki hatalar gibi birçok olumsuz durum fiber yönündeki numunelerin hazırlanmasını zorlaştırmaktadır. Şekil 3.2' de hem çekme deneyi hem de tersine mühendislik ile elde edilen gerilme-gerinme eğrileri (TME-E_{11}) görülmektedir. Burada iki sonuç arasında bir sapma oluşmaktadır, literatürde yapılan çalışmalar bu sapmanın kabul edilebileceği belirtilmektedir [58–60]. Testlerde

belirlenemeyen özellikler (karbon liflerin özellikleri), üretim hataları, ölçüm hataları gibi birçok sebepten dolayı bu sapmalar meydana gelmektedir.

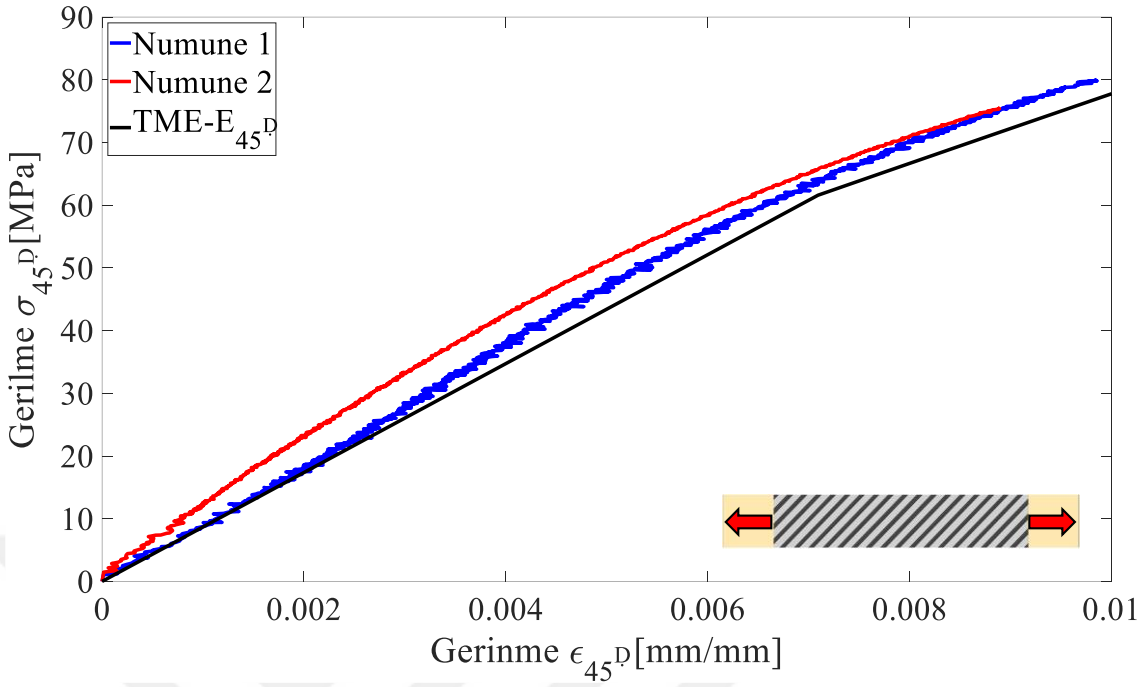


Şekil 3.2. Fiber yönünde çekme deneyi ve tersine mühendislik gerilme-gerinme eğrileri

Şekil 3.3'de fiber yönüne dik ([90º]) yapılan testler sonucu ve tersine mühendislik sonucunda elde edilen gerilme-gerinme grafiği görülmektedir. Bu yönde yapılan çekme testlerinde σ_{22}, ε_{22} değerlerinden E_{22} elastisite modülü ve en-boy birim şekil değiştirme oranlarından da minör poisson oranı ν_{21} elde edilmiştir.



Şekil 3.3. Fiber yönünde dik çekme deneyi gerilme-gerinme eğrileri



Şekil 3.4. Fiber yönüne ile 45 derecelik açı yapan numuneler için çekme deneyi gerilme-gerinme eğrileri

Fiber liflerinin serim açısı, çekme ekseni ile 45 derecelik açı oluşturacak şekilde üretilen çekme testi numunelerinde (ASTM D3518) test numunelerinde, uygulanan çekme yükü fiber liflerinde kayma gerilmesi oluşturur. Çekme işlemi sırasında fiber lifler yük yönünde hizalanmaya zorlandıklarından, açısal değişimine neden olur ve bu da gerilme-gerinim eğrisinin lineer olmayan viskoelastik bir davranış göstermesine sebep olmaktadır. Bununla birlikte matris malzemesinin plastik deformasyonu, fiber lifleri ve matris ara yüzündeki kaymalar yine eğrinin lineer olmayan bir davranış göstermesine sebep olmaktadır. Şekil 3.4'de fiber yönüne 45 derecelik açı yapacak şekilde hazırlanan numunelerin çekme testleri ile σ_{45} ve ε_{45} eksen dışı gerilme ve gerinme değerleri hesaplanabilmektedir. Elde edilen değerlerden çekme yönündeki elastiklik modülü de hesaplanabilmektedir. Buradan kayma modülü G_{12} hesaplanabilmektedir.

Deneysel olarak yapılan testler sonucunda (Şekil 3.2-4) E_{11}, E_{22}, ν_{12}, ν_{21}ve G_{12} değerleri hesaplanabilmektedir. Hesaplanamayan diğer özelliklerin bulunabilmesi için tersine mühendislik programı kullanılmıştır. Bu yöntemler takviye fazı ve matris fazı belirlenir ve mekanik özellikleri ile kompozit yapıyı oluşturan hacim oranı tanımlanmıştır. Sonra kompozit modelin homojen birim elemanı oluşturulmuştur. Daha sonra deneysel olarak elde edilen gerilme-gerinme değerleri tersine mühendislik programına yüklenmiştir ve bu

yapılan testler ile belirlenemeyen diğer mekanik özelliklerin hesaplanması sağlanmıştır. Deneylerde ve sayısal hesaplamalarda kullanılan karbon takviyeli kompozit malzemenin özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Burada kompozit malzemenin sadece elastik özellikleri incelenmiştir.

Tablo 3.1. Karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin mekanik özellikleri

Özellikler	Değerler
Fiber hacim oranı, (V_f)	%54
Yoğunluk, $\rho\ (kg/m^3)$	1.55
Boyuna elastisite modülü, $E_{11}\ (GPa)$	156
Boyuna elastisite modülü, $E_{22}\ (GPa)$	7.36
Enine elastisite modülü, $E_{33}\ (GPa)$	7.36
Düzlem içi kayma modülü, $G_{12}\ (GPa)$	3.1
Düzlem dışı kayma modülü, $G_{13}\ (GPa)$	3.1
Düzlem dışı kayma modülü, $G_{23}\ (GPa)$	2.64
Majör Poison oranı, ν_{12}	0.267
Çapraz (transverse) Poison oranı, ν_{23}	0.395

3.2. Üç Nokta Eğme Deney Bulguları

Üç nokta eğme testleri, malzemelerin eğilme mukavemetini, rijitliğini ve şekil değiştirme davranışlarını deneysel olarak belirleyebilmek için kullanılır. Üç nokta eğme testinde, numune merkezli olarak iki destek üzerine yerleştirilir ve numunenin orta kısmına üstten yük uygulanarak yapılır. Bu yük altında numune eğilmeye başlar ve numunede hem normal (eğilme) gerilmeler hem de kayma gerilmeleri meydana gelir. Bu gerilme değerleri numunelerin farklı bölgelerinde farklı değerlere sahiptirler. Her iki gerilme türü de geometri ve malzemenin üç nokta eğme şartlarındaki tepkisini belirleyebilmek için önemlidir ve malzemenin kırılması, çatlaması ve deformasyonu hakkında önemli bilgiler verir. Bu test yöntemi kompozit yapıların mekanik özelliklerini belirlemek içinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler ortotropik özelliklerinden dolayı farklı durumlar karşısındaki davranışları aynı değildir. Dolayısıyla kompozit malzemeler kullanılacakları yer ve dış yükleme şartları gibi özelliklere göre farklılıklar göstermektedirler.

Kompozit malzemeler ile yapılan optimizasyon çalışmaları, malzeme dağılımı ve fiber yönlendirmesi olmak üzere genelde iki başlık altında incelenmiştir. Bu yöntemlerde fiber yerleşim açısı optimizasyonu için seçilen hedef fonksiyonun amacı, gerilmelerin oluştuğu doğrultularda fiberleri yönlendirmektir. Bu şekilde en yüksek rijitlik ve minimum esneklik (compliance) elde edilmiş olur. Bu optimizasyon sayısal olarak mümkün ve verimli görünse de fiziki uygulamalarda birleşim noktalarında ki süreksizliklerden dolayı kritik bölgelerin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu problemi çözmek için uygulanacak adımlarda da üretim zorluklarına ve hata oranlarının artmasına yol açmaktadır [61].

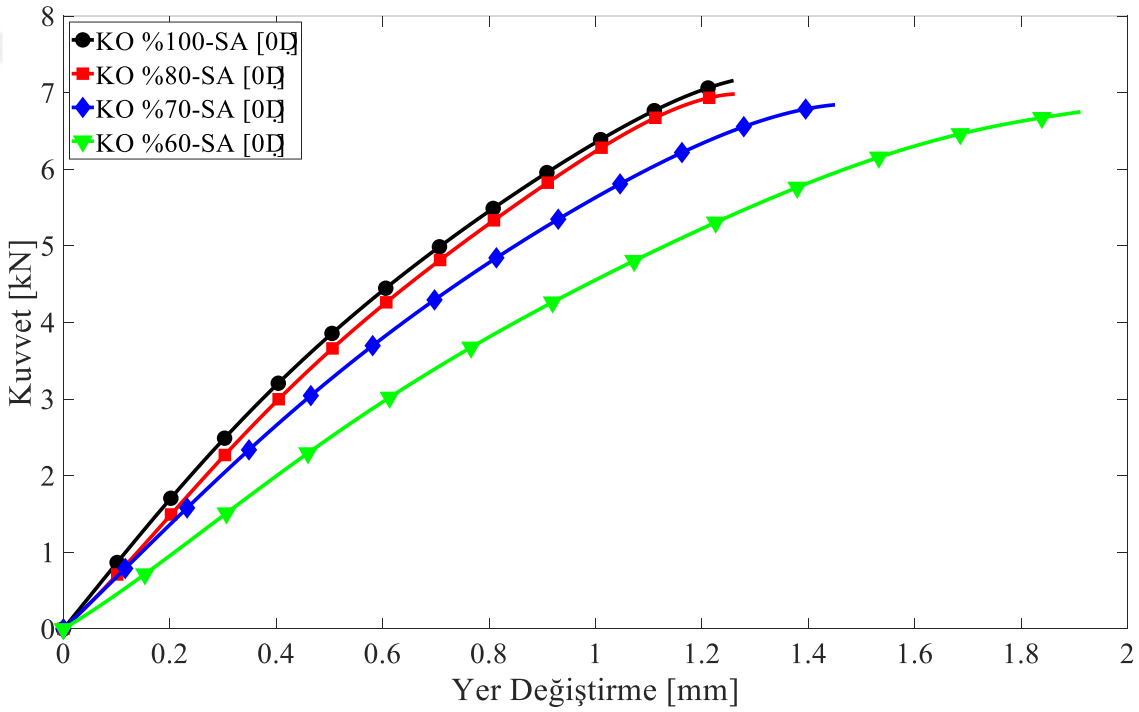
Bu çalışmanın amacı, karbon destekli kompozit yapıları hem fiber açısı hem de malzeme dağılımı olarak iki başlık altında sayısal ve deneysel olarak incelemektir. Burada ilk olarak fiber açıların etkisini incelemek için belirli yönlerde prepreg kumaşların serilmesi ve daha sonrasında da bu açılar üzerinden tasarım alanının malzeme dağılımı optimizasyonu gerçekleştirilmesidir. Bunun için $[0^o]_{10S}$, $[90^o]_{10S}$, $[0^o/90^o]_{5S}$ ve $[-45^o/45^o]_{5S}$ dört farklı açı oryantasyonunda fiber takviyeli kompozit plakalar üretilmiştir. Bu açılara göre %80, %70 ve %60 kütle kriterine göre topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Bu optimizasyon sonucunda elde edilen tasarım alanlarının güncellenmesi sonucu elde edilen üç geometri ve optimize edilmemiş %100 dolu geometri üretilmiştir. Bu test numuneleri üç nokta eğme testine tabi tutularak şekil değiştirme enerjileri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Şekil değiştirme enerjisi, bir cismin düşük hızda kuvvetlerin etkisi altında elastik olarak deforme olabilmesi için depoladığı enerjidir. Dış kuvvetlerin etkisi altında kalan bir cismin şekil değiştirme enerjisi, kuvvet-deformasyon eğrisi altında kalan alana eşittir. Test numuneleri üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Buradan elde edilen verile ile kuvvet-sehim grafikleri çizilmiştir ve bu grafiğin altında kalan alan hesaplanarak her bir numunenin şekil değiştirme enerjisi hesaplanmıştır. Üç nokta eğme testleri ASTM D790 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Eğilme testleri 2 mm/dk hızında yapılmıştır. Yapılan testlerde kompozit plakaların elastik davranışları dikkate alınmıştır. Bu nedenle kuvvet-sehim grafiklerinde sadece elastik bölge kullanılmıştır.

3.2.1. Test Numunelerinin Kuvvet-Yer Değiştirme Grafikleri

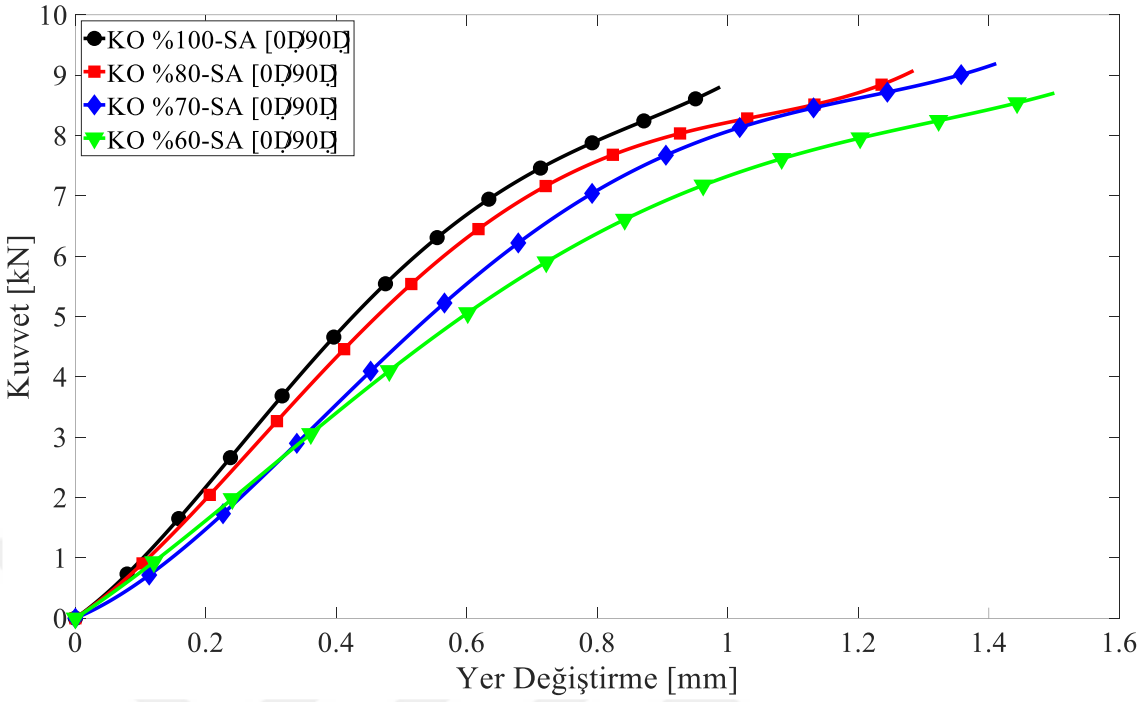
Yapılan testler sonrasında elde edilen veriler sonucunda kuvvet- yer değiştirme eğrileri ilk olarak aynı serim açısına sahip geometriler kendi içerisinde kıyaslanmış, sonra da aynı kütle kısıt kriterine göre geometriler kendi içerisinde değerlendirilmiştir. Son olarak aynı

şekilde şekil değiştirme enerjileri kıyaslanmıştır. Burada genel olarak açı farklılıklarının sonuçlara önemli bir şekilde etki ettiğini göstermiştir. Grafiklerde kullanılan KO, SA sırasıyla kütle kısıt kriteri ve serim açısı kısaltmalarıdır.

Üç nokta eğme sonucunda elde edilen kuvvet- şekil değiştirme grafikleri Şekil 3.5-8'de verilmektedir. Burada değerlendirmeler aynı plakalardan üretilen farklı geometrileri kıyaslayarak, topoloji optimizasyonunun etkilerini net bir şekilde görülebilmesini sağlamaktadır. Optimizasyon sonucu elde edilen geometrilerin benzer mekanik özellikler gösterdiği görülmektedir.

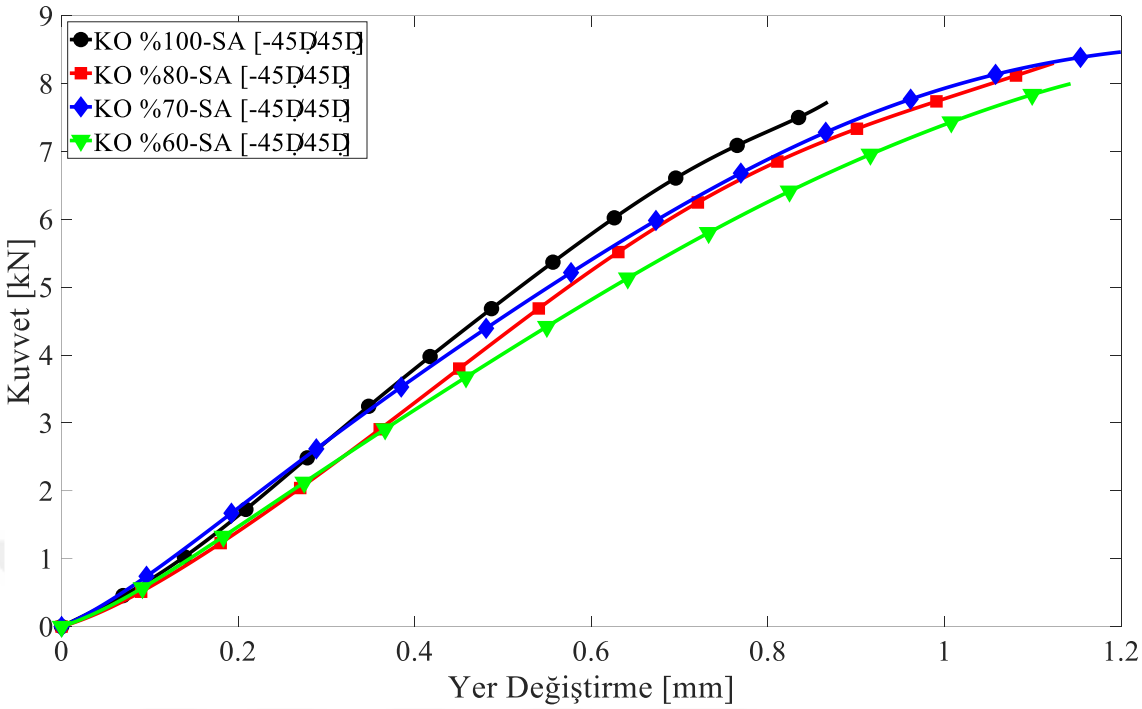


Şekil 3.5. Serim açısı $[0^o]_{10S}$ olan numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafiği

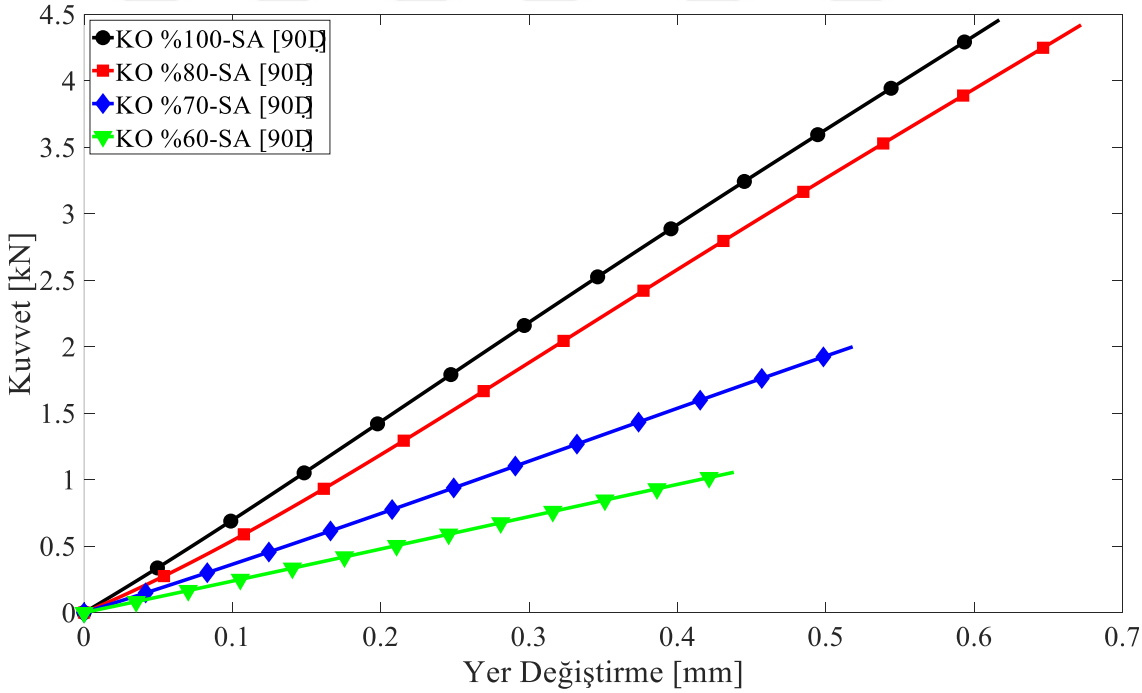


Şekil 3.6. Serim açısı $[0^o/90^o]_{5S}$ olan numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafiği

Farklı kütle kriterlerine göre yapılan topoloji optimizasyonları Şekil 3.5-8'de gösterilmektedir. Serim açısı [0º], [0º/90º] ve [-45º/45º] olan numuneler benzer özellikler göstermektedir [62]. Bunlar üzerine yapılan testlerde, kütle kısıtlama kriterine göre optimize edilmemiş ve optimize edilmiş numuneler arasında çok büyük farklılıkların oluşmadığı görülmektedir. Burada KO %100 olan test numunelerinde uygulanan kuvvet sonucunda yer değiştirmenin daha düşük olduğu yani rijitliğin daha yüksek olduğu görülmektedir. Topoloji optimizasyonu yapılmış geometrilerde uygulanan kuvvet karşısındaki yer değiştirme davranışının benzer olduğu fakat KO% 100 numunelerine göre rijitlik değerinin biraz düştüğü görülmektedir. Topoloji optimizasyonu yönteminin hedef ve amaç olmak üzere iki temel fonksiyonu vardır. Hedef fonksiyonunun görevi, belirtilen kütleyi yakalayabilmek için tasarım alanından eleman eksiltmektir, amaç fonksiyonunun görevi de bu kütleyi yakalamaya çalışırken esnekliği (compliance) minimize etmektir. Bu sebepten dolayı, kuvvet-yer değiştirme grafiklerde görüldüğü üzere optimize edilmiş geometrilerde küçük farklılıklar olsa da, temel olarak rijitlik değerlerinin benzer davranışlar gösterdiği görülmektedir.



Şekil 3.7. Serim açısı $[-45^{o}/45^{o}]_{5S}$ olan numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafiği

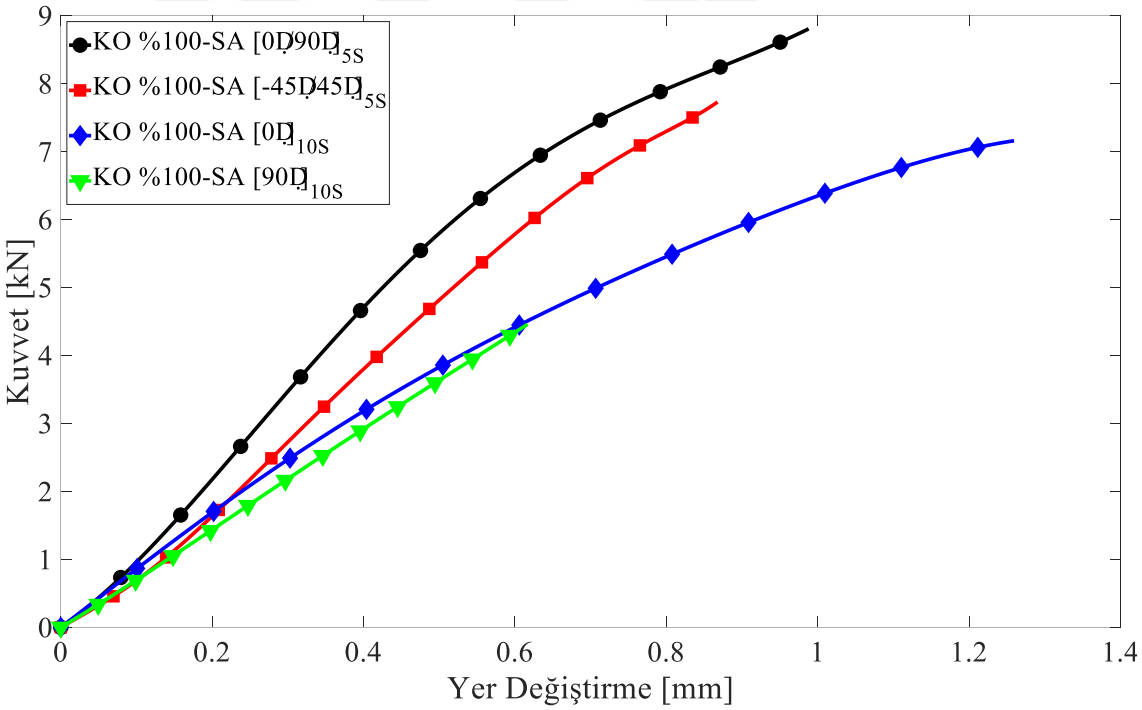


Şekil 3.8. Serim açısı $[90^{o}]_{10S}$ olan numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafiği

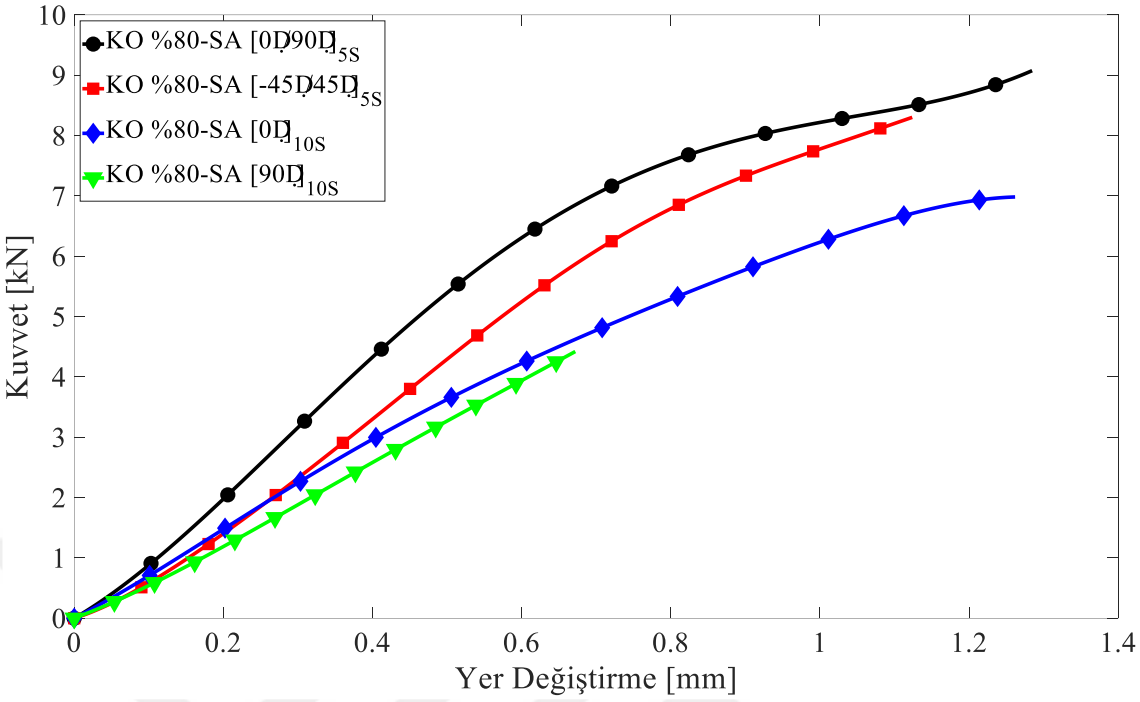
Üç nokta eğme testi sırasında hem kayma gerilmesi hem de normal gerilmeler oluşur. Kayma gerilmeleri plaka boyunca farklılık göstermektedir ve en yüksek değerine geometrinin ortasında ulaşır. Uygulanan yük geometriyi eğmeye zorladığı için normal

gerilmeler oluşur, bu gerilmeler tarafsız eksenin üstünde basma, altında ise çekme şeklinde meydana gelir. Bu gerilmelerin maksimum değerleri de tarafsız eksene en uzak uç noktalarında meydana gelir. Serim açısı [90º] olan numunelerde gerilmeler, matris malzemesini doğrudan etkilemektedir ve daha düşük yüklerde malzemenin kopmasına sebep olmaktadır. Şekil 3.8'de görüldüğü üzere diğer serim açılarına göre daha düşük yüklerde plakaların koptuğu görülmektedir. Bu eğilme tepkisi, kalınlık boyunca oluşan matris çatlamasının neden olduğu kırılgan davranışın bir sonucudur [62].

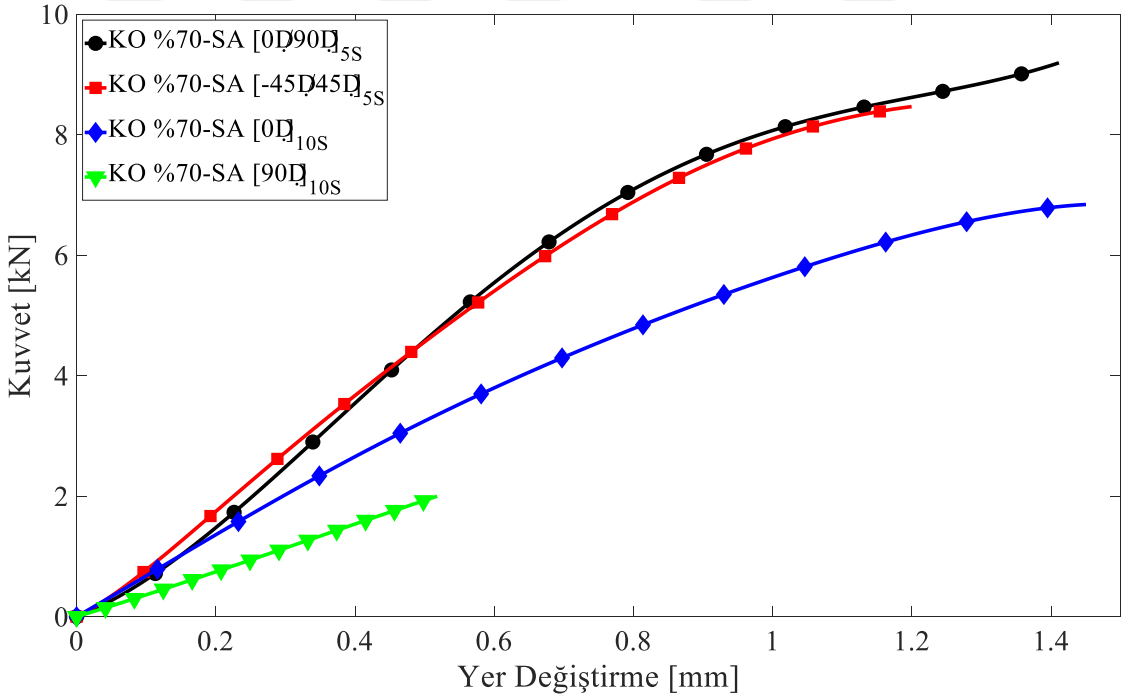
Şekil 3.9'da farklı serim açılarına sahip optimize edilmemiş geometrilerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri verilmektedir. Bu grafikte serim açısının etkileri net bir şekilde görülebilmektedir.



Şekil 3.9. Farklı serim açılarındaki optimizasyon yapılmamış geometrinin kuvvet-yer değiştirme grafiği



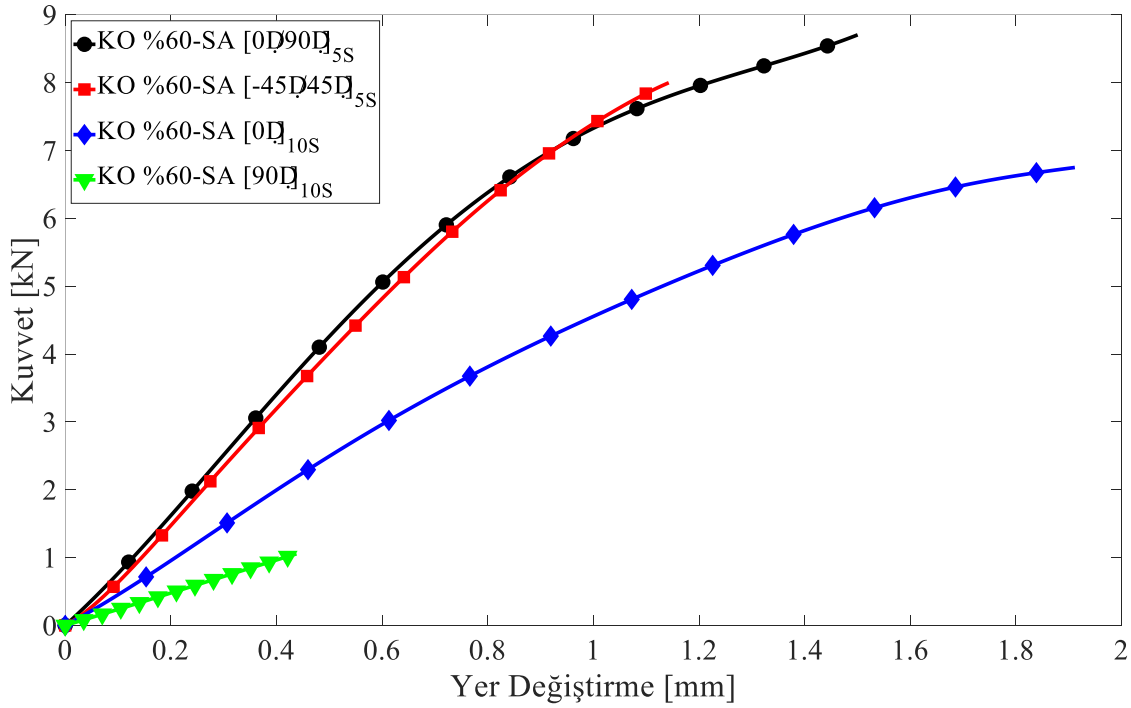
Şekil 3.10. %80 kütle oranına göre optimize edilmiş geometrinin kuvvet-yer değiştirme grafiği



Şekil 3.11. %70 kütle oranına göre optimize edilmiş geometrinin kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 3.10-12 grafikleri aynı kütle oranına göre optimize edilmiş geometrilerin farklı serim açılarındaki kuvvet- yer değiştirme grafiklerini göstermektedir. Serim açısı

$[0^o/90^o]_{5S}$ ve $[-45^o/45^o]_{5S}$ olan numuneler benzer mekanik özellikler sergiledikleri için rijitlik değerlerinin de benzer olduğu görülmektedir. Üç nokta eğme testinde, fiber lif demetleri uygulanan yük karşısında yeniden yönlenmekte ve matris-fiber bağlarına daha fazla yük gelmektedir. Bu yüklerden dolayı ara yüzeylerinde kayma gerilemeleri meydana gelmekte ve lif-matris ara yüzeyinde kayma ve ayrılmalara neden olmaktadır. Maruz kalınan gerilme değerleri fiber için düşük ve elastik sınırlar içerisinde kalsa da, matris yapısı plastik olarak deformasyona uğramaktadır. Bu sebeplerden dolayı bu iki serim açısına sahip plakaların kuvvet-yer değiştirme eğrileri lineer olmayan bir özellik göstermektedir. Fiber yerleşim açılarından dolayı, plakalara uygulanan kuvvetler kayma gerilmelerine sebep olurlar ve bu da rijitlik değerinin yüksek olmasını sağlamaktadır.

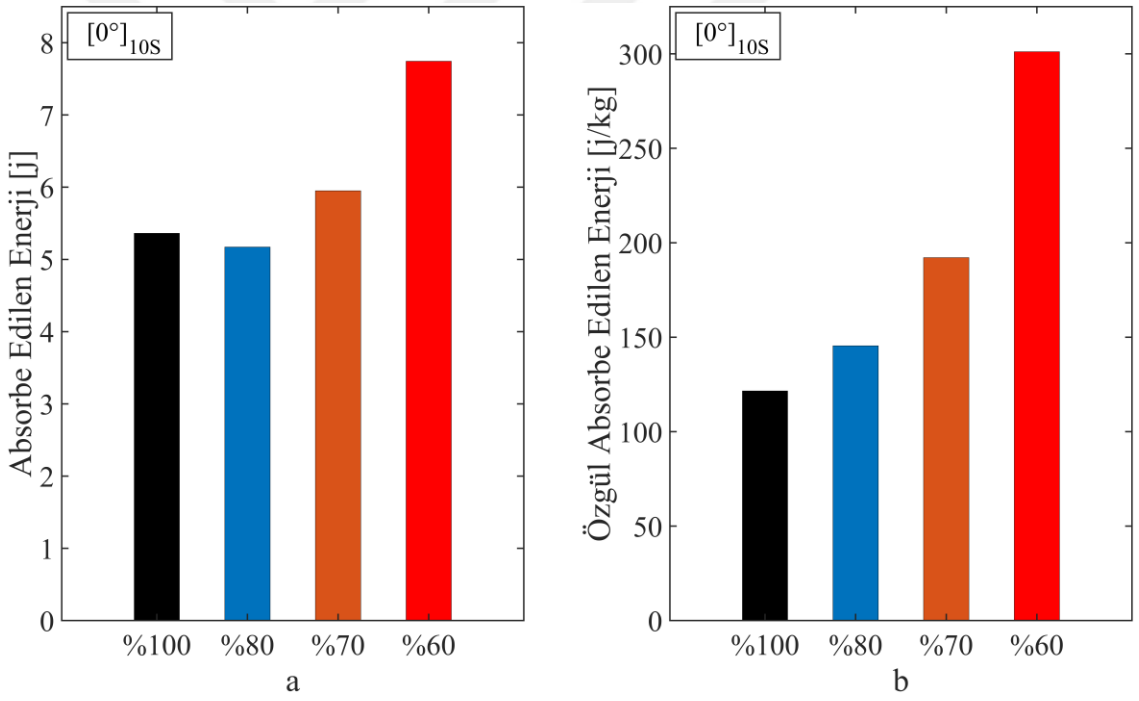


Şekil 3.12. %60 kütle oranına göre optimize edilmiş geometrinin kuvvet-yer değiştirme grafiği

Serim açısı [0º] olan geometrilerin, üç nokta eğme testlerinde fiber lifleri, normal gerilmeye maruz kaldıklarından şekil değişimi daha büyük olmaktadır ve bu da rijitliğin düşük çıkmasına sebep olur. En yüksek rijitlik değerlerinin [0º/90º] ve [-45º/45º] açılı numunelerde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni üç nokta eğme yükleme şartında geometrinin kayma gerilmelerine maruz kalmasıdır. Burada serim açısı [90º] olan plakaların eğilme mukavemetlerinin ve modüllerinin düşük olduğu görülmektedir.

3.2.1. Test Numunelerinin Enerji Absorbe Özellikleri

Farklı fiber serim açıları ve optimizasyon kriterlerine göre üretilen test numunelerinin, üç nokta eğme testlerindeki şekil değiştirme enerjileri (absorbe edilen enerji) incelenmiştir. Karşılaştırmalar aynı serim açısına sahip numunelerin optimizasyon yapılmamış ve topoloji optimizasyonu yapılarak hazırlanan numunelerin arasında yapılmıştır. Bir numunenin kütlesi, şekil değiştirme enerjisine büyük oranda etki etmektedir. Bir yapının enerji absorbe etme kabiliyetini daha iyi anlayabilmek için kütle etkisinin ortadan kaldırılması gerekmektedir [63]. Bunun için numunenin absorbe ettiği enerjinin, kütlesine bölünmesi gerekir. Böylece, özgül absorbe edilen enerji değeri bulunur. Şekil 3.13-16'da, a numunelerin absorbe ettiği enerjiyi, b ise özgül absorbe edilen enerji değerlerini göstermektedir.

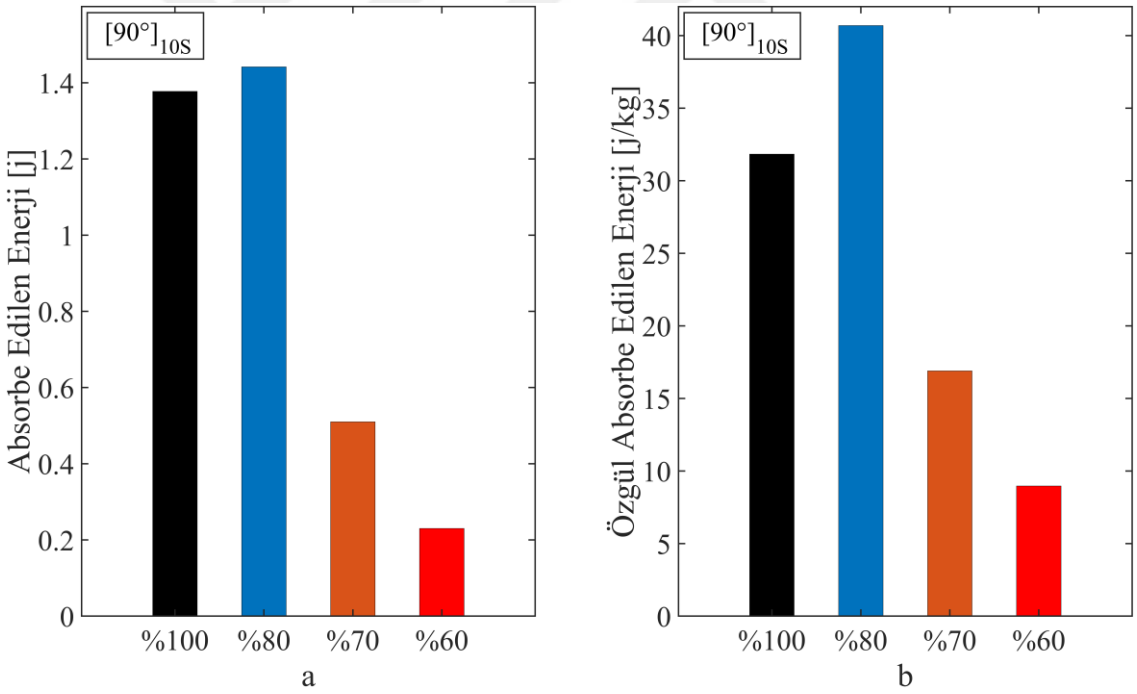


Şekil 3.13. Serim açısı [0º] olan numuneler tarafından a) absorbe edilen enerjiler b) özgül absorbe edilen enerji değerleri

Şekil 3.13'de gösterilen grafiklerde topoloji uygulanmış geometrilerin şekil değiştirme enerjilerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 3.5 kuvvet sehim grafiğinden de görüldüğü üzere, serim açısı [0º], kütle oran %100, %80 ve %70 olan numunelerin yakın değerlere sahip oldukları görünmektedir ve kuvvet dayanımı yine bu sıralamaya göre azalma göstermektedir. En düşük kuvvet dayanımını kütle oranı %60 olan numune göstermektedir. Bu numunelere enerji sönümleme kabiliyetleri açısından bakıldığında,

Şekil 3.13-a'da benzer değerler görüldüğü fakat enerji sönümleme kabiliyetinin yüksek kütleden düşük kütleye doğru arttığı görülmektedir. Şekil 3.13-b'de kütle etkisini kaldırdığımızda enerji sönümleme oranının %60'dan %100 bariz bir şekilde değiştiğini göstermektedir.

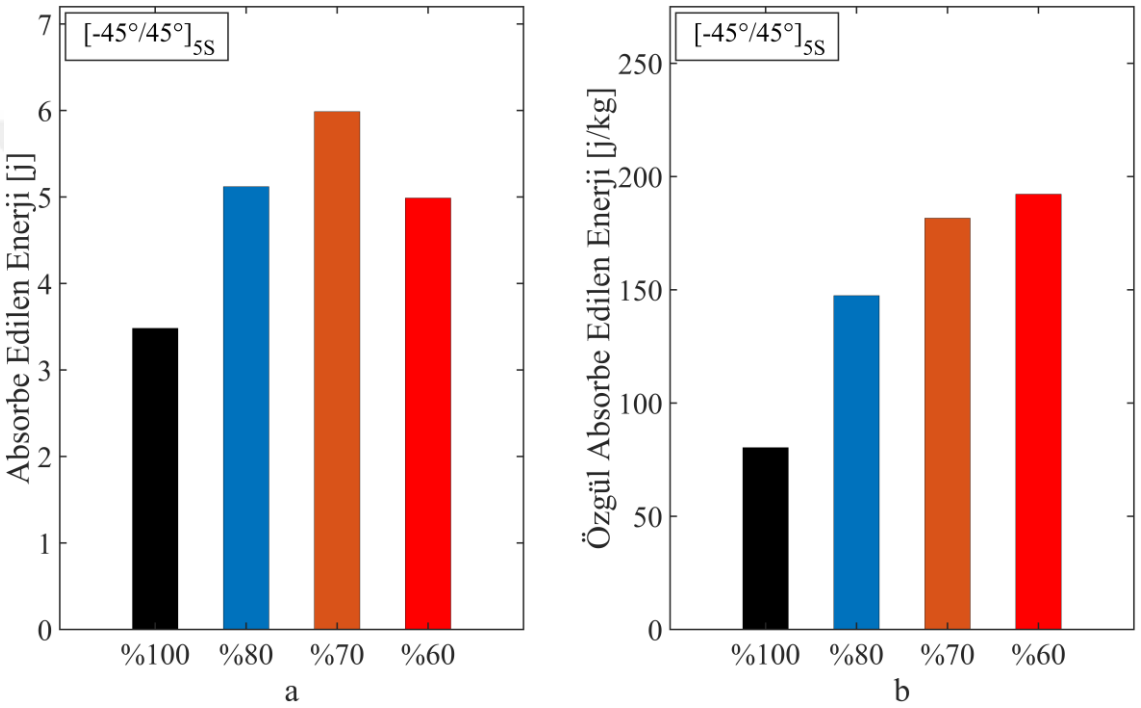
Şekil 3.13 ve 3.14'te tek yönlü olarak üretilen plakaların şekil değiştirme enerjileri kıyaslanmaktadır. Meydana gelen yükler, serim açısı [0º] olan numunelerin fiber yönlerinde olması ve fiberlerin bu yönde yüksek çekme dayanımı sahip olmasından dolayı enerji sönümleme kabiliyeti, serim açısı [90º] olan numunelere göre büyük bir farkla yüksek çıkmaktadır. Serim açısı [90º] olan numunelerde, uygulanan yükler karşısında şekil değişimi büyük bir oranda matris ara yüzeylerinde meydana geldiği için ve matris malzemesinin gevrek bir yapıya sahip olmasından dolayı şekil değiştirme oranları düşük çıkmaktadır.



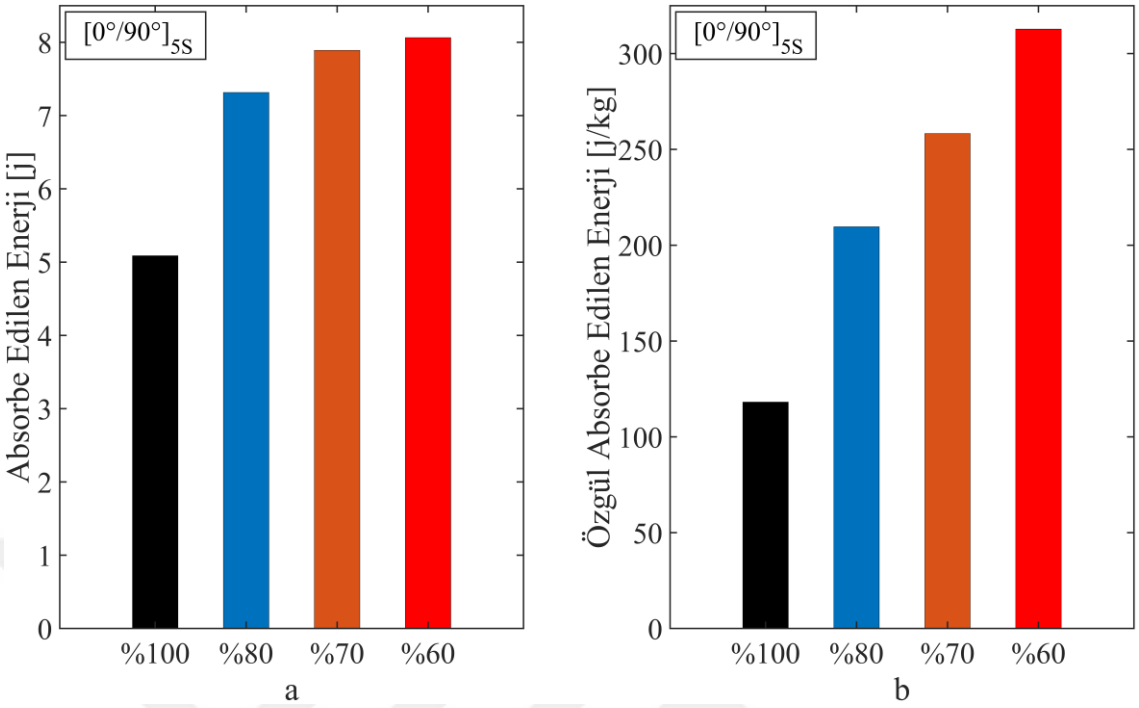
Şekil 3.14. Serim açısı [90º] numuneler tarafından a) absorbe edilen enerjiler b) özgül absorbe edilen enerji değerleri

Şekil 3.15 ve 3.16'da farklı yönlerde fiber serim açılarına sahip plakaların şekil değiştirme enerjileri karşılaştırılmıştır. Şekil 3.9-12'de gösterilen grafiklerde, serim açıları [0º/90º] ve [-45º/45º] olan numunelerin üç nokta eğme şartlarında benzer özellikler gösterdiği görülmektedir. Fakat şekil değiştirme enerjisi açısından incelendiğinde [0º/90º] numunelerinin, [-45º/45º] daha yüksek enerji sönümleyebildiği görülmektedir. Bunun

ana nedeni serim açısı [-45º/45º] olan numuneler uygulanan yükler sonucunda kayma eğiliminde olurken, serim açısı [0º/90º] olan numuneler şekil değişimine zorlanmaktadır [64]. Şekil 3.15-a'da serim açısı [-45º/45º] olan numunelerde absorbe edilen enerji değeri en yüksek %70, ikinci olarak %80, üçüncü olarak %100 ve son olarak %60 numunelerinde görülmektedir. Bu numunelerin kütle etkilerini ortadan kaldırdığımızda özgül absorbe edilen enerji sıralaması, en yüksek %60, ikinci olarak %70, üçüncü olarak %80 ve son olarak %100 olan numunelerde görülmektedir.



Şekil 3.15. Serim açısı [-45º/45º] numuneler tarafından a) absorbe edilen enerjiler b) özgül absorbe edilen enerji değerleri



Şekil 3.16. Serim açısı [0º/90º] numuneler tarafından a) absorbe edilen enerjiler b) özgül absorbe edilen enerji değerleri

Şekil 3.16'da serim açısı [0º/90º] olan numunelerin şekil değişim enerjileri gösterilmektedir. Bu serim açısında yapılan eğilme testlerinde numuneler daha kararlı bir yapı göstermektedirler ve optimizasyon sonucu elde edilen geometrilerin absorbe ettikleri enerjilerin daha yüksek olduğu görülmektedir. Burada absorbe edilen enerjiler ve spesifik absorbe edilen enerjiler arasında benzer bir ilişkide görülebilmektedir.

3.3. Modal Analiz ve Topoloji Optimizasyonu

Modal analiz yöntemi, sistemlerin doğal titreşim frekansını ve mod şeklini belirleyebilmek için yapılmaktadır. Bir sistemin kendi doğal titreşim frekansı ile çalışma şartlarından dolayı oluşan titreşim frekansının çakışması sonucunda rezonans oluşur ve rezonans sistemde yıkıcı etkiye sahip istenmeyen bir durumdur. Modal analiz yapının, doğal frekanslarını belirlenmesini ve bu sayede rezonans titreşiminden kaçınılmasını sağlamaktadır. Modal analiz sonuçlarına göre yapılan topoloji optimizasyonu, belirlenen frekans aralığında (amaç fonksiyonu), malzeme dağılımını veya topolojisini değiştirerek optimize etmektedir.

Bu çalışmada, test numunelerinin birinci eğilme modlarına göre doğal titreşim frekansları ve sönüm oranları (loss faktor) değerleri deneysel olarak tespit edilmeye çalışılmıştır.

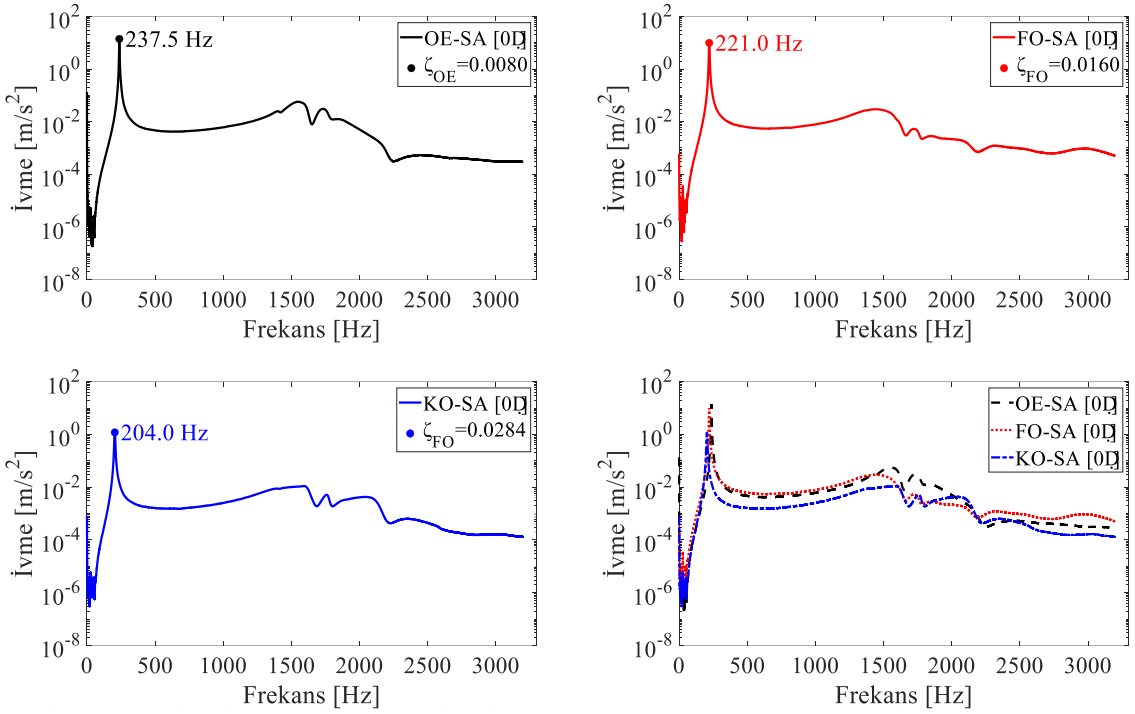
Serim açıları, $[0^o]_{10S}$, $[90^o]_{10S}$, $[0^o/90^o]_{5S}$ ve $[-45^o/45^o]_{5S}$ olan kompozit plakalardan modeller hazırlanmıştır ve bu modeller üzerine Ansys® sonlu elemanlar programında modal analizler gerçekleştirilmiştir. Modal analiz sonuçlarından elde edilen doğal titreşim frekansı cevaplarına göre topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Bu optimizasyon kütle azaltma ve frekans maksimizasyonu olmak üzere (iki farklı geometri elde edilmiştir) iki ayrı kritere göre yapılmıştır. Analizler sonucunda kütle ve frekans kriterine göre ve optimize edilmemiş (% 100 dolu) olmak üzere toplam üç test numunesi hazırlanmıştır. Deneyler her test numunesi için Şekil 2.44'de gösterildiği gibi konumlandırılarak gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmada veri girişi darbe çekici ile yapılmıştır, daha sonra tek yönlü ivmeölçer ile veriler Brüel&Kjaer veri toplama ve işleme cihazında FFT (Fast Fourier Transform) yardımı ile frekans ve ivme verilerine dönüştürülmüştür. Burada doğal titreşim frekansı tespit edilmiştir.

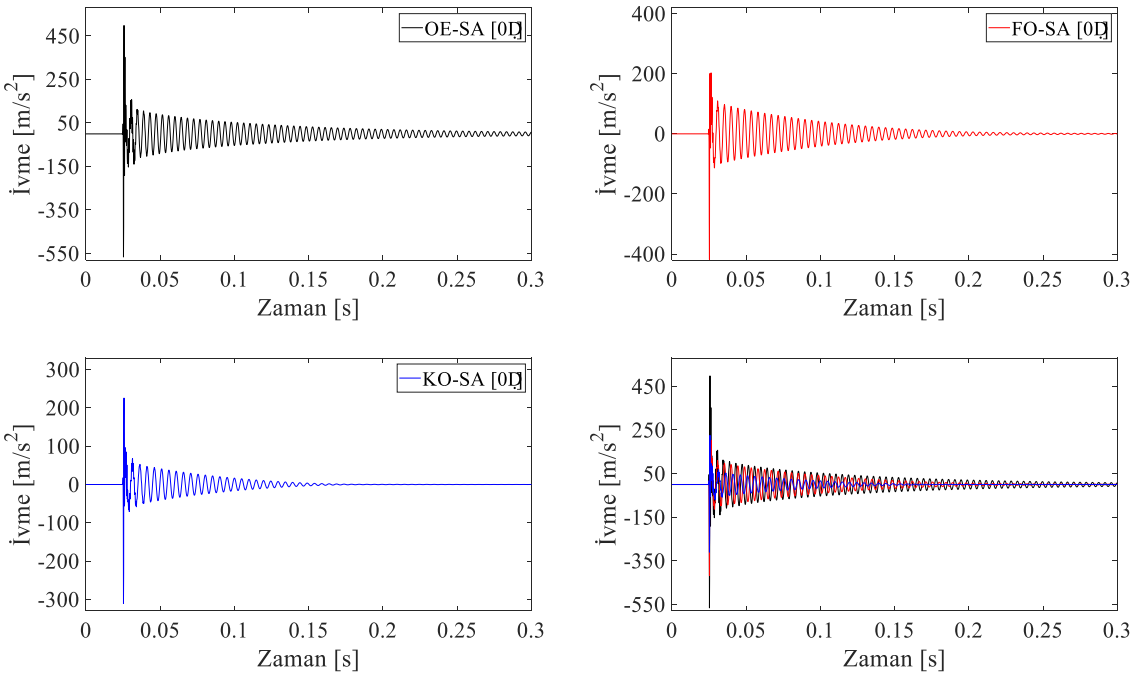
Elde edilen veriler matematik paket programında grafikleri çizdirilmiş ve yine bu programda Yarım Güç Bant Genişliği (Half Power Bandwith) yöntemi ile sönüm değeri tespit edilmiştir. Sönüm değeri hesaplamalarında, yarım güç bant genişliği ve Logaritmik Azalma (Logarithmic Decremant) yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler ile hesaplamaların nasıl yapıldığı daha önceki bölümlerde detaylı olarak anlatılmıştır. Yarım güç bant genişliği yöntemi ivme-frekans grafiğinden, Logaritmik Azalma yöntemi ise ivme zaman grafiğinden yararlanarak hesaplama yapmaktadır. Burada deneyler her bir numune için 10 tekrarlı vuruş ile yapılmaktadır. Deney düzeneği ivme-frekans verilerini bu 10 vuruşun ortalamasını alarak ivme-frekans değerlerini vermektedir. Deney cihazı ivme-zaman grafiğini son yapılan vuruşun verileri ile hesaplamaktadır. Dolayısıyla 10 vuruşun ortalaması sonucunda elde edilen değerler daha kesin bir sonuca ulaştırabileceği için, sönüm değerlerinin hesaplanmasında yarım bant genişliği yöntemi kullanılmıştır.

Dört farklı açıda ($[0^o]_{10S}$, $[90^o]_{10S}$, $[0^o/90^o]_{5S}$ ve $[-45^o/45^o]_{5S}$) ve üç farklı geometride (optimize edilmemiş, kütle kriterine göre optimize edilmiş ve frekans kriterine göre optimize edilmiş) toplam 12 farklı deney yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda elde edilen veriler işlenmiş ve aşağıdaki grafiklerde karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda özellikle optimizasyonun etkilerini anlayabilmek için aynı serim açısına sahip test numuneleri kendi içinde değerlendirilmiştir. Aşağıdaki grafiklerde kullanılan kısaltmalar, SA serim

açısı, OE optimize edilmemiş, FO frekans kriterine göre optimize edilmiş, KO kütle kriterine göre optimize edilmiş ve ζ sönüm değerini göstermektedir. Sönüm değerleri bir yapının dinamik yanıtları hakkında önemli bilgiler vermektedir.

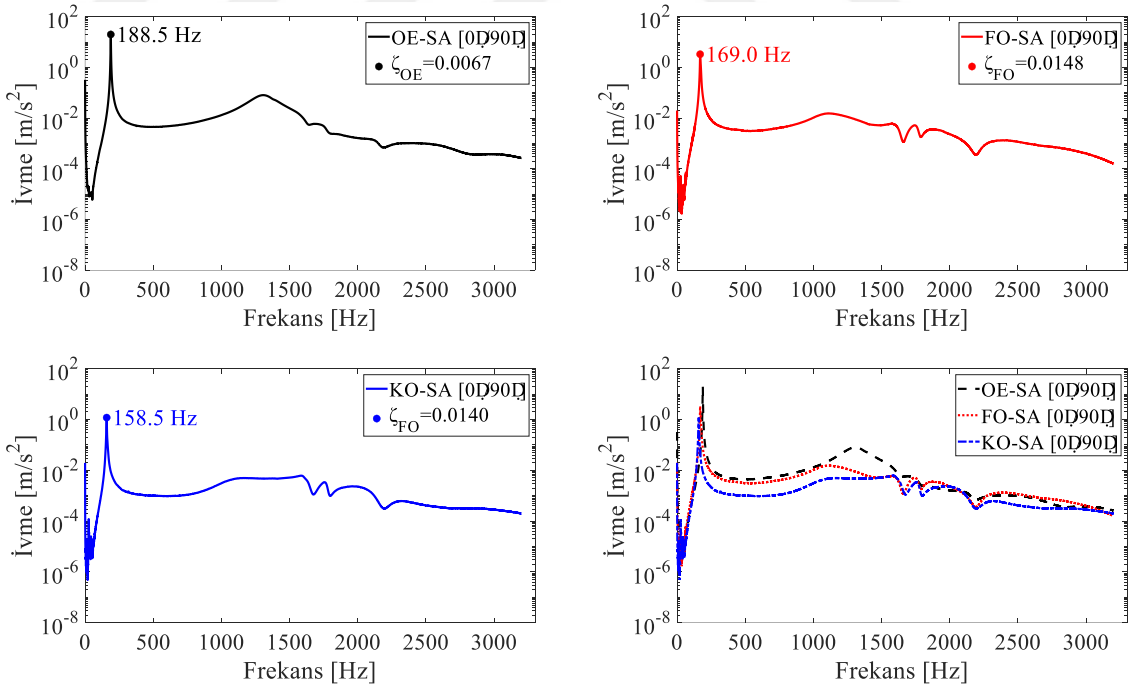


Şekil 3.17. Serim açısı $[0^o]_{10S}$ olan test numunelerinin doğal titreşim frekans grafikleri



Şekil 3.18. Serim açısı $[0^o]_{10S}$ olan test numunelerinin sönüm grafikleri

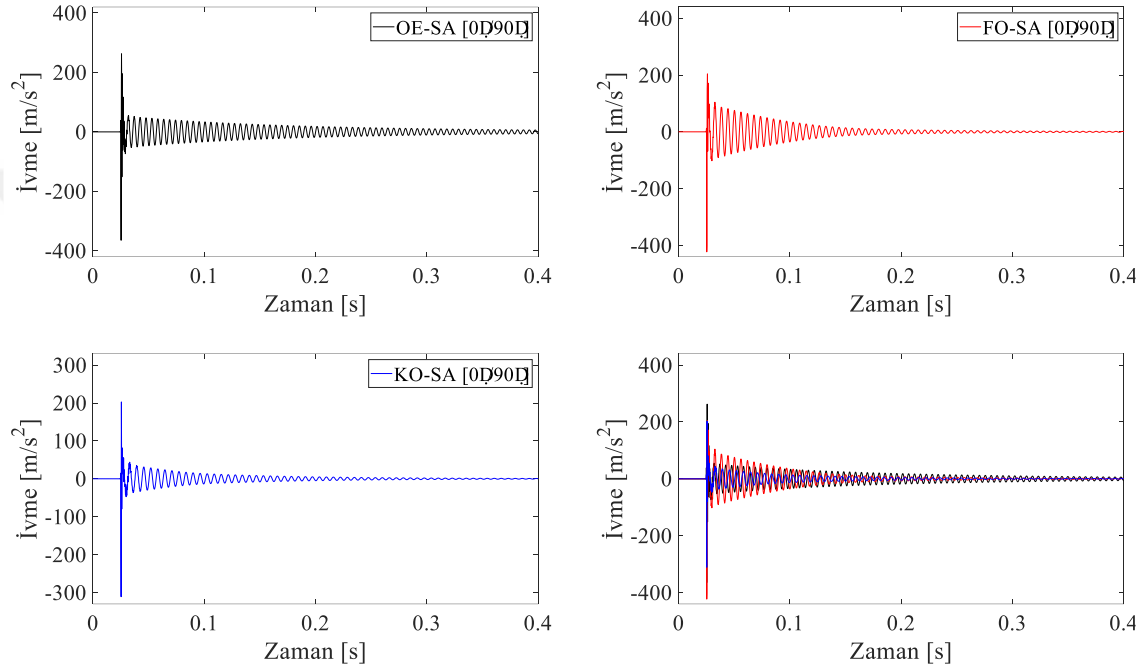
Şekil 3.17 ve 3.18'de serim açısı $[0^o]_{10S}$ olan plakadan elde edilmiş test numunelerinin birinci moda göre (eğilme) doğal titreşim frekanslarının ve sönüm değerlerinin deney sonuçları gösterilmektedir. Burada optimize edilmemiş test numunesinin doğal titreşim frekansı 237.5 Hz ve sönüm değeri 0.008 olarak tespit edilmiştir. Frekans kriterine göre optimize edilmiş test numunesinin doğal titreşim frekansı 221 Hz ve sönüm oranı 0.016 olarak bulunmuştur. Kütle kriterine göre optimize edilmiş test numunesinin doğal titreşim frekansı 204 Hz ve sönüm oranı 0.0284 olarak bulunmuştur. Burada optimize edilmemiş test numunesi en düşük sönüm oranına, kütleye göre optimize edilmiş test numuneleri ise en yüksek sönüm oranına sahip olduğu görülmektedir. Optimizasyonlar esnasında kütle ve geometride gerçekleşen değişiklikler doğal titreşim frekansının düşmesine sebep olmaktadır. Frekansa göre yapılan optimizasyonlarda hedef fonksiyonu doğal titreşim frekansını maksimum yapmaya çalışması, frekans kriterine göre optimizasyonda doğal titreşim frekansının yüksek çıkmasını açıklamaktadır. Serim açısı $[0^o]$ olan numunelerin diğer örneklere göre daha yüksek doğal titreşim frekansına sahip olduğu görülmektedir [65].



Şekil 3.19. Serim açısı $[0^o/90^o]_{5S}$ olan test numunelerinin doğal titreşim frekans grafikleri

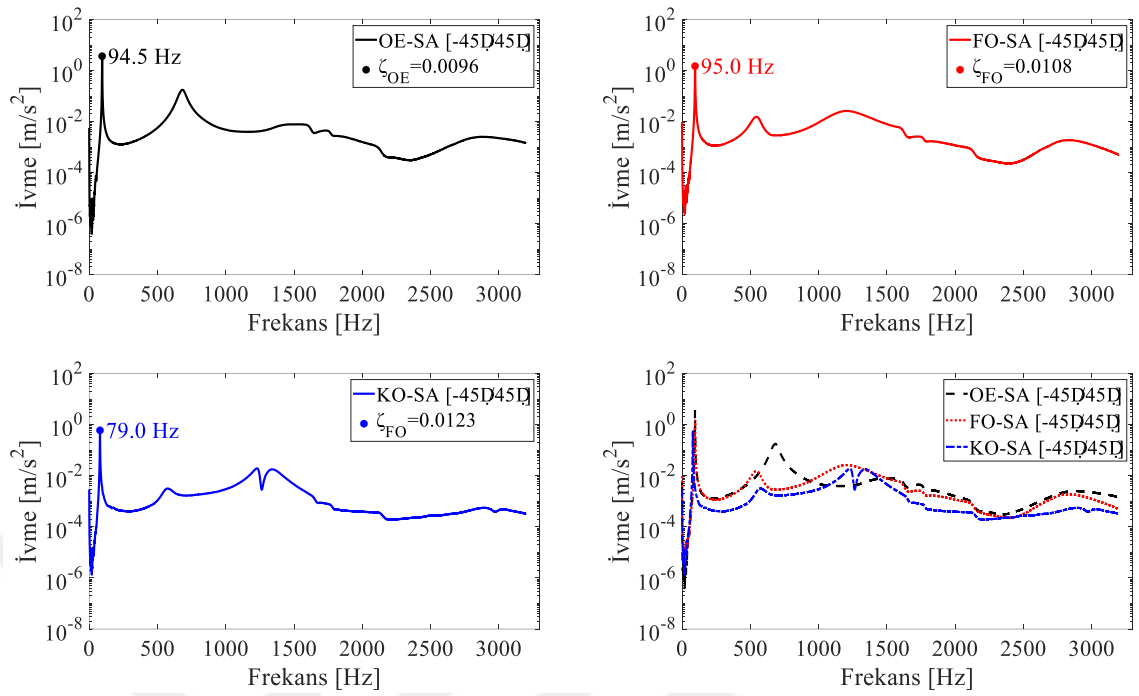
Şekil 3.19 ve 3.20'de serim açısı $[0^o/90^o]_{5S}$ olan plakadan elde edilmiş test numunelerinin birinci moda göre (eğilme) doğal titreşim frekanslarının ve sönüm değerlerinin deney sonuçları gösterilmektedir. Burada optimize edilmemiş test numunesinin doğal titreşim

frekansı 188.5 Hz ve sönüm değeri 0.0067 olarak tespit edilmiştir. Frekans kriterine göre optimize edilmiş test numunesinin doğal titreşim frekansı 169 Hz ve sönüm oranı 0.0148 olarak bulunmuştur. Kütle kriterine göre optimize edilmiş test numunesinin doğal titreşim frekansı 158.5 Hz ve sönüm oranı 0.0140 olarak bulunmuştur. Burada optimize edilmemiş test numunesi en az sönüm oranına, kütleye ve frekansa optimize edilmiş test numunelerinin birbirine yakın sönüm oranına sahip oldukları görülmektedir.

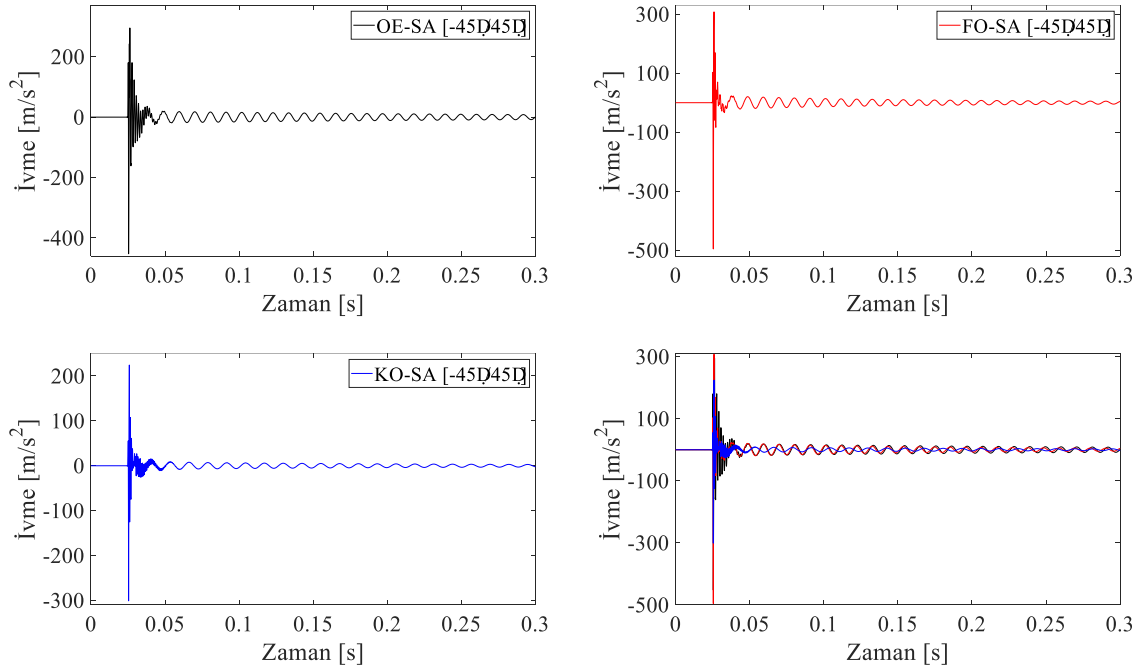


Şekil 3.20. Serim açısı $[0^o/90^o]_{5S}$ olan test numunelerinin sönüm grafikleri

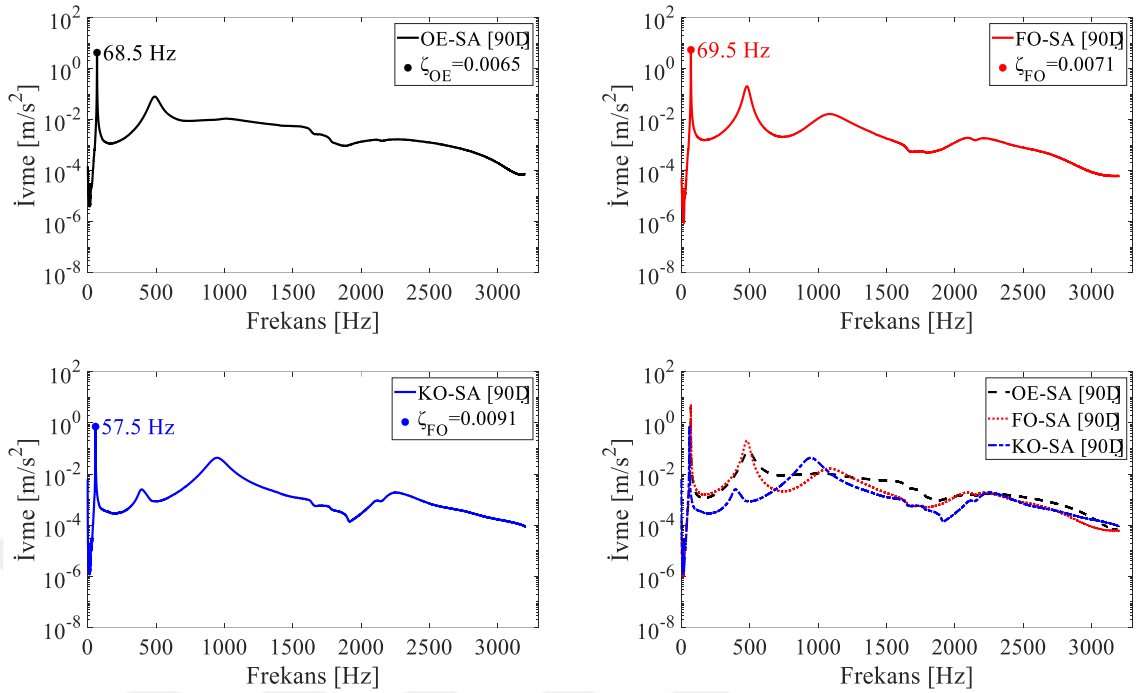
Şekil 3.21 ve 3.22'de serim açısı $[-45^o/45^o]_{5S}$ olan plakadan elde edilmiş test numunelerinin birinci moda göre (eğilme) doğal titreşim frekanslarının ve sönüm değerlerinin deney sonuçları gösterilmektedir. Burada optimize edilmemiş test numunesinin doğal titreşim frekansı 94.5 Hz ve sönüm değeri 0.0096 olarak tespit edilmiştir. Frekans kriterine göre optimize edilmiş test numunesinin doğal titreşim frekansı 95 Hz ve sönüm oranı 0.0108 olarak bulunmuştur. Kütle kriterine göre optimize edilmiş test numunesinin doğal titreşim frekansı 79 Hz ve sönüm oranı 0.0123 olarak bulunmuştur. Burada optimize edilmemiş test numunesi en az sönüm oranına sahip olduğu, kütle ve frekans kriterine göre optimize edilmiş test numunelerinin birbirine yakın sönüm oranına sahip oldukları görülmektedir.



Şekil 3.21. Serim açısı $[-45^{o}/45^{o}]_{5S}$ olan test numunelerinin doğal titreşim frekans grafikleri

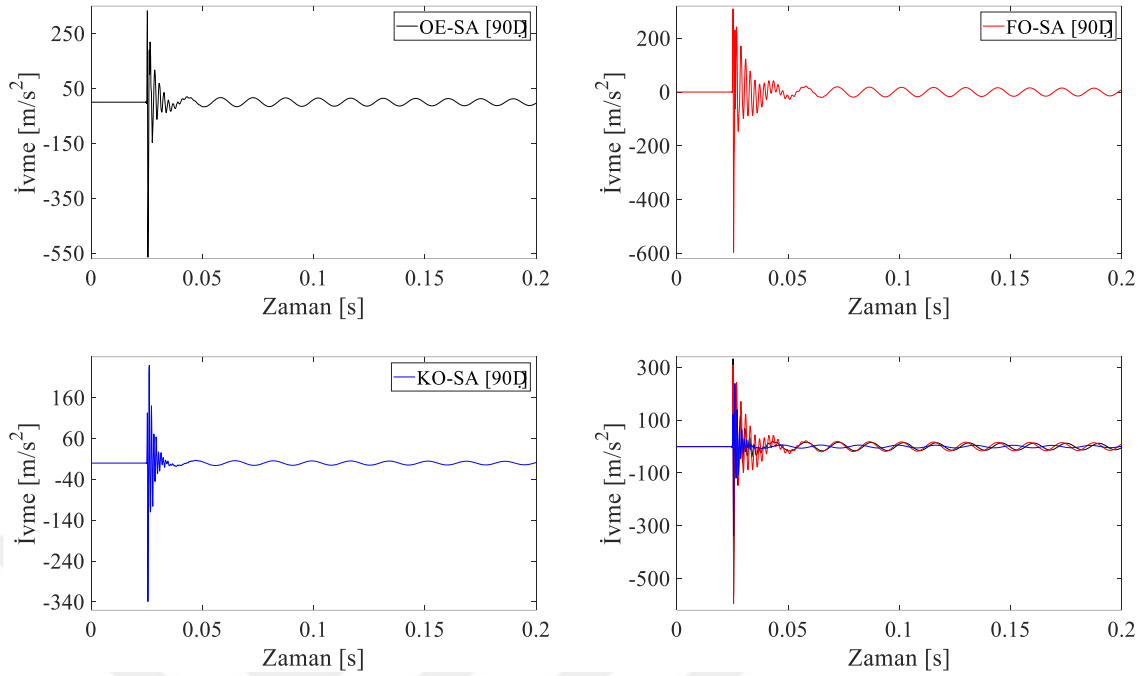


Şekil 3.22. Serim açısı $[-45^{o}/45^{o}]_{5S}$ olan test numunelerinin sönüm grafikleri



Şekil 3.23. Serim açısı $[90^o]_{10S}$ olan test numunelerinin sönüm grafikleri

Şekil 3.23 ve 3.24'de serim açısı $[90^o]_{10S}$ olan plakadan elde edilmiş test numunelerinin birinci moda göre (eğilme) doğal titreşim frekanslarının ve sönüm değerlerinin deney sonuçları gösterilmektedir. Burada optimize edilmemiş test numunesinin doğal titreşim frekansı 68.5 Hz ve sönüm değeri 0.0065 olarak tespit edilmiştir. Frekans kriterine göre optimize edilmiş test numunesinin doğal titreşim frekansı 69.5 Hz ve sönüm oranı 0.0071 olarak bulunmuştur. Kütle kriterine göre optimize edilmiş test numunesinin doğal titreşim frekansı 57.5 Hz ve sönüm oranı 0.0091 olarak bulunmuştur. Burada test edilen numuneler benzer titreşim karakteristiği göstermektedir. Bu serim açısında geometrinin değişikliğinin çok fazla etkisinin olmadığı görülmektedir. En düşük frekans cevabı bu serim açısına sahip geometrilerde en düşük frekans cevabı görülmektedir [65].



Şekil 3.24. Serim açısı $[90^o]_{10S}$ olan test numunelerinin sönüm grafikleri

Tablo 3.2. Doğal titreşim frekansı analiz ve deneysel sonuçları

Serim Açısı	Test Numunesi	$\omega_n\ [Hz]$ (Deneysel)	$\omega_n\ [Hz]$ (Sayısal)	ζ Sönüm Oranı
$[0^o]_{10S}$	OE	237.5	257	0.008
	FO	221	217	0.016
	KO	204	191	0.0284
$[0^o/90^o]_{5S}$	OE	188.5	205	0.0067
	FO	169	166.5	0.0148
	KO	158.5	154.6	0.0140
$[-45^o/45^o]_{5S}$	OE	94.5	94.7	0.0096
	FO	95	93.4	0.0108
	KO	79	79.6	0.0126
$[90^o]_{10S}$	OE	68.5	71.2	0.0065
	FO	69.5	68.6	0.0071
	KO	57.5	59.9	0.0091

Burada yapılan çalışmalarda bütün test numuneleri doğal titreşim frekansı açısından ortak bir titreşim karakteristiği göstermişlerdir. Doğal titreşim frekansı değerleri en yüksekten düşüğe doğru şu şekilde sıralanmıştır, birinci $[0^o]_{10S}$, ikinci $[0^o/90^o]_{5S}$, $[-45^o/45^o]_{5S}$ ve dördüncü olarak $[90^o]_{10S}$ plakalarından üretilen test numuneleri olmuştur. Bu sıralama da test numunelerinin rijitlik karakteristikleri ile doğrudan bağlantılı olduğunu, yüksek

rijitlik değeri ile doğal titreşim frekansının doğru orantılı olduğu görülmektedir [66]. Yapılan deneylerde doğal frekans en yüksek olanlar optimize edilmemiş numuneler, ikinci olarak frekans kriterine göre optimize edilmiş numuneler ve en son olarak da kütle kriterine göre optimize edilmiş numuneler takip etmektedir. Optimize edilen geometrilerde yapılan deneylerde doğal titreşim frekansı değerleri, aynı serim açısına sahip geometriler için birbirine yakın çıkmıştır. Bu konumda serim açısı $[0^o]_{10S}$ ve $[0^o/90^o]_{5S}$ olan test numuneleri, kendi içerisinde kıyaslandığında optimize edilmiş numunelerin yakın doğal frekans değerlerine sahip olduğu görülmektedir. $[-45^o/45^o]_{5S}$ ve $[90^o]_{10S}$ test numunelerinde ise optimize edilmemiş ve frekans kriterine göre optimize edilmiş numuneler yakın değerlere sahiptir, kütle kriterine göre yapılan optimizasyon sonuçlarının ise diğerlerinden çok daha düşük olduğu görülmektedir.

Sönüm oranları, doğal titreşim frekansı eğrisinden Yarım Bant Genişliği yöntemi ile hesaplanarak elde edilmiştir. Sönüm değerleri yapılan deneylerde, optimize edilmiş geometrilerde daha yüksek ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. En yüksek sönüm değeri serim açısı $[0^o]_{10S}$ olan ve kütle kriterine göre optimize edilmiş numunede elde edilmiştir. Sönüm değeri aynı geometrilerde de yine doğal titreşim frekansı gibi yüksek rijitlik oranlarında yüksek çıkmaktadır [67]. Bunun yanında sönüm oranı geometri şekli, fiber yerleşim açısı, fiber süreklilikleri, matris elemanı gibi değerlerine göre de değişkenlik göstermektedir.

4. BÖLÜM

TARTIŞMA SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Sonuç ve Yorumlar

Bu tez çalışmasında farklı fiber serim açılarına sahip kompozit yapılar üzerine, ayrı ayrı statik ve modal topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Elde edilen geometriler üzerine deneysel çalışmalar yapılmıştır. Statik olarak üç nokta eğme testleri, modal olarak da doğal titreşim frekansı deneyleri yapılmıştır.

Statik yükler başlığı atında tasarım alanı, %80, %70,%60 kütle kriterine göre optimize edilmiş ve bir de kıyaslama için optimize edilmemiş geometriler kullanılmıştır. Sayısal analizler sonucunda elde edilen numuneler talaşlı imalat yöntemleri ile üretilmiş ve bu numuneler üzerine üç nokta eğme testleri yapılmıştır. Bu testlerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme verileri ile açı farklılıklarının, optimizasyon kriterlerinin etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak serim açısı [0º] olan geometrilerin, üç nokta eğme testlerinde fiber lifleri, normal gerilmeye maruz kaldıklarından şekil değişimi daha büyük olmaktadır ve bu da rijitliğin düşük çıkmasına sebep olur. En yüksek rijitlik değerlerinin [0º/90º] ve [-45º/45º] açılı numunelerde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni üç nokta eğme yükleme şartında geometrinin kayma gerilmelerine maruz kalmasıdır. Burada serim açısı [90º] olan plakaların eğilme mukavemetlerinin ve modüllerinin düşük olduğu görülmektedir.

Burada ikinci kısımda test numunelerinin enerji absorbe etme özellikleri incelenmişti. Serim açıları [0º/90º] ve [-45º/45º] olan numunelerin üç nokta eğme şartlarında benzer özellikler gösterdiği görülmektedir. Fakat şekil değiştirme enerjisi açısından incelendiğinde [0º/90º] numunelerinin, [-45º/45º] daha yüksek enerji sönümleyebildiği görülmektedir. Bunun ana nedeni serim açısı [-45º/45º] olan numuneler uygulanan yükler sonucunda kayma eğiliminde olurken, serim açısı [0º/90º] olan numuneler şekil değişimine zorlanmaktadır [64]. Şekil 3.15-a'da serim açısı [-45º/45º] olan numunelerde

absorbe edilen enerji değeri en yüksek %70, ikinci olarak %80, üçüncü olarak %100 ve son olarak %60 numunelerinde görülmektedir. Bu numunelerin kütle etkilerini ortadan kaldırdığımızda özgül absorbe edilen enerji sıralaması, en yüksek %60, ikinci olarak %70, üçüncü olarak %80 ve son olarak %100 olan numunelerde görülmektedir.

Modal analiz başlığı altında farklı serim açılarına sahip kompozit yapılar üzerine modal topolojik optimizasyon yapılmıştır. Burada her açı için üç farklı geometri elde edilmiştir. Bunlar frekans ve kütle kriterine göre optimize edilmiş geometriler ve karşılaştırma yapabilmek için optimize edilmemiş geometriler kullanılmıştır. Burada yapılan çalışmalarda bütün test numuneleri doğal titreşim frekansı açısından ortak bir titreşim karakteristiği göstermişlerdir. Fiber yönlerinin, titreşim karakteristiğine önemli ölçüde etki ettiği görülmektedir. Fiber yönleri, yapıda oluşan gerilmeler doğrultusunda optimize edildiğinde doğal titreşim frekansına ve sönüm oranına önemli derecede katkı sağlamaktadır [68]. Yapılan deneylerde de görüldüğü üzere, doğal titreşim frekansı değerleri en yüksekten düşüğe doğru, birinci $[0^o]_{10S}$, ikinci $[0^o/90^o]_{5S}$, $[-45^o/45^o]_{5S}$ ve dördüncü olarak $[90^o]_{10S}$ plakalarından üretilen test numuneleri olmuştur. Bu sıralama da test numunelerinin rijitlik karakteristikleri ile doğrudan bağlantılı olduğunu, bunu da fiber yönleri ile oluşan gerileme yönlerinde olmasına bağlıdır. Yüksek rijitlik değeri ile doğal titreşim frekansının doğru orantılı olduğu görülmektedir [66]. Birinci ve ikinci konuma göre yapılan deneylerde doğal frekans en yüksek optimize edilmemiş numuneler, bunu frekans kriterine göre optimize edilmiş numuneler ve en son olarak da kütle kriterine göre optimize edilmiş numuneler takip etmektedir. Optimizasyon işlemi birinci konuma göre yapıldığı için bu konumda yapılan deneylerde doğal titreşim frekansı değerleri, aynı serim açısına sahip geometriler için birbirine yakın çıkmıştır. İkinci konumda yapılan deneylerde optimize edilmemiş test numunelerinin doğal titreşim frekansları yüksek çıkmıştır. Bu konumda serim açısı $[0^o]_{10S}$ ve $[0^o/90^o]_{5S}$ olan test numuneleri, kendi içerisinde kıyaslandığında optimize edilmiş numunelerin yakın doğal frekans değerlerine sahip olduğu görülmektedir. $[-45^o/45^o]_{5S}$ ve $[90^o]_{10S}$ test numunelerinde ise optimize edilmemiş ve frekans kriterine göre optimize edilmiş numuneler yakın değerlere sahiptir, kütle kriterine göre yapılan optimizasyon sonuçlarının ise diğerlerinden çok daha düşük olduğu görülmektedir.

Sönüm oranları, doğal titreşim frekansı eğrisinden Yarım Bant Genişliği yöntemi ile hesaplanarak elde edilmiştir. En yüksek sönüm değeri serim açısı $[0^o]_{10S}$ olan ve kütle

kriterine göre optimize edilmiş numunede elde edilmiştir. Sönüm değeri aynı geometrilerde de yine doğal titreşim frekansı gibi yüksek rijitlik oranlarında yüksek çıkmaktadır. Bunun yanında sönüm oranı geometri şekli, fiber yerleşim açısı, fiber süreklilikleri, matris elemanı gibi değerlerine göre de değişkenlik göstermektedir. Yapılan optimizasyonlar ve deneyler sonucunda optimize edilmiş test numunelerinde, optimize edilmemiş test numunelerine nazaran doğal titreşim frekanslarında düşük oranlarda azalma olsa da, sönüm oranı açısından artışlar görülmüştür. Topoloji optimizasyonunda fiber serim açılarının etkisinin yüksek olduğu görülmektedir.

4.2. Öneriler ve Planlanan Çalışmalar

Bu çalışmada tek yönlü karbon fiber destekli kompozit yapıların açı değişimleri, kütle oranları ve doğal titreşim frekansaları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu yapılan çalışmalar tamamen elastik bölge ile sınırlandırılmıştır. Bunun sebebi topoloji optimizasyonunun elastik bölgede çözümler önermesidir. Her ne kadar elastik sınırlar içerisinde çalışılmış olsa da kompozit malzemeler elastik bölgede elasto-plastik davranışlar göstermektedirler. Bu çalışmalar geliştirilerek yapıların plastik bölgede ki özellikleri incelenmeli ve geliştirilmelidir. Bunu takip eden çalışmalarda özellikle metallerin ve metal matrisli kompozitlerin üç boyutlu daha karmaşık yapıların optimizasyonları araştırılması gereken bir konudur.

Statik ve dinamik yapılar ve bunların optimizasyonunda elde edilen geometriler, kompozit plakalardan tek yönlü katmanlar yerine, sürekli fiber serim sistemlerinin geliştirilip fiber yönlerinin de optimize edilerek serilmesi ve geometrilerin bu şekilde üretilmesi hem maliyet açısından hem de yapısal açıdan önemli etkisi olacaktır.

Burada hem statik hem de modal analizler tek bir durum için incelenmiştir. Bu çalışma devamında farklı durumlar karşısındaki tepkileri incelenmeli ve bunların yapay zekâ yöntemleri ile birleştirilmelidir.

Katmanlı üretim yöntemlerinin üretim esnekliği topoloji optimizasyon yöntemlerinin önünü açmaktadır. Bu sayede üretim kısıtlarının büyük bir bölümü ortadan kalkmaktadır ve optimize edilen alan çok fazla bir değişikliğe uğramadan elde edilebilir ve sonuçları incelenebilir.

KAYNAKÇA

1. Bendsøe, M. P., 1989. Optimal shape design as a material distribution problem. **Structural Optimization, 1**(4): 193–202.
2. Bendsøe, M. P., Sigmund, O., 1996. Topology Optimization Theory, Methods and Applications, Springer 360 pp.
3. Ahrari, A., Atai, A. A., 2013. Fully stressed design evolution strategy for shape and size optimization of truss structures. **Computers and Structures, 123**: 58–67.
4. Liu, S., Li, Q., Hu, J., Chen, W., Zhang, Y., Luo, Y., Wang, Q., 2024. A Survey of Topology Optimization Methods Considering Manufacturable Structural Feature Constraints for Additive Manufacturing Structures. **Additive Manufacturing Frontiers, 3**(2): 200143.
5. KAW, A. A., Mechanics of composite materials, , 2013.
6. Yang, Y., Boom, R., Irion, B., van Heerden, D. J., Kuiper, P., de Wit, H., 2012. Recycling of composite materials. Chemical Engineering and Processing: **Process Intensification, 51**: 53–68.
7. Rajak, D. K., Pagar, D. D., Kumar, R., Pruncu, C. I., 2019. Recent progress of reinforcement materials: A comprehensive overview of composite materials. **Journal of Materials Research and Technology, 8**(6): 6354–6374.
8. Base, N., Mechanics of Composite Materials and Structures, , 1989.
9. Xie, Y. M., Steven, G. P., 1993. A simple evolutionary procedure for structural optimization. **Compurers & Structures, 49**(5): 885–896.
10. Querin, O. M., Young, V., Steven, G. P., Xie, Y. M., 2000. Computational efficiency and validation of bi-directional evolutionary structural optimization. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 189**(2): 559–573.
11. Wang M. Y., Wang X., G. D., 2003. A level set method for structural topology optimization. **Communications in Computational Physics, 192**(1–2): 227–246.
12. Brown, B., Hmeidat, N. S., Jia, X., Wilt, J., Roberts, M., Compton, B. G., Vermaak, N., 2022. Experimental investigations of the effectiveness of simultaneous topology/orientation optimization via SOMP and principal stress directions. **Materials and Design, 217**: 110647.
13. Eckrich, M., Arrabiyeh, P. A., Dlugaj, A. M., May, D., 2022. Structural topology

optimization and path planning for composites manufactured by fiber placement technologies. **Composite Structures, 289**: 115488.

14. Bruns, T. E., Tortorelli, D. A., 2003. An element removal and reintroduction strategy for the topology optimization of structures and compliant mechanisms. **International Journal for Numerical Methods in Engineering, 57**: 1413–1430.
15. Schmidt, M. P., Couret, L., Gout, C., Pedersen, C. B. W., 2020. Structural topology optimization with smoothly varying fiber orientations. **Structural and Multidisciplinary Optimization, 62**: 3105–3126.
16. Völkl, H., Klein, D., Franz, M., Wartzack, S., 2018. An efficient bionic topology optimization method for transversely isotropic materials. **Composite Structures, 204**: 359–367.
17. Nomura T., Dede E. M., Lee J., Yamasaki S., Matsumori T., Kawamoto A, K. N., 2012. General topology optimization method with continuous and discrete orientation design using isoparametric projection. **International Journal for Numerical Methods in Engineering, 101**: 571–605.
18. Hoglund, R., Smith, D. E., 2016. Continuous fiber angle topology optimization for polymer fused filament fabrication. Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, **SFF 2016**, 1: 1078–1090.
19. Zhou, K., Li, X., 2006. Topology optimization of structures under multiple load cases using a fiber-reinforced composite material model. **Computational Mechanics, 38**: 163–170.
20. Mehl, K., Schmeer, S., Motsch-Eichmann, N., Bauer, P., Müller, I., Hausmann, J., 2021. Structural optimization of locally continuous fiber-reinforcements for short fiber-reinforced plastics. **Journal of Composites Science, 5**: 118.
21. Safonov, A. A., 2019. 3D topology optimization of continuous fiber-reinforced structures via natural evolution method. **Composite Structures, 215**: 289–297.
22. Jantos, D. R., Hackl, K., Junker, P., 2020. Topology optimization with anisotropic materials, including a filter to smooth fiber pathways. **Structural and Multidisciplinary Optimization, 61**: 2135–2154.
23. Ostanin, I., Tsybulin, I., Litsarev, M., Oseledets, I., Zorin, D., 2017. Scalable topology optimization with the kernel-independent fast multipole method. **Engineering Analysis with Boundary Elements, 83**: 123–132.

24. Xie, F., Gao, Y., Meng, D., Xu, Y., Wu, C., Fang, J., Li, Q., 2024. Topology optimization for fiber-reinforced plastic (FRP) composite for frequency responses. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 428**: 117114.
25. Ypsilantis, K. I., Faes, M. G. R., Lagaros, N. D., Aage, N., Moens, D., 2024. Robust topology and discrete fiber orientation optimization under principal material uncertainty. **Computers and Structures, 300**: 107421.
26. Yoon, G. H., 2010. Structural topology optimization for frequency response problem using model reduction schemes. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 199**: 1744–1763.
27. Zhao, X., Wu, B., Lai, S. K., Liu, W., Zhong, H., 2022. Topology optimization of proportionally damped structures under harmonic excitations: Analysis of velocity and acceleration responses. **Engineering Structures, 258**: 114140.
28. Ding, H., Xu, B., Duan, Z., Meng, Q., 2022. Optimal design of laminated plate for minimizing frequency response based on discrete material model and mode reduction method, **Engineering with Computers, 38**:2919-2951.
29. Chu, S., Xiao, M., Gao, L., Zhang, Y., Zhang, J., 2021. Robust topology optimization for fiber-reinforced composite structures under loading uncertainty. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 384**: 113935.
30. Jog, C. S., 2002. Topology design of structures subjected to periodic loading. **Journal of Sound and Vibration, 253**(3): 687–709.
31. Du, J., Olhoff, N., 2007. Topological design of freely vibrating continuum structures for maximum values of simple and multiple eigenfrequencies and frequency gaps. **Structural and Multidisciplinary Optimization, 34**: 91–110.
32. Kang, Z., Zhang, X., Jiang, S., Cheng, G., 2012. On topology optimization of damping layer in shell structures under harmonic excitations. **Structural and Multidisciplinary Optimization, 46**: 51–67.
33. Liu, H., Zhang, W., Gao, T., 2015. A comparative study of dynamic analysis methods for structural topology optimization under harmonic force excitations. **Structural and Multidisciplinary Optimization, 51**: 1321–1333.
34. Duan, Z., Wang, J., Xu, B., Liu, Y., Yan, J., 2021. A new method for concurrent multi-scale design optimization of fiber-reinforced composite frames with fundamental frequency constraints. **Structural and Multidisciplinary Optimization, 64**: 3773–3795.

35. Liu, B., Huang, X., Huang, C., Sun, G., Yan, X., Li, G., 2017. Topological design of structures under dynamic periodic loads. Engineering Structures, 142: 128–136.
36. Zhang, X., Wang, D., Huang, L., XU, W., Liang, H., Liu, B., Xue, G., Chen, H., Huang, B., Meng, Z., 2024. Multi-objective topology optimization method for multi-axis random vibration based on hybrid cellular automata. **Applied Mathematical Modelling, 133**: 327–343.
37. Yang, Z., Fu, K., Zhang, Z., Zhang, J., Li, Y., 2022. Topology optimization of 3D-printed continuous fiber-reinforced composites considering manufacturability. **Composites Science and Technology, 230**: 109727.
38. Fedulov, B., Fedorenko, A., Khaziev, A., Antonov, F., 2021. Optimization of parts manufactured using continuous fiber three-dimensional printing technology. **Composites Part B: Engineering, 227**: 109406.
39. Chen, Y., Ye, L., 2021. Topological design for 3D-printing of carbon fibre reinforced composite structural parts. **Composites Science and Technology, 204**: 108644.
40. Fernandes, R. R., van de Werken, N., Koirala, P., Yap, T., Tamijani, A. Y., Tehrani, M., 2021. Experimental investigation of additively manufactured continuous fiber reinforced composite parts with optimized topology and fiber paths. **Additive Manufacturing, 44**: 102056.
41. Gao, K., Do, D. M., Chu, S., Wu, G., Kim, H. A., Featherston, C. A., 2022. Robust topology optimization of structures under uncertain propagation of imprecise stochastic-based uncertain field. **Thin-Walled Structures, 175**: 109238.
42. Seabra, M., Azevedo, J., Araújo, A., Reis, L., Pinto, E., Alves, N., Santos, R., Mortágua, P. J., 2016. Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace componentes. **Procedia Structural Integrity, 1**: 289–296.
43. Park, S. Y., Choi, C. H., Choi, W. J., Hwang, S. S., 2019. A Comparison of the Properties of Carbon Fiber Epoxy Composites Produced by Non-autoclave with Vacuum Bag Only Prepreg and Autoclave Process. **Applied Composite Materials, 26**: 187–204.
44. Zhang, K., Gu, Y., Li, M., Wang, S., Zhang, Z., 2019. Effects of curing time and de-molding temperature on the deformation of glass fiber/epoxy resin prepreg laminates fabricated by rapid hot press. **Polymers and Polymer Composites, 27**(6): 301–313.

45. Rusinek, R., 2010. Cutting process of composite materials: An experimental study. **International Journal of Non-Linear Mechanics, 45**: 458–462.
46. Davim, J. P., Reis, P., 2005. Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments. **Journal of Materials Processing Technology, 160**: 160–167.
47. ASTM D3171 Standard test methods for constituent content of composite materials.
48. ASTM 3090 Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials.
49. ASTM D3518 Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a 45 ° Laminate.
50. Alci, M., Gunes, R., 2023. A comparison study on experimental characterization of unidirectional fiber reinforced composites using strain-gauges and virtual extensometers. **Materials Testing, 65**(2): 174–191.
51. Htet, T. L., Prosuntsov, P., 2023. *Comparative analysis of methods for calculating the physico-mechanical characteristics of multi-layered composite materials*. **E3S Web of Conferences**, 376.
52. Isaincu, A., Dan, M., Ungureanu, V., Marsavina, L., 2020. Numerical investigation on the influence of fiber orientation mapping procedure to the mechanical response of short-fiber reinforced composites using Moldflow, Digimat and Ansys software. **Materials Today: Proceedings, 45**: 4304–4309.
53. Mansour, G., Tsongas, K., Tzetzis, D., 2016. Modal testing of epoxy carbon-aramid fiber hybrid composites reinforced with silica nanoparticles. **Journal of Reinforced Plastics and Composites, 35**(19): 1401–1410.
54. Bendsøe, M. P., Kikuchi, N., 1988. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 71**(2): 197–224.
55. Garcia-Granada, A. A., Catafal-Pedragosa, J., Lemu, H. G., 2019. *Topology optimization through stiffness/weight ratio analysis for a three-point bending test of additive manufactured parts*. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 700**: 012012.
56. ASTM D790 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.

57. ESİM, E., BENZER, E., 2022. Power unit design of industrial sponge crushing machine and vibration analysis by finite element method. **Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11**(4): 1154–1162.

58. Isaincu, A., Dan, M., Ungureanu, V., Marşavina, L., 2021. Numerical investigation on the influence of fiber orientation mapping procedure to the mechanical response of short-fiber reinforced composites using Moldflow, **Digimat and Ansys software. Materials Today: Proceedings, 45**: 4304–4309.

59. Choi, J. H., Yang, J., Jang, J., Pang, H., Cho, J. M., Yu, W. R., 2024. Pseudograin decomposition of short fiber-reinforced plastics for two-step homogenization using machine learning approach. **Composite Structures, 338**: 118022.

60. Micota, D., Isaincu, A., Marsavina, L., 2021. Micromechanical modeling of glass fiber reinforced plastic material. Materials Today: **Proceedings, 45**: 4330–4336.

61. Yang, Z., Fu, K., Zhang, Z., Zhang, J., Li, Y., 2022. Topology optimization of 3D-printed continuous fiber-reinforced composites considering manufacturability. **Composites Science and Technology, 230**(P1): 109727.

62. Caminero, M. A., Rodríguez, G. P., Muñoz, V., 2016. Effect of stacking sequence on Charpy impact and flexural damage behavior of composite laminates. **Composite Structures, 136**: 345–357.

63. Montazeri, A., Bahmanpour, E., Safarabadi, M., 2023. Three-Point Bending Behavior of Foam-Filled Conventional and Auxetic 3D-Printed Honeycombs. **Advanced Engineering Materials, 25**: 1–13.

64. Peng, Y., Wu, Y., Li, S., Wang, K., Yao, S., Liu, Z., Garmestani, H., 2020. Tailorable rigidity and energy-absorption capability of 3D printed continuous carbon fiber reinforced polyamide composites. **Composites Science and Technology, 199**(July): 108337.

65. Mahmoudi, S., Kervoelen, A., Robin, G., Duigou, L., Daya, E. M., Cadou, J. M., 2019. Experimental and numerical investigation of the damping of flax–epoxy composite plates. **Composite Structures, 208**: 426–433.

66. Joshi, R., Duggal, S. K., 2020. Free vibration analysis of laminated composite plates during progressive failure. **European Journal of Mechanics, A/Solids, 83**: 104041.

67. Apalak, K. M., Ekici, R., Yildirim, M., Erkaya, S., 2009. Determination of structural damping and optimal vibration control of an adhesively-bonded double

containment cantilever joint. **Journal of Adhesion Science and Technology, 23**: 339–359.

68. Elvas, A., Sohouli, A., Suleman, A., 2022. Simultaneous topology and fiber path optimization of composite structures with MAC constraints. **Composite Structures, 294**(February): 115645.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Erkan YILMAZ
Uyruğu: Türkiye (T.C)
Doğum Tarihi ve Yeri:
Medeni Durum:
e-mail:
Yazışma Adresi:

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi	2010
Lisans	Erciyes Üniversitesi	2007

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2013-Halen	Erciyes Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Sezer, T., Esim, E., Yılmaz, E., 2024. Trueness of intraoral scanners in different scan patterns for full-arch digital implant impressions. **The Journal of Oral Implantology, 50(4)**: 426-430.
2. Yılmaz, E., Sinanoğlu C., Topal, E., S., 2014. Experimental analyses of the effects of slipper bearing geometry and working conditions on the system load carrying capacity in axial piston pumps. **Journal of the Balkan Tribological Association, 20(4):** 247-258.

3. Yasan, Ö., B., Göçer, A., Yılmaz, E., (2022). Investigation of mechanical properties of fdm materials produced with sio2 reinforced pla filaments. **Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences, 9(22)**: 104-112