



**EĞRİSEL KİRİŞLERLE TAKVİYE EDİLMİŞ KOMPOZİT PANELLERİN
YAPISAL DAVRANIŞLARININ MODELLENMESİ, ANALİZİ VE
OPTİMİZASYONU**

Ege ÖZARSLAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ege ÖZARSLAN

20/06/2025

EĞRİSEL KİRİŞLERLE TAKVİYE EDİLMİŞ KOMPOZİT PANELLERİN YAPISAL
DAVRANIŞLARININ MODELLENMESİ, ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU
(Yüksek Lisans Tezi)

Ege ÖZARSLAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2025

ÖZET

Bu tez çalışması, Otomatik Elyaf Yerleştirme (Automated Fiber Placement - AFP) teknolojisinin üretim kısıtları dikkate alınarak, eğrisel kirişlerle takviye edilmiş kompozit panellerin burkulma ve dinamik davranışlarını incelemektedir. Üç boyutlu geometrinin etkili bir şekilde temsil edilmesini sağlayan, değişken kalınlıklara sahip kabuk elemanlarına dayalı özgün bir modelleme yaklaşımı geliştirilmiştir. ANSYS APDL ve Python betiklerinin entegrasyonu ile oluşturulan sayısal analiz altyapısı, tam otomatik ve yüksek hassasiyetli simülasyonlar gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Çalışma kapsamında, kiriş eğriliği ve yüksekliğinin yapısal performans üzerindeki etkileri sistematik olarak analiz edilmiştir. İlk olarak, farklı sınır koşulları altında eğrilik parametrelerinin (x_m ve x_e) doğal frekans ve kritik burkulma yükü üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla parametrik bir çalışma yürütülmüştür. Elde edilen sonuçlar, eğrisel kirişlerin doğrusal referans durumuna kıyasla mekanik performansta kayda değer değişikliklere olanak tanıdığını göstermektedir. Özellikle, kirişlerin yüksek deformasyon bölgelerine yakın konumlandırılmasının yapısal performansı önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Beş farklı tasarım senaryosu üzerinden çok amaçlı bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiş; bu kapsamda eğrilik ve yükseklik parametrelerinin çeşitli kombinasyonları değerlendirilerek burkulma kapasitesi, eşdeğer rijitlik ve toplam kütle aynı anda iyileştirilmeye çalışılmıştır. Eğrilik parametreleri performans artışına orta düzeyde katkı sağlamakla birlikte, katılık/ağırlık oranının hassas şekilde ayarlanabilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Duyarlılık analizleri, bu parametreler arasında ödünlüşim ilişkisi bulunduğunu doğrulamakta ve entegre geometrik optimizasyon gerekliliğini ortaya koymaktadır. Geliştirilen tasarım ve modelleme metodolojisi, AFP ile uyumlu ileri düzey kompozit yapıların tasarımı için yüksek doğrulukta ve hesaplama açısından verimli bir araç sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, eğrisel kirişlerin, kütle verimliliği koşullarını sağlarken üstün mekanik performans elde etmede önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymakta ve havacılık ile yüksek performanslı yapısal uygulamalara yönelik değerli katkılar sunmaktadır.

Bilim Kodu : 91417
Anahtar Kelimeler : Eğrisel kirişler, değişken katılık, kompozit plakalar
Sayfa Adedi : 95
Danışman : Doç. Dr. Tunç APATAY
İkinci Danışman : Dr. Onur COŞKUN

MODELING, ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF
CURVILINEARLY STIFFENED COMPOSITE PANELS

(M. Sc. Thesis)

Ege ÖZARSLAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2025

ABSTRACT

This thesis investigates the buckling and dynamic behavior of composite panels reinforced with curvilinear stiffeners, considering the manufacturing constraints of Automated Fiber Placement (AFP) technology. A novel modeling approach based on shell elements with variable thickness is developed to generate an efficient representation of the three-dimensional geometry. The numerical framework, built through the integration of ANSYS APDL and Python scripting, enables fully automated and high-accuracy simulations. The effect of stiffener curvature and height on structural performance is systematically analyzed. First, a parametric study is conducted to evaluate the influence of curvature parameters (x_m and x_e) on the natural frequencies and critical buckling loads of the panels under different boundary conditions. Results show that curvilinear stiffeners can alter mechanical performance significantly compared to the straight stiffener baseline. It is also observed that the stiffener location, especially near high-deformation regions, significantly impacts mechanical performance. A multi-objective optimization study is conducted through five design cases, evaluating combinations of curvature and height parameters to simultaneously improve buckling capacity, equivalent stiffness, and total mass. Curvature parameters contribute moderately to performance gains but are essential for fine-tuning stiffness-to-weight balance. Sensitivity analysis confirms the trade-off nature of these parameters, reinforcing the need for integrated geometric optimization. The proposed design and modeling methodology provides a high-fidelity yet computationally efficient tool for designing AFP-compatible advanced composite structures. The results underline the potential of curvilinear stiffeners in achieving superior mechanical performance while satisfying mass-efficiency constraints, offering valuable insights for aerospace and high-performance structural applications.

Science Code : 91417
Key Words : Curvilinear stiffeners, variable stiffness, composite plates
Page Number : 95
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Tunç APATAY
Co-Supervisor : Dr. Onur COŞKUN

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aőamasında bilgi, deneyim ve desteğini esirgemeyen, yol gosterici katkılarıyla tezimin őekillenmesine büyük katkı sağlayan değerli danıőmanım Dr. Onur COŞKUN'a en içten teőekkürlerimi sunarım.

Yapıcı geri bildirimleri ve araőtırmalarımaya sağladığı çok yönlü katkılarla sürece değer katan Doç. Dr. Tunç APATAY'a teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Bu süreçte her zaman yanımda olan aileme ve yakın arkadaőlarımaya verdikleri destek ve sabır için gönülden teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. KOMPOZİT LAMİNANT TEORİSİ.....	9
3.1. Değişken Katılık Değerine Sahip Kompozit Plakaların Teorisi.....	9
3.1.1. Sabit ve değişken katılık değerine sahip kompozit plakalar.....	9
3.1.2. Tasarım yaklaşımları.....	10
3.1.3. Elyaf yollarının tanımlanması	13
3.2. Eğrisel Kirişlerle Güçlendirilmiş Kompozit Plakaların Teorisi	15
3.2.1. Doğrusal ve eğrisel kirişler.....	15
3.2.2. Eğrisel kiriş yollarının tanımlanması.....	16
3.3. Klasik Plaka Teorisi	18
3.3.1. Birinci dereceden kayma deformasyonu teorisi.....	19
3.3.2. Doğrusal ve eğrisel laminatların malzeme davranışı.....	20
3.3.3. Eğrisel laminat malzeme ilişkileri	22
4. AFP MAKİNELERİ VE ÜRETİM SÜRECİ.....	25
5. SAYISAL MODELLEME.....	29

	Sayfa
5.1. FE Modülü ve İş Akışı	29
5.2. Değişken Katılık Değerine Sahip Kompozit Plakaların Modellenmesi.....	30
5.2.1. Doğrulama çalışması	33
5.3. Eğrisel Kirişlerle Takviye Edilmiş Kompozit Plakaların Modellenmesi	35
5.3.1. Geometri parametrizasyonu	35
5.3.2. Kabuk elemanları ile modelleme	36
5.3.3. Doğrulama çalışmaları.....	38
5.4. Ağ Yakınsama Çalışması.....	44
6. YÜKLEME KOŞULLARI VE ÖNEMLİ PARAMETRELERİN ETKİLERİ.....	47
6.1. Eğrisel Kirişlerle Güçlendirilmiş Kompozit Plakaların Serbest Titreşim Analizi.....	47
6.1.1. Eğrilik parametresinin etkisi - orta nokta	48
6.1.2. Eğrilik parametresinin etkisi - uç noktalar	53
6.2. Eğrisel Kirişlerle Güçlendirilmiş Kompozit Plakaların Burkulma Analizi	56
6.2.1. Eğrilik parametresinin etkisi - orta nokta	57
6.2.2. Eğrilik Parametresinin etkisi - uç noktalar	60
7. OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI	63
7.1. Optimizasyon Çalışması - I.....	64
7.2. Optimizasyon Çalışması - II	68
7.3. Optimizasyon Çalışması - III.....	71
7.4. Optimizasyon Çalışması - IV.....	74
7.5. Optimizasyon Çalışması - V	78
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	87
KAYNAKLAR	91

ÖZGEÇMİŞ..... 95



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Değişken katıllıklı kompozit laminatın malzeme özellikleri	33
Çizelge 5.2. Antunes tarafından raporlanan CFFF plakası için teorik doğal frekans sonuçları ile mevcut modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	34
Çizelge 5.3. AS4/3501-6'nın Malzeme özellikleri	39
Çizelge 5.4. Lee tarafından raporlanan ve mevcut çalışmada elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması	40
Çizelge 5.5. T300/5208 grafit-epoksi malzeme özellikleri.....	41
Çizelge 5.6. Zhao ve mevcut çalışma tarafından raporlanan normalleştirilmiş burkulma yüklerinin karşılaştırması	43
Çizelge 5.7. Ağ yakınsama çalışması sonuçları	45
Çizelge 6.1. Farklı sınır koşulları için eğrilik parametreleri ile doğal frekans değişimi.....	51
Çizelge 6.2. Farklı sınır koşulları için eğrilik parametreleri ile doğal frekans değişimi.	54
Çizelge 6.3. Farklı sınır koşulları için eğrilik parametreleri ile burulma yüklerinin değişimi.....	58
Çizelge 6.4. Farklı sınır koşulları için eğrilik parametreleri ile burulma yüklerinin değişimi.....	60
Çizelge 7.1. Optimizasyon çalışması – I için elde edilen optimum tasarım noktaları ve optimizasyon sonuçları	65
Çizelge 7.2. Optimizasyon çalışması – I için GA metodunda ikame modelinde kullanılan genom üyeleri.....	67
Çizelge 7.3. Optimizasyon çalışması – II için elde edilen optimum tasarım noktaları ve optimizasyon sonuçları	68
Çizelge 7.4. Optimizasyon çalışması – II için GA metodunda ikame modelinde kullanılan genom üyeleri.....	70
Çizelge 7.5. Optimizasyon çalışması – III için elde edilen optimum tasarım noktaları ve optimizasyon sonuçları	71

Çizelge	Sayfa
Çizelge 7.6. Optimizasyon çalışması – III için GA metodunda ikame modelinde kullanılan genom üyeleri.....	73
Çizelge 7.7. Optimizasyon çalışması – IV için elde edilen optimum tasarım noktaları ve optimizasyon sonuçları	74
Çizelge 7.8. Optimizasyon çalışması – IV için GA metodunda ikame modelinde kullanılan genom üyeleri.....	76
Çizelge 7.9. Optimizasyon çalışması – V için elde edilen optimum tasarım noktaları ve optimizasyon sonuçları	78
Çizelge 7.10. Optimizasyon çalışması – V için GA metodunda ikame modelinde kullanılan genom üyeleri.....	83

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Ayırık ve Sürekli değişken katılığa sahip kompozit plakaların şematik gösterimleri	9
Şekil 3.2. Optimal değişken katılığa sahip laminatlar	11
Şekil 3.3. Farklı ağ boyutlarına bağlı olarak kompozit laminatlar için optimum açı dağılımları	12
Şekil 3.4. Eğrisel fiber yolu tanımı	13
Şekil 3.5. Sürekli Kuadratik Bézier eğrisi	15
Şekil 3.6. Doğrusal ve eğrisel kirişlerle yönelimine sahip kompozit paneller.....	16
Şekil 3.7. LAV yöntemi ile tanımlanan eğrisel kiriş yolları	17
Şekil 3.8. Kiriş yolunun parametrize edilmesi ile eğrisel kiriş tasarımı şeması	17
Şekil 3.9. Bézier formülasyonu ve Abaqus spline aracı kullanılarak üç kontrol noktası ile kiriş eğrisi modellemesi.....	18
Şekil 3.10. FSDT için deformasyona uğramamış ve deformasyona uğramış plaka geometrileri	20
Şekil 3.11. Gerilme ve moment bileşenleri ile laminat konfigürasyonu.....	23
Şekil 4.1. Robotik kol tipine sahip AFP makinesi	25
Şekil 4.2. Tipik bir AFP makine başlığının basitleştirilmiş versiyonu	26
Şekil 4.3. Referans güzergahın temsili	26
Şekil 4.4. Bindirme alanı ve oluşan boşluklar	27
Şekil 5.1. FE modelleme iş akışı şeması.....	30
Şekil 5.2. Başlangıç serim yolu, başlangıç serimi ve kaydırılmış sonraki serimlerin temsili	31
Şekil 5.3. Dokuz şerit ile kaplanmış laminat ve her bir şerit yolunu simüle eden noktalar kümesi.....	32
Şekil 5.4. Doğrulama çalışmasından elde edilen sınır koşulları	33

Şekil	Sayfa
Şekil 5.5. Python ve APDL tarafından oluşturulan değişken katınlıklı kompozit laminat modelleri	34
Şekil 5.6. Plaka üzerindeki eğrisel kiriş geometrisi şeması	36
Şekil 5.7. Kiriş şerit yollarını simüle eden noktalar ile örülmüş kompozit laminat	36
Şekil 5.8. Plaka üzerine serilen kirişlerin, serim açısı değerlerinin python kodu ile çizdirilmesi.....	37
Şekil 5.9. Ağ oluşturma bölgelerine ayrılmış kompozit plaka modeli	37
Şekil 5.10. Eğrisel kirişlerle takviye edilmiş kompozit laminatın ağ yapısı ve kabuk elemanları ile oluşturulan üç boyutlu APDL modeli.....	38
Şekil 5.11. Çapraz katmanlı (cross-ply) kiriş içeren anizotropik plaka.....	39
Şekil 5.12. Plakanın Yük ve Sınır Koşulları ile Enine Kesiti	41
Şekil 5.13. Plaka üzerine serilen kirişlerin, serim açısı değerlerinin python betiği ve APDL betiği ile çizdirilmesi	42
Şekil 5.14. Zhao ve arkadaşları tarafından raporlanan burkulma modu şekilleri ile mevcut çalışmanın karşılaştırması	43
Şekil 6.1. Kompozit plakanın boyutları ve kesit görünümü	48
Şekil 6.2. Eğrilik parametreleri ile oluşturulmuş eğrisel kiriş yolunun temsili gösterimi	49
Şekil 6.3. Orta nokta eğrilik parametresi değişimine göre dört farklı durumun kontur grafiği	50
Şekil 6.4. Modal analiz ve optimizasyon için kompozit plaka sınır koşulları	51
Şekil 6.5. Farklı sınır koşulları ve eğrilik parametresi x_m ile birinci mod şekillerinin değişimi.....	52
Şekil 6.6. Eğrilik parametreleri ile oluşturulmuş eğrisel kiriş yolunun emsilit gösterimi	53
Şekil 6.7. Uç noktalar eğrilik parametresi değişimine göre dört farklı durumun kontur grafiği	54
Şekil 6.8. Farklı sınır koşulları ve eğrilik parametresi x_e ile birinci burkulma mod şekillerinin değişimi.....	65

Şekil	Sayfa
Şekil 6.9. Farklı sınır koşulları ve eğrilik parametreleri için normalize doğal frekans değerleri.....	56
Şekil 6.10. Burkulma analizi ve optimizasyonu için kompozit plaka sınır koşulları	56
Şekil 6.11. Farklı sınır koşulları ve eğrilik parametresi x_m ile birinci burkulma mod şekillerinin değişimi.....	59
Şekil 6.12. Farklı sınır koşulları ve eğrilik parametresi x_e ile birinci burkulma mod şekillerinin değişimi.....	61
Şekil 6.13. Farklı sınır koşulları ve eğrilik parametreleri için normalize burkulma değerleri	62
Şekil 7.1. Optimizasyon şeması.....	64
Şekil 7.2. Optimizasyon çalışması – I için yanıt yüzeyleri.....	66
Şekil 7.3. Optimizasyon çalışması – I için girdi ve çıktı parametrelerinin hassasiyet analizi.....	66
Şekil 7.4. Optimizasyon çalışması – I sonucu elde edilen optimum geometri	67
Şekil 7.5. Optimizasyon çalışması – II için yanıt yüzeyleri	69
Şekil 7.6. Optimizasyon çalışması – II sonucu elde edilen optimum geometri.....	69
Şekil 7.7. Optimizasyon çalışması – II için girdi ve çıktı parametrelerinin hassasiyet analizi.....	70
Şekil 7.8. Optimizasyon çalışması – III için yanıt yüzeyleri	71
Şekil 7.9. Optimizasyon çalışması – III için girdi ve çıktı parametrelerinin hassasiyet analizi.....	72
Şekil 7.10. Optimizasyon çalışması – III sonucu elde edilen optimum geometri.....	72
Şekil 7.11. Optimizasyon çalışması – IV sonucu elde edilen optimum geometri	75
Şekil 7.12. Optimizasyon çalışması – IV için yanıt yüzeyleri.....	75
Şekil 7.13. Optimizasyon çalışması – IV için girdi ve çıktı parametrelerinin hassasiyet analizi.....	76
Şekil 7.14. Optimizasyon çalışması – V için girdi ve çıktı parametrelerinin hassasiyet analizi.....	79
Şekil 7.15. Optimizasyon çalışması – V için yanıt yüzeyleri	80

Şekil	Sayfa
Şekil 7.16. Optimizasyon çalışması – V için yanıt yüzeyleri	81
Şekil 7.17. Optimizasyon çalışması – V için yanıt yüzeyleri	82
Şekil 7.18. Optimizasyon çalışması V sonucu elde edilen optimum geometri.....	83



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

θ	Fiber açısı
T_0	Plakanın orta nokta fiber açısı
T_1	Plakaya giriş fiber açısı
a	Katman uzunluğu
\emptyset	Normalin enine dönme değeri
P_i	Bézier kontrol noktaları
E	Elastisite Modülü
G	Kayma Modülü
u	X doğrultusundaki yer değiştirme
v	Y doğrultusundaki yer değiştirme
w	Z doğrultusundaki yer değiştirme
ϵ	Normal gerinim
γ	Kayma gerinimi
σ	Normal gerilme
τ	Kayma gerilmesi
ν_{ij}	Possion oranı
\bar{Q}	Katılık matrisi
N_i	Gerilme bileşeni
M_{ij}	Moment bileşeni
D_{ij}	Kayma Modülü
A_{ij}	Uzama katılığı
B_{ij}	Eğilme uzama katılığı
D_{ij}	Eğilme katılığı
mm	Milimetre
Hz	Hertz
GPa	Gigapascal

Simgeler ρ h_s t_s x_m x_e **Açıklamalar**

Yoğunluk

Kiriş yüksekliği

Plaka kalınlığı

Orta nokta eğrilik parametresi

Uç noktalar eğrilik parametresi

Kısaltmalar**Açıklamalar****APDL**

Ansys Parametric Design Language

AFP

Automated Fiber Placement

AGS

Advanced Grid Stiffened

CLT

Classical Lamination Theory

CLPT

Classical Lamination Plate Theory

CCCC

Sabit Mesnetli

DFAP

Discrete Fiber Angle Parameterization

DSM

Direct Stiffness Modeling

DFPP

Direct Fiber Path Parameterization

EFG

Element-Free Galerkin

FSDT

First-Order Shear Deformation Theory

FPF

First Ply Failure

GA

Genetic Aggregation

LAV

Linear Angle Variation

MLS

Moving Least Squares

MOGA

Multiobjective Genetic Algorithm

NAV

Nonlinear Angle Variation

NURBS

Non-Uniform Rational B-Splines

NURBS

Non-Uniform Rational B-Splines

NSGA-II

Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II

OSF

Optimal Space Filling

OTN

Optimum tasarım noktası

SSSS

Basit Mesnetli

Kısaltmalar**Açıklamalar****VS**

Variable Stiffness

VSL

Variable Stiffness Laminates

VSP

Variable Stiffness Panels



1. GİRİŞ

Arka plan ve motivasyon

Havacılık sektöründe ağırlığın minimize edilmesi büyük bir öneme sahiptir. Ağırlığın azaltılması, yakıt tüketimini düşürerek uçakların taşıma kapasitesini artırır ve menzilin uzatır. Bu gereklilik, havacılık endüstrisini kompozit malzemeler gibi daha hafif ve daha dayanıklı yapısal çözümler geliştirmeye teşvik etmektedir. Kompozit malzemeler, uçak yapı elemanlarında özellikle gövde ve kanat tasarımlarında yaygın şekilde kullanılmakta olup, yüksek özgül rijitlik/ağırlık oranı ve yüksek dayanım/ağırlık oranı gibi üstün performans özellikleri sayesinde önemli avantajlar sunmaktadır. Geleneksel kompozit laminatlar, düz fiberlerden oluşan katmanlardan üretilir. Fiberlerin yönlendirilmesi ve katman sayısının ayarlanmasıyla mekanik özellikler optimize edilebilir. Benzer şekilde, yapısal performansı artırmak amacıyla kiriş takviyeleri kullanılmaktadır. Genellikle doğrusal bir geometriye sahip olan kirişlerin sayıları ve yerleşim şekilleri değiştirilerek plakanın mekanik özelliklerini arttırabilir.

Son yıllarda, kompozit üretiminde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Kompozitlerin entegre yapısal montajı, vakum destekli reçine transfer kalıplama, Pi-birleştirme, AFP gibi geliştirilen üretim yöntemleri alışılmadık karmaşık şekilli kompozit yapıların daha hafif ve çevre dostu şekilde üretilebilmesini mümkün kılmıştır. Bu yenilikçi üretim teknolojileri, yeni nesil analiz ve tasarım araçlarının geliştirilmesini ve bu teknolojilerle üretilen takviyeli kompozit panellerin tasarımı için mühendislik çalışmalarını gerekli kılmıştır. Yaygın metotlardan biri olan Otomatik Fiber Yerleştirme (Automated Fiber Placement - AFP) teknolojisi, fiberlerin eğrisel (curvilinear) desenlerde yerleştirilmesine olanak tanıyarak, değişken katılığa sahip kompozit plakaların (VSL - Variable Stiffness Laminates) üretilmesini mümkün kılmaktadır. AFP süreci ayrıca kompozit panellerin eğrisel kirişlerle güçlendirilmesine de imkan tanır. Fiber ve kirişlerin yönlendirilerek yerleştirilmesi, kompozit plakaların mekanik özelliklerinin optimize edilmesini sağlayarak daha yüksek performans sunan yapılar oluşturulmasını mümkün kılar.

Eğrisel kirişler, destekler veya kaburgalar uçak tasarımında daha gelişmiş bir tasarım alanı sunarak yapısal performansta iyileşme sağlarlar. Ek olarak geometrik eğrilikleri sayesinde

yerleşim ve yönlendirme kriterlerine bağlı olarak yapının ağırlığını azaltılmasına da katkı sağlamaktadır. Gövde ve kanat panellerinde oluşan karmaşık gerilme dağılımları uygulanan sınır koşullarına bağlı olarak panelleri zayıflatabilir veya sertleştirebilir. Yerel burkulma, panel çarpınmasının sebep olduğu titreşim genliğinde artış gibi olgular, düzlem içi gerilmelerin panel rijitliğinde büyük bir azalmaya yol açabilir. Bu nedenle burkulma ve titreşim tepkileri uçağın yapısal parçalarının tasarımında kritik bir öneme sahiptir. Eğrisel kirişlerin potansiyel performans katkıları kullanılarak, yapının titreşim ve burkulma davranışında iyileşme sağlanabilir. Bu iyileşme, mod artırılması, titreşim ve burkulma mod şekillerinin belirli amaçlara göre yönlendirilmesi ve çeşitli düzlemsel yüklemeler altında burkulma yükünün yükseltilmesi yoluyla elde edilebilir.

Bu tez çalışması, eğrisel kirişlerle güçlendirilmiş kompozit panellerin burkulma performansına etkisini, geleneksel doğrusal kirişlerle güçlendirilmiş kompozit laminatlarla karşılaştırmalı olarak değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, yapıların doğal frekans tepkisi, toplam katılık ve ağırlık üzerindeki etkileri de ele alınmıştır.

Tezin amacı ve yaklaşımı

Literatürdeki çalışmaların büyük çoğunluğu doğrusal kirişli kompozit plakalar üzerine yoğunlaşırken, az sayıda çalışma eğrisel kirişli kompozit plakaları ele almaktadır. Ek olarak literatürdeki eğrisel kirişli kompozit çalışmalarında kiriş yüzeylerinin plakaya bağlanması için sonlu eleman analizi (FEA – Finite Element Analysis) programlarındaki hazır bağlantı komutları kullanılarak bitişik düğüm noktaları sonradan birleştirilir. Ancak bu modelleme yöntemi kompozit plakanın ve kirişlerin ayrı ayrı üretilip sonradan yapıştırılması veya dikilmesi gibi mekanik bağlama yöntemleri içeren üretim metotlarına uygundur ve analiz çözüm süresi olarak dezavantaj sağlamaktadır. Bu tez kompozit plaka ve kiriş panellerinin eş zamanda üretilmesiyle oluşturulan bir yapının simüle edilmesini amaçlamıştır. Değişken kalınlığa sahip kabuk elemanları kullanılarak modelleme gerçekleştirildiği için bağlantı komutlarına gerek kalmamıştır ve çözüm süresi azaltılmıştır. Önerilen tasarım metodolojisinde, AFP teknolojisi sayesinde kirişler artık plaka üzerine katman katman serilerek üretilebilecektir. Bu yöntemle, üretim sürecinin daha verimli hale getirmesi ve hassasiyetinin artması öngörülmektedir.

Tezin kapsamı

Bu tez, farklı yükleme ve sınır koşullarına maruz kalan kirişlerle güçlendirilmiş kompozit plakaların burkulma davranışını incelemektedir. Ayrıca, plakaların doğal frekans tepkisi, katılık ve toplam kütle değişimi gibi parametreler de analiz edilmektedir. Önerilen metodoloji ve optimizasyon sürecinin doğrulanması için literatürdeki test çalışmalarından faydalanılmıştır. Optimizasyon döngüleri, burkulma yükü açısından en uygun konfigürasyonları belirlemek amacıyla gerçekleştirilmektedir. Modelleme, simülasyon ve analizler ANSYS Mechanical APDL kullanılarak yapılmış olup, sürecin daha verimli hale getirilmesi için Python betik dili ile entegre edilmiştir ve hızlı bir şekilde çözüm alınmasını mümkün kılınmıştır.

Tezin içeriği

Bölüm 1: Bu bölümde, değişken katınlıklı kompozit yapıların mühendislikteki yeri, eğrisel kirişlerin yapısal avantajları ve AFP teknolojisinin sunduğu üretim esnekliği tanıtılmış; çalışmanın amacı, kapsamı ve önemi vurgulanmıştır.

Bölüm 2: Değişken katılık prensibiyle tasarlanmış laminat yapılar ve eğrisel kiriş takviyeli kompozit plakalar üzerine yapılmış mevcut araştırmalar analiz edilmiştir. Bu kapsamda, önceki çalışmaların yöntemleri, bulguları ve kısıtları değerlendirilmiştir.

Bölüm 3: Kompozit malzemelerin mekanik davranışları teorik olarak ele alınmış, değişken katınlıklı laminatların yönlendirme stratejileri ve teorik altyapısı sunulmuştur. Ayrıca, Klasik Laminat Teorisi ve Birinci Dereceden Kayma Deformasyonu Teorisi detaylandırılmıştır.

Bölüm 4: Otomatik Elyaf Yerleştirme (AFP) teknolojisinin çalışma prensipleri, üretim sınırları, minimum eğrilik yarıçapı ve üretim sırasında oluşabilecek kusurlar ele alınmış; bu teknolojinin modelleme üzerindeki etkileri açıklanmıştır.

Bölüm 5: Kompozit plaka ve kirişlerin sayısal olarak modellenmesi, kabuk elemanlarla geometrinin temsil edilmesi, ANSYS APDL ve Python entegrasyonu ile oluşturulan otomatik analiz altyapısı ve doğrulama çalışmaları sunulmuştur.

Bölüm 6: Eğrilik parametrelerinin doğal frekanslar ve burkulma yükleri üzerindeki etkileri farklı sınır koşulları altında sistematik olarak değerlendirilmiştir. Yapısal tepkiler üzerinde geometrik parametrelerin etkileri ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir.

Bölüm 7: Beş farklı senaryo altında çok amaçlı optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiş; burkulma yükü, katılık ve toplam kütle arasında denge kuran optimum tasarım konfigürasyonları elde edilmiştir. Ayrıca duyarlılık analizleri ile tasarım parametrelerinin etkileri karşılaştırılmıştır.

Bölüm 8: Tez boyunca elde edilen bulgular özetlenmiş; eğrisel kirişli, değişken katınlıklı kompozit yapıların performans potansiyeli değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde yer alan çalışmalarda, değişken ve sabit katılıktaki kompozit plakaların mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmalarda mekanik performansı artırmak amacıyla kompozit plaka tasarımlarına sıklıkla kirişler entegre edilmektedir. Doğrusal kirişli geleneksel tasarımlara odaklanan araştırmalar önemli bir yer tutarken, eğrisel kirişler üzerine yapılan çalışmalar nispeten sınırlıdır. Bu bölüm, kiriş içeren kompozit plakalar ve değişken katınlıklı kompozit laminatlar üzerine yapılan araştırmaları kapsayan bir literatür incelemesi sunmaktadır.

Literatürde, eğrisel kirişlerle takviye edilmiş kompozit yapıların burkulma ve titreşim davranışlarını analiz etmeye yönelik birçok önemli çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, hem gelişmiş sayısal modelleme teknikleri hem de üretim kısıtlarının dikkate alındığı uygulamalı yaklaşımlarla literatüre katkı sağlamaktadır. Zhao ve Kapania [1], çeşitli düzlem içi yüklemelere maruz kalan ön gerilmeli eğrisel kirişli panellerin titreşim modlarını analiz etmek üzere, kiriş düğümlerini plaka düğümleriyle hizalama zorunluluğu olmadan çözüm sunabilen etkili bir sonlu eleman yöntemi geliştirmiştir. Birinci dereceden kayma deformasyonu teorisine dayanan bu model, tasarım sürecine hem esneklik hem de hassasiyet kazandırmakta ve kiriş şeklinin temel frekansa olan etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Arranz ve arkadaşları [2], AFP teknolojisinin üretim kısıtlarını göz önünde bulundurarak, eğrisel elyaf yollarının ve grid kiriş tasarımlarının burkulma performansına olan etkilerini araştırmış, ayrıca üretim esnasında oluşan boşlukların VS laminatlarda burkulma davranışını nasıl etkilediğini deneysel olarak incelemiştir. Bu çalışmada, eğrisel kirişlerin doğru konumlandırılmasıyla üretim kusurlarının etkisinin azaltılabileceği gösterilmiştir. Tamijani ve Rakesh [3] ise, ağsız (mesh-free) bir yöntem olan Element-Free Galerkin (EFG) tekniğini kullanarak, rastgele yerleştirilmiş eğrisel kirişlerin analizini gerçekleştirmiş ve bu yöntemin, klasik FEM'e göre kiriş tasarımında yeniden ağ oluşturmaya ihtiyaç bırakmaması açısından önemli avantajlar sağladığını ortaya koymuştur. Aynı zamanda, elde edilen sonuçların hem literatürdeki bulgularla hem de ANSYS simülasyonlarıyla yüksek oranda uyumlu olduğu gösterilmiştir. Lee ve Lee [4], eksantrik yerleştirilmiş eğrisel kirişler içeren anizotropik kompozit plakaların doğal frekans ve mod şekillerini analiz etmiş; farklı kiriş boyutlarının ve yerleşimlerinin, plakaların dinamik davranışlarını nasıl etkilediğini sistematik biçimde ortaya koymuştur. Özellikle çift kirişli yapıların, CFCF sınır koşulları altında merkez

hattının yaklaşık %60 uzağına yerleştirildiğinde optimum frekans davranışı sergilediği görülmüştür. Coşkun [5] ise, AGS (Advanced Grid Stiffened) paneller üzerinde yürüttüğü çalışmada, kiriş konfigürasyonu ve malzeme kullanımının panel burkulma dayanımı üzerindeki etkilerini optimize etmiş ve VARTM yöntemiyle bu yapıların düşük maliyetli üretimini mümkün kılmıştır. Rikards ve arkadaşları [6], lamine kompozit kirişli kabukların titreşim ve burkulma analizini gerçekleştirmiş ve üçgen sonlu elemanlar ile birleştirilen Eşdeğer Katman Kabuk Teorisi'ne dayanan modellerinde hem kiriş hem de kabuk elemanları için yer değiştirme ve dönme sürekliliğini koruyarak yüksek doğrulukta çözümler elde etmişlerdir. Olson ve Hazell [7], düşük en-boy oranına sahip kiriş takviyeli plakaların titreşim karakteristiklerini, gelişmiş FEM modellemesi ile Gerçek Zamanlı Holografik Enterferometri tekniğini birleştirerek incelemiş ve özellikle doğal frekans ve mod şekillerinin görsel olarak analiz edilmesinde önemli deneysel katkılar sunmuştur. Alhajahmad ve Mittelstedt [8], değişken katınlıklı silindirik panellerde eğrisel grid kiriş kullanımının, doğrusal kirişli yapılara kıyasla burkulma yükünü %100'e kadar artırabildiğini göstermiştir. Bu analizlerde Python ve Abaqus tabanlı simülasyonlar bir arada kullanılmış ve AFP üretim kısıtları da dikkate alınarak optimize edilen kiriş geometrilerinin performansa katkısı değerlendirilmiştir. Liu ve diğerleri [9], eğrisel kiriş yolları ve düzgün olmayan kiriş dağılımı üzerine odaklanmış ve bu stratejilerin burkulma direnci üzerinde %73'e varan iyileşmelere yol açtığını tespit etmiştir. Ayrıca, kiriş profillerinde değişken kalınlık ve yükseklik gibi parametrelerin, rijitlik ve yük taşıma kapasitesi üzerinde belirgin etkileri olduğu gösterilmiştir. Son olarak Standford ve Jutte [10], kanat kutusu yapılarında (wingbox) eğrisel kirişlerin ve fiber yönlendirmeli laminatların aeroelastik performansını analiz etmiş; bu bileşenlerin birlikte optimize edilmesiyle %11.4'e varan kütle tasarrufu sağlanabileceğini ortaya koymuştur. Genel olarak tüm bu çalışmalar, eğrisel kirişlerin geometrik uyarlanabilirliğinin, üretim teknolojileriyle entegre edilebilirliğinin ve optimizasyon süreçlerine sunduğu esnekliğin, bu yapıların hem titreşim hem de burkulma performanslarını anlamlı düzeyde iyileştirebildiğini göstermektedir. Böylece, geleneksel doğrusal kirişli tasarımlara kıyasla daha hafif, daha rijit ve daha dayanıklı yapılar tasarlamak mümkün hale gelmektedir.

Değişken katılık değerine sahip kompozit plakalar (Variable Stiffness Laminates – VSL) üzerine yapılan araştırmalar, hem akademik hem de endüstriyel düzeyde artan bir ilgiyle takip edilmekte ve bu yapıların hafiflik, burkulma dayanımı ve titreşim performansı açısından sunduğu avantajlar detaylı biçimde incelenmektedir. Bu kapsamda yürütülen öncü

çalışmalardan biri olan Coşkun [11], üretilebilir eğrisel elyaf yolları ile donatılmış kompozit plakalar ve silindirik kabuklar için çok aşamalı bir optimizasyon süreci geliştirmiştir. Bu süreçte parametrik Bézier eğrileri kullanılarak tanımlanan eğrisel elyaf yolları sayesinde, özellikle rijitlik ve burkulma yükü performanslarında anlamlı artışlar elde edilmiştir. Çalışmada NSGA-II ve Genetic Aggregation gibi vekil model tabanlı algoritmaların uygulanması, tasarım alanının etkin şekilde taranmasını sağlamış ve geleneksel yarı izotropik laminatlara kıyasla optimize edilen konfigürasyonlarda %44'e kadar burkulma yükü iyileşmesi gözlemlenmiştir. Eğrisel elyaf yönelimi, özellikle panel kenarlarında yerel sertlik dağılımını etkileyerek küresel stabilite performansını doğrudan etkilemiştir. Bu doğrultuda, elyaf açılarının plaka boyunca kontrollü değişimi, sadece mekanik avantaj değil aynı zamanda üretilebilirlik açısından da bir paradigma kayması yaratmıştır. Antunes ve arkadaşları [12] tarafından gerçekleştirilen deneysel modal analiz çalışması, VSL yapıların doğal frekansları, mod şekilleri ve sönümleme oranları gibi dinamik özelliklerini teorik modellerle karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. CFFF, CFCF ve FFFF gibi farklı sınır koşullarının etkisi altında yapılan deneysel ve teorik karşılaştırmalar, özellikle sınır bölgelerinin modellenmesinde yapılan iyileştirmelerin sonuçların doğruluğu üzerinde belirleyici olduğunu göstermiştir. Klasik Plaka Teorisi (CLPT) ile karşılaştırıldığında, Birinci Dereceden Kayma Deformasyonu Teorisi (FSDT) modelinin daha isabetli sonuçlar sunduğu ve sınır koşullarına hassasiyet gösterdiği tespit edilmiştir. Benzer biçimde, Olmedo [13], mekansal olarak değişen elyaf yönelimlerine sahip panellerin düzlem içi sıkışma tepkisi ve burkulma davranışlarını, bağlı eliptik kısmi diferansiyel denklemler ve Ritz yöntemi ile modelleyerek analiz etmiş ve bazı konfigürasyonların doğrusal elyafli tasarımlara göre %80'e kadar daha yüksek burkulma yükü sunduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, elyaf yöneliminin sadece panel rijitliğini değil, aynı zamanda burkulma modlarını ve yük kapasitesini şekillendirdiğini ortaya koymuştur. Parnas ve arkadaşları [14], elyaf yönelimi ve katman kalınlığı değişimlerini Bézier eğrileri ve yüzeyleri aracılığıyla tanımlayarak kompozit laminatların minimum ağırlıkla optimum mekanik performansı sunmasını hedeflemiştir. Hasar tahmini için Tsai-Hill kriteri temel alınmış, yapısal optimizasyon süreci ise Sıralı Kuadratik Programlama yöntemiyle yürütülmüştür. Çalışma, eğrisel elyaf yönlendirmesinin doğrusal yönlendirmeye kıyasla daha esnek tasarım imkânı sunduğunu ve bu sayede daha hafif, daha performanslı yapılar elde edilebileceğini göstermiştir. Ancak üretimde karşılaşılan pratik sınırlamalar, özellikle eğrisel prepreg şeritlerin yerleştirilmesi ve AFP sistemlerinin minimum dönüş yarıçapı gibi teknik zorluklar, uygulamanın fizibilitesini kısıtlayan önemli faktörler olarak tanımlanmıştır. Mishra [15],

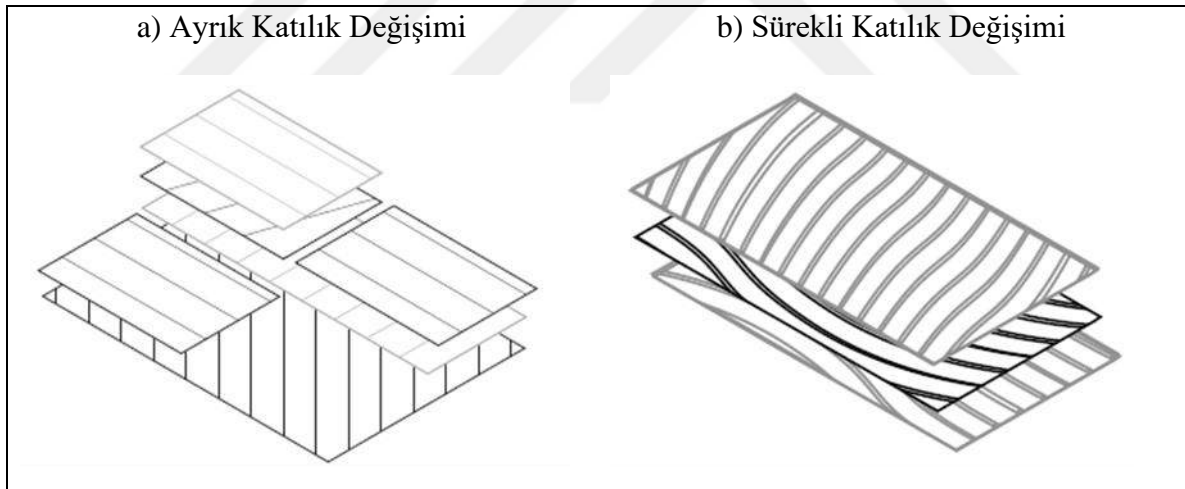
Üretim sürecinde sıklıkla karşılaşılan tow atlamalarının (tow drops) etkisini değerlendirmek üzere, kusurlu ve kusursuz panel davranışlarını karşılaştıran kapsamlı bir modelleme yaklaşımı geliştirmiştir. Geliştirilen modelde, kusurların yerinin önceden bilinmesine gerek kalmadan etkileri analiz edilebilmiş ve bu tür kusurların burkulma yükünde düşüşe, elastik modüllerde zayıflamaya neden olduğu belirlenmiştir. Bu yöntem, AFP ile üretilen değişken katılıklı laminatlarda üretim kusurlarının dikkate alınarak daha doğru ve muhafazakr tasarımlar yapılmasını mümkün kılmaktadır. Jovic ve arkadaşları [16] ise, özellikle kalın laminatların hasar davranışlarını analiz etmek için Tam Katmanlı Plaka Teorisi'ne dayalı gelişmiş bir sonlu eleman modeli sunmuş ve Tsai-Wu, Tsai-Hill ile Hoffman gibi yaygın hasar kriterlerini bu modele entegre etmiştir. Sonuçlar, Tsai-Wu kriterinin yüksek ilk katman hasar yükleri (FPF) tahmin etmesine karşın daha yüksek varyansla çalıştığını; Tsai-Hill ve Hoffman kriterlerinin ise daha düşük sapma ile güvenilir tahminler sunduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmalardan elde edilen genel bulgular, değişken katılıklı yapısal tasarımların yalnızca mekanik performansı artırmakla kalmadığını, aynı zamanda malzeme verimliliği ve ağırlık optimizasyonu açısından da ciddi kazanımlar sağladığını ortaya koymaktadır. Ancak bu kazanımların etkili biçimde elde edilebilmesi için üretim teknolojilerinin, kusur toleranslarının ve hasar öngörü yöntemlerinin dikkatle entegre edilmesi gerektiği açıktır.

3. KOMPOZİT LAMİNANT TEORİSİ

3.1. Değişken Katılık Değerine Sahip Kompozit Plakaların Teorisi

3.1.1. Sabit ve değişken katılık değerine sahip kompozit plakalar

Değişken Katılığa Sahip Laminatlar, kompozit malzeme tasarımında katılık özelliklerinin laminat boyunca değiştiği gelişmiş bir yaklaşım gerektirir. Geleneksel sabit katılığa sahip laminatlardan farklı olarak, elyaf yönelimi ve katılık, malzeme boyunca homojen olarak dağılmamaktadır. VSL'ler, laminat içerisindeki elyaf yönelimleri değiştirilerek konuma bağlı olarak değişen katılık özelliklerine sahip olacak şekilde tasarlanabilir. Bu işlem, çok parçalı laminatlar şeklinde belirli bölgelerde ayrı olarak veya tüm malzeme boyunca sürekli bir fiber serim yönü değişimiyle gerçekleştirilebilir. Şekil 3.1'de hem ayrı hem de sürekli değişken katılığa sahip laminatların şematik gösterimini sunmaktadır.



Şekil 3.1. Ayrı ve Sürekli değişken katılığa sahip kompozit plakaların şematik gösterimleri [17]

Ayrı katılık değişimi yöntemi, laminatı birkaç parçaya böler ve her bir parça, belirli ancak değişken bir katılığa sahip olur. Bu yöntem, tasarım ve üretim açısından sürekli değişim yöntemine kıyasla daha kolaydır, ancak bölmeler arasındaki sınır bölgelerinde gerilme yoğunlukları oluşabilir.

Sürekli katılık değişimi, elyaf yönelimindeki değişimin laminat boyunca kademeli olarak ilerlemesine olanak tanır ve böylece laminatın katılık özelliklerinde düzgün bir varyasyon

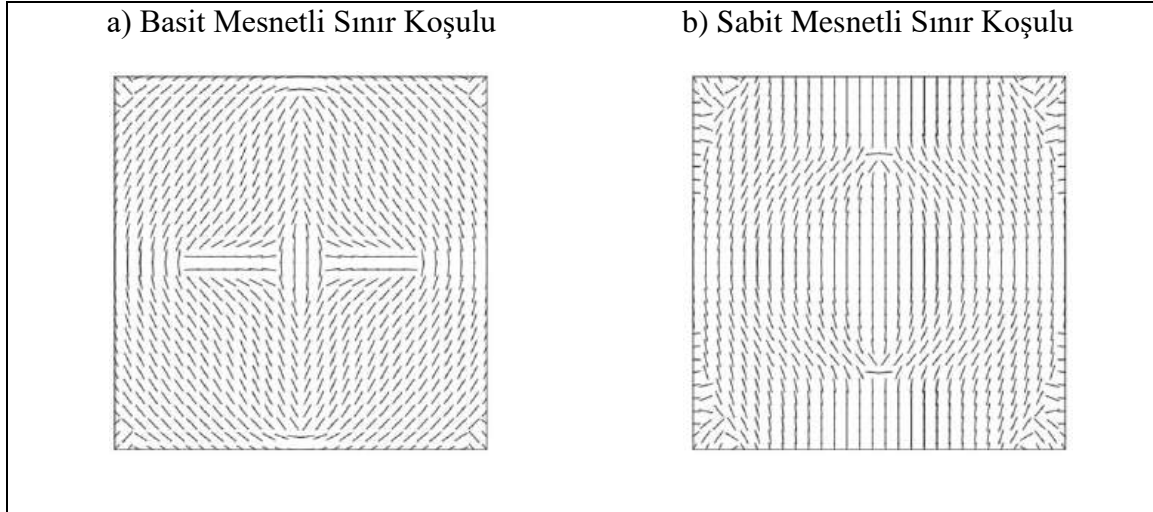
sağlar. Bu yöntem, modern otomatik elyaf yerleştirme makinelerinin sunduğu avantajlardan tam olarak yararlanır. Bu makineler, elyafı hassas bir şekilde yönlendirerek sürekli ve karmaşık katılık dağılımları oluşturabilir.

Değişken Katılığa Sahip Laminatlar, mukavemet, katılık ve burkulma direnci gibi mekanik özellikleri optimize edebilir. Katılığı değiştirerek, mühendisler malzeme mukavemetini en çok ihtiyaç duyulan bölgelere yoğunlaştırabilir, böylece ağırlığı azaltırken performansı koruyabilir veya iyileştirebilirler. Katılıkta sürekli değişim, gerilme yoğunluklarını azaltmaya yardımcı olur, bu da daha verimli bir yük dağılımına ve genel yapısal bütünlüğün iyileştirilmesine yol açar. VSL'ler, özellikle havacılık endüstrisinde ve ağırlık tasarrufu ile yapısal bütünlüğün kritik olduğu yüksek performanslı uygulamalarda büyük bir avantaj sağlamaktadır.

3.1.2. Tasarım yaklaşımları

VSP'lerin tasarımı ve optimizasyonu için üç ana yaklaşım bulunmaktadır: Ayrık Elyaf Açısı Parametrizasyonu (Discrete Fiber Angle Parameterization - DFAP), Doğrudan Katılık Modellemesi (Direct Stiffness Modeling - DSM) ve Doğrudan Elyaf Yolu Parametrizasyonu (Direct Fiber Path Parameterization - DFPP). Bu yöntemlerin temel amacı, ileri üretim teknolojilerinden faydalanarak geliştirilmiş katılık özelliklerine sahip kompozit laminatlar tasarlamak ve bu sayede kritik uygulamalardaki performanslarını artırmaktır.

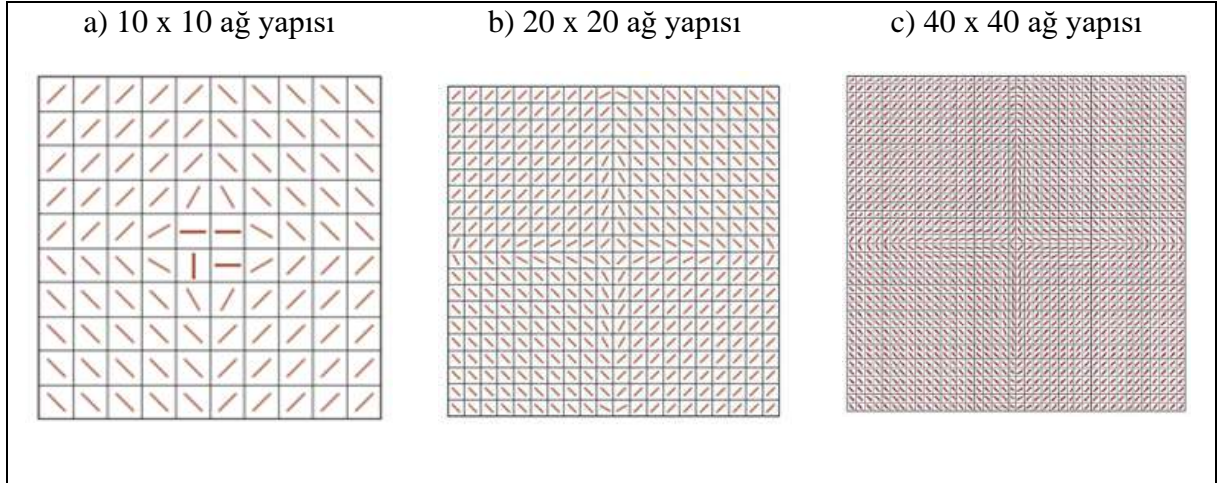
Ayrık Elyaf Açısı Parametrizasyonu (DFAP), laminat içerisindeki her sonlu eleman noktasında elyaf açılarının bağımsız olarak belirlenmesine olanak tanır. Teorik olarak optimal bir tasarım ortaya çıkarsa da, üretilen elyaf yollarındaki süreksizlikler üretilebilirlik gereksinimlerini ihlal edebilir, bu da bu yöntemi gerçek dünya uygulamaları için daha az pratik hale getirmektedir. DFAP yöntemi kullanılarak modellenmiş değişken katılıklı laminatlar, Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Optimal değişken katılığa sahip laminatlar: (a) Basit mesnetli, (b) Sabit mesnetli olarak modellenmiştir [18]

Doğrudan Katılık Modellemesi, elyaf yönelimlerini doğrudan tanımlamak yerine Klasik Laminasyon Teorisi'nden (Classical Lamination Theory - CLT) türetilen katılık matrislerini kullanır. Bu yöntem, tasarım sürecini basitleştirir ve elyaf yolu tanımlamayla ilgili bazı zorlukları ortadan kaldırır. Ancak, optimize edilen katılık dağılımının sürekli elyaf yollarına dönüştürülmesi, yapısal performansın azalmasına neden olmaktadır [19].

Doğrudan Elyaf Yolu Parametrizasyonu, elyaf yönelim açılarının sürekli eğrilerle tanımlanmasını sağlar ve DFAP yönteminde bulunan süreksizlikleri ortadan kaldırarak gerilme yoğunluklarını azaltır. Bu yöntem aynı zamanda üretilebilirliği artırır ve değişken katılığa sahip laminatların üretimini kolaylaştırır. DFPP yönteminin, burkulma yükü ve gerilme dağılımı (stress distribution) açısından diğer yöntemlere kıyasla üstün sonuçlar verdiği gösterilmiştir [5]. Araştırmalardan elde edilen, DFPP yöntemini kullanan açı değişimlerine sahip bir ağ yapısı Şekil 3.3'te gösterilmektedir [20]. Bu tezde, değişken kontur yollarını modellemek için DFPP yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Farklı ağ boyutlarına bağlı olarak kompozit laminatlar için optimum açı dağılımları [20]

3.1.3. Elyaf yollarının tanımlanması

Doğrudan Elyaf Yolu Parametrizasyonu yöntemi, elyaf yönelim açılarının sürekli eğriler kullanılarak tanımlanmasını sağlar ve bu değişken elyaf yönelimlerini oluşturmak için çeşitli metodolojiler bulunmaktadır. Literatürde yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında Doğrusal Açısal Değişim (Linear Angle Variation - LAV) ve Doğrusal Olmayan Açısal Değişim (Nonlinear Angle Variation - NAV) bulunmaktadır. Bu yöntemlerde, elyaf yönelimi, hedeflenen mekanik özelliklere ve üretim kısıtlamalarına bağlı olarak, bir noktadan diğerine sürekli olarak ayarlanabilir. Bu ayarlamalar doğrusal veya doğrusal olmayan şekilde gerçekleştirilebilir.

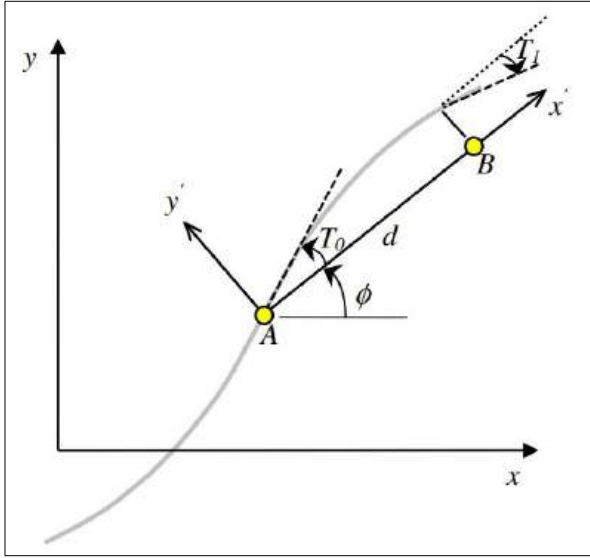
LAV yöntemi, iki laminat noktası arasındaki temel açılar arasında doğrusal bir ilişkiye dayanarak elyaf açılarını belirler. Basit ve tutarlı bir elyaf yönelimi değişimi gerektiğinde, LAV yöntemi avantajlıdır. Kompozit plakanın uzunluğu boyunca herhangi bir x konumundaki $\theta(x)$ açısı, aşağıdaki denklem ile tanımlanmaktadır [21]:

$$\theta(x) = 2(T_1 - T_0) \frac{x}{a} + T_0 \quad (3.1)$$

Burada, T_0 , $x = 0$ başlangıç noktasındaki giriş açısını, T_1 , $x = a$ noktasındaki çıkış açısını ve a , katman uzunluğunun toplam değerini temsil etmektedir. Ayrıca, denklem bir kaydırma ϕ değeri içerecek şekilde genişletilerek daha genel elyaf yolu formülleri oluşturulabilir [21]:

$$\theta(x') = \phi + 2(T_1 - T_0) \frac{x'}{a} + T_0 \quad (3.2)$$

Bu kompozit laminatlar, $\phi(T_0|T_1)$ gösterimi kullanılarak temsil edilebilir. Bu notasyon yalnızca üç parametreyi içerse de, geniş bir laminat konfigürasyonu aralığı için kullanılabilir. Bu açılar farklı yönelim setlerinden seçilerek çeşitli laminat yapıları tasarlanabilir. Eğrisel bir elyaf yolu tanımına ilişkin bir örnek, Şekil 3.4.'da gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Eğrisel fiber yolu tanımı [21]

Katmanı merkez noktası olarak (0,0) kabul ederek ve $\theta(x)$ formülünde küçük bir değişiklik yaparak, her x noktasına karşılık gelen $y(x)$ değerini bulmak için formüller tanımlanabilir [13]:

$$\theta(x) = \begin{cases} 2(T_1 - T_0) \frac{x}{a} + T_0 & 0 \leq x \leq -\frac{a}{2} \\ 2(T_0 - T_1) \frac{x}{a} + T_1 & -\frac{a}{2} \leq x \leq 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

$$y(x) = \begin{cases} \left(\left(\frac{a}{2(\theta_0 - \theta_1)} \right) \ln \left(\cos \left(\theta_0 - \left(\frac{2(\theta_0 - \theta_1)}{a} x \right) \right) \right) \right) + C_1 & 0 \leq x \leq -\frac{a}{2} \\ \left(\left(\frac{-a}{2(\theta_0 - \theta_1)} \right) \ln \left(\cos \left(\theta_0 - \left(\frac{2(\theta_0 - \theta_1)}{a} x \right) \right) \right) \right) + C_2 & -\frac{a}{2} \leq x \leq 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

$$c_1 = -\frac{a \ln(\cos(\theta_0))}{2(\theta_0 - \theta_1)} \quad (3.5)$$

$$c_2 = \frac{a \ln(\cos(\theta_0))}{2(\theta_0 - \theta_1)} \quad (3.6)$$

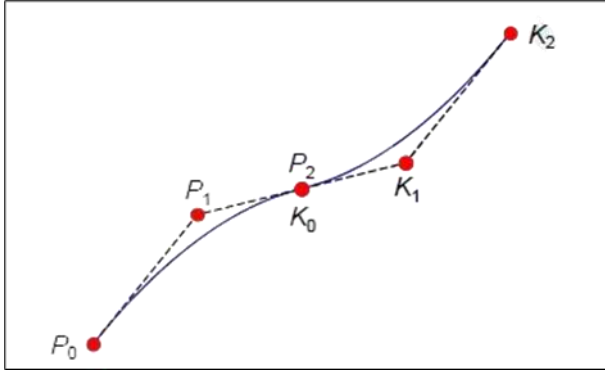
NAV (Doğrusal Olmayan Açısal Değişim) yöntemi, konumlar arasındaki açı farkının doğrusal olmayan bir şekilde değiştiği daha karmaşık bir varyasyon sunar. Bu yaklaşım, tasarım alanını genişleterek, gelişmiş mekanik özellikler sağlayabilecek daha karmaşık elyaf yollarına olanak tanır. Bu doğrusal olmayan alanları tanımlamak için genellikle ikinci dereceden Bézier eğrileri kullanılır. Bézier eğrileri, önceden tanımlanmış kontrol noktalarına dayanır ve bu noktalar arasındaki enterpolasyon ile sürekli bir yol sağlar. Bézier eğrileri iki ana türe ayrılır: Kübik ve Kuadratik. Kuadratik Bézier eğrileri üç kontrol noktasıyla tanımlanır (P_0, P_1, P_2) ve aşağıdaki formül kullanılır:

$$Q(t) = (1-t)^2 P_0 + 2(1-t)t P_1 + t^2 P_2 \quad (3.7)$$

Burada, t parametresi eğri boyunca konumu temsil etmektedir. Benzer şekilde x ve y koordinatları da matris biçiminde benzer şekilde temsil edilebilir.

$$Q(x) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1-t)^2 & 2(1-t)t & t^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Sürekli Kuadratik Bézier Eğrisi (Quadratic Bézier Curve), P_0, P_1, P_2 kontrol noktaları kullanılarak tanımlanır ve K_0, K_1, K_2 kontrol noktalarına bağlanır, Şekil 3.5'de gösterilmektedir:



Şekil 3.5. Sürekli kuadratik Bézier eğrisi [11]

Benzer şekilde, kübik Bézier eğrisi, dört kontrol noktası kullanılarak tanımlanır ve polinom derecesi üçtür. Genel formülü şu şekildedir:

$$Q(t) = (1 - t)^3 P_0 + 3(1 - t)^2 t P_1 + 3(1 - t) t^2 P_2 + t^3 P_3 \quad (3.9)$$

Bu tezde, kompozit plakalar yukarıda belirtilen formüller kullanılarak LAV yöntemi ile modellenmiştir.

3.2. Eğrisel Kirişlerle Güçlendirilmiş Kompozit Plakaların Teorisi

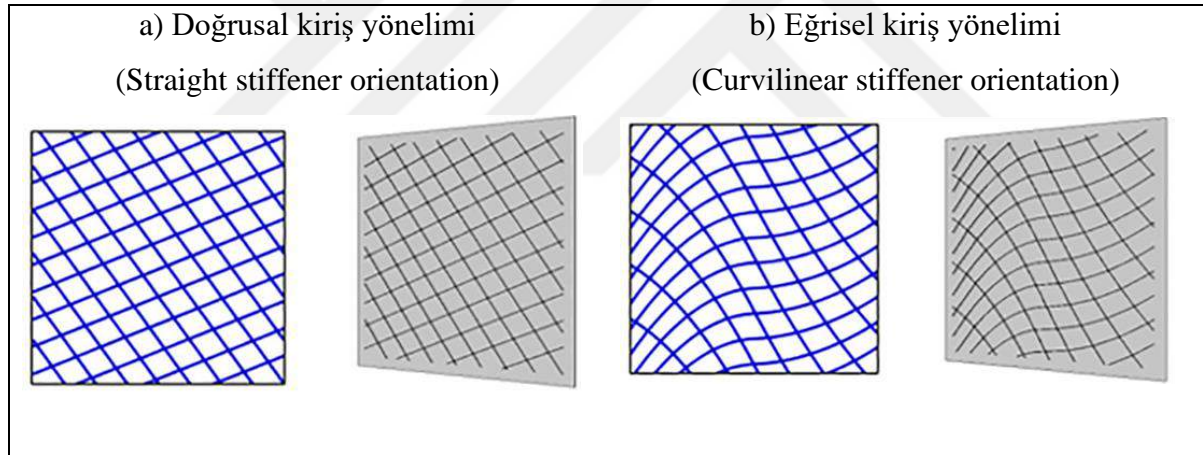
3.2.1. Doğrusal ve eğrisel kirişler

Yapısal uygulamalarda, kirişler genellikle mekanik performansı artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu, özellikle burkulma ve eğilme gibi yükleme koşulları altında önemlidir. Kirişler, doğrusal ve eğrisel olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Geleneksel doğrusal kirişler, boyuna, enine veya açılal konfigürasyonlarda hizalanmış düzenli desenlere sahiptir. Bu doğrusal tasarım, öngörülebilir mekanik davranış sağlayarak tasarım sürecini basitleştirir ve geleneksel teknikler kullanılarak üretimi kolaylaştırır. Ancak, doğrusal kirişlerin kullanımına olan bağımlılık, mühendisler için tasarım esnekliğini ve optimizasyon fırsatlarını sınırlandırmaktadır.

Eğrisel kirişler, karmaşık yükleme koşullarına göre optimize edilebilen düz olmayan eğrisel şekillere sahiptir. Bu kirişler, kompozit laminatların anizotropik özelliklerinden daha iyi yararlanarak katılık dağılımının mühendisler tarafından özelleştirilmesine olanak tanır. Daha

iyi bir yük dağılımı sağlanabildiği için katılık ve ağırlık verimliliği de artırılır, özellikle çok yönlü yükler altında. Ancak, eğrisel kirişlerin üretimi, geleneksel yöntemlere kıyasla daha gelişmiş imalat teknikleri gerektirir. Bu doğrultuda, Otomatik Elyaf Yerleştirme gibi ileri üretim yöntemleri kullanılmaktadır, bu da üretim maliyetlerini artırmaktadır.

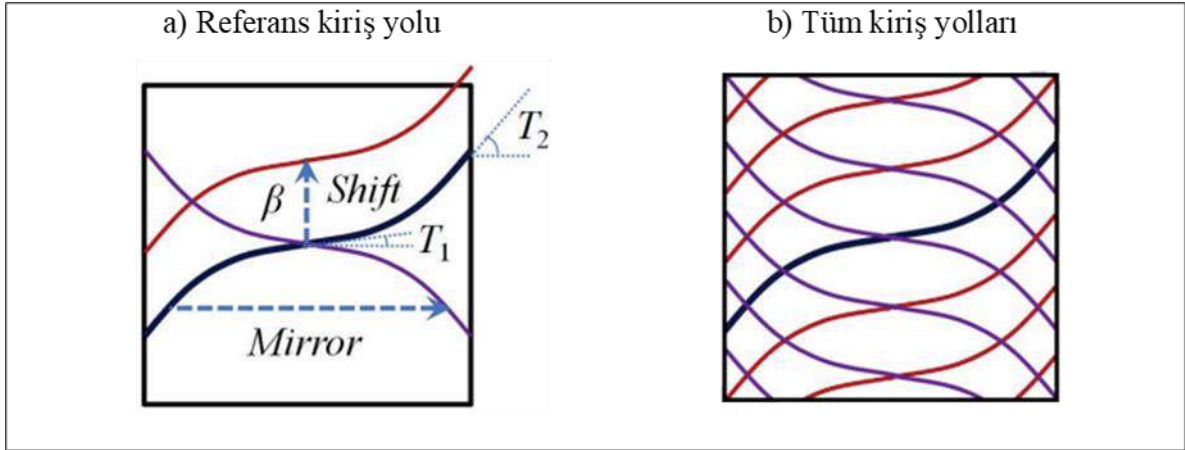
Kompozit laminatların yapısal bütünlüğünü artırmak amacıyla eğrisel kirişler kullanılarak yapılan birçok çalışma, eğrisel kirişlerin yapısal performansı iyileştirdiğini göstermektedir. Alhajahmad ve Mittelstedt [8], eğrisel kiriş kullanımının doğrusal kirişlere kıyasla burkulma direncini %100'e kadar artırdığını tespit etmiştir. Liu ve diğeri [9], değişken katılık tasarımlarının burkulma direncinde %73'e varan iyileşme ve daha yüksek yük taşıma kapasitesi sunduğunu göstermiştir. Standford ve Jutte [10], tow yönlendirme ve eğrisel kirişlerin birlikte kullanılmasıyla %11,4'e kadar ağırlık tasarrufu sağlandığını belirtmiştir. Şekil 3.6.'da gösterilen çalışma bu araştırmayı desteklemektedir.



Şekil 3.6. Doğrusal ve eğrisel kirişlerle yönelimine sahip kompozit paneller [9]

3.2.2. Eğrisel kiriş yollarının tanımlanması

Eğrisel kirişli panellerin modellenmesi için çeşitli yaklaşımlar kullanılmıştır, özellikle grid-kirişli tipler için. İlk yöntem, Değişken Katılığa Sahip Laminatlar bölümünde açıklanan LAV yöntemi ile aynıdır. Wang ve diğeri [22], eğrisel kiriş yollarını çizmek için LAV yöntemini kullanmış ve bunları kaydırarak grid bir yapı oluşturmuştur. Araştırmalarına ait bir şekil Şekil 3.7'de gösterilmektedir.

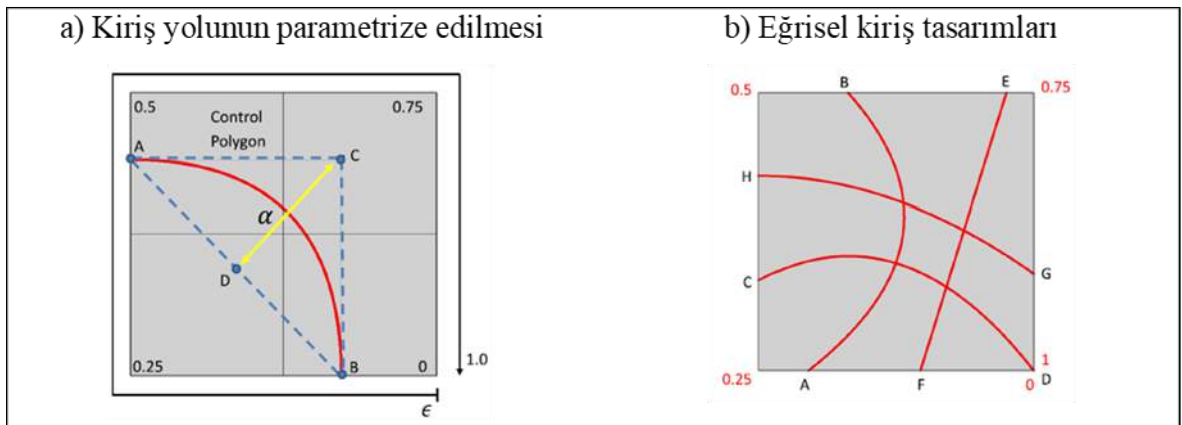


Şekil 3.7. LAV yöntemi ile tanımlanan eğrisel kiriş yolları [22]

İkinci yöntem, NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) veya üçüncü dereceden B-spline eğrileri olup birçok çalışmada bulunabilir [25, 24, 26]. Bu yöntemde üç nokta seçilir ve bunlardan iki tanesi (başlangıç ve bitiş noktaları) plakanın kenarında, üçüncü nokta ise plakanın yüzeyinde yer alır.

Tasarım değişkenlerini azaltmak amacıyla, başlangıç ve bitiş noktalarının konumlarını belirlemek için bir çevre değeri kullanılır ve bu değer 0 ile 1 arasında değişmektedir. Üçüncü nokta, başlangıçtan bitiş noktasına uzanan doğruya dik doğrultuda yerleştirilerek bir üçgen oluşturur.

Son parametre, kirişin eğrilik şeklini tanımlayan eğrilik parametresidir. Bu parametre kirişin genel şeklini belirler. Başlangıç ve bitiş noktaları, üçüncü nokta, çevre ve eğrilik parametreleri, A, B, C, ϵ and α , Şekil 3.8'de gösterilmektedir.

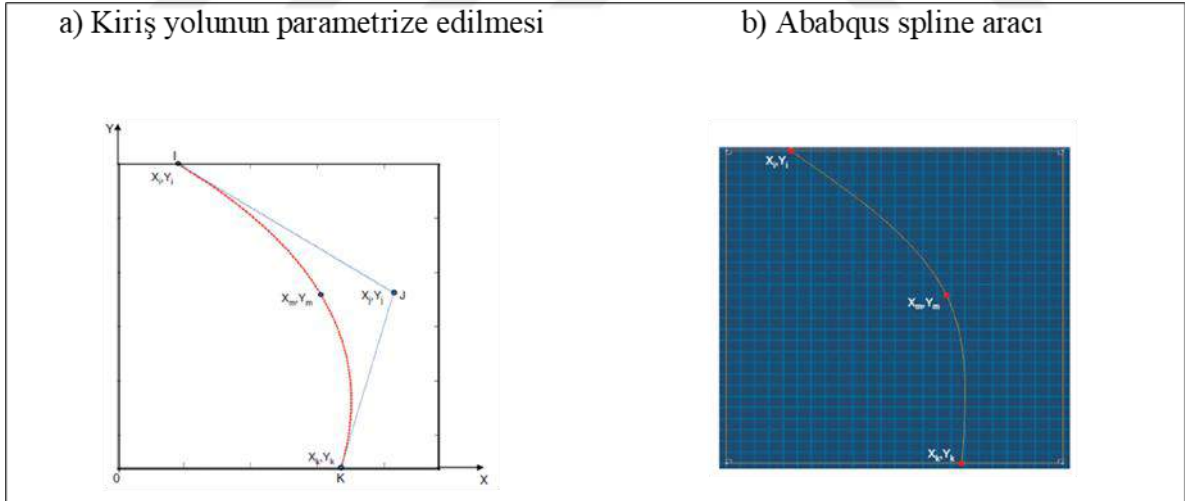


Şekil 3.8. Kiriş yolunun parametrize edilmesi ile eğrisel kiriş tasarımı şeması [26]

NURBS yöntemi, kiriş yolunu tanımlamak için yalnızca üç tasarım değişkeni gerektirse de, kirişin panel içinde kalmasını sağlamak için ek bir kontrol gereklidir. Bunun nedeni, eğrisel kiriş yolunun her zaman üçüncü kontrol noktasından geçmesi gerekmediğidir, bu yüzden konumunun panel sınırları içinde olup olmadığını doğrulamak gereklidir.

Diğer araştırmacılar [27, 28, 29], eğrisel kiriş geometrisini parametrize etmek için Bézier eğrilerini kullanmıştır. Eğrisel yolu tanımlamak için üç kontrol noktası kullanılmıştır. Başlangıç ve bitiş noktaları panelin kenarlarına sabitlenmiştir ve üçüncü nokta x-y koordinatları kullanılarak tanımlanmıştır. NURBS yöntemine benzer şekilde, Bézier eğrileri tüm üç kontrol noktasından geçmektedir ve tasarım değişkenleri için dikkatli sınır ayarları gerektirmektedir, böylece kiriş panel sınırları içinde kalır.

Dang ve diğeri [29], Abaqus spline aracını kullanarak eğrisel kiriş yollarını tanımlamış ve tüm üç kontrol noktasından geçtiği için sınır ayarlarını doğrulama gereksinimini ortadan kaldırmıştır. Eğrilik çalışmalarının temsili Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Çalışmaların Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Bézier formülasyonu ve Abaqus spline aracı kullanılarak üç kontrol noktası ile kiriş eğrisi modellemesi, sırasıyla (a) ve (b) [29].

3.3. Klasik Plaka Teorisi

Klasik Lamine Plaka Teorisi, lamine kompozit plakaların mekanik davranışını analiz etmek için kullanılan basitleştirilmiş bir teoridir. Bu teori, Kirchhoff hipotezi gibi çeşitli temel varsayımlara dayanır. Bu hipoteze göre, plaka kalınlığında uzama meydana gelmez, küçük

deformasyonlar kabul edilir ve laminatın davranışı doğrusal elastik olarak varsayılır. Enine normaller (plakanın orta yüzeyine dik doğrular), deformasyondan sonra da düz ve orta yüzeye dik kalır. Bu, plakada enine kesme deformasyonunun olmadığı anlamına gelir. Ayrıca, plakanın kalınlığı deformasyon sırasında değişmez. Teori, deformasyonların küçük olduğunu ve doğrusal gerinim-yer değiştirme ilişkilerinin kullanılabileceğini kabul eder. Her bir lamina doğrusal elastik olarak davranır ve laminatın genel davranışı, bireysel katmanların tepkilerinin birleştirilmesiyle elde edilir [13, 19, 35].

3.3.1. Birinci dereceden kayma deformasyonu teorisi

Birinci Dereceden Kayma Deformasyonu Teorisi, Klasik Lamine Plaka Teorisi üzerine geliştirilmiş bir genişletmedir ve analiz doğruluğunu artırmak için enine kesme deformasyonlarının etkilerini içerir.

Klasik Lamine Plaka Teorisinde, Kirchhoff hipotezinin geçerli olduğu kabul edilir. Bu hipotez, enine normallerin deformasyondan sonra da düz kaldığını ve orta yüzeye dik kaldığını belirtir. Birinci Dereceden Kayma Deformasyonu Teorisinde, CLPT'nin Kirchhoff hipotezi, enine normallerin orta düzleme dik kalacağını öne sürer. Sonuç olarak, plaka teorisinde enine kesme etkisi de dikkate alınır [35, 19].

FSDT'de yer değiştirme bileşenleri şu şekilde ifade edilir:

$$\begin{cases} u(x, y, z, t) \\ v(x, y, z, t) \\ w(x, y, z, t) \end{cases} = \begin{cases} u_0(x, y, t) + z\phi_x(x, y, t) \\ v_0(x, y, t) + z\phi_y(x, y, t) \\ w_0(x, y, t) \end{cases} \quad (3.10)$$

$$\phi_x = \frac{\partial u}{\partial z}$$

$$\phi_y = \frac{\partial v}{\partial z}$$

ϕ_x ve ϕ_y sırasıyla x eksenini ve y eksenini etrafında enine normalin dönmesini temsil etmektedir. FSDT için deformasyona uğramamış ve deformasyona uğramış plaka

ve temel malzeme yönleri 1 ve 2 olarak tanımlanır.

Laminatın elastik davranışını tanımlamak için genellikle dokuz elastik sabit kullanılır. Ancak, düzlem elastisite problemlerinde yalnızca altı sabitin belirlenmesi yeterlidir. Bu durum, kompozit malzemeler için elastik sabitler dört bağımsız bileşene indirgenir çünkü malzeme ortotropiktir ve uzama-kayma bağlantısı yoktur [13]. Bir lamina için düzlem gerilme varsayımı altında gerilme-gerinim ilişkisi şu şekilde ifade edilir:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 1/E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.12)$$

Bu ilişkinin ters formu şu şekildedir:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.13)$$

Eğer tüm laminat tabakaları aynı malzemeye sahipse, gerilme-gerinim ilişkisi de aynı olacaktır. Koordinat dönüşümü uygulandığında, aşağıdaki gibi bir bünye bağıntısı elde edilir:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.14)$$

Burada, katılık matrisi (\bar{Q}) dönüşüm formülü kullanılarak elde edilir:

$$[\bar{Q}] = [T]^{-1}[Q][T]^{-T} \quad (3.15)$$

Daha önce belirtilen malzeme bağıntıları, bazı basit düzenlemeler yapılarak eğrisel elyaflara sahip bir laminaya da uygulanabilir. Eğrisel laminada elyaf açısının x değişkenine bağlı olduğu unutulmamalıdır. Sonuç olarak, azaltılmış katılık matrisi (\bar{Q}) de x 'in bir fonksiyonu haline gelir ve şu şekilde ifade edilir $[\bar{Q}(\theta)] = [\bar{Q}(x)]$. Eğrisel elyaf laminası için malzeme

bağıntısı şu şekilde olur [135]:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11}(x) & \bar{Q}_{12}(x) & \bar{Q}_{16}(x) \\ \bar{Q}_{12}(x) & \bar{Q}_{22}(x) & \bar{Q}_{26}(x) \\ \bar{Q}_{16}(x) & \bar{Q}_{26}(x) & \bar{Q}_{66}(x) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{zy} \end{Bmatrix} \quad (3.16)$$

Doğrusal ve eğrisel elyaf laminası için gerilim-yer değiştirme ilişkisi:

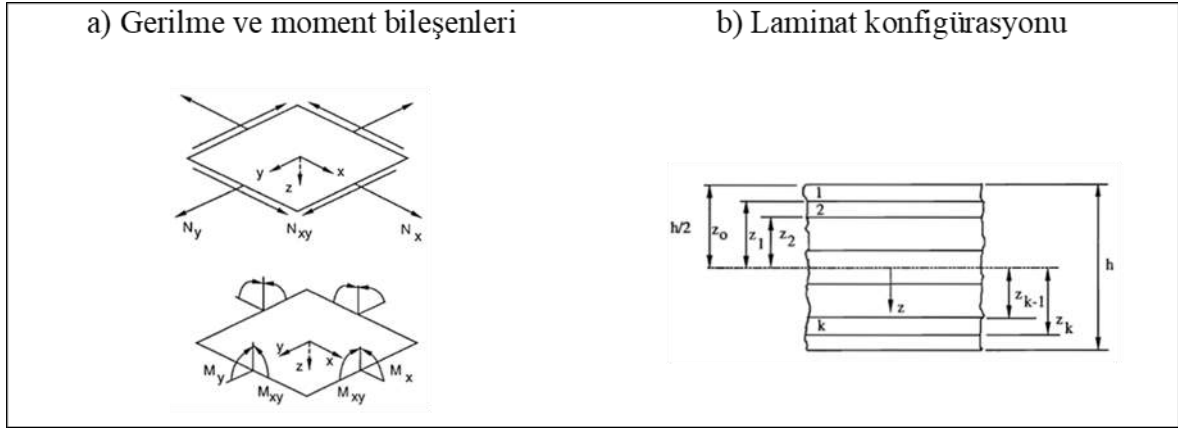
$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{zy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (3.17)$$

3.3.3. Eğrisel laminat malzeme ilişkileri (Constitutive Equations)

Klasik Laminat Teorisinde, laminanın her bir katmanındaki gerilmeleri ayrı ayrı ele almak yerine, toplam gerilme ve moment bileşenleri kullanılır. Gerilme bileşenleri, laminanın farklı noktalarında birim uzunluk başına ortalama gerilmeyi temsil eder ve şu şekilde tanımlanır:

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} dz \quad (3.18)$$

Burada h , laminanın toplam kalınlığıdır ve z_k ile z_{k-1} koordinatları k^{th} katmanın üst ve alt yüzeylerine karşılık gelir. Eğilme momenti bileşenleri ve laminanın tabakalanma sırası Şekil 3.11'de gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Gerilme ve moment bileşenleri ile laminat konfigürasyonu, sırasıyla (a) ve (b) [36]

Denklem matris formu bu şekildedir:

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{zy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3.19)$$

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \quad i \& j = 1, 2, 6$$

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad i \& j = 1, 2, 6$$

Burada A_{ij} ve B_{ij} katsayıları, toplam laminatın katılık matrisinden türetilmiştir. Sonuç momentinin tanımını şu şekilde ifade edilebilir:

$$\{M\} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \{\sigma\} z dz \quad (3.20)$$

Benzer şekilde,

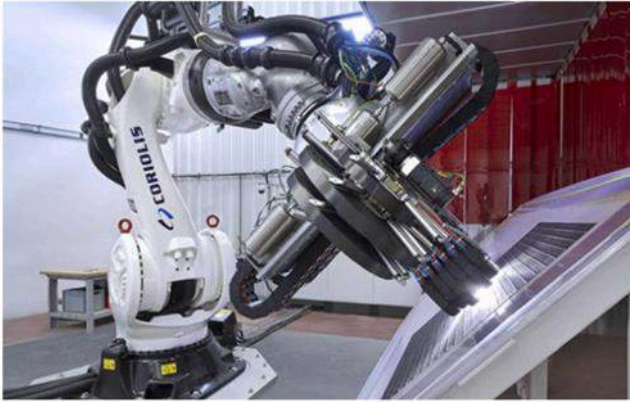
$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{zy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3.21)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad i \& j = 1,2,6$$

[A], [B] ve [D] matrislerinin elemanları sırasıyla uzama, bağlantı ve eğilme katılığı (bending stiffness) ile ilişkilidir. [A] matrisi, panelin düzlem içi gerinimlere verdiği tepkiyi kontrol eder. [B] ve [C] matrisleri, burulma ve eğilme arasındaki etkileşimi tanımlar. Panelin tepkisi, orta yüzey gerinimleri ve eğrilikler cinsinden ifade edilir ve katmanların tepkisini belirlemek için yukarıdaki denklem kullanılır. Daha sonra, gerilmeler ve gerinimler 1-2 koordinat sistemine dönüştürülerek malzemenin dayanımı değerlendirilir [36].

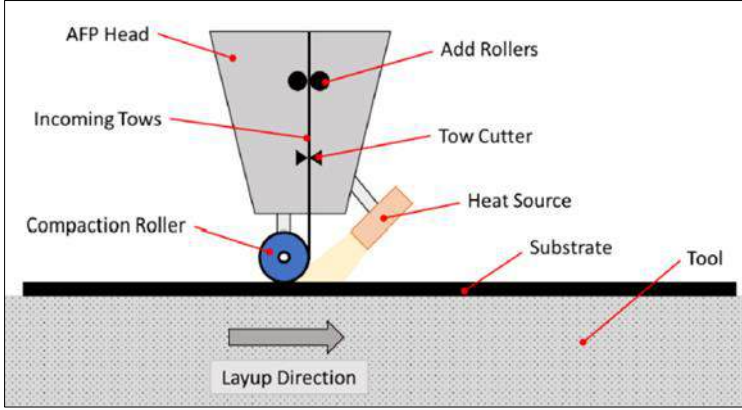
4. AFP MAKİNELERİ VE ÜRETİM SÜRECİ

Üretim teknolojilerindeki gelişmeler, eğrisel elyafar kullanılarak kompozit panellerin üretilmesini sağlamıştır. Gelişmiş üretim yöntemlerinden ikisine örnek olarak Otomatik Elyaf Yerleştirme (AFP) ve Otomatik Bant Serme (ATL) yöntemleri verilebilir. AFP, ATL sürecinin sınırlamalarını aşmak için geliştirilmiştir. Özellikle, AFP, ileri düzey bir filament sarım üretim teknolojisi olarak düşünülebilir. Elyaf yollarının eğriliğinin sürekli olarak değişmesine olanak tanıdığı için önemli bir teknolojik gelişmedir. Bu üretim teknolojisinin geliştirilmesinden sonra, AFP ekipmanları ve süreç kontrolü önemli ölçüde gelişmiş ve bu yöntem havacılık endüstrisi başta olmak üzere yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Tipik bir elyaf yerleştirme makinesi Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



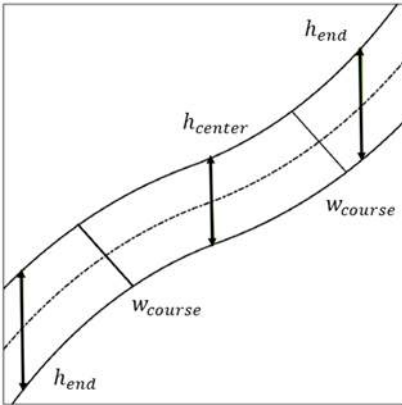
Şekil 4.1. Robotik kol tipine sahip AFP makinesi [30]

Bu süreç, önceden emprenye edilmiş elyaf şeritlerinin bilgisayar destekli yerleştirilmesini içerir. Bu sayede otomasyon sağlanır ve farklı açılara sahip yüzey katmanlarının hızlı üretimi mümkün hale gelir. Standart bir elyaf yerleştirme başlığı veya şerit besleme başlığı şematik olarak Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Elyafar, bir elyaf besleme sistemi aracılığıyla başlığa yönlendirilir ve fiber bandını oluşturacak şekilde çalışma yüzeyine yerleştirilir. Çok eksenli AFP makinesi, yüzey konturunu hassas bir şekilde takip edecek şekilde programlanmıştır ve başlığın yüzeyle sürekli temas halinde kalmasını sağlar [30, 31].



Şekil 4.2. Tipik bir AFP makine başlığının basitleştirilmiş versiyonu [30]

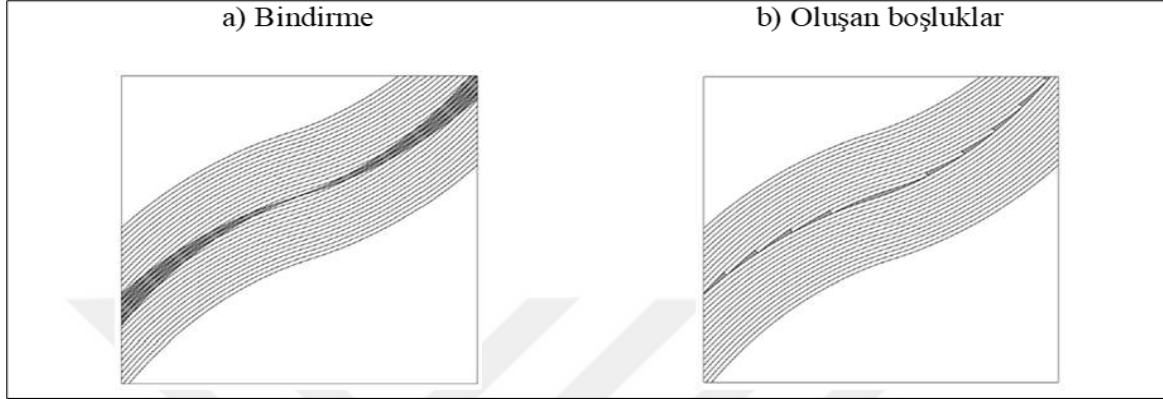
Şerit besleme başlığı, birden fazla paralel elyaf bandını yüzeye aynı anda yerleştirir. Elyaf lar yerleştirilirken, bir merdane tarafından sıkıştırılır. Başlık içinde bulunan bir ısıtıcı, reçinenin yüzeye daha iyi yapışmasını sağlamak için kullanılır. Isıtma ve sıkıştırmanın birleşik etkisi, yerleştirme sırasında elyaf bantlarının birleşmesini ve yapışmasını sağlar [15]. Laminasyon sürecinde, ilk olarak AFP, referans veya başlangıç yolunu yerleştirir. Bu yol eğrisel bir güzergaha sahip olduğundan, üst ve alt sınırları arasındaki mesafe, sabit bir yol genişliği elde etmek için dikey eksen boyunca değişir. Şekil 4.3’de, örnek bir referans güzergahı gösterilmektedir. Burada, dikey mesafenin plaka kenarlarında maksimum, merkeze yakın bölgelerde ise minimum olduğu ve yol boyunca genişliğin sabit kaldığı görülmektedir.



Şekil 4.3. Referans güzergahının temsili

Bir sonraki adımda, AFP, sonraki güzergahı yerleştirmek için dikey yönde sabit bir değerle kaydırma yapar. Sonuç olarak, eğer yol genişliği sabit kalırsa, şeritler arasında önemli ölçüde bindirme meydana gelir.

Kurslar arasındaki bindirmeyi önlemek için, yol genişliği, güzergahın dikey mesafesine bağlı olarak değiştirilmelidir. AFP makineleri, her bir elyaf şeridini bağımsız olarak kesebilir. Ancak, güzergah sınırlı sayıda elyaf şeridi genişliği ile oluşturulduğunda, küçük kusurlar veya boşluklar oluşabilir. Her iki kusur da Şekil 4.4’de gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Bindirme alanı ve oluşan boşluklar, sırasıyla (a) ve (b) [28]

Elyaf şeridi kesildiğinde, ya boşluklar ya da bindirmeler meydana gelebilir. AFP makinesi bir şeridi bırakırken, kenarı bitişik yolun sınırına ulaştığında bir boşluk oluşur. Öte yandan, şeridin kesimi ikinci kenara dokunduğunda bindirme meydana gelir. Sonuç olarak, iki stratejiden biri seçilebilir. Bunlardan ilki %0 kapsama stratejisi olup, sadece boşluklar oluşur. Diğeri ise %100 kapsama stratejisidir ve tüm yolların üst üste gelmesini sağlar.

Arian ve diğeri [33], AFP sürecindeki üretim kusurlarını inceleyen bir çalışma yapmıştır. Geniş bir yol genişliği kullanmanın laminatta kusur alanlarını önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Ayrıca, boşluk stratejisinin kusur minimizasyonunu iyileştirdiği, ancak bindirme stratejisinin daha iyi yapısal performans sağladığı vurgulanmaktadır.

Fayazbakhsh ve diğeri [34], VSL’de boşlukların ve bindirmelerin düzlem içi katılık ve burkulma yükü üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Kusurların geometrisini ve konumunu hesaplamak için kusur katmanı yöntemi kullanılmıştır. Sonuçlar, boşlukların düzlem içi katılığı ve burkulma yükünü önemli ölçüde azalttığını ve bu azalmanın %12’ye kadar olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, bindirmelerin yapısal performansı artırdığı belirlenmiştir. Burkulma yükü, bir konfigürasyon için %78’e, diğeri konfigürasyon için ise %71’e kadar artmıştır. Bu tezde, AFP makinelerinin elyaf şeridi kesme özelliği simüle edilerek üretim kusurları ihmal edilmiştir.



5. SAYISAL MODELLEME

Bu bölüm, eğrisel elyaflar ve kirişler ile takviye edilmiş kompozit panellerin sayısal modellenmesini kapsar. FE Modülü içinde gerçekleştirilen görevlerin iş akışı açıklanmakta olup, Python programlama dili ve ANSYS APDL algoritmalarının kullanımı anlatılmaktadır. Daha sonraki bölümlerde, kompozit laminatlar ve eğrisel kirişlerle takviye edilmiş panellerin modellenmesi ele alınmaktadır. Son olarak, yakınsama çalışması Bölüm 5.4'de sunulmaktadır.

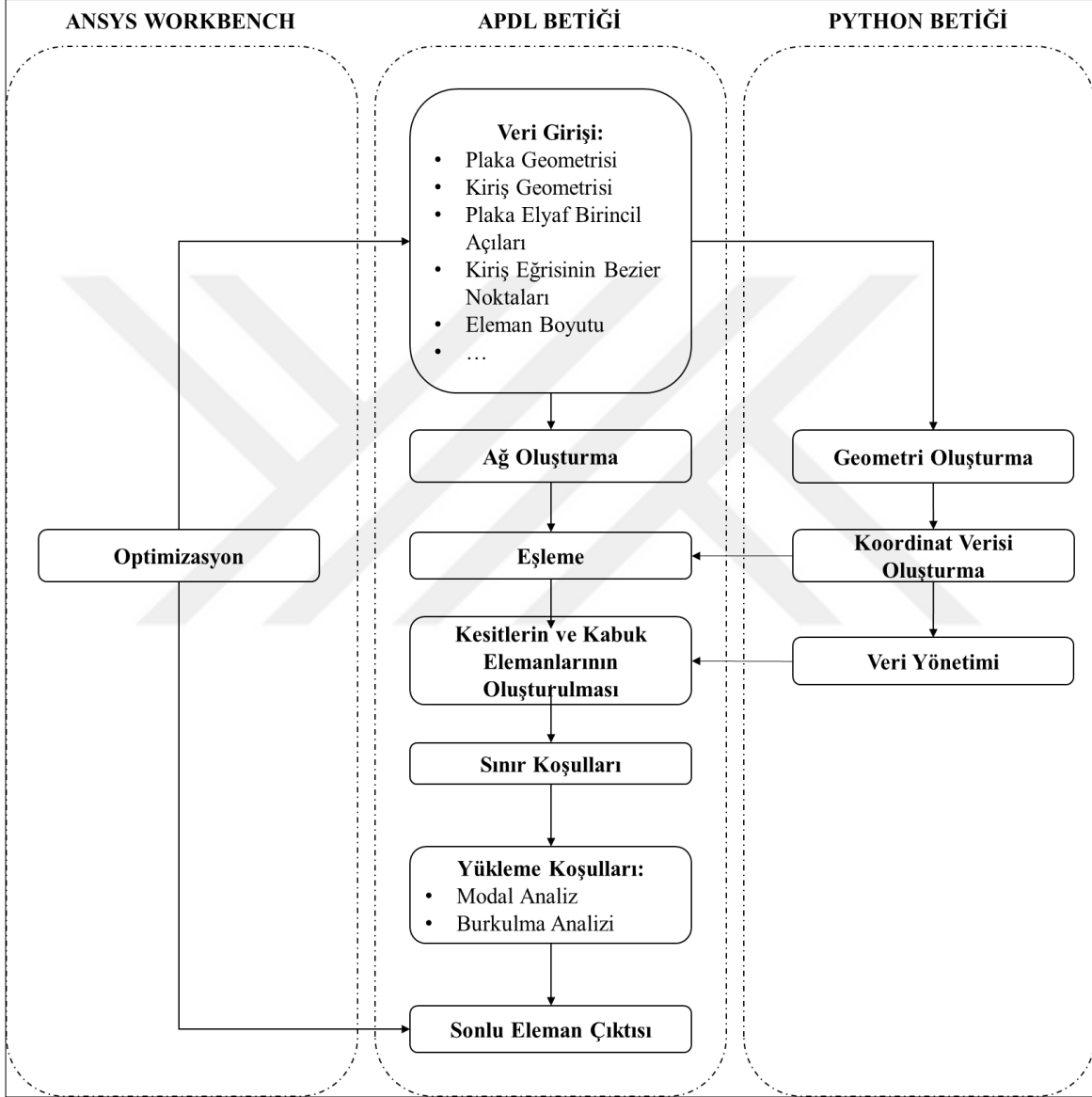
5.1. FE Modülü ve İş Akışı

Sayısal yöntemler, eğrisel kirişlerle takviye edilmiş kompozit panellerin modal karakteristiklerini ve burkulma tepkisini incelemek için kullanılmaktadır. Python programlama dili, ANSYS Workbench ve APDL sonlu eleman yazılımı kullanılarak sayısal modelleme gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon algoritmaları, tasarım parametreleri için en iyi olası seçeneği bulmak amacıyla kullanılmaktadır. Sayısal hesaplamalar, farklı yükleme koşulları altında belirli bir parametre seti için tekrarlanmaktadır. İş akışı, FE modelinin oluşturulması, analizinin yürütülmesi ve sonuçlarının çıkarılmasını kapsamaktadır. Optimizasyonun verimli olması için iş akışı otomatik hale getirilmiş ve batch solver içinde kesintisiz çalışacak şekilde tasarlanmıştır.

Model, ANSYS APDL kodu kullanılarak oluşturulmuş ve Python kodu arka planda çalışarak nokta koordinatlarını ve açı değerlerini okuyarak istenen geometrinin oluşturulmasını sağlamıştır. Bu amaçla, APDL kodunda Bézier noktalarının konumları ve birincil elyaf açıları gibi veri girişleri tanımlanmış ve geometriyi oluşturmak için gerekli parametreler atanmıştır. Bu parametreler bir dosyaya yazıldıktan sonra APDL kodu çalıştırılarak Python kodunun bir sonraki adımları tetiklenmiştir. Python kodu, bu parametreleri okuyarak belirlenen noktalarda fiber yerleşimi için gereken geometriyi oluşturmuş ve eşleme (mapping) işlemlerini gerçekleştirmiştir. Sabitlenmiş kompozit paneller için Python kodu, eğrisel elyaf yoluyla çakışan kabuk elemanlarını belirlemek için bir veri yönetim bloğu çalıştırmış ve ardından yerleşim aşamaları eleman ağırlık merkezleri üzerine eşlenmiştir.

Üç boyutlu geometri oluşturulduktan sonra, malzeme özellikleri, sınır koşulları ve analiz

ayarları APDL betiği tarafından uygulanmıştır. Bir sonraki aşama, bir optimizasyon sürecidir ve APDL betiğinden elde edilen sonlu eleman analiz sonuçları, daha ileri rafine işlemler için kullanılmıştır. Bu süreç için ANSYS Workbench optimizasyon modülü kullanılmıştır. İş akış şeması Şekil 5.1’de gösterilmektedir.

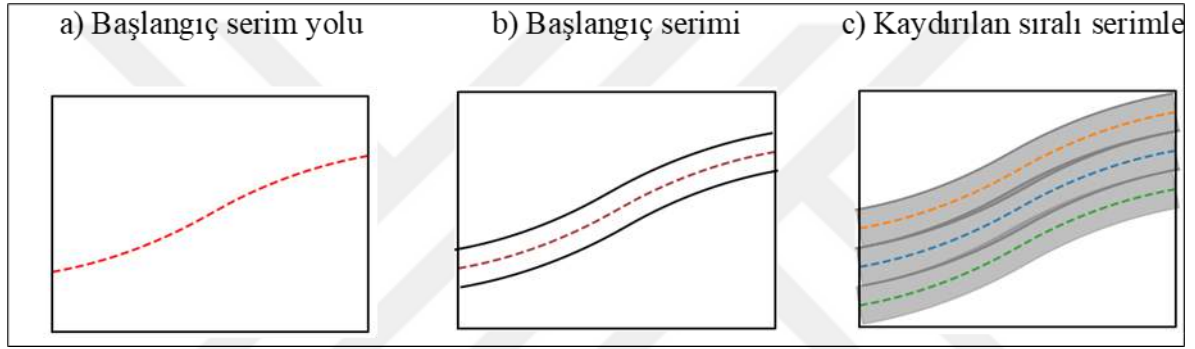


Şekil 5.1. FE modelleme iş akışı şeması

5.2. Değişken Katılık Değerine Sahip Kompozit Plakaların Modellenmesi

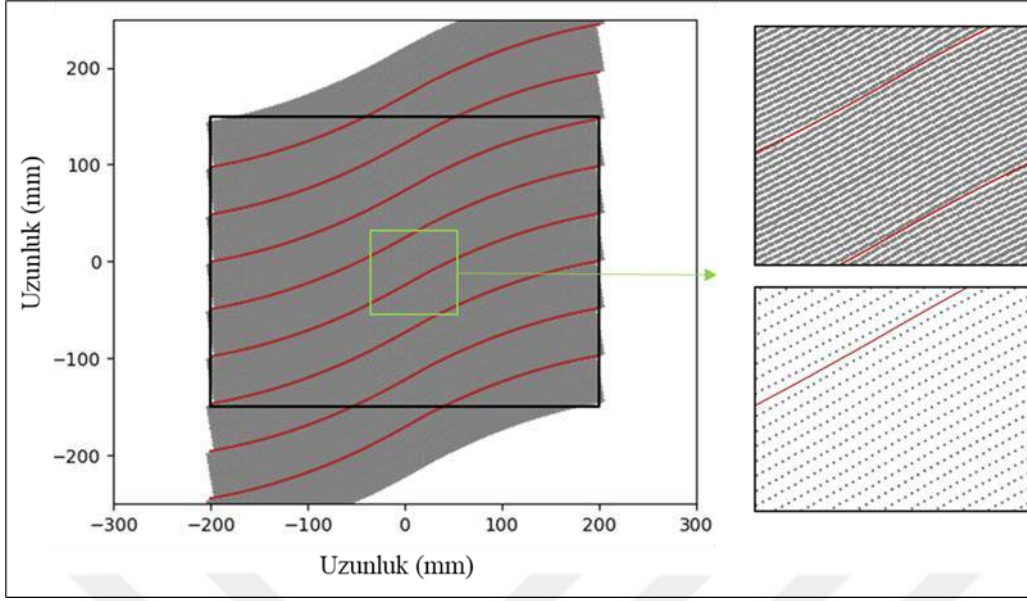
Bu bölüm, mekanik APDL ve Python betiği kullanılarak fiber yerleştirme ve statik analiz ile ilgili yapılan doğrulama çalışmalarını içeren kompozit laminatların modellenmesini kapsamaktadır. İlk olarak, APDL betiği ANSYS APDL modülü tarafından okunur. APDL

betiği, plaka genişliği, plaka uzunluğu, plaka kalınlığı, birincil açılar (Q_1 & Q_2), katman kalınlığı, ağ boyutu, malzemenin mekanik özellikleri, AFP makinesi şerit genişliği ve yol genişliği gibi tasarım girdilerini içerir. Tasarım giriş verileri okunduktan sonra, ilk Python betiği çalıştırılır ve doğrusal denklemler çözülerek şerit noktalarının koordinat ve açı değerleri üretilir. İlk Python betiği, 3.3 bölümünde açıklanan LAV formüllerini kullanır. Başlangıç şeridi, plakanın merkezine yerleştirilir ve ardından şerit kalınlığı bu referans şeride göre belirlenir. Daha sonra, AFP dikey yönde sabit bir değerle kaydırılarak sonraki şerit yerleştirilir. %100 kapsama stratejisini sağlamak için optimum kaydırma miktarı hesaplanarak uygulanır. Bu adımların temsili Şekil 5.2’de gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Başlangıç serim yolu, başlangıç serimi ve kaydırılmış sonraki serimlerin temsili, sırasıyla (a), (b) ve (c)

AFP makineleri her bir şeridi bağımsız olarak kesebildiğinden, serim süreci Python betiğinde benzer şekilde simüle edilmiştir. Gerekli serim miktarı tüm plaka yüzeyini kaplayacak şekilde hesaplanır ve kaydırılır. Her serim, belirli sayıda şerit başlığı kullanılarak noktalar kümesiyle kaplanır. Her serim, belirli sayıda şerit başlığı ile oluşturulduğundan, her x, y ve Q nokta koordinat ve açı değeri, APDL’de sonraki eşleme işlemi için saklanır. Kompozit laminatları temsil eden grafikler, şeritler ve bu şeritleri kapsayan noktalar kümesi Şekil 5.3’de gösterilmektedir.

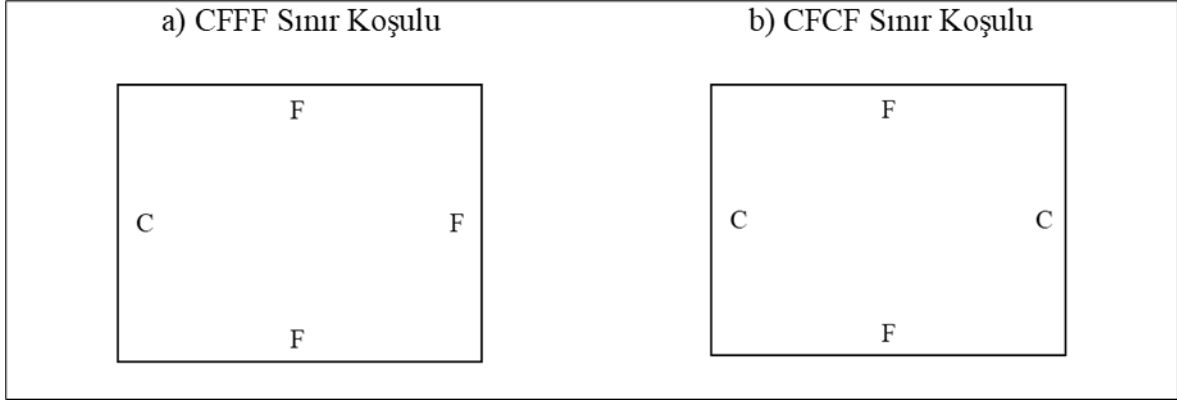


Şekil 5.3. Dokuz şerit ile kaplanmış laminat ve her bir şerit yolunu simüle eden noktalar kümesi

APDL kodu, geometri girişlerine dayalı olarak plaka geometrisini oluşturur ve malzeme özelliklerini içeren ağ yapısını kurar. Her nokta için saklanan x , y ve Q değerleri, en yakın ağ ağırlık merkezi noktasıyla eşleştirilir. Daha sonra, katman kalınlığı ve kompozit laminat tabakalarının belirli bir dizilim düzeniyle üst üste yerleştirildiği kabuk elemanları tanımlanır. Üç boyutlu geometri oluşturulduktan sonra, yükleme koşulu için modeli tamamlamak amacıyla sınır koşulları uygulanır.

5.2.1. Doğrulama çalışması

Doğrulama çalışması için, Antunes ve diğeri [12] tarafından yapılan çalışmada değişken katılığa sahip kompozit plakanın modal analiz sonuçlarıyla karşılaştırma yapılmıştır. Çalışma, deneysel modal analiz sonuçları ile teorik modelleri kapsamaktadır. Çalışmada iki farklı sınır koşulu dikkate alınmıştır. İlk koşulda (CFFF), plakanın bir kenarı sabitlenmişken diğer kenarlar serbest bırakılmıştır. İkinci koşulda (CFFC), iki kenar sabitlenmiş, diğer iki kenar ise serbest bırakılmıştır.



Şekil 5.4. Doğrulama çalışmasından elde edilen sınır koşulları

Plakanın boyutları genişlik $a = 400\text{mm}$, derinlik $b = 300\text{mm}$ ve toplam plaka kalınlığı $h = 1.8\text{mm}$ olup bu değer 10 katman için $0,18\text{mm}$ katman kalınlığıyla oluşturulmuştur. Katman istifleme düzeni şu şekildedir:

$$(\langle T_0|T_1 \rangle, \langle -T_0|-T_1 \rangle, \langle T_0|T_1 \rangle, \langle -T_0|-T_1 \rangle, \langle 90^\circ|90^\circ \rangle)$$

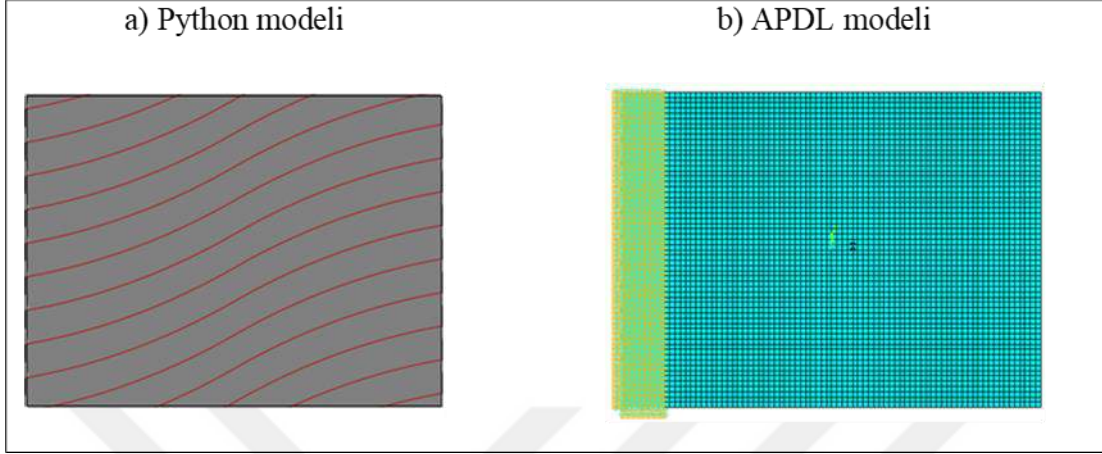
$T_0 = 30^\circ$ plakanın merkezindeki birincil açığı, $T_1 = 10^\circ$ ise kenarlardaki birincil açığı temsil etmektedir. Plaka malzemesi, yüksek performanslı bir kompozit olan ASA/8552'dir. Malzemenin mekanik özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Değişken katınlıklı kompozit laminatın malzeme özellikleri [12]

Özellik	Değer	Birim
Boyuna Young Modülü, E_1	126,3	GPa
Enine Young Modülü, E_2	8,765	GPa
Düzlem İçi Kayma Modülü, G_{12}	4,92	GPa
Enine Kayma Modülü, G_{13}	4,92	GPa
Enine Kayma Modülü, G_{23}	3,35	GPa
Poisson Oranı, ν	0,334	-
Kütle Yoğunluğu, ρ	1556,7	kgm^{-3}

Değişken katınlıklı kompozit laminatların yapılarını modellemek için APDL ve Python betikleri kullanılmaktadır. İş akışı ve adımlar, Bölüm 5.2'de belirtilen prosedüre uygun olarak gerçekleştirilmiştir. CFFF sınır koşulu için, Python betiği tarafından oluşturulan fiber

yönelimi modeli, sınır koşullarını ve test kurulumunu içeren APDL modeli ile birlikte Şekil 5.5’de gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Python ve APDL tarafından oluşturulan değişken katınlıklı kompozit laminat modelleri

CFFF sınır koşulları altında oluşturulan modeller üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, referans çalışmada bulunan verilerle karşılaştırılmış ve sonuçlar Çizelge 5.2’te gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Antunes tarafından raporlanan CFFF plakası için teorik doğal frekans sonuçları ile mevcut modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması. (Sonuçlar Hz cinsindedir)

Mod	Antunes [111] Sonuçları	Mevcut Model Sonuçları	Yüzde Hata
1	17,17	17,16	0,07
2	38,63	38,55	0,20
3	85,97	85,72	0,29
4	107,40	107,36	0,04
5	132,20	131,88	0,24
6	187,10	186,91	0,10
7	214,90	214,33	0,27

Analizlerden elde edilen doğal frekans değerleri, referans çalışmada bildirilen sonuçlarla %0,3’ten daha az bir fark göstermektedir. Bu durum, doğal frekans tepkilerinin oldukça yakın olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, oluşturulan kompozit plaka modelinin hem

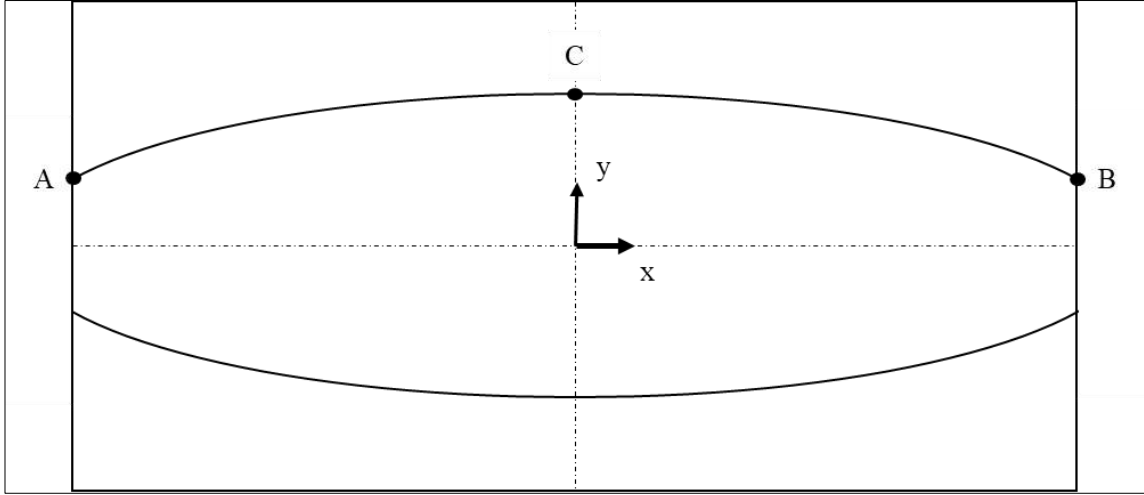
değişken hem de sabit katılık özelliklerinin doğru bir şekilde modellendiğini doğrulamaktadır.

5.3. Eğrisel Kirişlerle Takviye Edilmiş Kompozit Plakaların Modellenmesi

Bu bölüm, eğrisel kirişlerle takviye edilmiş kompozit laminatların modellenmesini ve APDL betiği ile Python betiği kullanılarak oluşturulan modellerin doğrulama çalışmalarını kapsamaktadır. Bölüm 5.2'de uygulanan adımlara benzer adımlar izlenmiş, ancak kirişleri modellemek için ek adımlar gerektiğinden daha karmaşık bir betik kullanılmıştır. Tüm işlemler matris işlemlerine dönüştürülerek çözüm süresi 10 kata kadar azaltılmıştır. Ağ oluşturma işlemi, ağ kalitesini artırmak ve kiriş bölgelerindeki ağ hassasiyetini düzenlemek için tüm plaka yüzeyini otomatik ağlamak yerine alan yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ek adımlar ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

5.3.1. Geometri parametrizasyonu

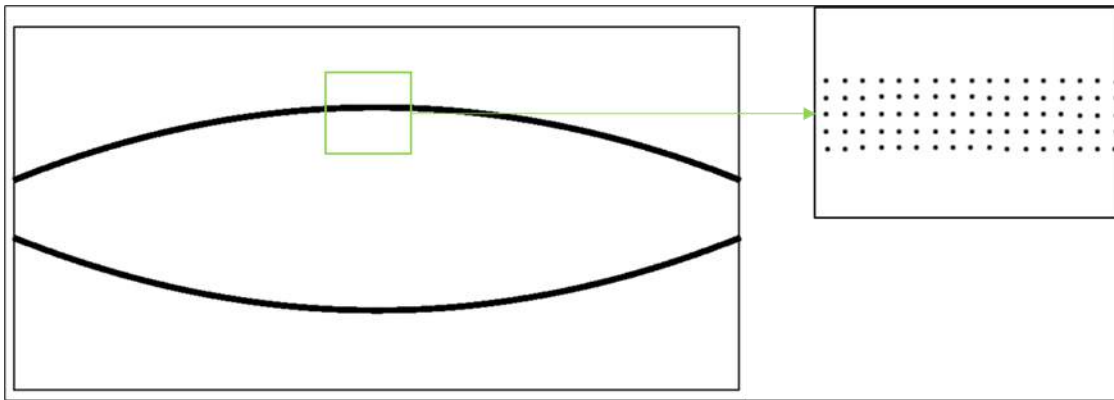
Bölüm 3.2.2'de bazı eğrisel kirişlerle takviye edilmiş kompozit laminatların geometri modelleme yaklaşımları tartışılmıştır. Bu çalışmada, kiriş eğrisel yolunu üç nokta ve kuadratik Bézier eğrisi kullanarak parametrik hale getirilmiştir. Başlangıç ve bitiş noktaları (A ve B), plakanın kenarlarında konumlandırılmıştır. Bu noktalar, kirişlerin plaka merkez eksenine göre kenarlardaki konumunu belirlemektedir. Üçüncü kontrol noktası olan C noktası, plakanın merkez ekseninde y eksenine doğrultusunda yerleştirilmiştir. Bu sayede, kiriş geometrisi üç değişkenle (A, B ve C noktalarının y koordinatları) tanımlanabilmektedir. Bu tez çalışmasında, tasarım değişkenlerinin sayısını azaltmak için iki kiriş x-ekseni etrafında simetrik olarak modellenmiştir. Örnek bir kiriş geometrisinin şeması Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Plaka üzerindeki eğrisel kiriş geometrisi şeması

5.3.2. Kabuk elemanları ile modelleme

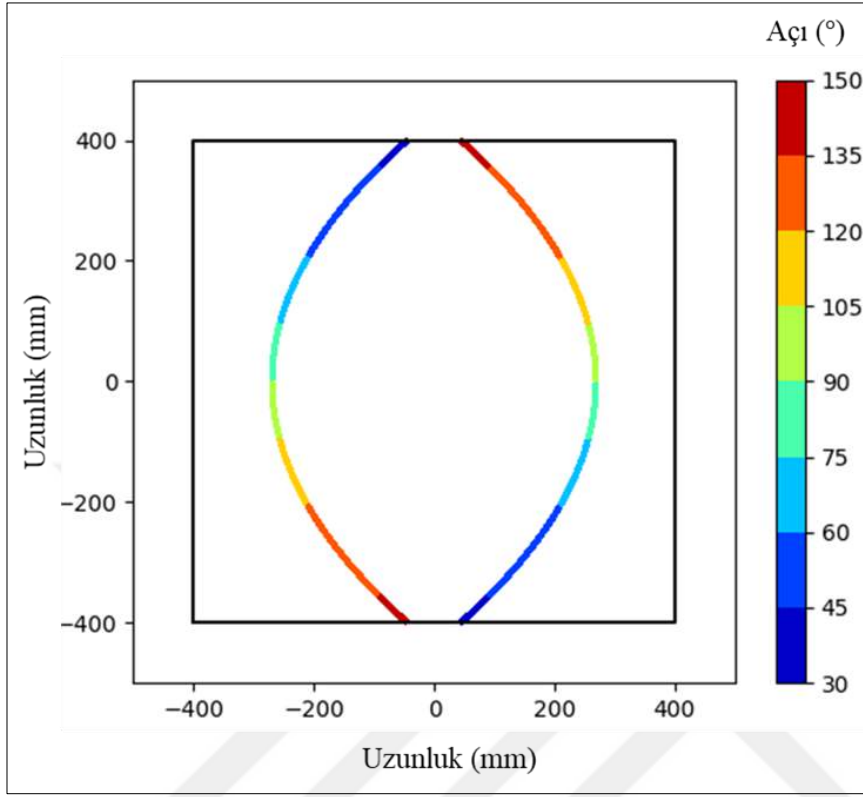
İlk olarak kirişin yolu belirlenir ve ardından bu kirişin serim yolu referans alınarak şerit genişliği oluşturulur. Her şerit, belirli sayıda şerit başlığı kullanılarak noktalar kümesiyle kaplanır ve böylece şerit yolları simüle edilir. Kiriş kalınlığı, şerit sayısı ve kalınlık bilgileri APDL betiğinden girdi olarak alınmaktadır. x, y ve Q değeri, APDL’de ilerleyen eşleme işlemi için saklanmaktadır. Kiriş serimlerini ve noktalar kümesini temsil eden grafikler Şekil 5.7’de gösterilmektedir.



Şekil 5.7 Kiriş şerit yollarını simüle eden noktalar ile örülmüş kompozit laminat

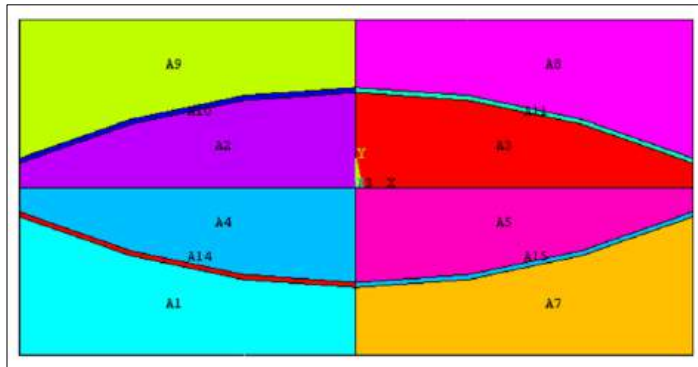
Python betiğinden, kiriş üzerindeki her birim nokta için serim açısı değerleri elde edilmiştir. Eğrisel kirişlerin her birim noktasındaki serim açısı değerleri Python betiği ile çizdirilmiştir. Grafik Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Bu grafik, elyafların plaka üzerine doğru açılarla

yerleştirildiğini doğrulamak için kullanılmıştır.



Şekil 5.8. Plaka üzerine serilen kirişlerin, serim açısı değerlerinin python kodu ile çizdirilmesi

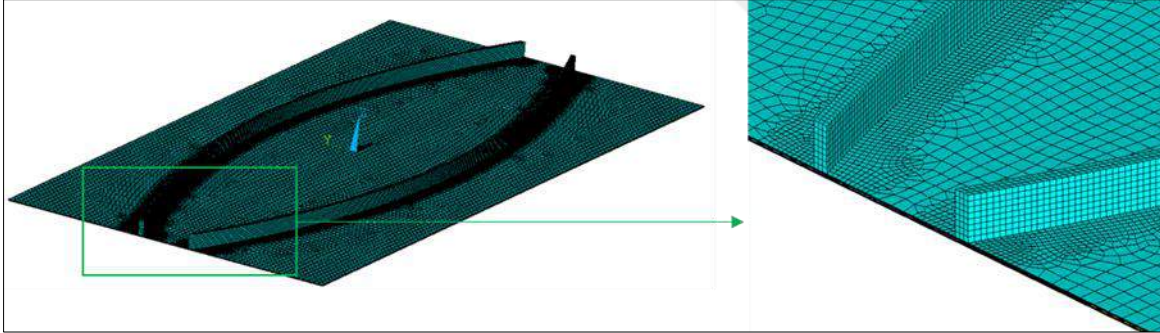
Kompozit plaka, Şekil 5.9'da gösterilen eğrisel kiriş yolları kullanılarak bölümlere ayrılmıştır. Alan bazlı ağ oluşturma komutu, eğrisel kiriş bölgelerinden dikdörtgenel alanlara yumuşak bir geçiş sağlayarak üç boyutlu modelde plaka ve kiriş arasında daha sorunsuz bir ağ yapısı oluşturur.



Şekil 5.9. Ağ oluşturma bölgelerine ayrılmış kompozit plaka modeli

Ağ yapısı ve malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra, saklanan koordinat ve açı değerleri en yakın ağ merkez noktasıyla eşleştirilir. Her katman için, plaka alt yüzeyinden kiriş üst yüzeyine kadar koordinatlar, açılar ve ağ kalınlığı değerleri matris dizilerine kaydedilir. Bu veriler, kabuk elemanlarının ve kalınlıklarının tanımlanmasında da kullanılmaktadır. Ağ yapısı ve kabuk elemanları ile oluşturulan üç boyutlu APDL modeli Şekil 5.10'da gösterilmiştir.

Kabuk elemanlarının modelleme için kullanılmasının en büyük avantajı, temas veya kısıtlama tanımlamaya gerek olmamasıdır. Kirişler ve plaka, ayrı kiriş/kabuk elemanları olarak tanımlanmadığı için modelleme sürecinin karmaşıklığı azalmaktadır. Ek olarak, kiriş düğümlerinin plaka düğümleriyle örtüşmesine de gerek duyulmamaktadır. Üç boyutlu geometri oluşturulduktan sonra, kiriş bölgelerinde ağ iyileştirmesi uygulanmaktadır. Son olarak, yükleme koşulları için modeli tamamlamak amacıyla sınır koşulları uygulanmaktadır.



Şekil 5.10. Eğrisel kirişlerle takviye edilmiş kompozit laminatın ağ yapısı ve kabuk elemanları ile oluşturulan üç boyutlu APDL modeli

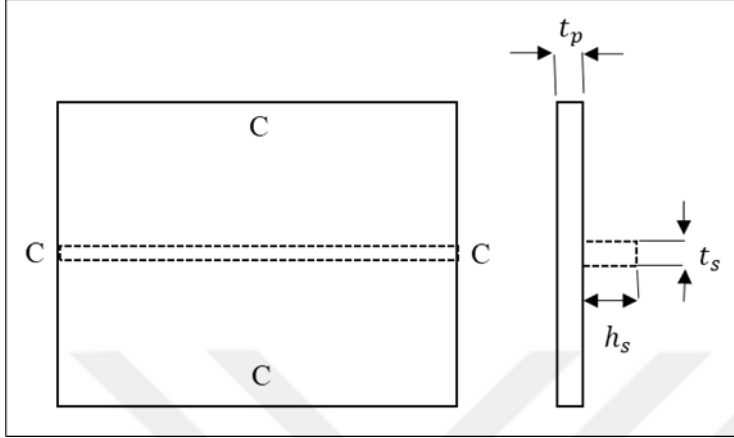
5.3.3. Doğrulama çalışmaları

Eğrisel kirişlerle takviye edilmiş kompozit plaka modelinin doğrulama çalışması iki aşamada incelenmiştir. İlk olarak düz kirişlerle yapılan çalışmalar ile sonrasında eğrisel kirişlerle takviye edilmiş çalışmalar ile karşılaştırma yapılmıştır.

Düz kirişlerle takviye edilmiş kompozit plakanın doğrulama çalışması

Kirişlerle güçlendirilmiş kompozit modelin doğruluğunu sağlamak için, temel bir tasarım olarak tek bir kiriş içeren model seçilmiştir. Tamamen sabitlenmiş sınır koşullarına (CCCC)

sahip olan bu takviyeli plaka, Şekil 5.11'de gösterildiği gibi, Lee ve Lee [4] tarafından yapılan bir araştırmaya karşılık gelmektedir. Bu araştırma, tek bir merkez kirişi bulunan izotropik bir kompozit plaka kullanılmıştır.



Şekil 5.11. Çapraz katmanlı kiriş içeren anizotropik plaka

Sayısal analiz, grafit-epoksi kompozit malzemeden (AS4/3501-6) yapılmış takviyeli bir kompozit plaka üzerine odaklanmaktadır. Malzeme özellikleri aşağıdaki gibidir:

Çizelge 5.3. AS4/3501-6'nın malzeme özellikleri [4]

Özellik	Değer	Birim
Boyuna Young Modülü, E_1	128	GPa
Enine Young Modülü, E_2	11	GPa
Düzlem İçi Kayma Modülü, G_{12}	4,48	GPa
Enine Kayma Modülü, G_{13}	4,48	GPa
Enine Kayma Modülü, G_{23}	1,53	GPa
Poisson Oranı, ν	0,25	-
Kütle Yoğunluğu, ρ	1500	kgm^{-3}

Kompozit plakanın istifleme dizisi $[0/\pm 45/90]_s$ şeklinde belirtilirken, kirişin çapraz katmanlı istifleme dizisi $[0_7/90_7]_s$ olarak verilmiştir. Şekil 5.11'de gösterilen kirişin boyutları $t_s \times h_s = 3,64mm \times 10,5mm$ olup, plakanın boyutları $250mm \times 500mm$ ve $t_p=1,04mm$ olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada ek olarak, kiriş (beam) modeli ve kabuk (shell) modeli karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, kiriş modeli kirişler için oldukça doğru

sonuçlar verse de, kabuk modeli ile elde edilen sonuçlarla büyük lde benzerlik göstermektedir. Takviyeli kompozit plakalar için en düşük beş doğal frekans izelge 5.4'de sunulmuştur. Mevcut sonuçlar, Lee tarafından raporlanan sonuçlarla %1,8'den daha az hata oranı ile uyum içindedir.

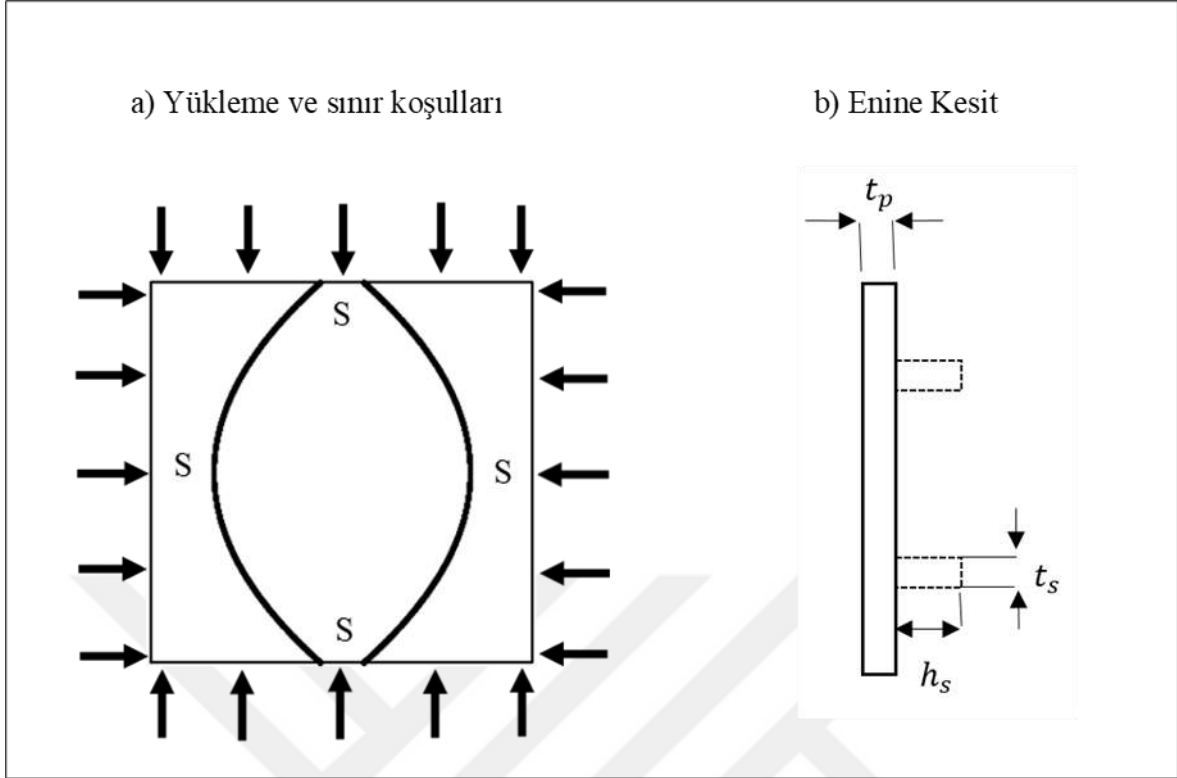
Çizelge 5.4. Lee Tarafından raporlanan ve mevcut çalışmada elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması. (Sonuçlar Hz cinsindedir) [4]

Mod	Lee Kiriş Modeli Sonuçları	Lee Kabuk Modeli Sonuçları	Mevcut Kabuk Modeli Sonuçları	Yüzde Hata Oranı
1	213,80	213,60	210,88	1,27
2	229,40	229,20	232,93	1,63
3	270,20	270,20	265,42	1,77
4	31,80	312,40	317,97	1,78
5	35,00	354,60	350,76	1,08

Eğrisel kirişlerle takviye edilmiş kompozit plakanın doğrulama alışması

Zhao ve arkadaşları [1] tarafından yapılan çalışmada, eğrisel kirişlerle takviye edilmiş kompozit panellerin titreşim ve burkulma davranışlarını incelemek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada burkulma yükü sonuçlarına odaklanılmış ve eğrisel kirişler için geliştirilen bir modelin doğrulaması amaçlanmıştır. Sonlu elemanlar analizi, APDL yazılımı kullanılarak, kenar uzunlukları 800 mm \times 800 mm olan ve düzlem içi iki eksenli yüklere maruz bırakılan kare bir panel üzerinde gerçekleştirilmiştir. Plaka ve kirişlerin kalınlığı $t_p = t_s = 8\text{mm}$ olarak belirlenmiştir.

Burkulma yükü üzerindeki kiriş yüksekliliği (h_s) etkisi araştırılmıştır. Bu doğrultuda farklı kiriş derinlik-geyişlik oranı (h_s/t_s) değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 5.12, plakanın yükleme ve sınır koşulları ile enine kesitini göstermektedir. Plaka basit mesnetlidir (SSSS) ve plakaya kenarlardan birim basma yükleri uygulanmıştır.



Şekil 5.12. Plakanın yük ve sınır koşulları ile enine kesiti

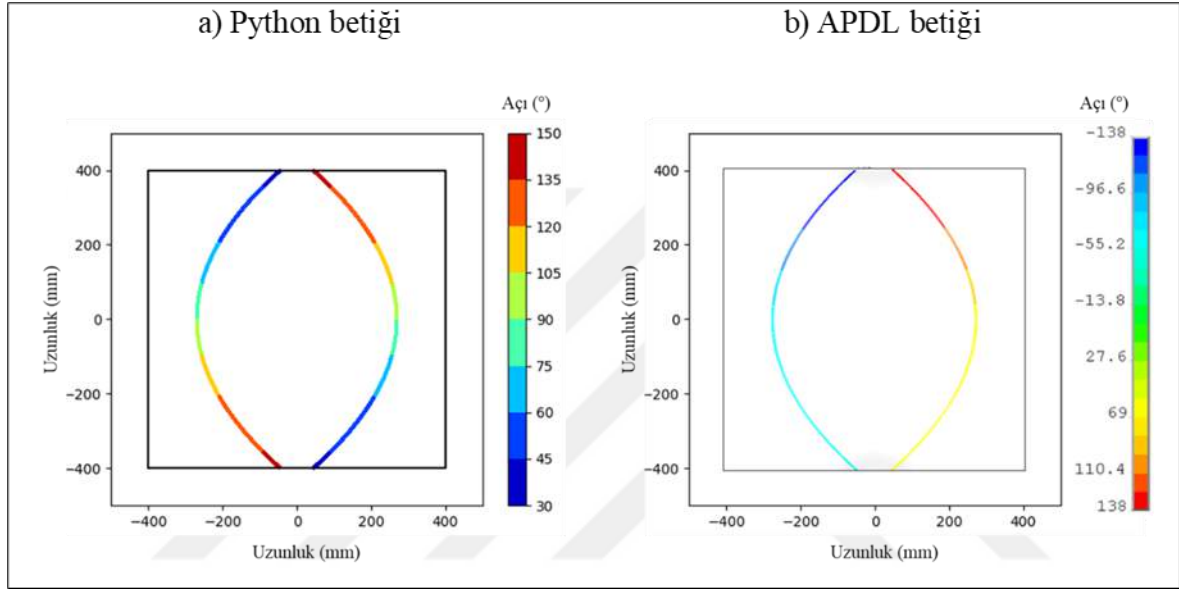
Kompozit panel ve kirişler için kullanılan malzeme T300/5208 grafit-epoksi olup, malzeme özellikleri Çizelge 5.5’de verilmiştir.

Çizelge 5.5. T300/5208 grafit-epoksi malzeme özellikleri [1]

Özellik	Değer	Birim
Boyuna Young Modülü, E_1	132,38	GPa
Enine Young Modülü, E_2	10,76	GPa
Düzlem İçi Kayma Modülü, G_{12}	5,65	GPa
Enine Kayma Modülü, G_{13}	5,65	GPa
Enine Kayma Modülü, G_{23}	3,38	GPa
Poisson Oranı, ($\nu_{12} = \nu_{13}$)	0,25	-
Poisson Oranı, (ν_{23})	0,49	-
Kütle Yoğunluğu, ρ	1800	kgm^{-3}

Panelin yerleşim dizilimi, sekiz katmandan oluşan simetrik çapraz katmanlı $[0/90/0/90]_s$ konfigürasyonuna sahiptir. Kiriş laminatı, sekiz katmandan oluşmakta ve panelin orta

düzlemine dik olacak şekilde düz lif dizilimli $[0]_8$ konfigürasyonunda düzenlenmiştir. Kiriş konfigürasyonu, panelin y eksenini boyunca eksantrik olarak konumlandırılmış iki simetrik kirişten oluşturulmuştur. Eğrisel kirişlerin her bir noktasındaki yerleşim açısı değerlerinin gösterimi Şekil 5.13’de verilmiştir. Bu grafik, liflerin plaka üzerine doğru açılarla yerleştirildiğini doğrulamak için kullanılmıştır. Ayrıca, Python kodunun APDL modeliyle olan uyumunu göstermektedir.

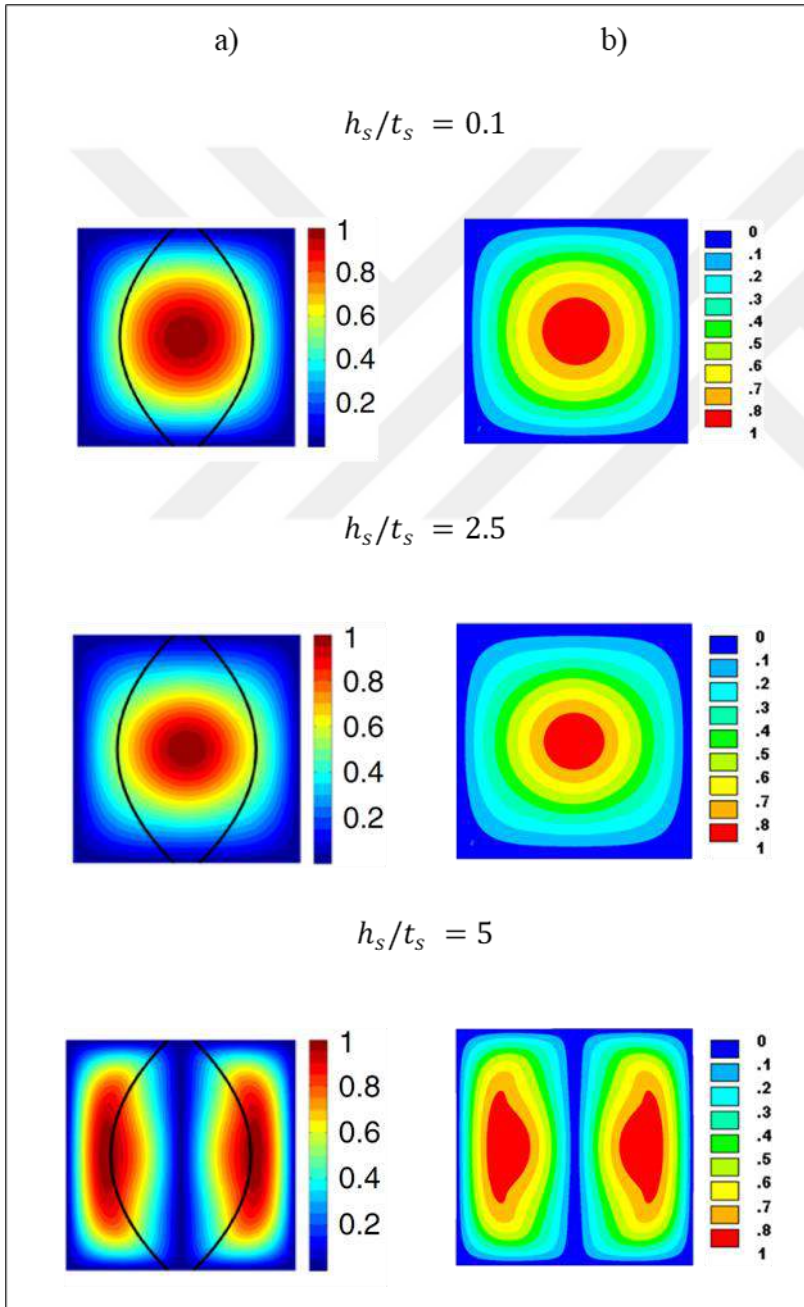


Şekil 5.13. Plaka üzerine serilen kirişlerin, serim açısı değerlerinin python betiği ve APDL betiği ile çizdirilmesi

Zhao ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada burkulma yükleri, kiriş içermeyen temel kompozit plakanın yükleri baz alınarak normalize edilmiştir. Temel kompozit plakanın burkulma yükü 56,1 N/mm olarak hesaplanmış olup, çalışmada hesaplanan 56,16 N/mm değerinden %1,3'ten düşük hata payına sahiptir. Farklı kiriş derinlik oranları için normalize edilmiş burkulma yükleri Çizelge 5.6’da özetlenmiştir. Burkulma modu şekilleri de Şekil 5.14’de gösterilmiş olup, mevcut model ile Zhao ve arkadaşlarının sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar arasındaki yüzde hata %1’den azdır ve bu da mevcut modelin doğruluğunu göstermektedir.

Çizelge 5.6. Zhao ve mevcut çalışma tarafından raporlanan normalleştirilmiş burkulma yüklerinin karşılaştırması

h_s/t_s	Zhao Sonuçları	Mevcut Sonuçlar	Yüzde Hata
0,1	1,01	1,01	< 0,001
2,5	3,90	3,85	1,28
5	7,30	7,24	0,82



Şekil 5.14. Zhao ve arkadaşları tarafından raporlanan burkulma modu şekilleri ile mevcut çalışmanın karşılaştırması, (a) ve (b) için sırasıyla verilmiştir

5.4. Ağ Yakınsama Çalışması

Bir ağ yakınsama çalışması, güvenilir sonlu eleman analizi (FEA) sonuçları elde etmek için gereken minimum eleman sayısını belirlemek amacıyla gerçekleştirilir. Bu işlem, aynı zamanda kabul edilebilir hesaplama süresini koruyarak yürütülür. Ağ, daha fazla iyileştirme yapıldığında sonuçlarda yalnızca ihmal edilebilir bir değişiklik meydana geldiğinde yakınsanmış olarak kabul edilir. Bu çalışmada, burkulma yükü sonlu eleman analizi tarafından tahmin edilen ve kararlı bir değere ulaşana kadar eleman boyutu 30 mm'den 4 mm'ye kadar adım adım azaltılmıştır. Yakınsama çalışması, Zhao ve arkadaşlarının [110] en güncel çalışması temel alınarak yapılmıştır. Bu çalışma, birim basınca maruz bırakılan basit mesnetli (SSSS) kompozit bir kompozit panel içermektedir. Panelin ölçüleri 800 mm x 800 mm olup, hem plaka hem de kirişler sekiz katmanlı bir yapıya sahiptir. Kiriş ve plakanın kalınlığı $t_p = t_s = 8\text{mm}$ olarak seçilmiştir. Yerleşim dizinimi plaka için $[0/90/0/90]_s$, kiriş için $[0]_8$ olarak belirtilmiştir. Kirişin yükseklik/kalınlık oranı $h_s/t_s = 5$ olarak alınmıştır.

Panel ve kirişler birlikte ağ oluşturularak modellenmiştir. Kiriş bölgelerinde ağ iyileştirmesi uygulanmıştır. Farklı kalınlıklara sahip kare kabuk elemanları plaka ve kirişlere uygulanmıştır. Ardışık sonlu eleman analizi simülasyonları, eleman boyutu küçültülerek tekrarlanmıştır. Yakınsama, en ince ağ boyutuyla elde edilen burkulma yüküne göre belirlenmiştir. Yüzde hata, gerçek burulma yükü 6mm eleman boyutu olacak şekilde aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır:

$$Hata \% = \frac{Burkulma\ Y\ddot{u}k\ddot{u} - Burkulma\ Y\ddot{u}k\ddot{u}_{ger\ddot{c}ek}}{Burkulma\ Y\ddot{u}k\ddot{u}_{ger\ddot{c}ek}} \times 100$$

Son olarak, hata %0.5'in altına düştüğünde ağ boyutu yeterli kabul edilmiştir. Çizelge 5.7'de, ağ yakınsama çalışmasının sonuçları verilmiştir. Yakınsama, eleman boyutu 10 mm olduğunda %0,1 hata oranı elde edilmiştir. Bu nedenle, son modelleme için 10 mm eleman boyutu seçilmiş ve toplamda 16,212 eleman kullanılmıştır.

Çizelge 5.7. Ağ yakınsama çalışması sonuçları

Eleman Boyutu (mm)	Eleman Sayısı	Burkulma Yüğü (N/mm)	Hata (%)
30	4 082	410,16	1,229
20	6 534	407,32	0,528
15	9 450	406,37	0,294
10	16 212	405,59	0,101
8	22 284	405,34	0,039
7	29 220	405,25	0,017
6	36 614	405,18	0,000

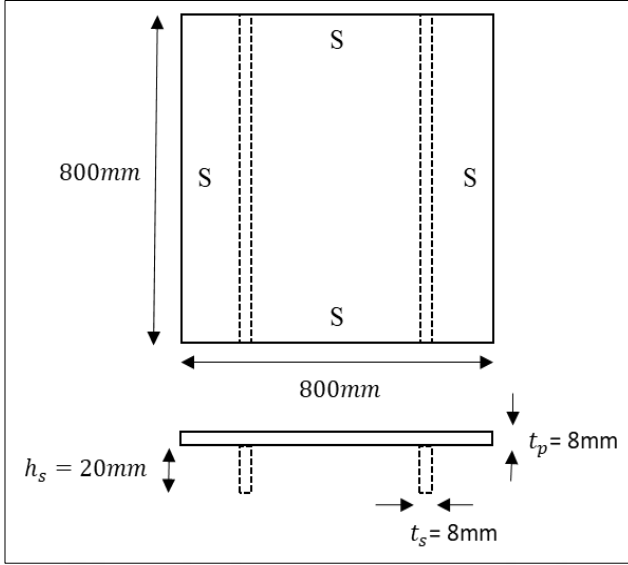


6. YÜKLEME KOŞULLARI VE ÖNEMLİ PARAMETRELERİN ETKİLERİ

Bu bölüm, farklı yükleme durumları için önemli parametrelerin etkisini ele almaktadır. Bölüm 6.1, eğrisel kirişlerle güçlendirilmiş kompozit plakanın serbest titreşim yanıtını incelerken, Bölüm 6.2 kompozit plakanın burkulma tepkilerini açıklamaktadır. Önemli parametreler olarak seçilen orta noktanın konumu (x_m) ve uç noktaların konumu (x_e) eğrisel kiriş geometrilerini oluşturmaktadır. Sonuçlar, bu noktaların konumlarına bağlı olarak farklı sınır koşulları için incelenmiştir. İlk olarak, A ve B noktalarının konumu (x_e) sabit tutulurken ve C noktası konumu (x_m) değiştirilmiştir. Daha sonra, C noktasının konumu sabit tutulurken A ve B noktalarının konumu değiştirilmiştir. Noktaların konum değişikliği yalnızca x ekseni boyunca yapılmıştır.

6.1. Eğrisel Kirişlerle Güçlendirilmiş Kompozit Plakaların Serbest Titreşim Analizi

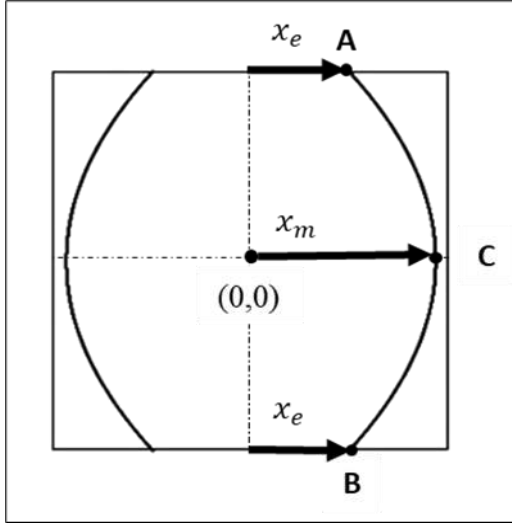
Bu çalışma, 800 mm × 800 mm boyutlarında kare bir kompozit panelin serbest titreşim analizini incelemektedir. Plaka katman kalınlığı 1 mm olarak belirlenmiş olup, 8 katmandan oluşan toplam 8 mm plaka kalınlığına sahiptir. Kiriş genişliği 8 mm, yüksekliği ise 20 mm olarak belirlenmiştir. Plaka boyutları Şekil 6.1’de gösterilmiştir. Hem plaka hem de kirişler, T300/5208 grafit/epoksi kompozit malzemeden üretilmiştir. Malzeme özellikleri Çizelge 5.5’de verilmiştir. Her bir bileşen, yani hem kirişler hem de kompozit lamine plaka, 8 katmanlı simetrik laminatlardan oluşmaktadır. Plaka dizilimi $[45/0/-45/90]_s$ şeklinde simetrik çapraz katmanlı yapı ile düzenlenmiştir. Önceki bölümler, sonlu eleman ağ boyutunun burkulma yükü değişimi üzerindeki yakınsama çalışmasını gözden geçirmiştir. Bu bölümle uyumlu olarak, plaka ve sertleştiriciler için sonlu eleman titreşim analizinde 10 x 10 mm ağ boyutu kullanılmıştır.



Şekil 6.1. Kompozit plakanın boyutları ve kesit görünümü

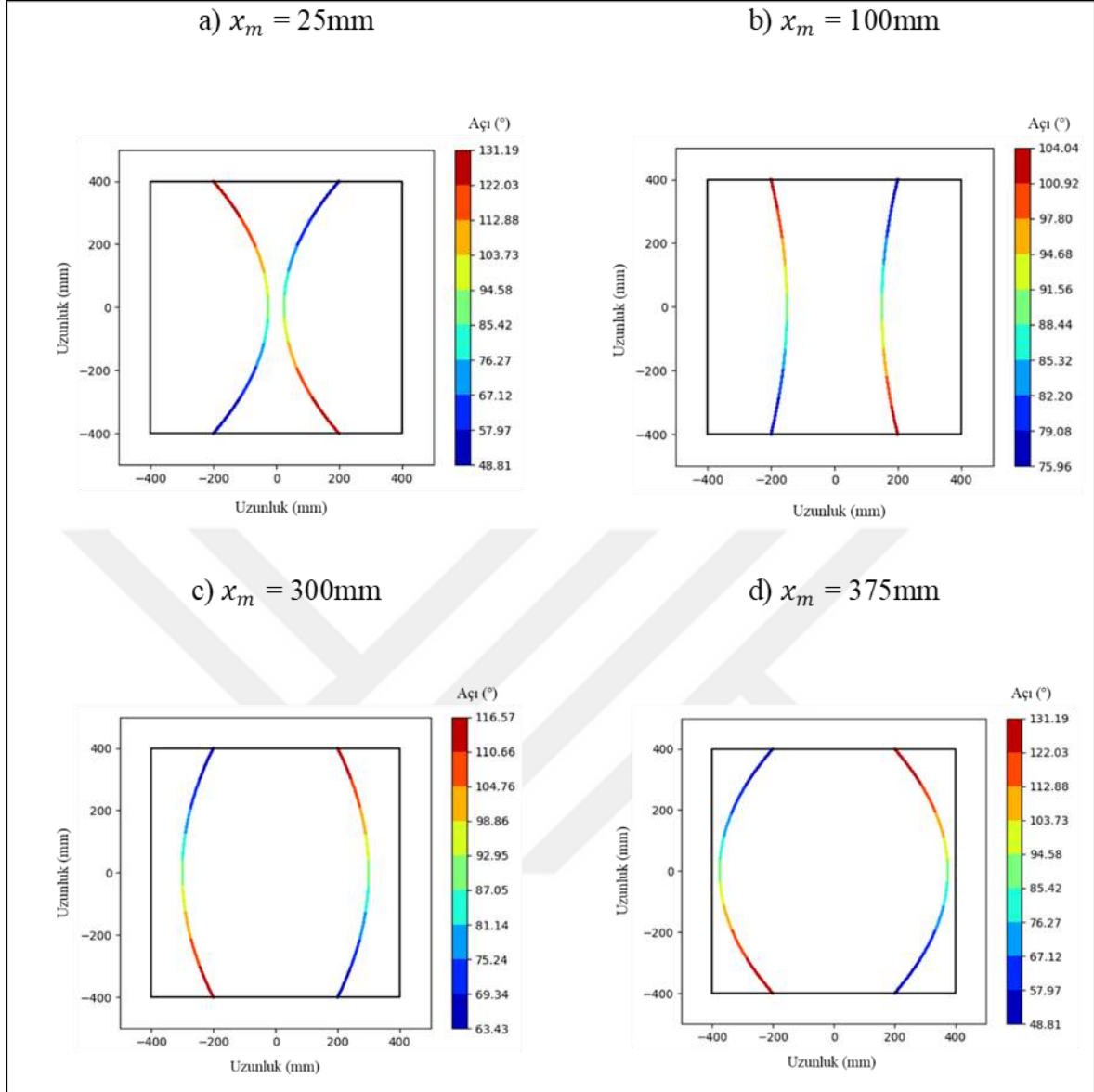
6.1.1. Eğrilik parametresinin etkisi - orta nokta

Bu bölümde, eğrilik, orta nokta koordinatlarının değiştirilmesiyle ayarlanmaktadır. A ve B uç noktaları, plakanın merkezinden $x_A = x_B = x_e = 200\text{mm}$ mesafede olacak şekilde yerleştirilmiştir. Orta noktanın konumu (x_m) ise 25 mm ile 375 mm arasında değişmektedir. Sonuçlar, düz kiriş durumu olan $x_m = 200\text{ mm}$ referans alınarak normalize edilmiştir. Orta nokta parametresi x_m , plakanın merkezinden 25 mm, 100 mm, 200 mm, 300 mm ve 375 mm olacak şekilde konumlandırılmıştır. Buna bağlı olarak, normalleştirilmiş koşulun dışında dört farklı durum ortaya çıkmıştır. Şekil 6.2 A, B ve C noktaları ve eğrilik parametreleriyle oluşturulan kiriş geometrisini göstermektedir.



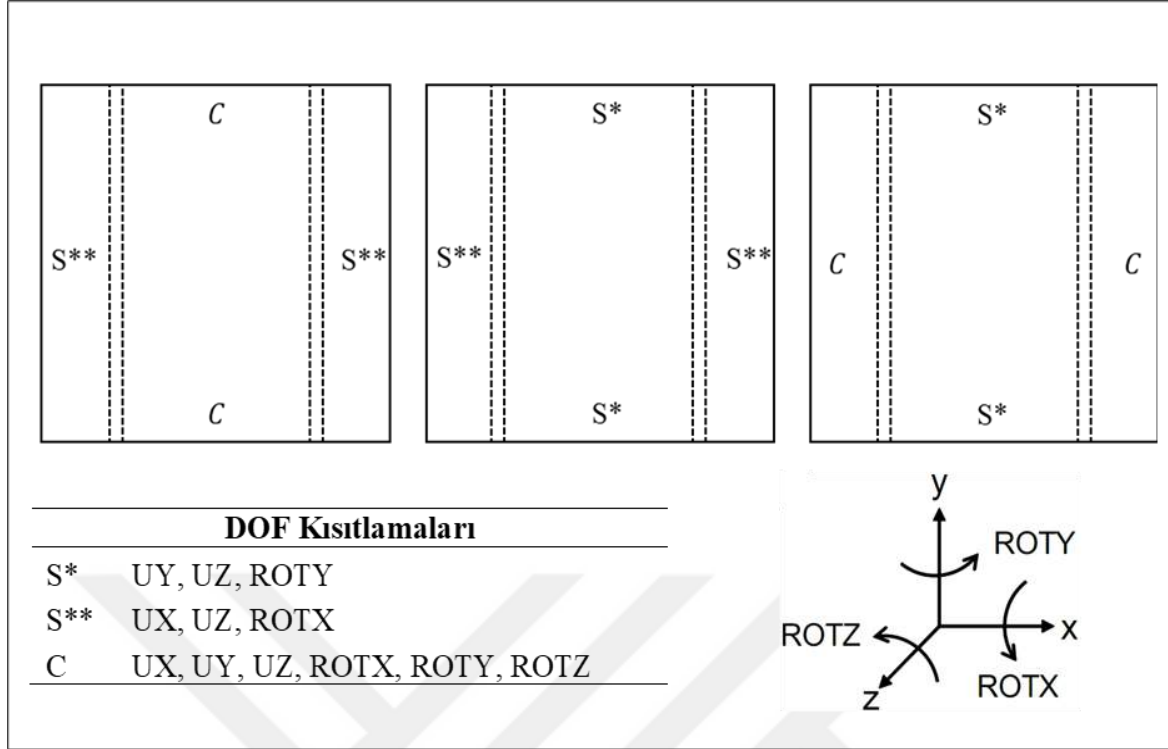
Şekil 6.2. Eğrilik parametreleri x_e ve x_m ile oluşturulmuş eğrisel kiriş yolunun temsili gösterimi

Eşleme işlemi için kullanılan eğrisel liflerin katman açılarının doğrulanması amacıyla, Python programı kullanılarak kontur grafikleri çizilmiştir. ANSYS APDL modelinden elde edilen kontur grafikleri de APDL ve Python modelleri arasındaki korelasyonu doğrulamak için karşılaştırılmıştır. Şekil 6.3, sertleştirilmiş kompozit plakaların farklı orta nokta konumları için tanımlanan dört farklı durumu için eğrilik geometrisini ve katman açılarını göstermektedir.



Şekil 6.3. Orta nokta eğrilik parametresi değişimine göre dört farklı durumun kontur grafiği

Belirlenen sınır koşulları, plakaların modal tepkisini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu analiz için, sabit mesnetli (CCCC) ve basit mesnetli (SSSS) sınır koşullarının üç farklı kombinasyonu değerlendirilmiştir. Şekil 6.4, üç farklı sınır koşulu konfigürasyonunu ve karşılık gelen serbestlik derecesi kısıtlamalarını göstermektedir.



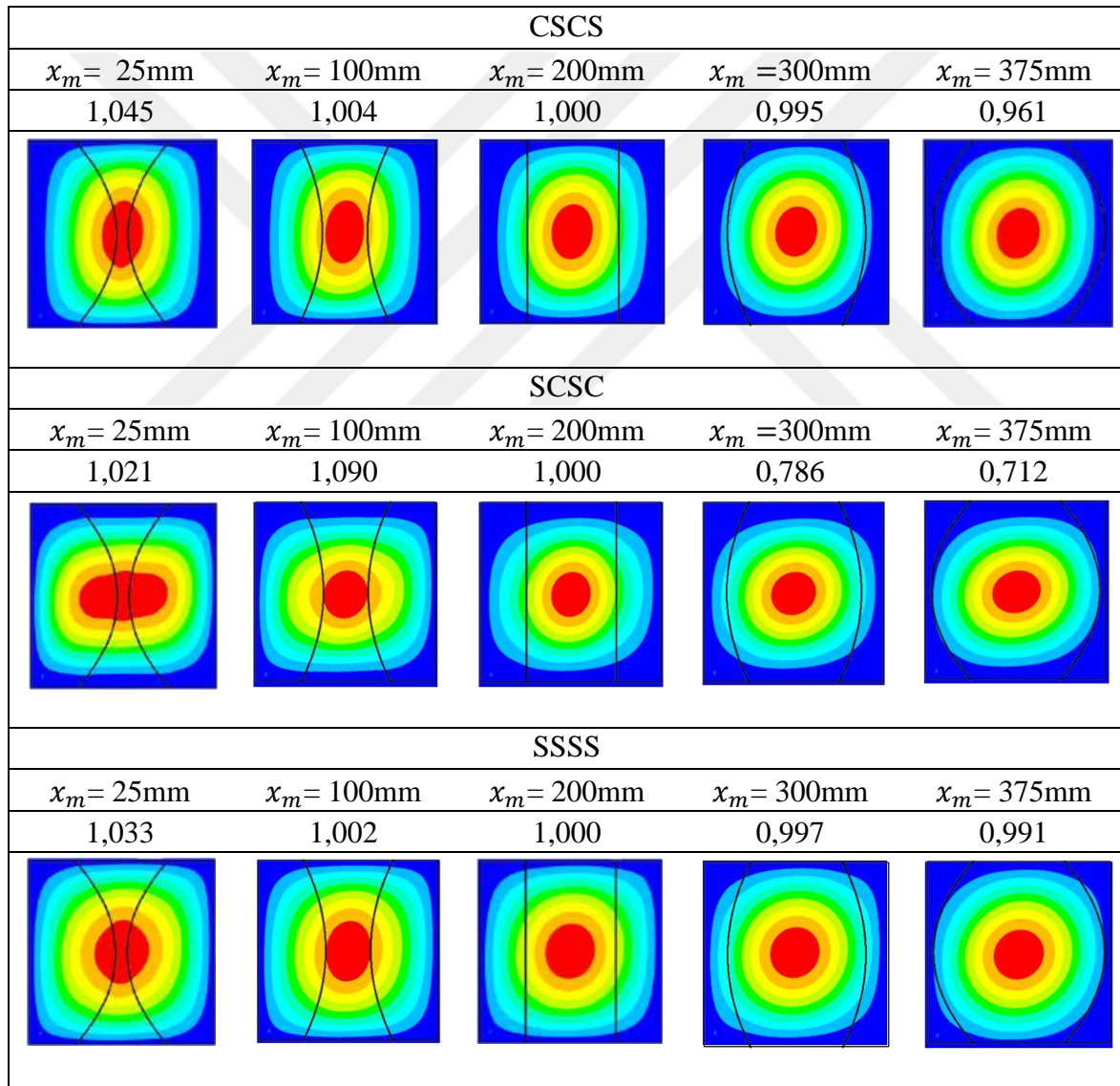
Şekil 6.4. Modal analiz ve optimizasyon için kompozit plaka sınır koşulları

Çizelge 6.1’de eğrilik parametresi (x_m) ile doğal frekansların değişimini göstermektedir. Sayısal sonuçlar, eğrisel kirişlerle güçlendirilmiş kompozit plakanın doğal frekans tepkisinin, kiriş eğrilik parametresinin değiştirilmesiyle herhangi bir ağırlık artışı olmadan iyileştirilebileceğini göstermektedir. SCSC durumu, farklı sınır koşulları arasında en yüksek mod frekanslarını vermektedir. Bunun nedeni, sertleştirici eleman kenarlarındaki tüm altı serbestlik derecesinin tamamen kısıtlanmış olmasıdır; bu da kompozit plakanın maksimum katılığa sahip olmasını sağlamaktadır. En yüksek doğal frekans, $x_m = 100\text{mm}$ için SCSC durumunda elde edilirken, en düşük değer $x_m = 375\text{mm}$ için bulunmuştur.

Çizelge 6.1. Farklı sınır koşulları için eğrilik parametreleri ile doğal frekans değişimi (Sonuçlar Hz cinsindedir)

BC	$x_m = 25\text{mm}$	$x_m = 100\text{mm}$	$x_m = 200\text{mm}$	$x_m = 300\text{mm}$	$x_m = 375\text{mm}$
CSCS	118,73	114,12	113,67	113,13	109,21
SCSC	147,48	157,47	144,43	113,52	102,90
SSSS	92,57	89,77	89,59	89,34	88,77

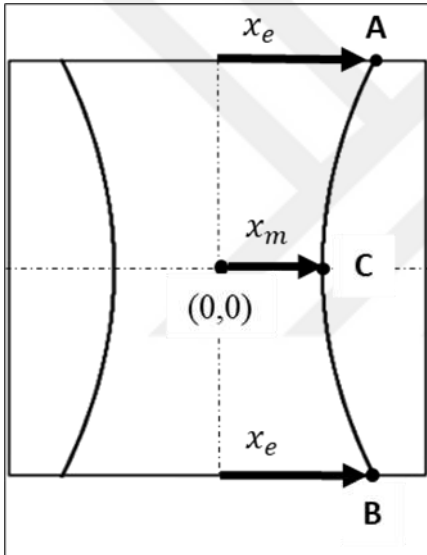
Şekil 6.5’de farklı sınır koşulları ve eğrilik parametresi x_m ile birinci mod şekillerinin değişimini göstermektedir. Sonuçlar, düz sertleştirici durumu ($x_m = 200\text{mm}$) referans alınarak normalize edilmiştir. Kirişler merkeze doğru yaklaştıkça, büyük deformasyonun gözlemediği alan güçlendirildiği için doğal frekans artmaktadır. Bunun aksine, kirişler dışa doğru büküldüğünde doğal frekans azalmaktadır. CSCS, SCSC ve SSSS durumları için sonuçlar sırasıyla %8, %34 ve %4,1’lik değişimler göstermektedir. Bu, kiriş eğriliğinin, kirişlerle güçlendirilmiş kompozit plakaların modal tepkisi üzerindeki önemli etkisini vurgulamaktadır.



Şekil 6.5. Farklı sınır koşulları ve eğrilik parametresi x_m ile birinci mod şekillerinin değişimi

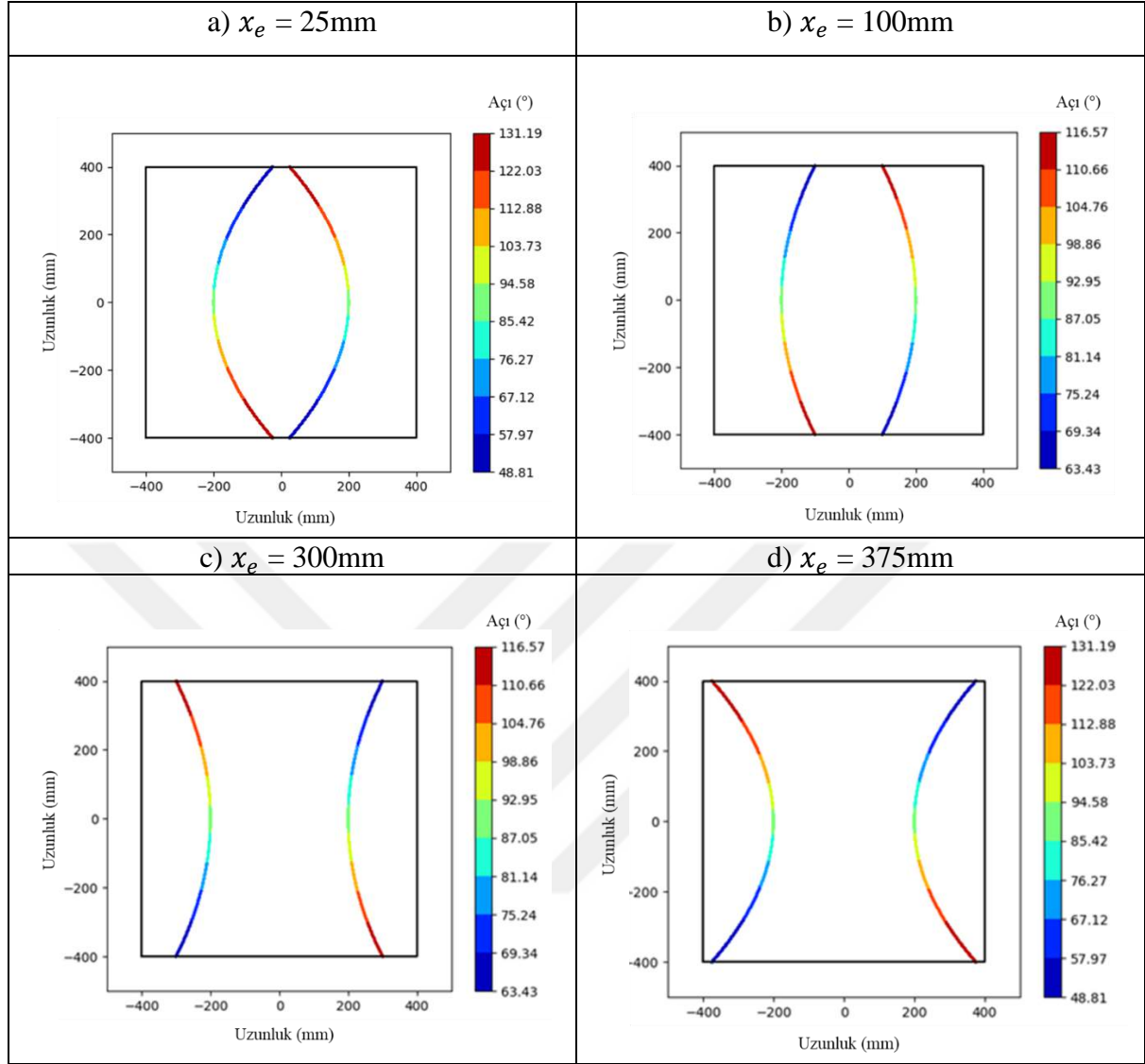
6.1.2. Eğrilik parametresinin etkisi – uç noktalar

Bu bölümde, eğrilik, uç nokta koordinatlarının değiştirilmesiyle ayarlanmaktadır. C merkez noktası, plakanın merkezinden $x_c = x_e = 200\text{mm}$ mesafede olacak şekilde yerleştirilmiştir. Uç noktaların konumu (x_e) ise 25 mm ile 375 mm arasında değişmektedir. Sonuçlar, düz kiriş durumu olan $x_e = 200\text{ mm}$ referans alınarak normalize edilmiştir. Uç bokta parametresi x_e , plakanın merkezinden 25 mm, 100 mm, 200 mm, 300 mm ve 375 mm olacak şekilde konumlandırılmıştır. Buna bağlı olarak, normalleştirilmiş koşulun dışında dört farklı durum ortaya çıkmıştır. Şekil 6.6 A, B ve C noktaları ve eğrilik parametreleriyle oluşturulan kiriş geometrisini göstermektedir.



Şekil 6.6. Eğrilik parametreleri x_e ve x_m ile oluşturulmuş eğrisel kiriş yolunun temsili gösterimi

Eşleme işlemi için kullanılan eğrisel liflerin katman açılarının doğrulanması amacıyla, Python programı kullanılarak kontur grafikleri çizilmiştir. ANSYS APDL modelinden elde edilen kontur grafikleri de APDL ve Python modelleri arasındaki korelasyonu doğrulamak için karşılaştırılmıştır. Şekil 6.7’de sertleştirilmiş kompozit plakaların farklı uç nokta konumları için tanımlanan dört farklı durumu için eğrilik geometrisini ve katman açılarını göstermektedir.



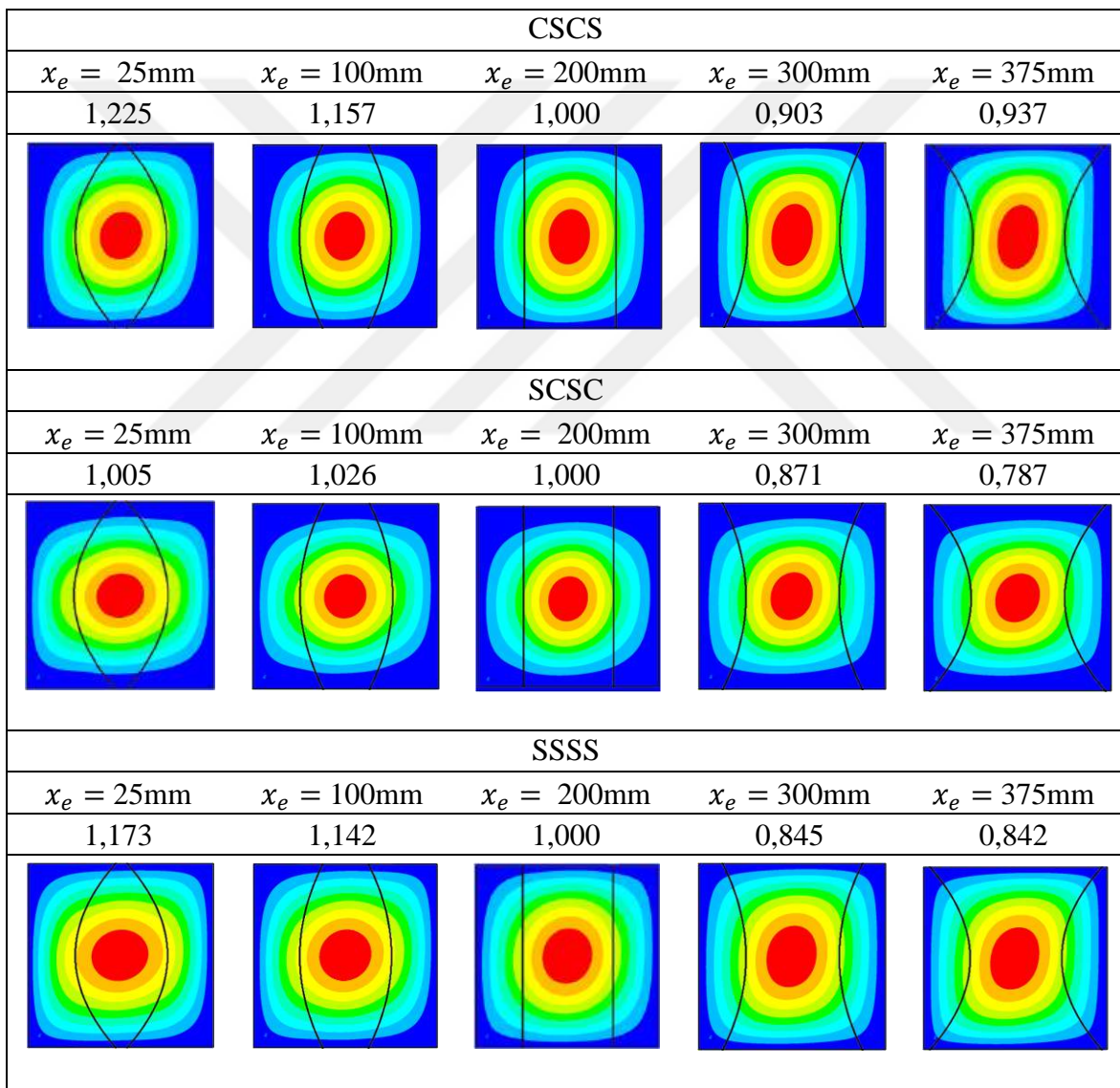
Şekil 6.7. Uç noktalar eğrilik parametresi değişimine göre dört farklı durumun kontur grafiği

Çizelge 6.2. Farklı sınır koşulları için eğrilik parametreleri ile doğal frekans değişimi (Sonuçlar Hz cinsindedir)

BC	$x_e = 25\text{mm}$	$x_e = 100\text{mm}$	$x_e = 200\text{mm}$	$x_e = 300\text{mm}$	$x_e = 375\text{mm}$
CSCS	139,29	131,47	113,67	102,70	106,55
SCSC	145,10	148,22	144,43	125,76	113,67
SSSS	105,07	102,29	89,59	75,74	75,46

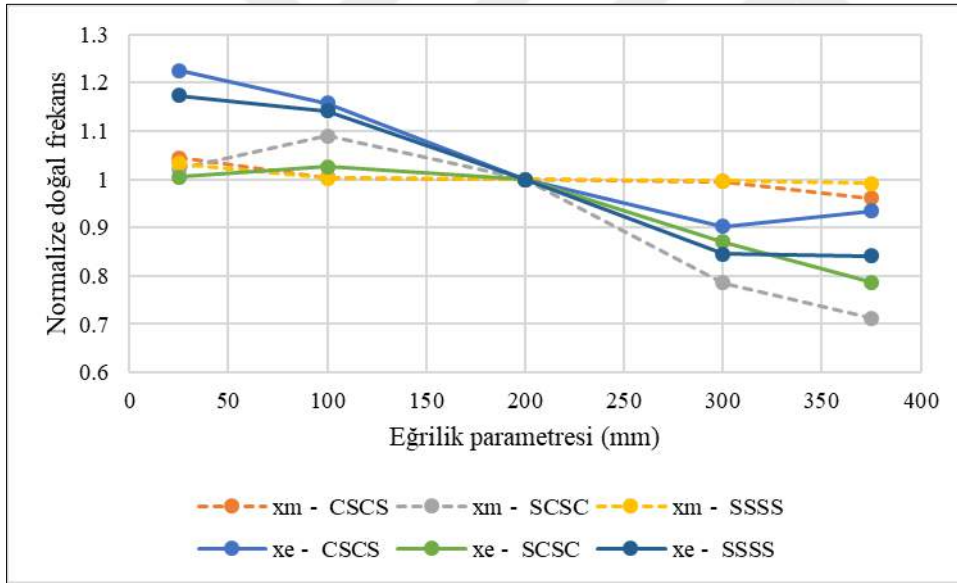
Çizelge 6.2’de eğrilik parametresi x_e ile ilgili doğal frekansların değişimini göstermektedir. Sayısal sonuçlar, orta nokta değişim yöntemi kullanılarak elde edilenlerle tutarlıdır. En yüksek doğal frekans olan 148,22 Hz, $x_e = 100\text{mm}$ olan SCSC durumunda gözlemlenirken,

en düşük doğal frekans olan 75,46 Hz, $x_e = 375\text{mm}$ olan SSSS durumunda meydana gelmiştir. Şekil 6.8., farklı sınır koşulları için birinci mod şekillerini göstermektedir. Sonuçlar, düz kiriş durumu ($x_e = 200\text{mm}$) baz alınarak normalleştirilmiştir. Uç noktalar, daha büyük deformasyonun gözlemlendiği merkeze doğru yaklaştıkça, doğal frekans artarken, tam tersi durumda, yani uç noktalar dışa doğru hareket ettiğinde, doğal frekans azalmaktadır. CSCS, SCSC ve SSSS durumları için sonuçlar sırasıyla %26,2, %23,3 ve %28,19'lük değişimler göstermektedir. Bu durum, kiriş eğriliğinin kompozit plakaların mod tepkisi üzerindeki önemli etkisini vurgulamaktadır.



Şekil 6.8. Farklı sınır koşulları ve eğrilik parametresi x_e ile birinci mod şekillerinin değişimi

Eğrilik parametrelerinin üç farklı sınır koşuluna verdiği doğal frekans tepkileri Şekil 6.9’ da toplu olarak verilmiştir. Genel olarak, eğrilik parametresinin artmasıyla birlikte normalize doğal frekansta azalma eğilimi gözlenmektedir. Bu durum, kiriş eğriliğinin merkezden uzaklaşarak artmasının sistem rijitliğini belirli sınırlar dahilinde azaltabileceğine ve buna bağlı olarak doğal frekansları düşürebileceğine işaret etmektedir. Maksimum normalize doğal frekans $x_e=25$ mm için CSCS sınır koşulunda %22,5 artış ile gözlenirken, minimum normalize doğal frekans $x_m=375$ mm için SCSC sınır koşulunda %28 azalma ile gözlemlenmiştir. x_m – SCSC ve x_e – SCSC konfigürasyonları eğrilik parametresi arttıkça en belirgin frekans azalmasını sergileyen konfigürasyonlar olarak öne çıkmaktadır. x_m – CSCS ve x_m – SSSS konfigürasyonları frekans değerlerini eğrilik boyunca neredeyse sabit tutmaktadır; bu da kiriş merkez eğriliğinin doğal frekans üzerindeki etkisinin az olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.9. Farklı sınır koşulları ve eğrilik parametreleri için normalize doğal frekans değerleri

6.2. Eğrisel Kirişlerle Güçlendirilmiş Kompozit Plakaların Burkulma Analizi

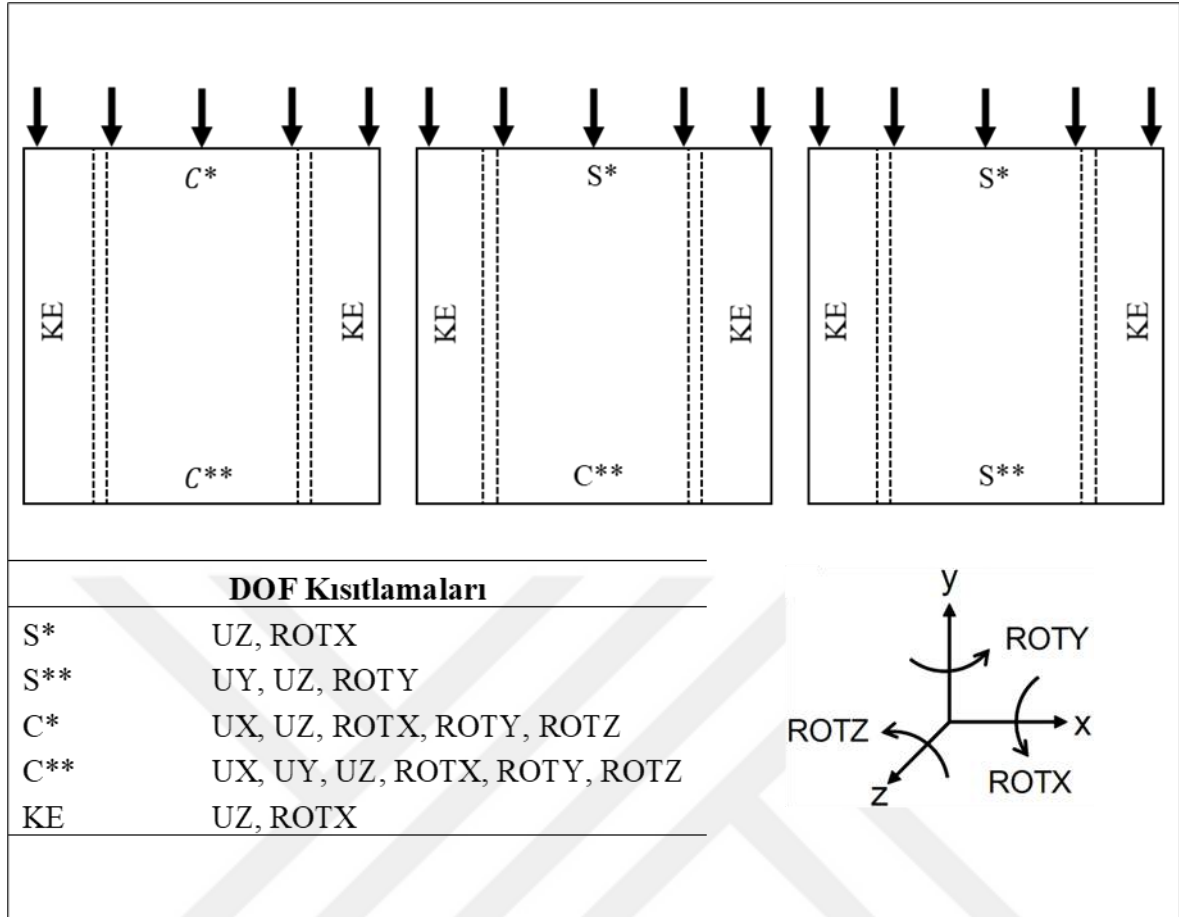
Bu çalışma, 800 mm x 800 mm boyutlarındaki kare bir kompozit plakanın burkulma tepkisini incelemektedir. Plaka katman kalınlığı 1 mm olarak belirlenmiş ve 8 katmandan oluşan bir yapı kullanılarak toplamda 8 mm plaka kalınlığı elde edilmiştir. Benzer şekilde, kiriş genişliği 8 mm ve yüksekliği 20 mm olarak belirlenmiştir. Plaka boyutları Şekil 6.2’de

gösterilmiştir. Hem plaka hem de sertleştiriciler, T300/5208 grafit/epoksi kompozit malzemeden üretilmiş olup, mekanik özellikleri Çizelge 5.5’de verilmiştir. Her bileşen, hem sertleştiriciler hem de kompozit lamine plaka, sekiz katmanlı simetrik katmanlardan oluşmaktadır. Malzeme yönelimi, sertleştiricinin uzunluk yönü ile hizalanmıştır. Plaka ve sertleştiricilerin sonlu eleman burkulma analizinde 10 x 10 mm’lik bir ağ boyutu kullanılmıştır.

6.2.1. Eğrilik parametresinin etkisi - orta nokta

Bu bölüm, eğrisel kirişlerle güçlendirilmiş kompozit plakanın eğrisel kiriş yolunun burkulma yüküne etkisini, uç nokta koordinatlarını (x_e) değiştirerek incelemektedir. A ve B uç noktaları, plakanın merkezinde sabitlenirken ($x_A = x_B = x_e = 200mm$), orta nokta ($x_C = x_m$), 25 mm ile 375 mm arasında değiştirilerek beş farklı konfigürasyon oluşturulmuştur. Normalleştirme için kullanılan düz kiriş konfigürasyonu ($x_m = 200mm$) ile birlikte dört ek eğrilik durumu daha analiz edilmiştir ($x_e = 25, 100, 300$ ve $375mm$). Şekil 6.2 A, B ve C noktalarını ve eğrilik parametresi x_m ’i göstermektedir. Eğrisel liflerin katman açılarını doğrulamak amacıyla, Python programı kullanılarak kontur grafikleri oluşturulmuş ve tutarlılığı sağlamak için ANSYS APDL modellerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu bölüm, Şekil 6.3’de farklı gösterilen dört geometri için ayrıntılı analiz sonuçlarını göstermektedir.

Bu çalışma için sabit mesnetli ve basit mesnetli kenar koşulları içeren üç farklı sınır koşulu ele alınmıştır. Tüm durumlarda, sol ve sağ kenarlar bıçak kenarı (Knife Edge – KE) kısıtlamalarıyla desteklenmiştir; bu kısıtlamalar, düzlem dışı deformasyonları sınırlandırır ve kenarın dönmesini engeller. Birim yükler, y-yönünde üst kenara uygulanmaktadır. Üç farklı sınır koşulu varyasyonu, Şekil 6.10’da gösterilmiştir.



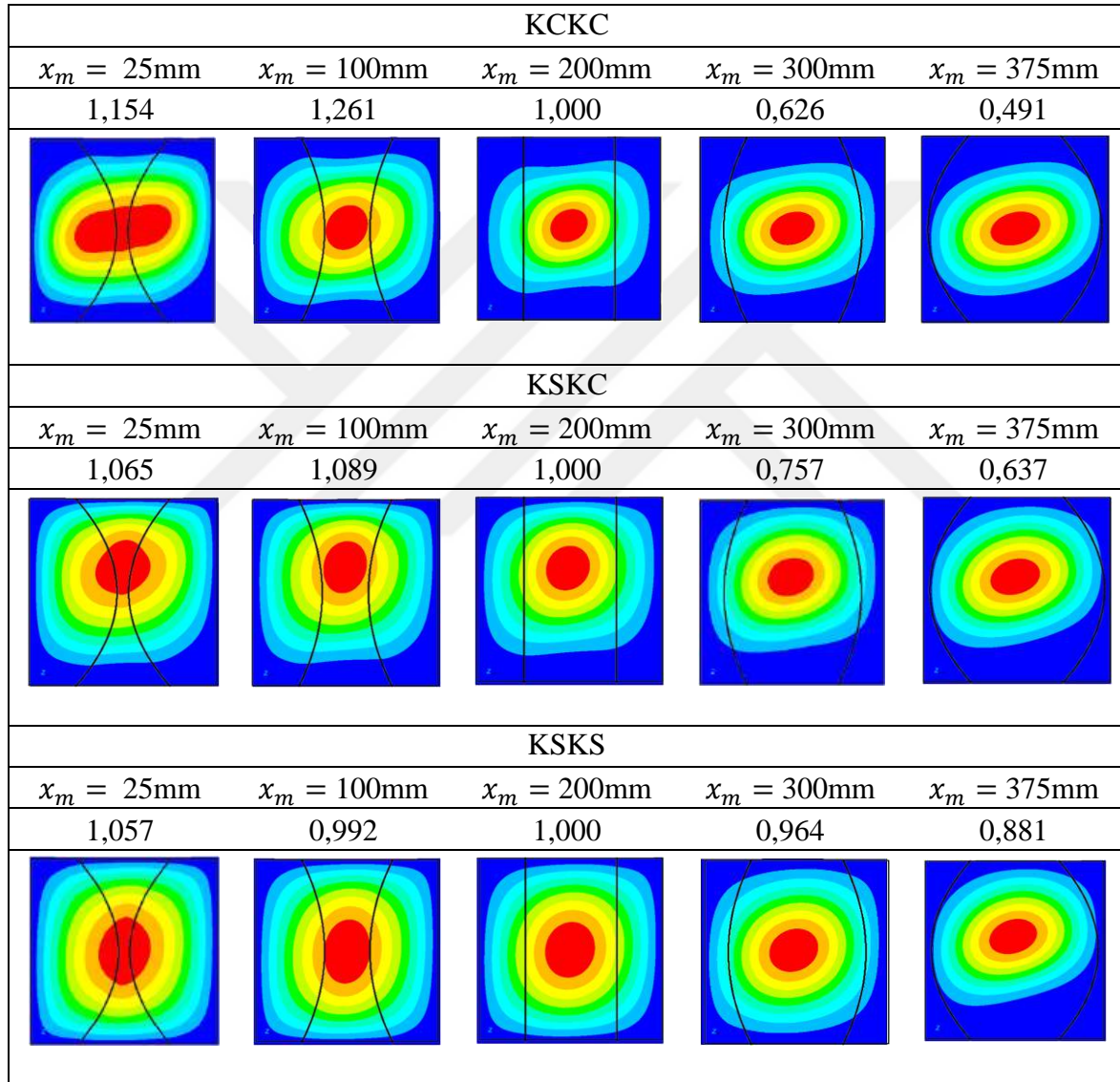
Şekil 6.10. Burkulma analizi ve optimizasyonu için kompozit plaka sınır koşulları

Çizelge 6.3’de eğrilik parametresi x_m ile burkulma yüklerinin değişimini göstermektedir. Sayısal sonuçlar, kiriş eğriliğinin değiştirilmesi yoluyla eğrisel kirişlerle güçlendirilmiş kompozit plakanın kritik burkulma dayanımının artırılabilceğini göstermektedir. Bu iyileştirme, herhangi bir ek ağırlık artışı olmadan sağlanmaktadır. En yüksek doğal frekans, $x_m = 100\text{mm}$ durumunda KCKC sınır koşulu için 714,16 Hz olarak gözlemlenirken, en düşük doğal frekans $x_m = 375\text{mm}$ durumunda KSKC sınır koşulu için 271,57 Hz olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.3. Farklı sınır koşulları için eğrilik parametreleri ile burulma yüklerinin değişimi (Sonuçlar Hz cinsindedir)

BC	$x_m = 25\text{mm}$	$x_m = 100\text{mm}$	$x_m = 200\text{mm}$	$x_m = 300\text{mm}$	$x_m = 375\text{mm}$
KCKC	653,58	714,16	566,52	354,74	278,20
KSKC	454,45	464,71	426,65	322,83	271,57
KSKS	325,99	305,79	308,36	297,18	271,70

Şekil 6.11’de farklı sınır koşulları ve eğrilik parametreleri için burkulma mod şekillerini ve burkulma yüklerini göstermektedir. Sonuçlar, düz kiriş konfigürasyonu ($x_m = 200\text{mm}$) referans alınarak normalize edilmiştir. KCKC, KSKC ve KSKS durumları için sonuçlar sırasıyla %61, %41,5 ve %16,6’lık değişim göstermektedir. Bu bulgular, sertleştirici eğrilüğünün sertleştirilmiş kompozit plakaların burkulma yanıtı üzerindeki önemli etkisini vurgulamaktadır.



Şekil 6.11. Farklı sınır koşulları ve eğrilik parametresi x_m ile birinci burkulma mod şekillerinin değişimi

6.2.2. Eğrilik parametresinin etkisi - uç noktalar

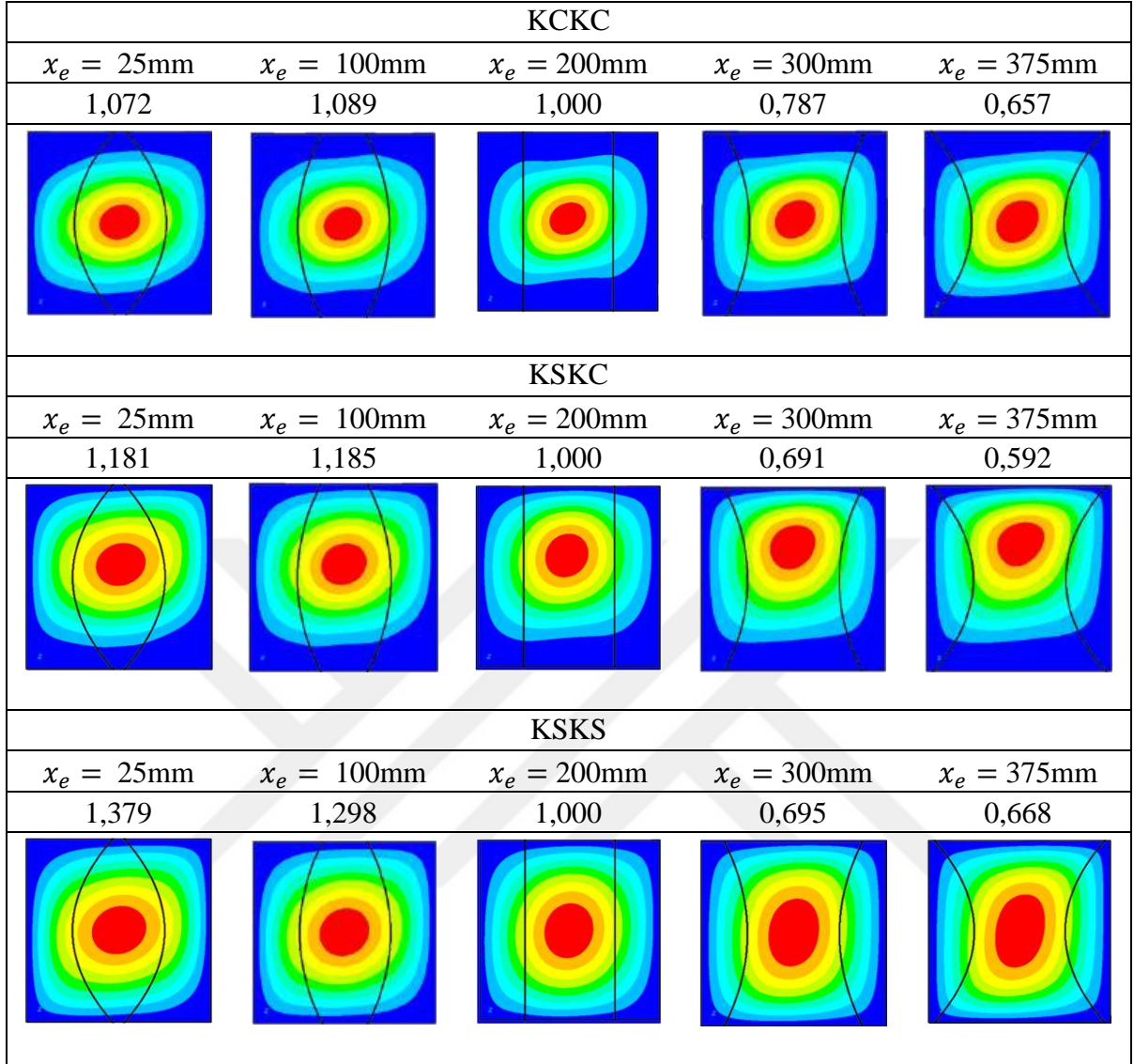
Bu bölüm, eğrisel kirişlerle güçlendirilmiş kompozit plakanın eğrisel kiriş yolunun burkulma yüküne etkisini, orta nokta koordinatlarını (x_m) değiştirerek incelemektedir. C noktası, plakanın merkezinde sabitlenirken ($x_c = x_m = 200mm$), kenar noktaları ($x_A = x_B = x_e$), 25 mm ile 375 mm arasında değiştirilerek beş farklı konfigürasyon oluşturulmuştur. Normalleştirme için kullanılan düz kiriş konfigürasyonu ($x_e = 200mm$) ile birlikte dört farklı kiriş geometrisi analiz edilmiştir ($x_e = 25, 100, 300$ ve $375mm$). Şekil 6.6 A, B ve C noktalarını ve eğrilik parametresi x_m 'i göstermektedir. Eğrisel liflerin katman açılarını doğrulamak amacıyla, Python programı kullanılarak kontur grafikleri oluşturulmuş ve tutarlılığı sağlamak için ANSYS APDL modellerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu bölüm, Şekil 6.7'de farklı gösterilen dört geometri için analiz sonuçlarını göstermektedir.

Çizelge 6.4'de burkulma yüklerinin eğrilik parametresi (x_m) ile nasıl değiştiğini göstermektedir. Sayısal sonuçlar, kiriş eğriliğinin değiştirilmesiyle herhangi bir ağırlık artışı olmaksızın burkulma yükü tepkisinin iyileştirilebileceğini göstermektedir. En yüksek doğal frekans olan 616,86 Hz, $x_m = 100mm$ için KCKC sınır koşulunda gözlemlenirken, en düşük doğal frekans olan 206,09 Hz, $x_m = 375mm$ için KSKS sınır koşulunda elde edilmiştir.

Çizelge 6.4. Farklı sınır koşulları için eğrilik parametreleri ile burkulma yüklerinin değişimi (Sonuçlar Hz cinsindedir)

BC	$x_e = 25mm$	$x_e = 100mm$	$x_e = 200mm$	$x_e = 300mm$	$x_e = 375mm$
KCKC	607,10	61,86	566,52	445,94	372,45
KSKC	503,87	505,41	426,65	294,61	252,72
KSKS	425,30	400,21	308,36	214,35	206,09

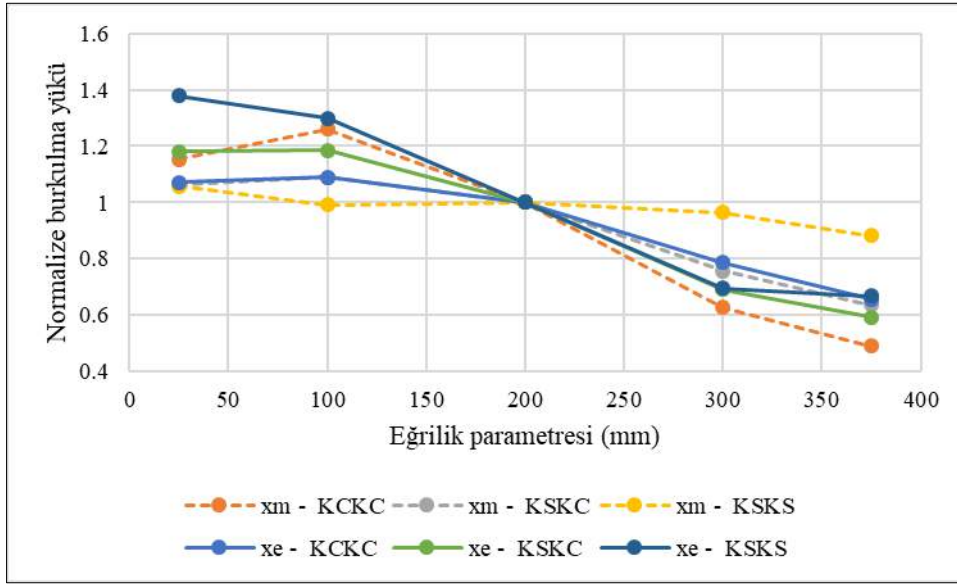
Şekil 6.12'de farklı sınır koşulları için burkulma mod şekillerini ve burkulma yüklerini göstermektedir. Sonuçlar, düz sertleştirici durumu ($x_e = 200mm$) referans alınarak normalize edilmiştir. KCKC, KSKC ve KSKS durumları için sonuçlar sırasıyla %39,6, %49,9 ve %51,5'lik farklar göstermektedir.



Şekil 6.12. Farklı sınır koşulları ve eğrilik parametresi x_e ile birinci burkulma mod şekillerinin değişimi

Eğrilik parametrelerinin üç farklı sınır koşuluna verdiği burkulma tepkileri Şekil 6.13’de toplu olarak verilmiştir. Genel olarak, eğrilik parametresinin artmasıyla birlikte normalize burkulma yükünde azalma eğilimi gözlenmektedir. Bu durum, kiriş eğriliğinin merkezden uzaklaşarak artmasının sistem rijitliğini belirli sınırlar dahilinde azaltabileceğine ve buna bağlı olarak burkulma yükünü düşürebileceğine işaret etmektedir. Maksimum normalize burkulma yükü $x_e=25\text{mm}$ için KCKC sınır koşulunda %38 artış ile gözlenirken, minimum normalize doğal frekans $x_m=375\text{mm}$ için KCKC sınır koşulunda %51 azalma ile gözlemlenmiştir. Uç nokta konfigürasyonları eğrilığe karşı daha duyarlıdır. Özellikle $x_e - \text{KCKC}$ ve $x_e - \text{KSKC}$ konfigürasyonları, düşük eğrilik değerlerinde yüksek burkulma yükleri sergilerken, eğrilik arttıkça performansta ciddi düşüşler yaşamaktadır. Bu durum, uç

nokta yerleşimli kirişlerin başlangıçta yük taşımaya katkı sağlasa da, artan eğrilik nedeniyle stabilite açısından zayıfladığını göstermektedir. Diğer yandan, orta nokta konfigürasyonları eğrilik değişimine karşı daha stabil bir davranış sergilemektedir. Özellikle x_m – KSKS konfigürasyonu, yüksek eğrilik değerlerinde dahi burkulma yükünü belirli bir seviyede tutarak merkezden yerleştirilen kirişlerin eğrilik karşısında daha kararlı bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. Bu konfigürasyonun, uçlardaki sınır koşulları açısından daha serbest olması nedeniyle lokal deformasyonlara daha toleranslı olduğu söylenebilir.



Şekil 6.13. Farklı sınır koşulları ve eğrilik parametreleri için normalize burkulma yükü değerleri

7. OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI

Bu bölüm, tez kapsamında gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarını ayrıntılı olarak ele almaktadır. Optimizasyon döngülerinin amacı, nihayetinde en iyi optimizasyon sonuçlarını verecek olan optimum giriş parametrelerini bulmaktır. Optimizasyon döngüleri için üç giriş parametresi seçilmiştir: orta nokta eğrilik parametresi (x_m), uç noktalar eğrilik parametresi (x_e) ve kiriş yüksekliği (h_s). Çıktı parametreleri ise normalize edilmiş toplam kütle, normalize edilmiş burkulma yükü ve kompozit plakanın katılığı olarak belirlenmiştir. Çıktı parametreleri, 20 mm yüksekliğinde (h_s) düz sertleştirici durumuna göre normalize edilmiştir. Eğrilik parametreleri 25 mm ile 375 mm arasında değişmektedir. Plaka geometrisi, kompozit malzeme, yükleme koşulları ve önemli parametrelerin etkileri, optimizasyon sonuçlarının önceki çalışmalarla karşılaştırılabilmesi için Bölüm 6 ile aynı tutulmuştur. Farklı parametre çiftleri farklı durumlarda kullanılırken, sınır koşulları tüm durumlar için KSKS olarak sabit tutulmuştur.

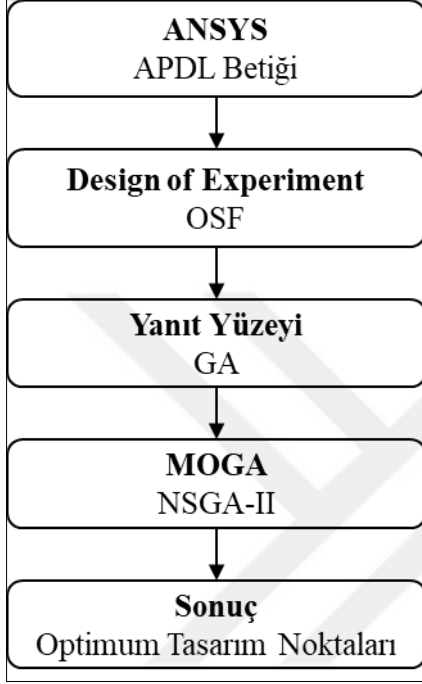
Optimizasyon işlemi için ANSYS Workbench'in Design Exploration modülü kullanılmıştır. Optimizasyon sürecinde üç alt modül kullanılmıştır:

- Optimal Alan Doldurma (Optimal Space Filling - OSF) ile Tasarım Deneyi (Design Experiment) ve 50 Tasarım Noktası (Design Point)
- Genetik Birleştirme (Genetic Aggregation - GA) ile Yanıt Yüzeyi (Response Surface)
- Sıralı Genetik Algoritma (Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II - NSGA-II) kullanan Çok Amaçlı Genetik Algoritma (Multiobjective Genetic Algorithm - MOGA)

Coşkun [129], seçilen tasarım noktalarının yanıt yüzeyinin yakınsamasını sağladığını doğrulamıştır. Sonuç olarak, iki veya daha fazla giriş parametresi içeren optimizasyon durumları için OSF algoritması kullanılarak 50 tasarım noktası seçilmiştir. Tek bir giriş parametresi olan durumlarda 10 tasarım noktası kullanılmıştır. Bu noktalar, önceki bölümlerde açıklanan sonlu eleman yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir.

Bu sonuçlara dayanarak, GA yöntemi ile bir yanıt yüzeyi oluşturulmuştur. GA, optimum sonucu İkinci Derece Polinomlar, Parametrik Regresyon, En Küçük Kareler (Moving Least Squares) ve Kriging ikame modelleri kullanarak seçmektedir. Algoritma, tüm ikame

modellerinin popülasyonunu analiz ederek tek bir yanıt yüzeyi veya birden fazla yanıt yüzeyinin birleşimini oluşturur. Daha sonra optimizasyon MOGA yöntemi kullanılarak verilen hedefler doğrultusunda gerçekleştirilmiş ve optimum tasarım noktaları belirlenmiştir. Optimizasyon şeması Şekil 7.1’de gösterilmektedir.



Şekil 7.1. Optimizasyon şeması

7.1. Optimizasyon Çalışması – I

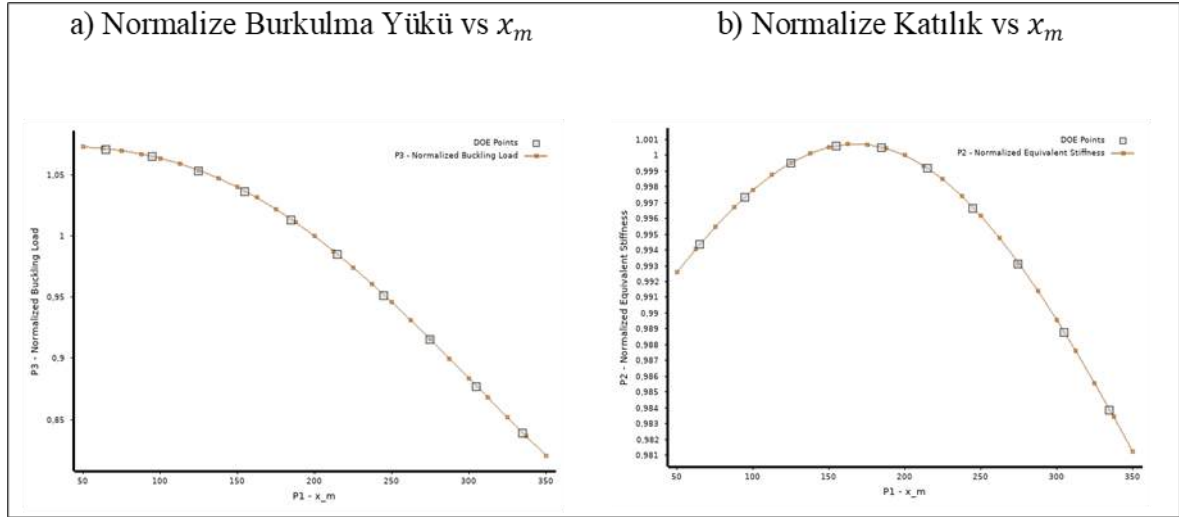
Bu çalışmada, eğrilik parametresi olan orta nokta (x_m) giriş parametresi olarak seçilirken, normalize edilmiş katılık ve normalize edilmiş burkulma yükü çıktı parametreleri olarak belirlenmiştir. Optimizasyon çalışması için yalnızca bir giriş parametresi olduğu için, yanıt yüzeylerini oluşturmak amacıyla 10 tasarım noktası seçilmiştir. GA yöntemi kullanılarak oluşturulan yanıt yüzeyleri Şekil 7.2’de hassasiyet analizi Şekilde 7.3’de optimum geometri ise Şekil 7.4’de gösterilmiştir. Ayrıca, örnekleme noktaları için kullanılan ikame modellerine ait detaylar Çizelge 7.2’de gösterilmiştir.

Optimizasyon işlemi, hem normalize edilmiş katılığı hem de normalize edilmiş burkulma yükünü maksimize etmeyi amaçlamaktadır. Önceki bölümlerde kullanılan yöntemle benzer şekilde, x_m parametresi 25 mm ile 375 mm aralığında değişmektedir. Üç optimum tasarım noktası (OTN) için elde edilen optimizasyon sonuçları Çizelge 7.1’de özetlenmiştir.

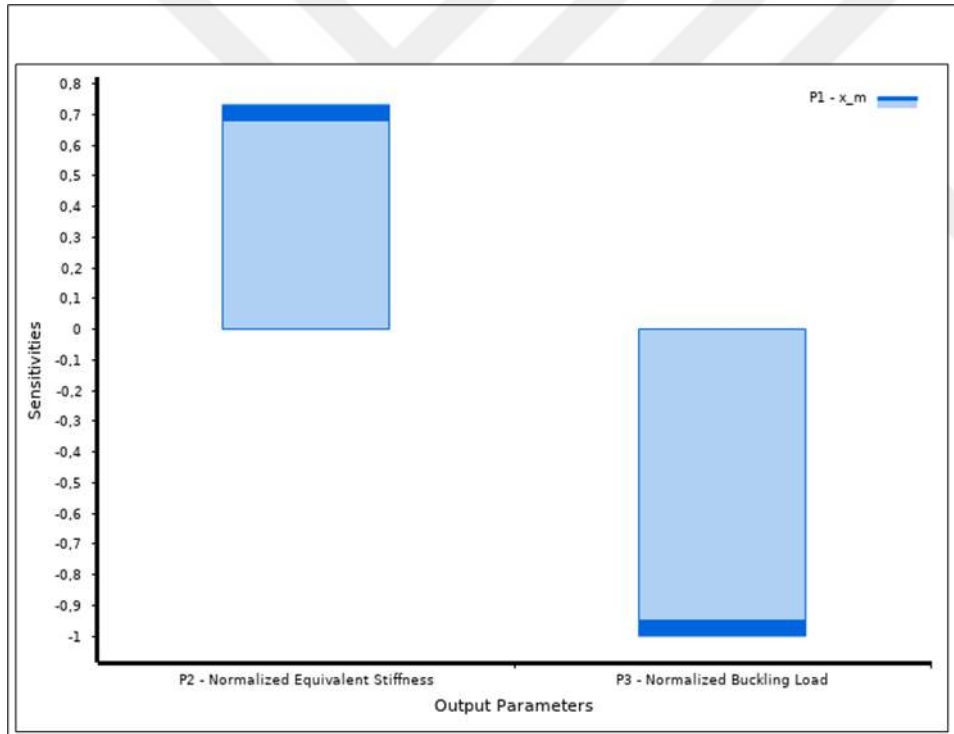
Çizelge 7.1. Optimizasyon çalışması – I için elde edilen optimum tasarım noktaları ve optimizasyon sonuçları

Parametreler	OTN 1	OTN 2	OTN 3
x_m (mm)	135,500	144,500	117,500
Normalize burkulma yükü	1,049	1,043	1,057
Normalize katılık	1,0000	1,0004	0,9991

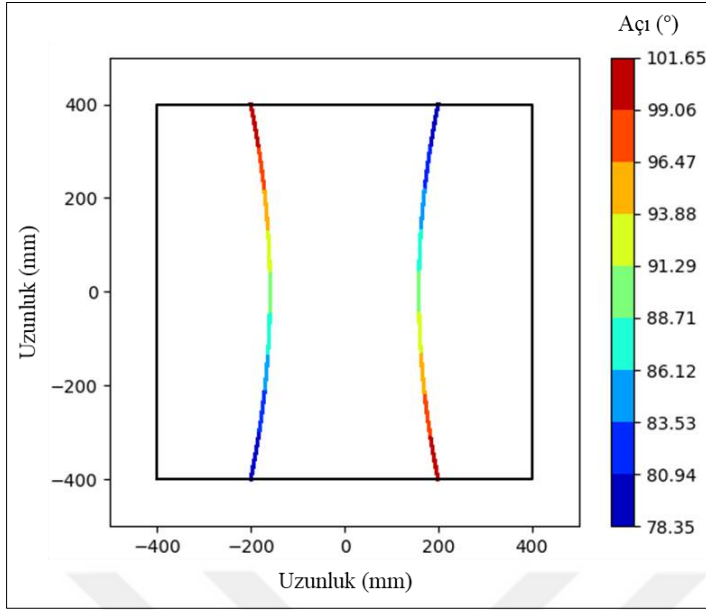
Optimizasyon Çalışması - I'den elde edilen sonuçlar, x_m parametresinin normalize edilmiş katılık üzerinde minimum bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir; çünkü üç aday çözüm için katılık neredeyse sabit kalmıştır. Buna karşılık, normalize edilmiş burkulma yükü hafif dalgalanmalar göstermektedir ve en yüksek değer 1,057 olarak OTN 3'te ($x_m = 117,5\text{mm}$) elde edilmiştir. Benzer şekilde, $x_m = 135,5\text{mm}$, kritik burkulma yükünde %4.9'luk bir artış sağlarken, katılık değeri neredeyse aynı kalmıştır. Hassasiyet analizi, x_m 'in kritik burkulma yükü ve katılık üzerindeki mutlak duyarlılığının oldukça yüksek olduğunu göstermektedir ve bu değerler 0,7 veya daha büyük olabilmektedir. Bu durum, x_m 'in her iki çıktı parametresi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu, ancak bu etkinin zıt yönlerde gerçekleştiği görülmektedir. Sonuç olarak, grafik bir ödünleşim olduğunu vurgulamaktadır: x_m 'in artırılması katılığı iyileştirirken burkulma yükünü azalmaktadır. Eğer burkulma yükü öncelikli bir kriterse x_m 'deki artışlar kontrol altında tutulmalıdır. Öte yandan, eğer eşdeğer rijitlik daha kritikse, x_m 'in daha yüksek değerleri tercih edilir. Genome üyeler çizelgesi, katılık modelinin dengeli ve basit olduğunu, ancak burkulma yükü modelinin daha karmaşık ve bağımlılıkları bulmak için daha ayrıntılı ve çeşitli bir yaklaşım gerektirdiğini göstermektedir.



Şekil 7.2. Optimizasyon çalışması – I için yanıt yüzeyleri



Şekil 7.3. Optimizasyon çalışması - I için girdi ve çıktı parametrelerinin hassasiyet analizi



Şekil 7.4. Optimizasyon çalışması I sonucu elde edilen optimum geometri

Çizelge 7.2. Optimizasyon çalışması – I için GA metodunda ikame modelinde kullanılan genom üyeleri

Normalize Katılık
Rank = 1 , Ensemble Genome , 3 Members : member 0, weight = 0,33425, Kriging, Kernel Type = Damped Sin, Kernel Variation Type = Isotropic, Regression Type = Pure Quadratic member 1, weight = 0,33237, Kriging, Kernel Type = Gaussian, Kernel Variation Type = Isotropic, Regression Type = Linear member 2, weight = 0,33338, Kriging, Kernel Type = Gaussian, Kernel Variation Type = Anisotropic, Regression Type = Full Quadratic
Normalize Burkulma Yüğü
Rank = 1 , Ensemble Genome , 5 Members : member 0, weight = 0,32614, Kriging, Kernel Type = Damped Sin, Kernel Variation Type = Anisotropic, Regression Type = Constant member 1, weight = 0,010487, Polynomial Regression, Polynomial Type = Full Quadratic, Output Transformation Type = Yeo-Johnson, Confidence Level = 0.05 member 2, weight = 0,33755, Kriging, Kernel Type = Damped Sin, Kernel Variation Type = Isotropic, Regression Type = Pure Quadratic member 3, weight = 0,32349, Kriging, Kernel Type = Gaussian, Kernel Variation Type = Anisotropic, Regression Type = Full Quadratic member 4, weight = 0,0023305, Support Vector Regression, Epsilon Value = 0,1, Support Vector Kernel Type = Gaussian, Loss Function Type = Laplace

7.2. Optimizasyon Çalışması – II

Bu çalışmada, eğrilik parametresi olan uç noktalar (x_e) giriş parametresi olarak seçilirken, normalize edilmiş katılık ve normalize edilmiş burkulma yükü çıktı parametreleri olarak belirlenmiştir. Optimizasyon çalışması için yalnızca bir giriş parametresi olduğu için, yanıt yüzeylerini oluşturmak amacıyla 10 tasarım noktası seçilmiştir. GA yöntemi kullanılarak oluşturulan yanıt yüzeyleri Şekil 7.5’de optimum kiriş geometrisi Şekil 7.6’da hassasiyet analizi ise Şekilde 7.7’de gösterilmiştir. Ayrıca, örnekleme noktaları için kullanılan ikame modellerine ait detaylar Çizelge 7.4’de gösterilmiştir.

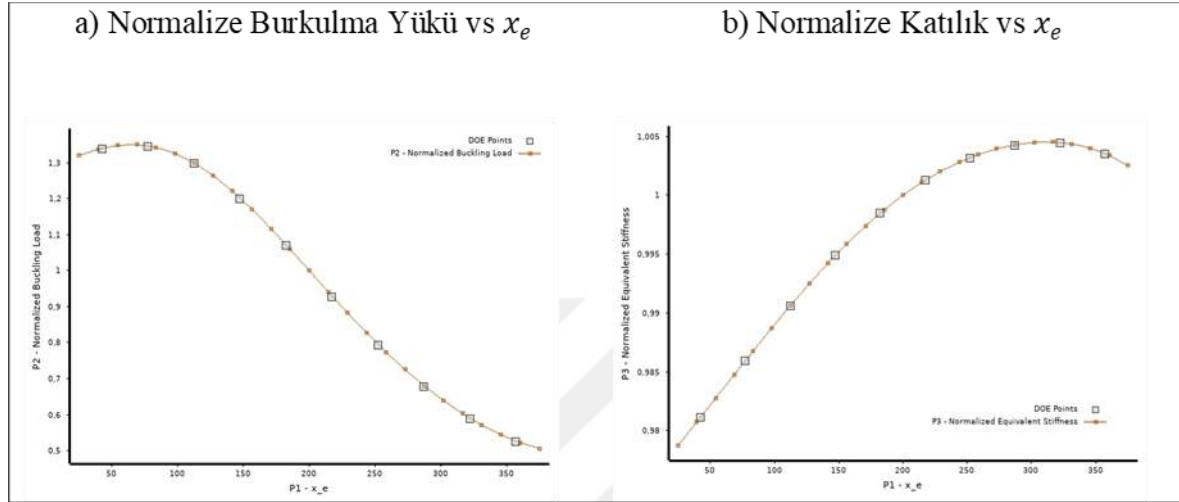
Optimizasyon işlemi, hem normalize edilmiş katılığı hem de normalize edilmiş burkulma yükünü maksimize etmeyi amaçlamaktadır. Önceki bölümlerde kullanılan yöntemle benzer şekilde, x_e parametresi 25 mm ile 375 mm aralığında değişmektedir. Üç optimum tasarım noktası (OTN) için elde edilen optimizasyon sonuçları Çizelge 7.3’de özetlenmiştir.

Çizelge 7.3. Optimizasyon çalışması – II için elde edilen optimum tasarım noktaları ve optimizasyon sonuçları

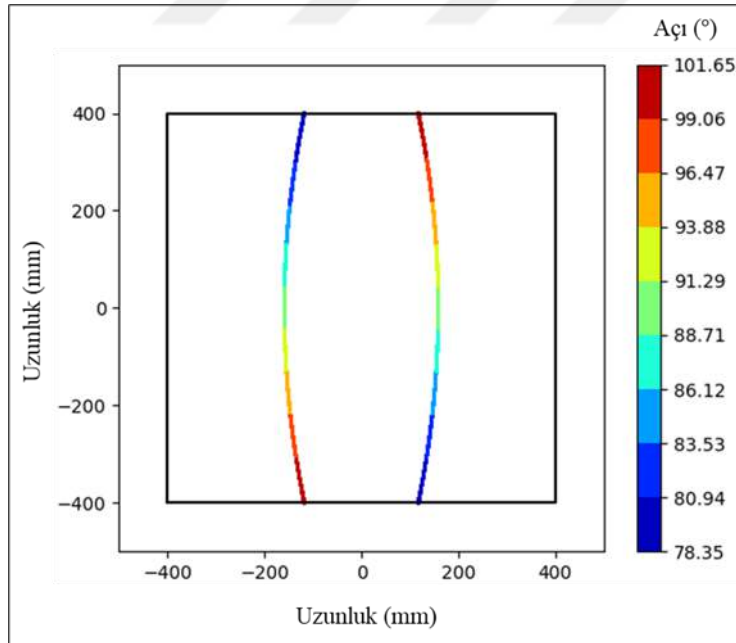
Parametreler	OTN 1	OTN 2	OTN 3
x_e (mm)	152,750	173,750	198,250
Normalize burkulma yükü	1,184	1,110	1,007
Normalize katılık	0,9955	0,9977	0,9999

Optimizasyon Çalışması II’den elde edilen sonuçlar, x_e parametresinin normalize burkulma yükü ve normalize katılık değeri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. En yüksek normalize burkulma yükü değeri $x_e = 152,750\text{mm}$ konumunda 1,184 olarak gözlemlenirken, en düşük değer $x_e = 198,250\text{mm}$ konumunda 1.007 olarak bulunmuştur. Buna karşılık, normalize katılık x_e arttıkça hafifçe artarak OTN 1’de 0,9955’ten, OTN 2’de 0,9977 ve OTN 3’te 0,999’a kadar değişmektedir. Hassasiyet analizi, x_e ’nin kritik burkulma yükü ve katılık üzerindeki mutlak duyarlılıklarının oldukça yüksek olduğunu, değerlerin 0.9 veya daha büyük olduğunu göstermektedir. Bu durum, x_e ’nin her iki çıktı parametresi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ancak zıt yönlerde çalıştığını göstermektedir. Sonuç olarak, grafik bir ödüneleşimi vurgulamaktadır; x_e katılığı artırırken burkulma yükünü azaltmaktadır. Eğer burkulma yükü öncelikliyse, x_e artışları kontrol edilmelidir. Öte yandan,

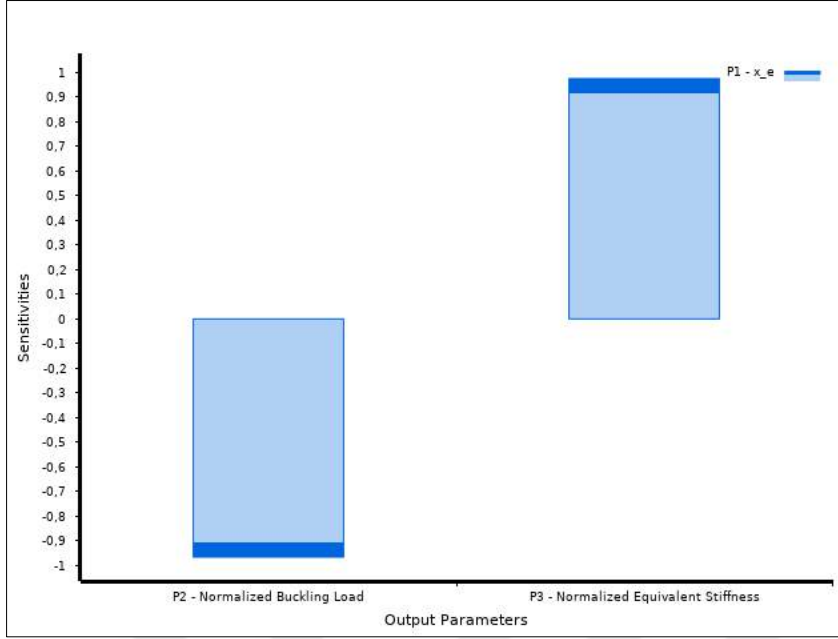
eğer eşdeğer katılık daha kritikse, x_e 'nin daha yüksek değerleri tercih edilmelidir. Genome üyeler çizelgesi, katılık modelinin dengeli ve basit olduğunu, ancak burkulma yükü modelinin daha karmaşık ve bağımlılıkları bulmak için daha ayrıntılı ve çeşitli bir yaklaşım gerektirdiğini göstermektedir.



Şekil 7.5. Optimizasyon çalışması – II için yanıt yüzeyleri



Şekil 7.6. Optimizasyon çalışması II sonucu elde edilen optimum geometri



Şekil 7.7. Optimizasyon çalışması - II için girdi ve çıktı parametrelerinin hassasiyet analizi

Çizelge 7.4. Optimizasyon çalışması – II için GA metodunda ikame modelinde kullanılan genom üyeleri

Normalize Katılık
member 0, weight = 0,97246, Kriging, Kernel Type = Gaussian, Kernel Variation Type = Anisotropic, Regression Type = Full Quadratic member 1, weight = 0,027539, Support Vector Regression, Epsilon Value = 0,1, Support Vector Kernel Type = Gaussian, Loss Function Type = Laplace
Normalize Burkulma Yüğü
member 0, weight = 0,091509, Support Vector Regression, Epsilon Value = 0,1, Support Vector Kernel Type = Gaussian, Loss Function Type = Laplace member 1, weight = 0,011457, Support Vector Regression, Epsilon Value = 0,5, Support Vector Kernel Type = Gaussian, Loss Function Type = Nu member 2, weight = 0,89286, Kriging, Kernel Type = Gaussian, Kernel Variation Type = Anisotropic, Regression Type = Pure Quadratic member 3, weight = 0,0041779, Moving Least Squares, Weighting Function Type = Gaussian, Polynomial Type = Linear

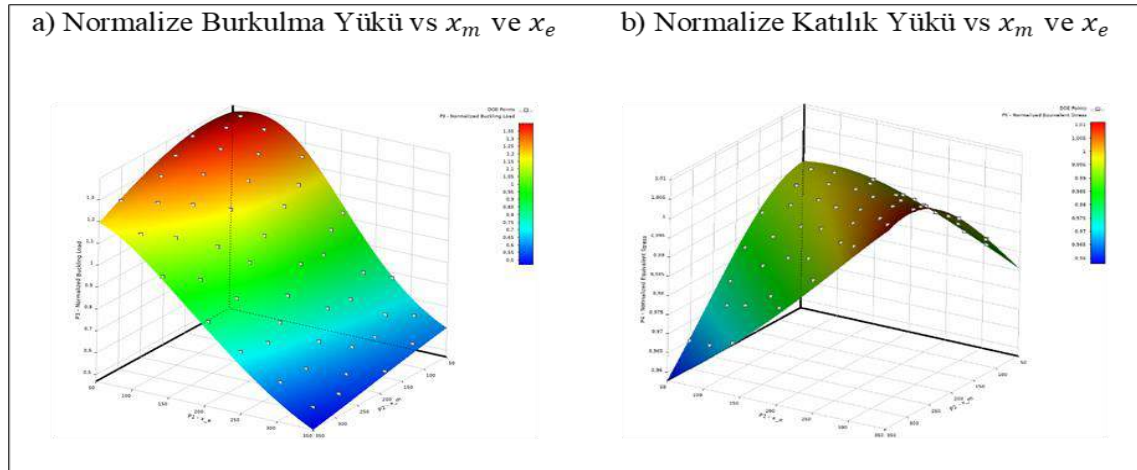
7.3. Optimizasyon Çalışması – III

Bu çalışmada, eğrilik parametresi olan uç noktalar (x_e) ve orta nokta (x_m) giriş parametreleri olarak seçilirken, normalize edilmiş katılık ve normalize edilmiş burkulma yükü çıktı parametreleri olarak belirlenmiştir. Optimizasyon çalışması için iki giriş parametresi olduğu için, yanıt yüzeylerini oluşturmak amacıyla 50 tasarım noktası seçilmiştir. GA yöntemi kullanılarak oluşturulan yanıt yüzeyleri Şekil 7.8’de hassasiyet analizi Şekilde 7.9’da optimum geometri ise Şekil 7.10’da gösterilmiştir. Ayrıca, örnekleme noktaları için kullanılan ikame modellerine ait detaylar Çizelge 7.6’de gösterilmiştir.

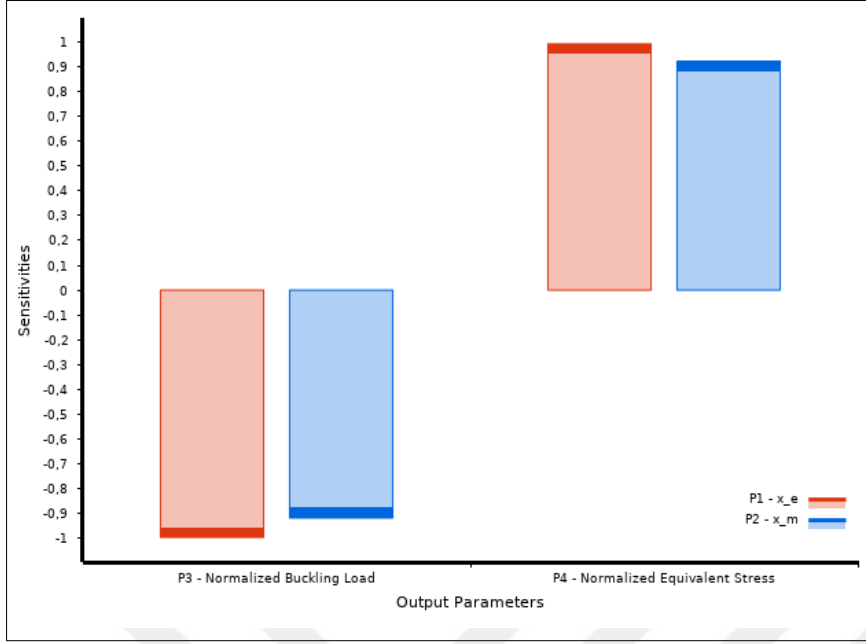
Optimizasyon işlemi, hem normalize edilmiş katılığı hem de normalize edilmiş burkulma yükünü maksimize etmeyi amaçlamaktadır. Önceki bölümlerde kullanılan yöntemle benzer şekilde, x_e ve x_m parametreleri 25 mm ile 375 mm aralığında değişmektedir. Üç optimum tasarım noktası (OTN) için elde edilen optimizasyon sonuçları Çizelge 7.5’de özetlenmiştir.

Çizelge 7.5. Optimizasyon çalışması – III için elde edilen optimum tasarım noktaları ve optimizasyon sonuçları

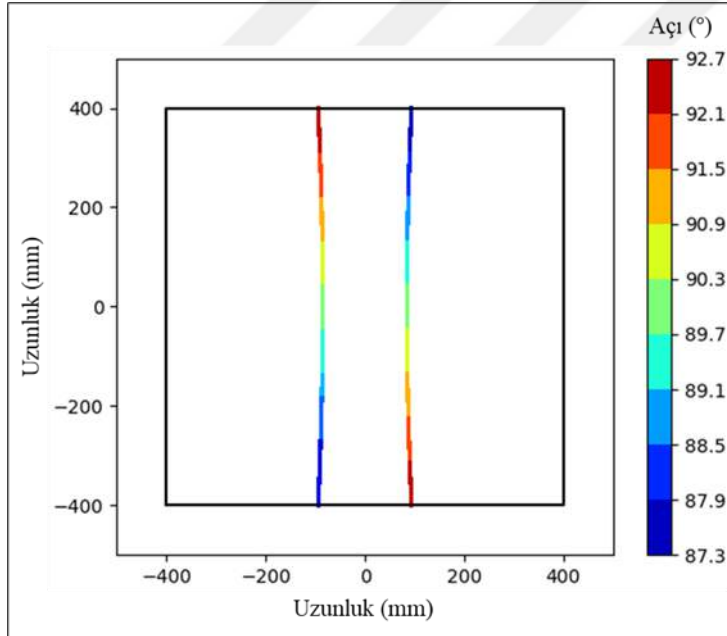
Parametreler	OTN 1	OTN 2	OTN 3
x_m (mm)	90,273	92,477	131,190
x_e (mm)	94,142	130,640	153,500
Normalize burkulma yükü	1,393	1,330	1,243
Normalize katılık	0,9971	0,9981	0,9990



Şekil 7.8. Optimizasyon çalışması – III için yanıt yüzeyleri



Şekil 7.9. Optimizasyon çalışması - III için girdi ve çıktı parametrelerinin hassasiyet analizi



Şekil 7.10. Optimizasyon çalışması III sonucu elde edilen optimum geometri

Çizelge 7.6. Optimizasyon çalışması – III için GA metodunda ikame modelinde kullanılan genom üyeleri

Normalize Katılık
member 0, weight = 0,33368, Kriging, Kernel Type = Gaussian, Kernel Variation Type = Anisotropic, Regression Type = Full Quadratic
member 1, weight = 0,33336, Kriging, Kernel Type = Damped Sin, Kernel Variation Type = Isotropic, Regression Type = Full Quadratic
member 2, weight = 0,33295, Kriging, Kernel Type = Gaussian, Kernel Variation Type = Isotropic, Regression Type = Full Quadratic
Normalize Burkulma Yüğü
member 0, weight = 1, Kriging, Kernel Type = Gaussian, Kernel Variation Type = Anisotropic, Regression Type = Linear

Optimizasyon Çalışması - III'ten elde edilen sonuçlara göre, hem x_m hem de x_e eğrilik parametrelerinin kontrol edilmesi burkulma yükünde %39.3'lük büyük bir artış sağlarken, eşdeğer rijitlikte %3'lük bir azalmaya neden olmuştur. Her iki parametrenin kontrol edilmesi, kiriş eğrilinin optimizasyonunun yanı sıra kirişlerin konumunun da optimize edilmesine olanak tanıyarak daha yüksek sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. OTP 1'de, $x_m = 90,273\text{mm}$ ve $x_e = 94,142\text{mm}$ olduğunda, en yüksek normalleştirilmiş burkulma yükü elde edilirken, normalleştirilmiş eşdeğer rijitlik en düşük seviyesindedir. Buna karşılık, OTP 3'te $x_m = 131,190\text{mm}$ ve $x_e = 153,500\text{mm}$ olduğunda, normalleştirilmiş katılık 0.999 ile en yüksek seviyeye ulaşmış ancak normalleştirilmiş burkulma yükü en düşük değeri olan 1,243'e düşmüştür. OTP 2'de elde edilen ara değerler, iki hedef arasında bir değeri göstermektedir. Bu sonuçlar, eğrilik parametrelerini artırmanın katılığı artırırken burkulma yükünü olumsuz etkileyerek ödünleşim gerektirdiğini ve yapısal tasarımda spesifik performans önceliklerine bağlı olarak dikkatli bir dengenin sağlanması gerektiğini göstermektedir. Hassasiyet analizi, eğrilik parametrelerinin kritik burkulma yükü ve katılık değeri üzerindeki mutlak hassasiyetinin oldukça yüksek olduğunu ve değerlerin 0.9 veya daha büyük olduğunu göstermektedir. Bu, her iki parametrenin de çıktı parametreleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ancak zıt yönlerde çalıştığını göstermektedir. Sonuç olarak, grafik bir ödünleşimi vurgulamakta, eğrilik parametrelerinin artırılmasının rijitliği artırdığını ancak aynı zamanda burkulma yükünü de önemli ölçüde düşürdüğünü göstermektedir. Önceki durumlardan farklı olarak, normalleştirilmiş katılık değeri için

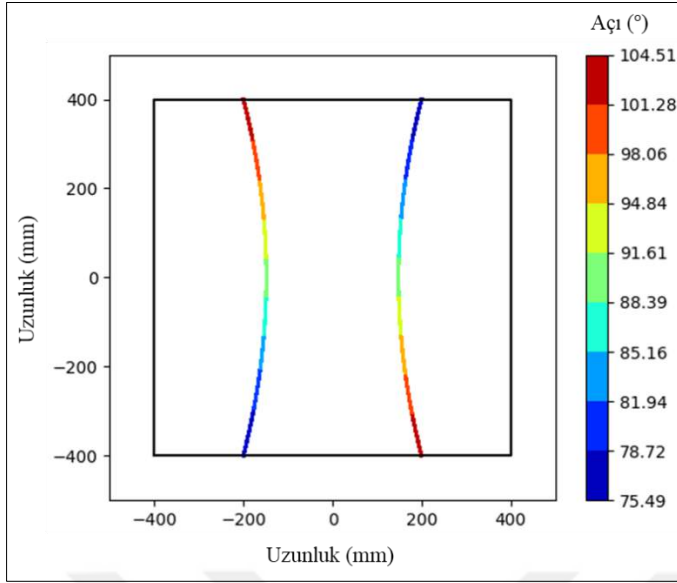
oluşturulan genom üyeleri, üç üye ile daha karmaşık bir yapıya sahipken, buna karşılık, burkulma yükü modeli daha basitleştirilmiş olup, daha basit bir davranışı yakalamak için doğrusal regresyona dayalı tek bir üyeye güvenmektedir.

7.4. Optimizasyon Çalışması – IV

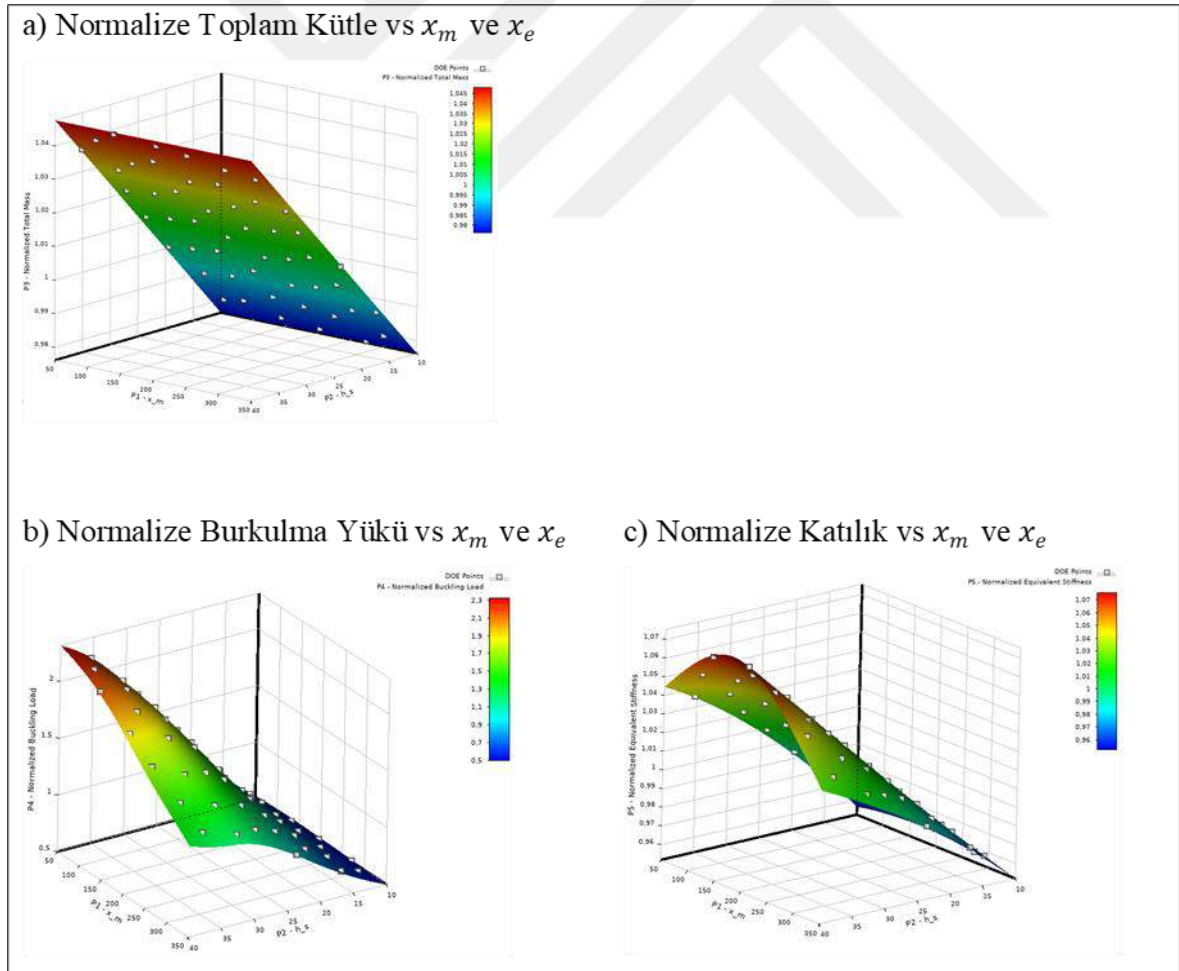
Bu çalışmada, eğrilik parametresi olan uç noktalar (x_e) ve kiriş yüksekliği (h_s) giriş parametleri olarak seçilirken, normalize edilmiş toplam kütle, normalize edilmiş katılık ve normalize edilmiş burkulma yükü çıktı parametreleri olarak belirlenmiştir. Optimizasyon çalışması için iki giriş parametresi olduğu için, yanıt yüzeylerini oluşturmak amacıyla 50 tasarım noktası seçilmiştir. Optimum geometri Şekil 7.11’de, GA yöntemi kullanılarak oluşturulan yanıt yüzeyleri Şekil 7.12’de, hassasiyet analizi ise Şekilde 7.13’de gösterilmiştir. Ayrıca, örnekleme noktaları için kullanılan ikame modellerine ait detaylar Çizelge 7.8’de gösterilmiştir. Optimizasyon işlemi, hem normalize edilmiş katılığı hem de normalize edilmiş burkulma yükünü maksimize etmeyi, normalize edilmiş toplam kütleli azaltmayı amaçlamaktadır. Önceki bölümlerde kullanılan yöntemle benzer şekilde, x_e ve x_m parametreleri 25 mm ile 375 mm aralığında değişmektedir. Üç optimum tasarım noktası (OTN) için elde edilen optimizasyon sonuçları Çizelge 7.7’de özetlenmiştir.

Çizelge 7.7. Optimizasyon çalışması – IV için elde edilen optimum tasarım noktaları ve optimizasyon sonuçları

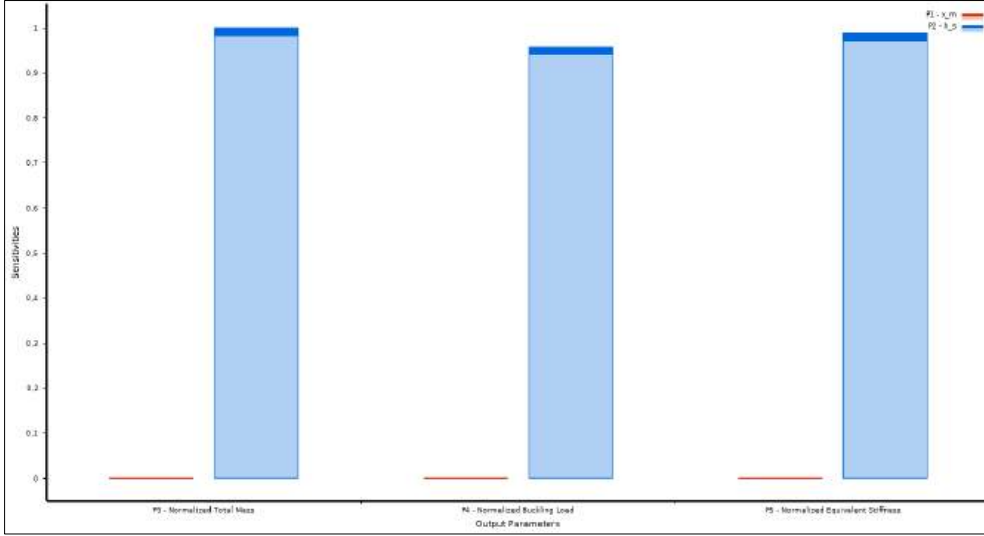
Parametreler	OTN 1	OTN 2	OTN 3
x_m (mm)	144,18	120,37	96,50
h_s (mm)	39,213	37,495	38,275
Normalize toplam kütle	1,0457	1,0417	1,0435
Normalize burkulma yükü	2,0961	2,1244	2,1924
Normalize katılık	1,0701	1,0601	1,0563



Şekil 7.11. Optimizasyon çalışması IV sonucu elde edilen optimum geometri



Şekil 7.12. Optimizasyon çalışması – IV için yanıt yüzeyleri



Şekil 7.13. Optimizasyon çalışması - IV için girdi ve çıktı parametrelerinin hassasiyet analizi

Çizelge 7.8. Optimizasyon çalışması – IV için GA metodunda ikame modelinde kullanılan genom üyeleri

Normalized Total Mass
member 0, weight = 1, Polynomial Regression, Polynomial Type = Full Quadratic, Output Transformation Type = Yeo-Johnson, Confidence Level = 0,05
Normalized Equivalent Stiffness
member 0, weight = 1, Kriging, Kernel Type = Gaussian, Kernel Variation Type = Anisotropic, Regression Type = Full Quadratic
Normalized Buckling Load
member 0, weight = 0,69792, Kriging, Kernel Type = Gaussian, Kernel Variation Type = Anisotropic, Regression Type = Full Quadratic member 1, weight = 0,30208, Support Vector Regression, Epsilon Value = 0,157743, Support Vector Kernel Type = Gaussian, Loss Function Type = Laplace

Optimizasyon Çalışması - IV'ten elde edilen optimizasyon sonuçları, x_m ve h_s parametrelerinin değiştirilmesiyle normalleştirilmiş toplam kütle, normalleştirilmiş burkulma yükü ve normalleştirilmiş katılık arasındaki ödüneşimleri vurgulamaktadır. $x_m = 144,18\text{mm}$ ve $h_s = 39,21\text{mm}$ olan OTP 1, en düşük normalleştirilmiş burkulma yükünü (2,0961) elde ederken, en yüksek normalleştirilmiş katılık değerini (1,0701) sağlamaktadır. Buna karşılık, $x_m = 38,275\text{mm}$ ve $h_s = 38,275\text{mm}$ olan OTP 3, en yüksek normalleştirilmiş

burkulma yükünü (2,1924) üretirken, en düşük katılık değerini (1,0563) vermektedir. Diğer tasarım noktası OTP 3, iki çıktı parametresi arasında bir değer vermiştir. Bu bulgular, burkulma yükünü ve katılığı maksimize etmek ile toplam kütle arasındaki açık ödünleşimi ortaya koymaktadır. Ancak toplam kütle neredeyse benzer seviyelerde kalırken performans değerlerinin bir hayli iyileştirilebilmiştir. h_s değerinin artırılmasının burkulma performansını iki katından fazla iyileştirdiği gözlemlenmiştir, bu da bu parametrenin burkulma değeri üzerinde eğrilik parametrelerinden çok daha fazla bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, duyarlılık analizi, h_s 'nin yapısal performansı etkileyen en önemli parametre olduğunu ortaya koymaktadır. Yüksek duyarlılık değerleri, h_s 'in artırılmasının yalnızca burkulmaya karşı direnci artırmakla kalmayıp, aynı zamanda rijitliği de iyileştirdiğini göstermektedir. Ancak, bununla birlikte toplam kütlede de bir artışa neden olmaktadır. Buna karşılık, x_m 'nin tüm çıktı parametreleri üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir seviyede olduğu belirlenmiştir. Bu da, x_m değişiminin yapısal tepkiyi anlamlı bir şekilde değiştirmediğini göstermektedir. Bu bulgular, katılık, burkulma performansı ve ağırlık verimliliği arasındaki optimum dengeyi sağlamak için kiriş yüksekliğinin optimize edilmesinin kritik öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır. Bu nedenle, performans iyileştirmeleri için odaklanılması gereken birincil tasarım değişkeninin kiriş yüksekliği olduğu ortaya çıkmaktadır.

Optimizasyon Çalışması - IV'te kullanılan genom modelleri, normalleştirilmiş toplam kütle, katılık ve burkulma yükünü tahmin etmek için farklı regresyon tekniklerinden yararlanmaktadır. Normalleştirilmiş toplam kütle, tam kuadratik dönüşüme (Yeo-Johnson) sahip tek bir polinom regresyon modeli ile modellenmiştir. Bu, kesin bir ilişki olduğunu ve doğruluk için birden fazla modele gerek olmadığını göstermektedir. Normalleştirilmiş eşdeğer rijitlik, tamamen Kriging yöntemiyle modellenebilmiştir. Normalleştirilmiş burkulma yükü ise, Kriging (%69,79 ağırlık) ve Destek Vektör Regresyonu (%30,21) kombinasyonu kullanılarak modellenmiştir. Bu, burkulma davranışındaki karmaşıklıkları doğru bir şekilde yakalamak için birden fazla modelleme yaklaşımının gerekli olduğunu göstermektedir. Destek Vektör Regresyonu'nun Laplace fonksiyonu ile dahil edilmesi, burkulma tepkisinde potansiyel doğrusal olmayan bileşenlerin varlığını ortaya koymaktadır. Genel olarak, kütle ve katılık için daha basit ilişkiler tek bir modele dayandırılırken, burkulma yükünün daha karmaşık olması nedeniyle hibrit bir modelleme yaklaşımından yararlandığı gözlemlenmiştir.

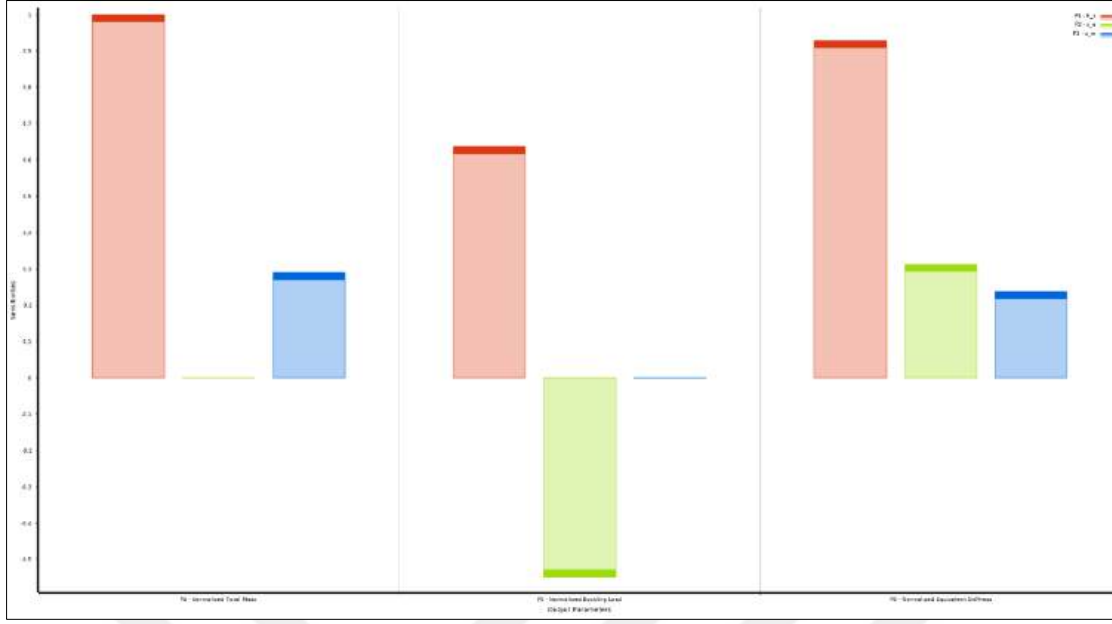
7.5. Optimizasyon Çalışması – V

Bu çalışmada, eğrilik parametreleri olan uç noktalar (x_e) ve orta nokta (x_m) kiriş yüksekliği (h_s) birlikte giriş parametreleri olarak seçilirken, normalize edilmiş toplam kütle, normalize edilmiş katılık ve normalize edilmiş burkulma yükü çıktı parametreleri olarak belirlenmiştir. Optimizasyon çalışması için üç giriş parametresi olduğu için, yanıt yüzeylerini oluşturmak amacıyla 50 tasarım noktası seçilmiştir. GA yöntemi kullanılarak oluşturulan yanıt yüzeyleri Şekil 7.15, Şekil 7.16 ve Şekil 7.17 'de optimum geometri Şekil 7.18'de, hassasiyet analizi ise Şekilde 7.14'de gösterilmiştir. Ayrıca, örnekleme noktaları için kullanılan ikame modellerine ait detaylar Çizelge 7.10'da gösterilmiştir.

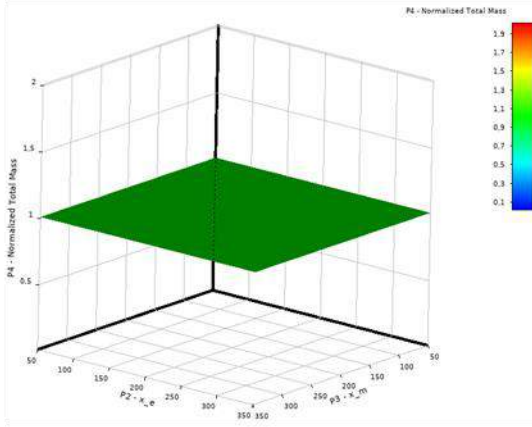
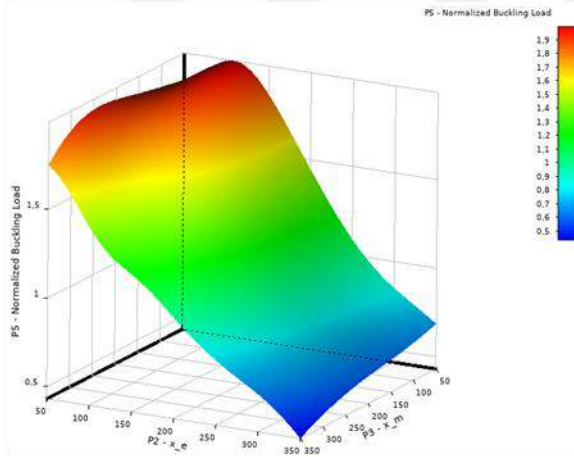
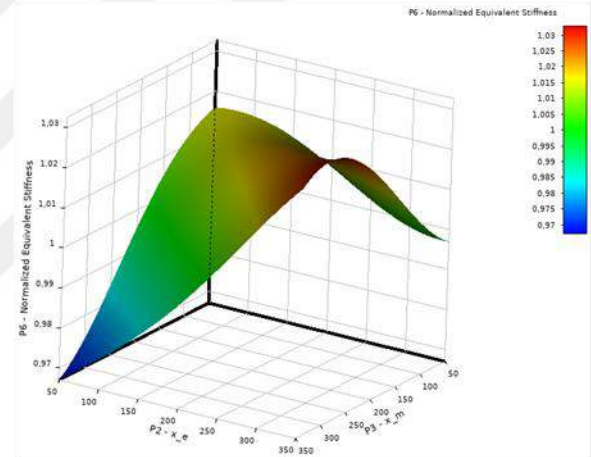
Optimizasyon işlemi, hem normalize edilmiş katılığı hem de normalize edilmiş burkulma yükünü maksimize etmeyi, normalize edilmiş toplam kütleyle azaltmayı amaçlamaktadır. Önceki bölümlerde kullanılan yöntemle benzer şekilde, x_e ve x_m parametreleri 25 mm ile 375 mm aralığında değişmektedir. Üç optimum tasarım noktası (OTN) için elde edilen optimizasyon sonuçları Çizelge 7.9'da özetlenmiştir.

Çizelge 7.9. Optimizasyon çalışması – V için elde edilen optimum tasarım noktaları ve optimizasyon sonuçları

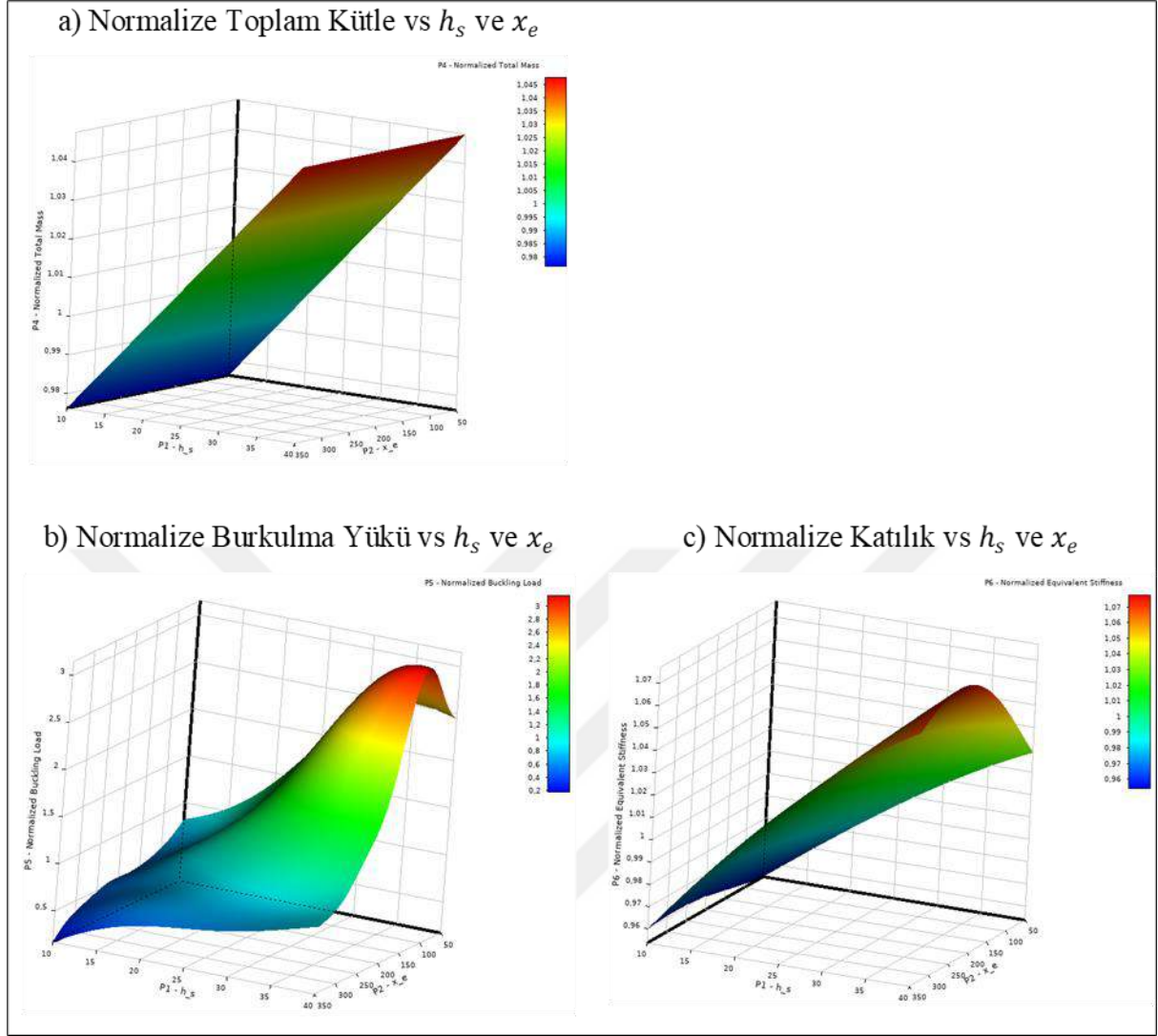
Parametreler	OTN 1	OTN 2	OTN 3
x_m (mm)	152,73	86,068	103,35
x_e (mm)	138,22	100,72	128,84
h_s (mm)	34,75	35,35	29,95
Normalize toplam kütle	1,0351	1,0365	1,0237
Normalize burkulma yükü	3,1175	2,9934	2,6451
Normalize katılık	1,0517	1,0545	1,0355



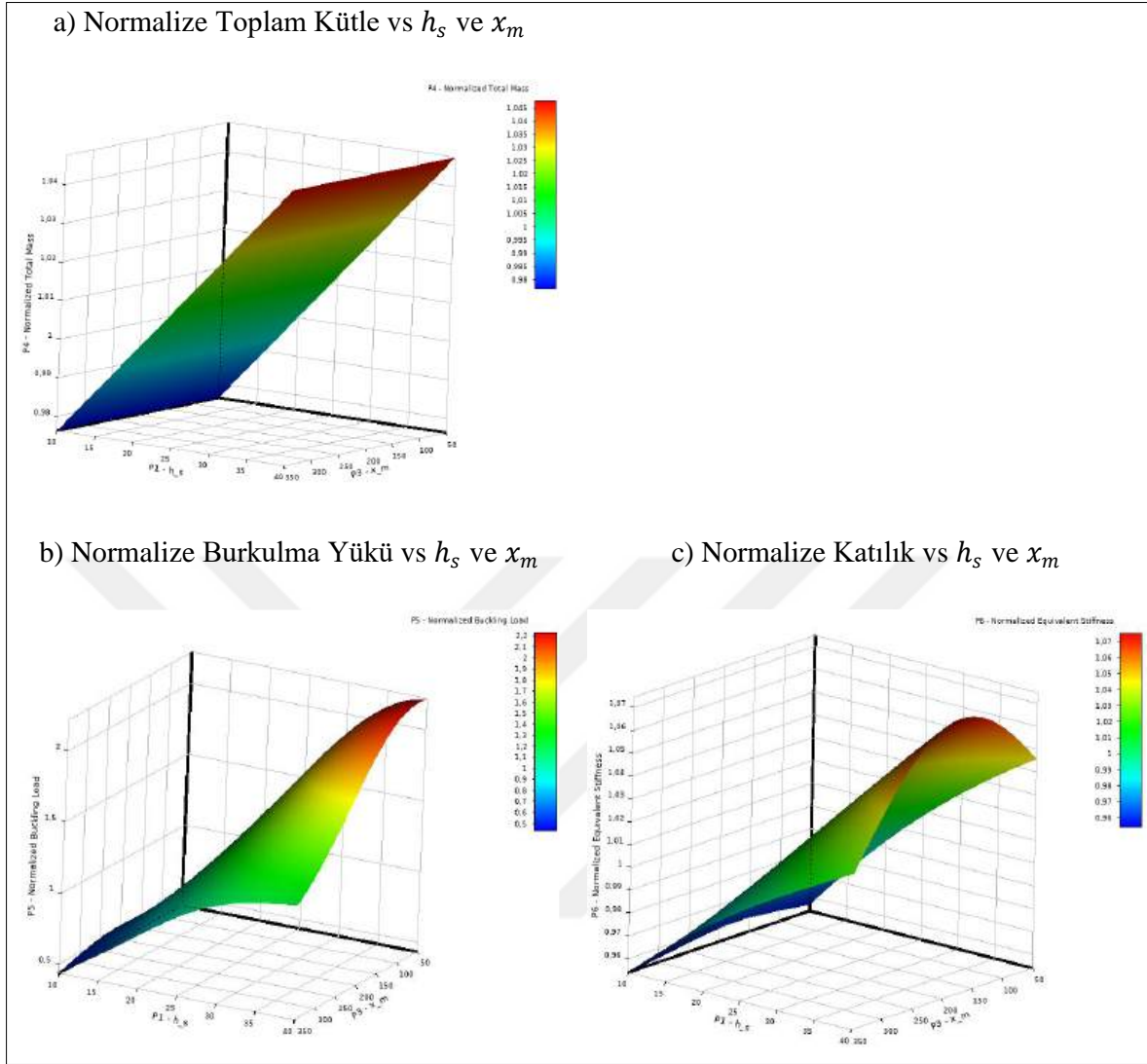
Şekil 7.14. Optimizasyon çalışması - V için girdi ve çıktı parametrelerinin hassasiyet analizi

a) Normalize Toplam Kütle vs x_m ve x_e b) Normalize Burkulma Yüğü vs x_m ve x_e c) Normalize Katılık vs x_m ve x_e 

Şekil 7.15. Optimizasyon çalışması – V için x_m ve x_e parametreleri ile çıktı parametreleri ile oluşturulan yanıt yüzeyleri



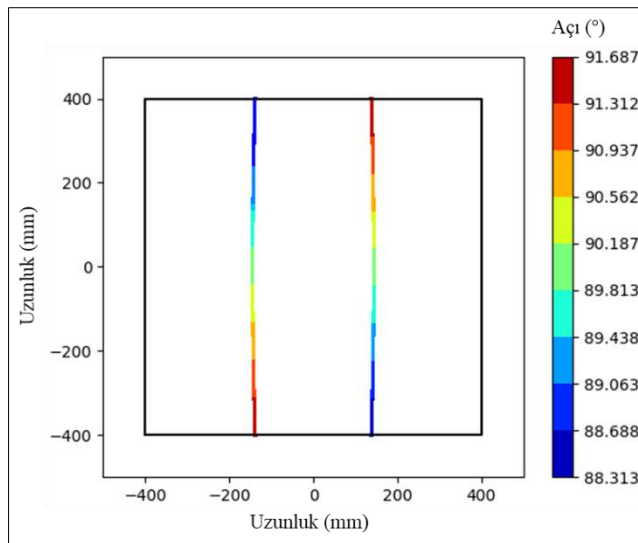
Şekil 7.16. Optimizasyon çalışması – V için h_s ve x_e parametreleri ile çıktı parametreleri ile oluşturulan yanıt yüzeyleri



Şekil 7.17. Optimizasyon çalışması – V için h_s ve x_m parametreleri ile çıktı parametreleri ile oluşturulan yanıt yüzeyleri

Çizelge 7.10. Optimizasyon çalışması – V için GA metodunda ikame modelinde kullanılan genom üyeleri

Normalize Toplam Kütle
member 0, weight = 1, Polynomial Regression, Polynomial Type = Full Quadratic, Output Transformation Type = Yeo-Johnson, Confidence Level = 0,05
Normalize Katılık
member 0, weight = 0,32939, Kriging, Kernel Type = Bessel, Kernel Variation Type = Anisotropic, Regression Type = Constant
member 1, weight = 0,33453, Kriging, Kernel Type = Damped Sin, Kernel Variation Type = Anisotropic, Regression Type = Pure Quadratic
member 2, weight = 0,33608, Kriging, Kernel Type = Damped Sin, Kernel Variation Type = Anisotropic, Regression Type = Constant
Normalize Burkulma Yüğü
member 0, weight = 0,26282, Support Vector Regression, Epsilon Value = 0,5, Support Vector Kernel Type = Gaussian, Loss Function Type = Nu
member 1, weight = 0,37572, Kriging, Kernel Type = Gaussian, Kernel Variation Type = Anisotropic, Regression Type = Pure Quadratic
member 2, weight = 0,36146, Kriging, Kernel Type = Gaussian, Kernel Variation Type = Anisotropic, Regression Type = Linear



Şekil 7.18. Optimizasyon çalışması V sonucu elde edilen optimum geometri

Optimizasyon Çalışması V için Çizelge 7.9'da verilen optimizasyon sonuçları, eğrilik parametrelerinin (x_m ve x_e) ve giriş yüksekliğinin (h_s) yapısal performans üzerindeki etkisini göstermektedir. Üç aday çözüm arasında OTP 1, en yüksek normalleştirilmiş burkulma yükünü (3,1175) elde ederken, biraz daha yüksek bir toplam kütleyle (1,0351) sahiptir. OTP 2, karşılaştırılabilir bir burkulma yükünü (2,9934) sağlarken en yüksek normalleştirilmiş katılığı (1,0545) göstermektedir. OTP 3 ise en düşük toplam kütleyle (1,0237) sağlarken, en düşük burkulma yükü (2,6451) ve biraz daha düşük katılık (1,0355) değerleri ile sonuçlanmıştır. Bu bulgular, iki eğrilik parametresi (x_m ve x_e) ile giriş yüksekliğinin (h_s) kontrolünün beklenildiği gibi en yüksek normalize burkulma yükü sonuçlarını sağladığını göstermektedir. Giriş eğriliği, konumu ve yüksekliğinin optimize edildiği bu çalışmada, burkulma yükleri 3 katından fazla arttırabilmiş; buna karşılık toplam kütle ve katılık, normalleştirilmiş değerlere yakın kalmıştır.

Duyarlılık analizinde üç farklı çıktı parametresi olan normalleştirilmiş toplam kütle, normalleştirilmiş burkulma yükü ve normalleştirilmiş katılık üzerindeki üç temel tasarım değişkeni olan eğrilik parametreleri ve giriş yüksekliğinin göreceli etkileri analiz edilmiştir. Grafik, her bir çıktı için tasarım değişkenlerinin duyarlılık katsayılarını karşılaştırmalı olarak göstermekte olup, parametrelerin çıktı üzerindeki doğrusal etkisini nicel olarak ortaya koymaktadır. Analiz sonuçlarına göre h_s parametresi tüm çıktı fonksiyonları üzerinde en yüksek duyarlılığa sahiptir. Özellikle normalleştirilmiş toplam kütle ve burkulma yükü çıktıları, h_s 'deki varyasyonlara karşı yüksek düzeyde duyarlılık göstermekte ve bu parametrenin yapısal davranış üzerindeki belirleyici etkisini teyit etmektedir. h_s parametresiyle ilişkili duyarlılık değerlerinin mutlak büyüklüğü, diğer iki parametreye kıyasla anlamlı derecede daha yüksektir. Bu durum, giriş yüksekliğinin hem kütleli artış hem de mekanik performans (burkulma direnci ve katılık) açısından dominant bir tasarım girdisi olduğunu göstermektedir. Diğer yandan, eğrilik parametreleri olan x_m ve x_e 'nin etkileri göreceli olarak düşüktür. x_m 'nin tüm çıktı fonksiyonları üzerindeki duyarlılığı ihmal edilebilir seviyede kalmakta, x_e ise özellikle burkulma yükü üzerinde küçük çaplı negatif bir etki yaratmaktadır. Bu da eğrilik parametrelerinin, özellikle burkulma ve katılık davranışı açısından minör rol oynadığını ve yapının global performansını belirlemede sınırlı etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, h_s parametresi; ağırlık, burkulma yükü ve katılık arasında kurulan çok kriterli optimizasyon ilişkilerinde kritik bir rol oynamakta olup,

yapının genel mekanik performansının iyileştirilmesi açısından en yüksek optimizasyon potansiyeline sahip tasarım değişkeni olarak öne çıkmaktadır.

Genom modeli, normalleştirilmiş toplam kütle, katılık ve burkulma yükünü farklı regresyon teknikleriyle tahmin etmek için yapılandırılmış bir yaklaşım sunmaktadır. Toplam kütle, tam kuadratik dönüşüm içeren yalnızca polinom regresyon modeliyle modellenmiştir; bu da yapının karmaşıklığının düşük olduğunu göstermektedir. Normalleştirilmiş eşdeğer rijitlik ise, farklı çekirdek varyasyonlarına sahip üç ayrı Kriging modelinin birleşimiyle modellenmiş ve bu da orta derecede karmaşık bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşılık, burkulma yükü en yüksek karmaşıklığı sergilemekte olup %73,71 oranında Kriging ve %26,28 oranında Destek Vektör Regresyonu'nun hibrit kombinasyonu ile modellenmiştir. Bu durum, burkulma davranışında potansiyel doğrusal olmayan yapıların varlığını göstermektedir.



8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, eğrisel kirişlerle takviye edilmiş kompozit panellerin burkulma ve dinamik davranışları, ileri üretim teknolojisi olan Otomatik Elyaf Yerleştirme (Automated Fiber Placement - AFP) süreci dikkate alınarak çok yönlü şekilde analiz edilmiştir. Çalışmada, değişken kalınlıklara sahip kabuk elemanları kullanılarak takviyeli kompozit plakaların modellenmesini sağlayan yeni bir yöntem geliştirilmiş ve bu üç boyutlu geometriyi temsil eden model, mevcut literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Geliştirilen parametrik modelleme ve sonlu eleman analiz (FEA) altyapısı, Python betikleri ile ANSYS APDL betikleri üzerinden otomatikleştirilmiş; böylece yüksek hassasiyetli, tekrarlanabilir ve üretilebilir çözümler sunan bir tasarım platformu ve metodolojisi oluşturulmuştur. Araştırmada esas olarak kirişlerin eğrisel yolunun etkisini incelemekte olup, buna ek olarak kiriş yüksekliğinin etkisi de değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, kiriş geometrisi kuadratik Bézier eğrileri ile tanımlanmış, AFP makinasının yönlendirme kısıtları göz önünde bulundurularak modelleme gerçekleştirilmiştir.

Kiriş geometrisinin etkisini görmek amacıyla, ilk olarak, eğri parametreleri (x_m and x_e) kullanılarak dört farklı koordinat için kompozit palakaların titreşim ve burkulma yanıtları incelenmiştir. Titreşim sonuçlarının sayısal analizi, kirişin şeklinin doğal frekans tepkisini önemli ölçüde etkilediğini, ancak mod şekli üzerinde belirgin bir değişikliğe neden olmadığını ortaya koymaktadır. Kirişin eğriliğine ve sınır koşuluna bağlı olarak doğal frekans düz kirişli duruma kıyasla %22,5'e kadar artmış ya da %29'a kadar azalmıştır. Kirişler, maksimum deformasyonun gerçekleştiği plaka merkezine doğru yaklaştıkça doğal frekans artmakta; tersine, dışa doğru yerleştirildiğinde doğal frekans azalmaktadır. Orta nokta konumlandırmaları %4–5'e kadar değişime yol açarken, uç nokta konumlandırmaları %22'ye varan değişim yaratmakta; bu da kiriş uç konumlarının doğal frekans üzerindeki etkisini göstermektedir. Sayısal sonuçlar, SCSC sınır koşulunun diğer sınır koşulları arasında en yüksek mod frekansını verdiğini göstermektedir. Kiriş kenarlarında altı serbestlik derecesinin tamamen sınırlandırılmış olması maksimum rijitliğe yol açmaktadır. Bu doğrultuda SSSS sınır koşulu en düşük, SCSC ise orta düzeyde doğal frekans sonuçları vermiştir.

Burkulma sonuçlarının sayısal analizine göre, kirişin şekli kritik burkulma yüklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Kirişin eğriliğine ve sınır koşullarına bağlı olarak, düz kiriş durumuna kıyasla kritik burkulma yükü %38'e kadar artmış veya %51'e kadar azalmıştır. KSKS sınır koşullu paneller, üst kenardan uygulanan birim basma yükü altında %38'lik bir artışla en büyük iyileşmeyi göstermiştir. Öte yandan, KCKC sınır koşulu yalnızca %7'lik bir artışla en az iyileşmeyi göstermiştir. SSCS sınır koşulu ise %18'lik orta düzeyde bir artışla sonuçlanmıştır. En yüksek kritik burkulma yükü KCKC durumunda, en düşük ise KSKS durumunda gözlemlenmiştir. Sayısal veriler ayrıca, KCKC ve KSKC durumlarında, eğrilik parametrelerinin 100 mm olduğu durumda en yüksek burkulma yüklerinin elde edildiğini göstermektedir.

Çok amaçlı optimizasyon çalışmaları, beş farklı senaryo (Optimizasyon Çalışması I – V) üzerinden yürütülmüş, her birinde farklı kombinasyonlarda giriş parametreleri (x_m , x_e , h_s) tanımlanarak çok amaçlı hedef fonksiyonlar (normalleştirilmiş burkulma yükü, katılık ve toplam kütle) analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

Optimizasyon Çalışması I'de yalnızca orta nokta değişkeni (x_m) optimize edilmiş ve burkulma yükünde düz tasarıma göre %5.7'ye varan bir artış elde edilmiştir. Bu artış, katılığın neredeyse sabit kalmasıyla gerçekleştirilebilmiştir; bu da orta nokta parametresiyle değişen eğriliğin burkulma yükü üzerinde etkili ancak katılık üzerinde sınırlı bir rol oynadığını göstermiştir.

Optimizasyon Çalışması II'de uç nokta değişkeni (x_e) optimize edilmiş ve maksimum %18,4'lük burkulma yükü artışı sağlanmıştır. Katılık ise bu durumda %0,5'lük küçük bir artış göstermiştir. Sonuçlar, uç noktaların eğriliğinin, orta noktaya göre burkulma davranışı üzerinde daha etkili olduğunu göstermektedir.

Optimizasyon Çalışması III'de eğrilik parametreleri (x_m ve x_e) birlikte optimize edilmiştir. Burkulma yükü %39,3 oranında artırılmış; buna karşın katılık %3 civarında azalmıştır. Üç bezier noktasının kullanılması kiriş eğriliyle birlikte konumunun optimize edilmesine olanak tanıdığı için burkulma oranındaki değişimi önemli ölçüde artırılabilmiştir. Bu durum, eğrilik parametreleri arasında sinerjik bir ilişki kurulduğunda daha yüksek burkulma performansı elde edilebileceğini, ancak katılık açısından bir ödün verilmesi gerekebileceğini göstermiştir.

Optimizasyon Çalışması IV’de kiriş yüksekliğinin etkilerini görmek adına x_m ve kiriş yüksekliği (h_s) birlikte optimize edilmiştir. Kiriş yüksekliği, hem rijitlik hem de burkulma performansını artırırken, yapının ağırlığını belirli ölçüde etki etmiştir. Burkulma yükü %219 oranında artırılmış; katılık %5,6 artarken, toplam kütlede yaklaşık %4,3’lük bir artış gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda, iki katından fazla burkulma yükünde artış sağlayan kiriş yüksekliğinin kiriş eğriliğine kıyasla çok daha fazla bir etkiye sahip olduğunu görülmüştür, ancak toplam kütle açısından bir ödün verilmesi gerektiğini göstermiştir.

Optimizasyon Çalışması V’de, tüm tasarım parametrelerinin aynı anda optimize edildiği en kapsamlı çalışmadır. Burkulma yükü düz kirişli tasarıma kıyasla %311 oranında artarken katılık %5,2 artmış, toplam kütle ise yalnızca %3,5’lik bir artışla sınırlandırılmıştır. Bu sonuç, çok parametreliliğin optimizasyonun burkulma dayanımı, katılık ve kütle korunumu açısından en verimli çözüm olduğunu göstermektedir.

Özetle, eğrisel kiriş geometrisinin optimize edilmesi, burkulma ve katılık performansını büyük ölçüde artırmakta, bununla birlikte kütle artışı kontrol altında tutulabilmektedir. AFP ile uyumlu bu tasarım yaklaşımı, çok kriterli mühendislik hedeflerinin dengeli bir şekilde sağlanmasına olanak tanımakta ve ileri düzey yapısal uygulamalar için yüksek potansiyel sunmaktadır. Geliştirilen dijital optimizasyon altyapısı, özellikle havacılık ve uzay sanayisinde hafiflik-katılık-burkulma gibi karşıt mühendislik gereksinimlerini eş zamanlı karşılamak isteyen tasarımcılar için güçlü bir araç olarak değerlendirilebilir.



KAYNAKLAR

1. Zhao W., Kapania R.K. (2016). Vibration analysis of curvilinearly stiffened composite panel subjected to in-plane loads. *AIAA Journal*, 54(9),981-997.
2. Arranz S., Sohoulı A., Suleman A. (2021). Buckling optimization of variable stiffness composite panels for curvilinear fibers and grid stiffeners. *Journal of Composite Science*, 5(12), 324.
3. Tamijani A.Y., Kapania R.K. (2010). Buckling and static analysis of curvilinearly stiffened plates using mesh-free method. *AIAA Journal*, 48(12), 2739–2749.
4. Lee D.M., Lee I. (1995). Vibration analysis of anisotropic plates with eccentric stiffeners. *Computers and Structures*, 57(1), 99–105.
5. Coşkun O. (2014). *Finite element analysis, optimum design and cost-effective manufacturing of advanced composite grid-stiffened structures for aircraft fuselage applications*. Yüksek Lisans Tezi İstanbul Technical University, Graduate School of Science, Engineering and Technology. İstanbul
6. Rikards R., Chate A., Ozolinsh O. (2001). Analysis for buckling and vibrations of composite stiffened shells and plates. *Composite Structures*, 51(4), 361–370.
7. Olson M.D., Hazell C.R. (1977). Vibration studies on some integral rib-stiffened plates. *Journal of Sound and Vibration*, 50(1), 43–61.
8. Alhajahmad A., Mittelstedt C. (2020). Design tailoring of curvilinearly grid-stiffened variable-stiffness composite cylindrically curved panels for maximum buckling capacity. *Thin-Walled Structures*, 157, 107132.
9. Liu D., Hao P., Zhang K., Tian K., Wang B., Li G., Xu W. (2020). On the integrated design of curvilinearly grid-stiffened panel with non-uniform distribution and variable stiffener profile. *Materials and Design*, 190, 108556.
10. Stanford B.K., Jutte C.V. (2020). Comparison of curvilinear stiffeners and tow steered composites for aeroelastic tailoring of transports. *AIAA Journal*, 58(8), 3100–3115.
11. Coşkun O. (2022). *Design and optimization of variable stiffness composite structures modeled using Bézier curves*. Doktora Tezi, İstanbul Technical University, Graduate School of Education.
12. Antunes A.M., Ribeiro P., Rodrigues J.D., Akhavan H. (2020). Modal analysis of a variable stiffness composite laminated plate with diverse boundary conditions: Experiments and modelling. *Composite Structures*, 239, 111974.
13. Olmedo R.A. (1992). Compression and buckling of composite panels with curvilinear fibers. Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Department of Engineering Mechanics.

14. Parnas L., Oral S., Ceyhan Ü. (2003). Optimum design of composite structures with curved fiber courses. *Composites Science and Technology*, 63(7), 1071–1082.
15. Mishra V. (2017). *A methodology to predict the stiffness properties and buckling load of manufacturable variable stiffness panels*. Yüksek Lisans Tezi, Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering.
16. Jočić E., Milojević M., Marjanović M. (2021). Probabilistic first-ply failure analysis of composite laminates. *Proceedings of the Symposium 2020*, University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering.
17. IJsselmuiden S.T. (2011). *Optimal design of variable stiffness composite structures using lamination parameters*, Doktora Tezi. Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering.
18. Setoodeh S., Abdalla M.M., IJsselmuiden S.T., Gürdal Z. (2009). Design of variable-stiffness composite panels for maximum buckling load. *Composite Structures*, 87(1), 109–117.
19. Cömert U.K. (2022). *Investigation of buckling, post-buckling behaviour of variable stiffness composite plates*. Yüksek Lisans Tezi Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences.
20. Demir E., Yousefi-Louyeh P., Yıldız M. (2019). Design of variable stiffness composite structures using lamination parameters with fiber steering constraint. *Composites Part B*, 165, 733–746.
21. Gürdal Z., Tatting B.F., Wu C.K. (2008). Variable stiffness composite panels: Effects of stiffness variation on the in-plane and buckling response. *Composites Part A*, 39(5), 911–922.
22. Wang D., Abdalla M.M., Zhang W. (2017). Buckling optimization design of curved stiffeners for grid-stiffened composite structures. *Composite Structures*, 168, 288–301.
23. Praticò L., Galos J., Cestino E., Frulla G., Marzocca P. (2020). Experimental and numerical vibration analysis of plates with curvilinear sub-stiffeners. *Engineering Structures*, 212, 109956.
24. Zhao W., Kapania R.K. (2015). Buckling analysis of unitized curvilinearly stiffened composite panels. *Composite Structures*, 134, 703–717.
25. Kapania R.K., Li J., Kapoor H. (2005). Optimal design of unitized panels with curvilinear stiffeners. *Proceedings of the AIAA 5th Aviation, Technology, Integration, and Operations Conference*, Arlington, Virginia.
26. Singh K., Kapania R.K. (2019). Buckling load maximization of curvilinearly stiffened tow-steered laminates. *Journal of Aircraft*, 56(6), 2335–2347.

27. Vescovini R., Oliveri V., Pizzi D., Dozio L., Weaver P.M. (2020). Pre-buckling and buckling analysis of variable-stiffness, curvilinearly stiffened panels. *Aerotecnica Missili & Spazio*, 99(1), 32–49.
28. Arranz S. (2021). *Buckling optimization of composite panels with curvilinear fibers and grid stiffeners*. *Yüksek Lisans Tezi*, Universidade de Lisboa, Aerospace Engineering.
29. Dang T.D., Kapania R.K., Slemp W.C.H., Bhatia M., Gurav S.P. (2010). Optimization and postbuckling analysis of curvilinear-stiffened panels under multiple-load cases. *Journal of Aircraft*, 47(5), 1656–1670.
30. Brasington A., Sacco C., Halbritter J., Wehbe R., Harik R. (2021). Automated fiber placement: A review of history, current technologies, and future paths forward. *Composites Part C: Open Access*, 6, 100182.
31. Grant C. (2006). Automated processes for composite aircraft structure. *Industrial Robot: An International Journal*, 33(2), 117–121.
32. Blom A.W., Lopes C.S., Kromwijk P.J., Gürdal Z., Camanho P.P. (2009). A theoretical model to study the influence of tow-drop areas on the stiffness and strength of variable-stiffness laminates. *Journal of Composite Materials*, 43(5), 403–425.
33. Arian Nik M., Fayazbakhsh K., Pasini D., Lessard L. (2014). Optimization of variable stiffness composites with embedded defects induced by Automated Fiber Placement. *Composite Structures*, 107, 160–166.
34. Fayazbakhsh K., Arian Nik M., Pasini D., Lessard L. (2013). Defect layer method to capture effect of gaps and overlaps in variable stiffness laminates made by Automated Fiber Placement. *Composite Structures*, 97, 245–251.
35. Ye J. (2003). *Laminated composite plates and shells: 3D modelling*. Springer-Verlag London, 269.
36. Jones R.M. (1999). *Mechanics of composite materials* (2nd ed.). Taylor & Francis, 465.





Gazili olmak ayrıcalıktır