



**DEĞİŞKEN KATILIĞA SAHİP KATMANLI DELİKLİ KOMPOZİT
PLAKLARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE ETKİSİ ALTINDA DİNAMİK
DAVRANIŞININ MODELLENMESİ, ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU**

Görkem KARASU

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

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.

Görkem KARASU

06/01/2023

DEĞİŞKEN KATILIĞA SAHİP KATMANLI DELİKLİ KOMPOZİT PLAKLARIN
DÜŞÜK HIZLI DARBE ETKİSİ ALTINDA DİNAMİK DAVRANIŞININ
MODELLENMESİ, ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU
(Yüksek Lisans Tezi)

Görkem KARASU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Güncel mühendislik uygulamalarındaki ürünlerin tasarım süreçlerinde kompozit malzemeler, üstün ve esnek mekanik özelliklerinden dolayı günümüzde sıkça kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle, yüksek mekanik özellik ve hafif tasarım istenilen uçak endüstrisinde kompozit malzemeler birçok yerde kullanılmaktadır. Son yıllarda, kompozit malzemelerin performanslarını arttırabilmek için eğrisel olarak serilen fiberler kullanılarak oluşturulan, değişken katılıklara sahip kompozit malzemeler çalışmaya başlanmıştır. Değişken katılık sayesinde tasarımcılar, daha iyi mekanik özelliklere sahip ve ağırlık tasarrufu sağlayan kompozit malzemeler ile istenilen gereksinimleri karşılayabilmektedirler. Bu tez çalışmasında, düşük hızlı darbe etkilerinin, değişken katılığa sahip delikli kompozit plakalar üzerinde oluşturduğu dinamik davranış sonlu elemanlar modeli yöntemi ile incelenmiştir. Bu amaçla, elyafların konuma bağlı serim açısı bilgilerinin elde edilebilmesi için Python programlama dili kullanılarak kod geliştirilmiştir. Elde edilen serim bilgileri Ansys ACP modülü yardımı ile sonlu elemanlar modeline aktarılmıştır. Oluşturulmuş olan sonlu elemanlar modellerinin, literatürde var olan çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulamaları yapılmıştır. Plakaların modal karakteristiklerinin daha iyi anlaşılabilmesi için değişik delik çapı değerlerine sahip plakalar ile modal analizler yapıp, sabit katılığa sahip plakaların modal karakteristikleri ile karşılaştırılmıştır. Daha sonrasında düşük hızlı darbe yükü altındaki değişik delik çaplarına sahip plakaların analiz modelleri oluşturulduktan sonra, iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, düşük hızlı darbe yükü altında, değişken katılığa sahip plakaların orta nokta yer değiştirme değerlerinin sabit katırlı plakalara göre %17,5 oranında daha az olduğu görülürken, delik çapının dört katı büyüklüğe çıkarılması durumunda katılık kaybına bağlı olarak yer değiştirmenin %33,8 oranında arttığı gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 91417
Anahtar Kelimeler : Değişken katılık, düşük hızlı darbe, kompozit malzeme, katmanlı plaka, sonlu elemanlar
Sayfa Adedi : 91
Danışman : Prof. Dr. Tuncay KARAÇAY

DESIGN, ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF DYNAMIC BEHAVIOR OF
VARIABLE STIFFNESS LAMINATED COMPOSITE PLATE WITH HOLE UNDER
LOW VELOCITY IMPACT EFFECT

(M. Sc. Thesis)

Görkem KARASU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

Composite materials have started to be used frequently in the design processes of products in current engineering applications due to their superior and flexible mechanical properties. Especially, composite materials are used in many places in the aircraft industry, where high mechanical properties and light design are desired. In recent years, variable stiffness composite materials, which are formed using curvilinear fibers, have been studied to increase the performance of composite materials variable stiffness allows designers to meet the desired requirements with composite materials with better mechanical properties and weight savings. In this thesis, the dynamic behavior of low-velocity impact effects on perforated variable stiffness composite plates have been investigated using the finite element model method. For this purpose, a code has been developed using the Python programming language to obtain the position-dependent laying angle information of the fibers. The resulting layout information was transferred to the finite element model with the help of the Ansys ACP module. The finite element models were validated by comparing them with the results of the studies available in the literature. In order to better understand the modal characteristics of the plates, modal analyses were performed with plates with different hole diameter values and compared with the modal characteristics of plates with constant stiffness. Afterward, analysis models of plates with different hole diameters under low-velocity impact load were created, and improvement studies were carried out. When the results were examined, it was observed that under low speed impact load, the midpoint displacement values of the plates with variable stiffness are 17.5% less than the plates with constant stiffness, while the displacement increases by 33.8% due to the loss of stiffness when the hole diameter is increased to four times the size.

Science Code : 91417

Key Words : Variable stiffness, low velocity impact, composite material, laminated plate, finite element

Page Number : 91

Supervisor : Prof. Dr. Tuncay KARAÇAY

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasının planlanmasında ve gerçekleştirilmesinde, değerli zamanını ayırıp ilgi, öneri, hoşgörü ve bilimsel katkılarını esirgemeyen değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Tuncay KARAÇAY'a teşekkürü bir borç bilirim.

Araştırmalarım sırasında, kompozit malzemelerin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi ve optimizasyonu için yaptığı her türlü değerli katkı ve önerilerinden dolayı, Sayın Dr. Onur COŞKUN'a teşekkürlerimi sunarım.

Beni daima sabırla destekleyen eşime ve aileme, çalışmalarım sırasında gösterdikleri ilgi ve sevgiden dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
3. DÜŞÜK HIZLI DARBE ANALİZİ TEORİSİ	13
3.1. Yenilenmiş Hertzian Kontak Yasası	13
3.2. LS-DYNA Sonlu Elemanlar Programı ile Düşük Hızlı Darbe Analizi Teorisi ..	15
3.2.1. LS-DYNA ceza kontak algoritma teorisi	18
3.2.2. Zaman adımı kontrolü	21
4. DEĞİŞKEN KATILIKLI KOMPOZİT MALZEMELER.....	23
4.1. Tabakalı Kompozit Malzemeler	23
4.2. Değişken Katılığa Sahip Kompozit Plaka Tanımı	25
4.3. Fiber Yerleştirme Teknolojisine Genel Bakış	26
4.4. Eğrisel Olarak Serilen Elyafların Tanımlanması	27
4.4.1. Doğrusal açı değişimi yöntemi.....	27
4.4.2. Sabit eğriliğe sahip elyaf açı tanımlaması.....	29
4.4.3. Doğrusal açı değişimi ve sabit eğrilik yöntemlerinin karşılaştırması	31
4.5. Katmanlı Kompozit Plaka Teorisi	31
4.5.1. Birinci dereceden kayma deformasyon katmanlı plaka teorisi	32

5. DEĞİŞKEN KATILIĞA SAHİP PLAKANIN SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE MALZEME MODELLEMESİ	39
5.1. Değişken Katılığa Sahip Kompozit Elyaf Serim Açısının Belirlenmesi için Geliştirilen Python Kodu Algoritması	39
5.2. Ansys ACP Modülü ile Değişken Katırlı Kompozit Malzeme Modelinin Oluşturulması.....	42
6. YAPILAN ANALİZLERİN DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI	43
6.1. DK Sahip Katmanlı Kompozit Plakanın Modal Analiz Doğrulaması	43
6.1.1. Oluşturulan model detayları	43
6.1.2. Sonuçların karşılaştırılması	45
6.2. İzotropik Çelik Plaka Çarpma Analizi Doğrulaması.....	48
6.2.1. Oluşturulan sonlu elemanlar modelinin detayları.....	48
6.2.2. Sonuçların karşılaştırılması	49
6.3. Sabit Katılığa Sahip Kompozit Plakanın Çarpma Analizinin Doğrulaması	49
6.3.1. Oluşturulan sonlu elemanlar modelinin detayları.....	49
6.3.2. Sonuçların karşılaştırılması	51
6.4. Değişken Katılığa Sahip Kompozit Plakanın Çarpma Analizinin Doğrulaması	53
6.4.1. Oluşturulan sonlu elemanlar modelinin detayları	53
6.4.2. Sonuçların karşılaştırılması.....	55
7. DEĞİŞKEN KATILIĞA SAHİP DELİKLİ KOMPOZİT PLAKANIN ANALİZ MODELLERİ VE İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARI	57
7.1. Değişken Katılığa Sahip Delikli Plakaların Modal Analiz Çalışmaları	58
7.1.1. DK delikli kompozit plaka ile SK delikli kompozit plakanın modal karakteristiklerinin karşılaştırması	59
7.1.2. DK delikli kompozit plakalarda delik boyutunun modal karakteristik üzerindeki etkileri	63
7.2. Değişken katılığa sahip delikli plakaların düşük hızlı darbe analiz çalışmaları .	66
7.2.1. Düşük hızlı darbe yükü altındaki değişken katılığa sahip delikli plakaların dinamik davranışlarının incelenmesi	66

Sayfa

7.2.2. Düşük hızlı darbe etkisi altındaki DK sahip delikli plakalarda delik boyutunun dinamik davranış üzerindeki etkileri	71
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR	79
EKLER.....	83
EK-1. Python kodunun akış diyagramı	84
EK-2. Yapılan modal analiz iyileştirme çalışmasının akış diyagramı	85
EK-3. Değişik delik çapı boyutlarına sahip plakaların doğal frekanslarına ait BMFD ve İMFD için oluşan cevap yüzeyleri	86
EK-4. Yapılan darbe analizi iyileştirme çalışmasının akış diyagramı	88
EK-5. Değişik delik çaplarına sahip plakaların darbe yükü altındaki orta nokta yer değiştirmesine ait cevap yüzeyleri	89
ÖZGEÇMİŞ	91

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.1. Hexply AS48552 Malzeme Özellikleri	43
Çizelge 6.2. Doğrulama Çalışması 6.1 İçin Ağ Boyutu-Mod Karşılaştırma Tablosu	45
Çizelge 6.3. Doğrulama Çalışması 6.1 İçin Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	46
Çizelge 6.4. Doğrulama Çalışması 6.3 İçerisinde Kullanılan Malzemenin Özellikleri..	50
Çizelge 6.5. Doğrulama Çalışması 6.4 İçerisinde Kullanılan Malzeme Özellikleri.....	54
Çizelge 7.1. G40-800/5276-1 Malzeme Özellikleri.....	58
Çizelge 7.2. SK Sahip Plakaların Birinci ve İkinci Mod Frekans Değerleri	60
Çizelge 7.3. DK Sahip Plakaların Birinci ve İkinci Mod Frekans Değerleri.....	62
Çizelge 7.4. Delik Çapı Boyutuna Bağlı Olarak Plakaların BMFD ve İMFD Değerleri	64
Çizelge 7.5. Örnekleme Sayısına Bağlı Maksimum Hata Miktarı.....	67
Çizelge 7.6. DK ve SK Sahip Plakaların Merkezlerinin Maksimum Yer Değiştirme Miktarları	69
Çizelge 7.7. DK Sahip Delikli Plakaların Darbe Yüğü Altındaki Orta Nokta Maksimum Yer Değiştirme Miktarı	72

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Tek Yönlü Kontaklardaki Ana Düğüm ile Bağımlı Düğümlerin Hareketlerinin Kontak Kuvveti Üzerindeki Etkisi	17
Şekil 3.2. Kontak Halindeki İki Yüzey Arasındaki Girişim	18
Şekil 4.1. Birden Fazla Tabakadan Meydana Gelen Tabaklı Kompozit.....	23
Şekil 4.2. Tabaka Açısı Tanımı	24
Şekil 4.3. Simetrik ve Simetrik Olmayan Tabakalı Kompozitler	24
Şekil 4.4. a) Ayrık ve b) Sürekli Değişken Katınlıklı Plakalar.....	25
Şekil 4.5. Ayrık Fiber Gösterim Örneği.....	25
Şekil 4.6. Örnek Bir Otomatik Elyaf Yerleştirme Makinesi.....	26
Şekil 4.7. OEY Makinasının Minimum Dönüş Yarıçapı	27
Şekil 4.8. Doğrusal Elyaf Açısı Değişimi ile Tanımlanan Elyaf Referans Yolu.....	28
Şekil 4.9. Sabit Eğrilige Sahip Elyaf Referans Yolu	30
Şekil 4.10. Doğrusal Açısı Değişimi ve Sabit Eğrilik Açısı Değişimi Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	31
Şekil 4.11. BDKD Teorisi Altında Deforme Olmuş Plaka.....	32
Şekil 4.12. Bir Katman İçerisinde Gerilmelerin Şematik Gösterimi	33
Şekil 4.13. Katmanlı Plakalar İçin Kullanılan Koordinat Sistemi ve Katman Numaralandırma Sistemi	35
Şekil 4.14. Plaka Elemanı Üzerindeki Bileşke Kuvvet ve Momentler	36
Şekil 5.1. Python Kodu ile Oluşturulan Örnek Referans Elyaf Eğrisi.....	40
Şekil 5.2. Python Kodu ile Oluşturulan Örnek Dizi	40
Şekil 5.3. Python Kodu ile Oluşturulan Örnek Dizi Serisi	41
Şekil 5.4. Python Kodu ile Oluşturulan Örnek Dizin Serim Açısı Değişimi.....	41
Şekil 5.5. Elyaf Seriminin Sonlu Elemanlar Modelindeki Ağ Yapısına İşlenmiş Hali ..	42
Şekil 6.1. Doğrulama Çalışması 6.1 İçin Plaka Boyutlarının Şematik Gösterimi	43

Şekil	Sayfa
Şekil 6.2. Doğrulama Çalışması 6.1 İçerisinde Kullanılan Plakaların Sınır Koşulları: a) SBBB ve b) SBSB	44
Şekil 6.3. Doğrulama Çalışması 6.1 İçin Oluşturulan Sonlu Elemanlar Modeli	44
Şekil 6.4. Doğrulama Çalışması 6.1 İçin a) Python Kodundan Alınan Serim Açısı b) ACP Modülü İçerisinde Sonlu Elemanlar Modeline İşlenmiş Serim Açısı ...	45
Şekil 6.5. Doğrulama Çalışması 6.1 İçin SBBB Sınır Koşulu ile Elde Edilen Mod Şekilleri	47
Şekil 6.6. Doğrulama Çalışması 6.1 İçin SBSB Sınır Koşulu ile Elde Edilen Mod Şekilleri	47
Şekil 6.7. İzotropik Plaka Çarpma Analizinin Sonlu Elemanlar Modeli	48
Şekil 6.8. İzotropik Plaka Çarpma Analizinin Kontak Kuvveti- Zaman Grafiği.....	49
Şekil 6.9. Doğrulama Çalışması 6.3 İçin Çarpma Analizinin Şematik Gösterimi.....	50
Şekil 6.10. Doğrulama Çalışması 6.3 İçin Sabit Katılığa Sahip Kompozit Plakanın Çarpma Analizinin Kontak Kuvveti- Zaman Grafiği	51
Şekil 6.11. Doğrulama Çalışması 6.3 İçin SK Sahip Kompozit Plakanın Çarpma Analizinin Plaka Merkezi Yer Değiştirme-Zaman Grafiği.....	52
Şekil 6.12. Doğrulama Çalışması 6.3 İçin Sabit Katılığa Sahip Kompozit Plakanın Çarpma Analizinin Enerji - Zaman Grafiği	52
Şekil 6.13. Doğrulama Çalışması 6.4 İçin a) Pozitif Serim Açıları b) Negatif Serim Açıları	53
Şekil 6.14. Doğrulama Çalışması 6.4 İçin Oluşturulan Sonlu Elemanlar Modeli ve Sınır Koşulları	54
Şekil 6.15. Doğrulama Çalışması 6.4 İçin Kontak Kuvveti Karşılaştırması	55
Şekil 6.16. Doğrulama Çalışması 6.4 İçin Plaka Merkezi Yer Değiştirme Miktarı Karşılaştırması	56
Şekil 6.17. Doğrulama Çalışması 6.4 İçin Enerji - Zaman Grafiği.....	56
Şekil 7.1. Delikli Plakalarda Kullanılan Geometri Şekli	57
Şekil 7.2. Delikli Plaka için Oluşturulan Ağ Yapısı	59
Şekil 7.3. SYİ Delikli Plakanın a) Birinci Mod Şekli b) İkinci Mod Şekli	60
Şekil 7.4. DK Delikli Plakanın İyileştirme Çalışmasında Elde Edilen Cevap Yüzeyleri a) BMFD İçin b) İMFD İçin.....	61

Şekil	Sayfa
Şekil 7.5. Modal Analiz Çalışması İçin İyileştirilmiş Serim Açılırları a) Pozitif Serim Açısı b) Negatif Serim Açısı.....	62
Şekil 7.6. İyileştirilmiş Serim Açısına Sahip DK Plakanın a) Birinci Mod Şekli b) İkinci Mod Şekli	63
Şekil 7.7. 1D delik çapı için a) SYİ Plakanın 1. Mod Şekli, b) SYİ Plakanın 2. Mod Şekli, c) DK Sahip Plakanın 1. Mod Şekli, d) DK Sahip Plakanın 2. Mod Şekli.....	64
Şekil 7.8. 2D delik çapı için için a) SYİ Plakanın 1. Mod Şekli, b) SYİ Plakanın 2. Mod Şekli, c) DK Sahip Plakanın 1. Mod Şekli, d) DK Sahip Plakanın 2. Mod Şekli	65
Şekil 7.9. 3D delik çapı için için a) SYİ Plakanın 1. Mod Şekli, b) SYİ Plakanın 2. Mod Şekli, c) DK Sahip Plakanın 1. Mod Şekli, d) DK Sahip Plakanın 2. Mod Şekli	65
Şekil 7.10. 4D delik çağı için a) SYİ Plakanın 1. Mod Şekli, b) SYİ Plakanın 2. Mod Şekli, c) DK Sahip Plakanın 1. Mod Şekli, d) DK Sahip Plakanın 2. Mod Şekli.....	65
Şekil 7.11. Delikli Plakanın Düşük Hızlı Darbe Analizi Oluşturulan Sonlu Elemanlar Modeli.....	66
Şekil 7.12. 250 Örnek Kullanılarak Orta Nokta Yer Değişime Miktarı İçin Oluşturulmuş Olan Cevap Yüzeyi.....	68
Şekil 7.13. Lokal Bölge Aramaları İçin Oluşan Cevap Yüzeyleri a) $\theta 1$ Değişkeni 0° - 30° Sınır Koşulu İçin b) $\theta 1$ Değişkeni 45° - 65° Sınır Koşulu İçin.....	68
Şekil 7.14. Düşük Hızlı Darbe Analizi Çalışması İçin İyileştirilmiş Serim Açılırları a) Pozitif Serim Açısı b) Negatif Serim Açısı	69
Şekil 7.15. SK ve DK Sahip Delikli Plakaların Darbe Analizi ile Edilen Kontak Kuvvetinin Zamana Bağlı Değişimi.....	70
Şekil 7.16. SK ve DK Sahip Delikli Plakaların Darbe Analizi ile Edilen Orta Noktanın Yer Değiştirme Miktarının Zamana Bağlı Değişimi	71
Şekil 7.17. DK Sahip Delikli Plakaların Darbe Yüğü Altında Oluşan Kontak Kuvvetleri.....	72
Şekil 7.18. DK Sahip Delikli Plakaların Darbe Yüğü Altındaki Zamana Bağlı Orta Nokta Yer Değiştirme Miktarı.....	73

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler Açıklamalar

A_{ij}	Uzama Katılığı
B_{ij}	Eğilme-Uzama Katılığı
D_{ij}	Eğilme Katılığı
D_p	İki Yüzey Arası Girişim Miktarı
E_1	Boyuna Yönde Elastik Modül
E_2	Enine Yönde Elastik Modül
F	Kontak Kuvveti
G_{ij}	Kayma Modülü
k	Kontak Katılığı
M_{ij}	Moment Bileşkeleri
N_{ij}	Kuvvet Bileşkeleri
ν_{ij}	Poisson Oranı
ρ	Yoğunluk
u	Boyuna Yönde Yer Değiştirme
v	Enine Yönde Yer Değiştirme
Q_{ij}	İndirgenmiş Katılık Matrisi
$\overline{Q}_{ij}$	Dönüştürülmüş İndirgenmiş Katılık Matrisi
θ_1	Plaka Başlangıç Serim Açısı
θ_0	Plaka Orta Nokta Serim Açısı
σ_1	Elyaf Yönündeki Gerilme
σ_2	Elyaf Yönüne Dik Yöndeki Gerilme
X_t	Boyuna Çekme Dayanımı
X_c	Boyuna Basınç Dayanımı
Y_t	Enine Çekme Dayanımı
Y_c	Enine Basınç Dayanımı

Kısaltmalar	Açıklamalar
BDKD	Birinci Dereceden Kayma Deformasyon
BMFD	Birinci Mod Frekans Değeri
CFL	Courant Friedrichs Lewy
ÇAGA	Çok Amaçlı Genetik Algoritma
DK	Değişken Katılık
İMFD	İkinci Mod Frekans Değeri
KDD	Kısmi Diferansiyel Denklemler
KKPT	Klasik Katmanlı Plaka Teorisi
MOGA	Multi Objective Genetic Algorithm
OEY	Otomatik Elyaf Yerleştirme
SBBB	Sabit Mesnetli Diğer Kenarları Boşta
SBCF	Segment Bazlı Ceza Formülasyonu
SBSB	İki Kenarı Sabit Mesnetli Ve İki Kenarı Boşta
SK	Sabit Katılık
SYİ	Simetrik Yarı İzotropik
YKCF	Yumuşak Kısıtlamalı Ceza Formülasyonu
ZAÖF	Zaman Adımı Ölçek Faktörü

1. GİRİŞ

Kompozit malzeme terimi malzeme bilimi olarak incelendiğinde, iki veya daha fazla malzemenin, yararlı bir üçüncü malzeme oluşturmak için makroskopik bir ölçekte birleştirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Farklı malzemeler, metallerin alaşımlanması örneğinde olduğu gibi, mikroskobik ölçekte birleştirilebilir, ama bu birleştirme sonucu oluşan malzeme, makroskopik olarak homojendir [1]. Oluşan son malzeme içerisindeki bileşenler çıplak gözle ayırt edilemez ve esas olarak birlikte hareket ederler. Kompozit malzemelerin avantajı, genellikle bileşenlerinin en iyi özelliklerini ve çoğu zaman ise her iki bileşenin de sahip olmadığı bazı iyi özellikleri gösterebilmeleridir. Bununla birlikte malzeme özelliklerinin tamamının aynı anda iyileştirilmesinin de çok zor olduğu unutulmamalıdır. Kompozit malzemelerin geliştirilmesindeki asıl amaç, yalnızca tasarım görevini gerçekleştirmek için gereken özelliklere sahip bir malzeme ortaya çıkarılmasıdır.

Kompozit malzemelerin kullanımları çok eski tarihlere dayanmaktadır. Mısır'da MÖ 4000 tarihlerin başlarında, papirüs bitkisinden lamine yazı malzemeleri yapmak için lifli kompozit malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Kontrplak, yine eski Mısırlılar tarafından, ahşabın üstün mukavemet ve termal genleşmeye, ayrıca nemin emilmesinin neden olduğu şişmeye karşı direnç elde etmek için kullanılmıştır [2]. Orta çağ zamanlarında ise kılıçlar ve zırhlar, farklı metal katmanlarından oluşturulmuştur. Günümüzde ise kompozit malzemeler uzun yıllardır yapısal ve yapısal olmayan uygulamalar için kullanılmaktadır.

Son yıllarda kompozit malzemeler özellikle havacılık ve uzay sektöründe oldukça sık bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Ağırlığa göre yüksek mukavemet ve yüksek sertlik oranlarına sahip fiber takviyeli, reçine matrisli kompozit malzemeler, uçak ve uzay araçları gibi ağırlığa duyarlı uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. Bu sayede ağırlıkları azalan uçak ve roketlerin, yakıt tüketimleri ve CO₂ emisyonu azalmakta ve bununla birlikte daha düşük maliyetlerde üretilabilmektedirler. Havacılık sektöründe, uçak kanatları, gövde, yatay ve dikey stabilizatörler, iniş takımı kapıları, motor kaportaları gibi hem birincil hem de ikincil öneme sahip yapısal parçalarda, metal alaşımlar yerine kompozit malzemeler giderek daha fazla kullanılmaya başlanmıştır [3]. Özellikle son yıllarda uçak motorlarında daha fazla kompozit malzeme kullanabilmek için yapılan çalışmalar hız kazanmıştır.

Değişken katılığa sahip kompozit malzemeler, son yıllarda sağlamış olduğu avantajlardan dolayı son dönemde çalışılmaya başlanmıştır. Değişken katılığa sahip kompozit malzeme, elyaf malzemenin kavisli sürekli yolları takip etmesi ile elde edilmektedir. Bu sayede sürekli değişken sertlik varyasyonlarına sahip tabakalar oluşturulmaktadır ve bunun sonucu olarak tasarımcıya daha geniş bir tasarı alanında çalışması sağlanmaktadır. Havacılık uygulamalarına odaklanan değişken katılığa sahip kompozit plakaların, sabit katılığa sahip kompozit plakalara göre burkulma yükünün %50'si oranında artış gösterdiği görülmüştür [4]. Bununla birlikte, değişken katılığa sahip kompozitler karmaşık malzeme düzenine ve tahmin edilmesi zor olan mekanik davranışlara sahiptirler.

Darbe etkilerinin kompozit malzemeler üzerinde oluşturduğu etkiler, son yıllarda araştırma konularının başında gelmektedir. Darbe etkileri, çarpan cismin hızına göre düşük, orta ve yüksek hızlı olarak üç bölümde sınıflandırılmaktadır. Bakım sırasında alet düşmesi veya pist enkazı gibi çeşitli olaylardan kaynaklanan düşük hızlı çarpma etkileri, kompozit malzemelerin iç yapılarında tahmin edilmesi zor olan hasarlar meydana getirmektedir [5]. Bu nedenden dolayı darbe konusu pratik önemi yüksek bir konudur ve kompozit malzemelerin tasarım aşamasında dikkate alınması gerekir.

Bu tez çalışmasında, DK sahip delikli kompozit plakalardaki modal ve dinamik karakteristiklerinin, SK sahip kompozit plakalara göre avantajları ve dezavantajları incelenmek istenmiştir. Daha sonra delik çapı değişiminin DK sahip kompozit plakalar üzerinde oluşturduğu etkilerin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda, SK sahip delikli kompozit plakalar ile DK sahip kompozit plakaların modal karakteristikleri ve düşük hızlı darbe etkisi altındaki dinamik davranışları karşılaştırılmıştır. SK ve DK sahip plakaların karşılaştırma çalışmaları yapıldıktan sonra, delik boyutu değiştirilerek DK sahip plakaların modal karakteristiklerini ve düşük hızlı darbe yükü altındaki dinamik davranışını nasıl etkilediği incelenmiştir. Tez çalışması sırasında yapılan analizler literatürden bulunan analizler ile karşılaştırılıp doğrulamaları yapılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde düşük hızlı çarpma konusu üzerine ilk çalışmalardan birini 1939 yılında Karas [6] yapmıştır. Karas, dört tarafı rijit olacak şekilde sabitlenmiş olan izotropik dikdörtgen çelik malzemeden yapılmış levhanın merkezine, yine aynı malzemeden yapılan çelik bir bilyenin çarpma hareketini incelemiştir. Kontak kuvvetleri, yer değiştirme değerlerini ve hem plaka merkezinin hem de çelik bilyenin hızları Karas tarafından analitik olarak hesaplanmıştır. Karas tarafından yapılan bu çalışmalar daha sonraki yıllarda birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. İlerleyen yıllarda, giderek artan kompozit malzeme kullanımından dolayı, kompozit malzemelerin düşük hızlı çarpma yükü altındaki davranışları incelenmeye başlanmıştır.

Dobyns [7], 1981 yılında statik ve dinamik yükleme koşulları altındaki basit mesnetli ortotropik plakaların analizinin yapılabilmesi için denklemler sunmuştur. Çalışmalarında patlamaları temsil edebilmek için, zamana bağlı olarak değişen, sinüs, dikdörtgen, üçgen şeklindeki darbe dalgalarını kullanmıştır. Çalışmalarının düşük hızlı darbe yükü içinde kullanılabileceği görülmüştür. Elde ettiği denklem ile darbe dalgalarının etkisi atındaki plakaların dinamik davranışlarını temsil etmiştir. 1985 yılında Tan ve Sun [8] grafit epoksi malzemeden yapılan katmanlı kompozit plakanın düşük hızlı darbeye olan tepkisini teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Teorik olarak buldukları denklemi sonlu farklar methodu ile çözümlemişlerdir. Teorik sonuçlar ile gerinim ölçerlerden elde edilen deneysel verilerin birbirleri ile uyum sağladığını görmüşlerdir. Yaptıkları çalışmanın sonucu olarak geliştirmiş oldukları teorik prosedürün düşük hızlı darbe yükü altındaki katmanlı kompozit plakanın tepkisini tanımladığını görmüşlerdir. Yine aynı yıl içerisinde Sun ve Chen [9], sonlu elemanlar methodunu kullanarak, ilk başta gerilmiş olan laminaların darbeye karşı nasıl tepki verdiklerini araştırmışlardır. Deneysel olarak oluşturulan kontakt kuralını, sonlu elemanlar modellerinin içerisine eklemişlerdir. Plakalardaki temas kuvveti geçmişi, sapma ve gerinim gibi sayısal sonuçlar çalışma içerisinde sunulmaktadır. Çarpma testi düzeneğinin kütlesi ve boyutu, plakalar üzerindeki başlangıç gerilme değerleri ve çarpma hızının etkilerini incelemişlerdir.

1989 yılı içerisinde düşük hızlı darbe durumunu inceleyen üç farklı çalışma yapılmıştır. İlk çalışmada, Wu ve Chang [10] darbe yükü altındaki katmanlı plakanın zamana bağlı dinamik

analizini yapmışlardır. Yapmış oldukları analiz ile çarpma sırasında kompozit plakanın yer değiştirmelerini ve katman kalınlığı boyunca zamana bağlı gerilim ve gerinim dağılımlarını hesaplamışlardır. Çarpma sırasında temas kuvvetini hesaplamak için Newton Raphson yöntemini temel olarak alan bir temas yasasını kullanmışlardır. Oluşturulmuş olan sonlu elemanlar yönteminin çözümü için bilgisayar kodundan faydalanmışlardır. Yöntemin doğruluğunun test edilebilmesi için Karas'ın yapmış olduğu analitik çalışma ile kendi çalışmalarını karşılaştırmışlar ve sonuç olarak Karas'ın elde ettiği sonuçlar ile uyumlu sonuçları bulduklarını görmüşlerdir. Wu ve Chang'in yapmış oldukları bu çalışmadan önceki analizler iki boyutlu plaka teorisine dayanmaktaydı ve kalınlık boyunca gerilme ve gerinim dağılımları elde edilemiyordu. Bu sebeple Wu ve Chang, darbe sırasında katman kalınlığı boyunca tüm gerilmelerin ve gerinimlerin dağılımlarını değerlendirmek için bir analiz geliştirmek ve katman kalınlığının etkisini incelemek istemişlerdir. İkinci çalışmada ise, Cairns ve Lagace [11] Grafit/Epoksi ve Kevlar/Epoksi malzemelerden oluşan kompozit malzemelerin darbe yükü altında zamana bağlı cevaplarını incelemişlerdir. Çalışmalarında, katmanlı kompozit plakaların darbe yükü davranışı üzerindeki farklı parametrelerin etkilerini analitik olarak ele almışlardır. Zamanla değişen başlangıç problemini çözmek için Rayleigh-Ritz enerji yönteminden yararlanmışlardır. Oluşturmuş oldukları analitik modele, kesme deformasyonu, eğilme-bükülme ilişkisini ve doğrusal olmayan kontak davranışının etkilerini dahil etmişlerdir. Analitik modellerinin doğruluğunu test etmek için daha önceki yıllarda çalışmış olan Wu ve Sun & Chen'in elde ettikleri sonuçları kullanmışlardır. Referans alınan iki makale ile uyumlu sonuçları elde ettiklerini görmüşlerdir. Analitik modellerini doğruladıktan sonra değişik parametrelerin etkilerini görmek için parametrik çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda plakanın etkin kütlelerinin, çarpma olaylarına tepkide genellikle önemli bir etkisi olduğunu görmüşlerdir. Genel olarak, çok düşük hız etkisi için yapısal davranışın etkisi baskınken, çarpma hızı arttıkça hedef kütle özelliklerinin daha önemli hale geldiği görülmüştür. Kütlelerin bu önemi, çarpma tertibatının kinetik enerjisinin çarpma tertibatını karakterize etmek için yeterli olmadığını, çarpma tertibatının kütlelerinin sonuçta ortaya çıkan dinamik davranış üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu anlamışlardır. Üçüncü çalışmada Christoforou ve Swanson [12] kompozit malzemelerde çarpma olayına analitik bir çözüm getirmek için çalışmışlardır. Darbe problemi çözümü için Laplace dönüşüm teknikleri ile birleştirilmiş, basit destekli plakalar için olağan Fourier serisi açılımına dayalı olarak analitik bir çözüm sunmuşlardır. Araştırmalarını, Wu ve Sun & Chen'in çalışmalarında elde ettikleri sonuçlar ile doğrulamışlardır.

1989 yılı içerisinde düşük hızlı çarpma konusunda çalışmalar devam ederken Hyer ve Lee [13] elyaf dizilimlerinin eğrisel hale getirilmesiyle birlikte oluşan değişik katılığa sahip kompozit malzemeler ile çalışmalar yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada, geleneksel düz serilime sahip elyaf düzeni yerine, katmanlardaki elyaf oryantasyonunun değişebileceği durumunu düşünerek, burkulma performansının arttırılmasını araştırmışlardır. Araştırmalarında, merkezi olarak yerleştirilmiş bir deliğe sahip, basit mesnetli bir kare plaka kullanmışlardır. Çalışmalarında duyarlılık analizi ve gradyan arama tekniği kullanmışlardır. Duyarlılık analizini, plakanın hangi bölgelerinin burkulma yükü üzerinde en fazla etkiye sahip olduğunu anlamak için kullanmışlardır. Gradyan arama tekniği ise, öngörülen koşullar için mutlak maksimum burkulma yükünü temsil eden tasarımı bulmak için kullanmışlardır. Bu sayede plakanın çeşitli bölgelerindeki elyaf oryantasyonunu, burkulma yükünü artıracak şekilde seçmişlerdir. Gerilme sonucu oluşan konturları incelediklerinde, eğrisel fiberlerin, oluşan yükü plakanın desteklenmeyen delik bölgesinden desteklenen kenarlara doğru hareket ettirdiği ve böylece plakanın burkulma kapasitesini artırdığını görmüşlerdir. Geliştirilmiş burkulma tasarımı ile plakanın çekme kapasitesinin de arttığı görülmüştür. Böylece eğrisel elyaf konseptinin hem çekme kapasitesini hem de burkulma kapasitesini aynı anda iyileştirilebileceğini göstermişlerdir. Yıl 1993 yılına gelindiğinde Gürdal ve Olmedo [14] DK sahip kompozit plakalar ile ilk çalışmalarını yapmaya başlamışlardır. Elyaf açılarını, katmanlı kompozit malzeme uzunluğu boyunca değiştirmişlerdir, bu sayede konumun bir fonksiyonu olarak değişen sertlik özellikleri elde etmişlerdir. Çalışmalarında, DK sahip simetrik plakaların birleştirilmesi ile elde edilen katmanlı kompozit malzeme için, değişik sınır koşullarına sahip düzlem elastik problemlerine çözümler elde etmişlerdir. Yapılan çalışmalarda, sertlik değişiminin analizini ve aynı zamanda bu değişimin panelin elastik tepkisi üzerindeki etkileri sunulmaktadır. DK sahip olan panelin düzlem içerisindeki yanıtlarını kısmi diferansiyel denklemler kullanarak matematiksel olarak tanımladıktan sonra sayısal çözüm metotları kullanarak çözüm elde etmişlerdir. Yaptıkları araştırmalar sonucunda, tasarımcıların plaka üzerindeki gerilme dağılımlarını uyarlamak için değişken katırlıklı kompozit malzemeleri kullanabileceklerini görmüşlerdir.

İlerleyen yıllarda araştırmacılar darbe hareketinin kompozit malzemeler üzerindeki etkilerini daha iyi anlayabilmek için çalışmalarına devam etmişlerdir. 1996 yılında Carvalho ve Soares [15] ile Pierson ve Vaziri [16] kompozit plakaların çarpma davranışını analitik olarak temsil etmeye çalışmışlardır. Her iki çalışmada da basit mesnet kullanılarak sabitlenmiş olan kompozit plakaların dinamik karakteristiklerinin çözülmesi için

Fourier serisi açılımından faydanılmıştır. Yıl 1997’de Goo ve Kim [17] rijit bir cisim ile katmanlı kompozit arasındaki çarpma davranışlarını, dinamik temas problemi çözümü ile açıklamaktadırlar. Bu yöntemde, Değiştirilmiş Hertz temas yasasında kullanılmayan, kalınlık etkilerini ve katmanlama modelini hesaplamaları içerisine kattığı için, dinamik temas analizinin katmanlı kompozit malzemelerin darbe tepkisini daha doğru bir şekilde temsil edeceği sonucuna varmışlardır. Çalışmaları içerisinde cezalı sonlu elemanlar yöntemini kullanan dinamik temas probleminin formülasyonunu özetlemişlerdir. Ayrıca gerçek hayatta karşılaşılan kavisli katmanlı kompozit malzemelerin darbe davranışlarını incelemişlerdir. Çeşitli eğrilikler ve istifleme dizileri ile kavisli katmanlı kompozit darbe kuvveti geçmişlerini grafik şeklinde sunmuşlardır. Eğriliğin, katmanlı kompozitlerin darbe tepkisi üzerindeki etkilerini göstermişlerdir.

Chun ve Lam [18] bir kütlenin çarptığı, ankastre olarak bağlanmış çapraz açılı katmanlı plakaların dinamik tepkisini, 1998 yılında incelemişlerdir. Düşük hızlı darbe altında katmanlı kompozit plakaların dinamik tepkisinin hesaplanması amacıyla sayısal bir yöntem önermişlerdir. Doğrusal olmayan, ikinci dereceden diferansiyel denklemleri, Lagrange ilkesi ve Hertz temas yasası kullanarak türetmişlerdir. Elde edilen diferansiyel denklemler, asal dönüşüm yöntemiyle ikinci dereceden terimlere göre ayrıştırılmış ve daha sonra sayısal olarak çözülmüştür. Bunun sonucu olarak herhangi bir katmanlama sırası ve sınır koşulu ile katmanlı plakaların darbe problemlerini analiz etmek için kullanılabilecek yöntem oluşturmuşlardır. Kompozit plakalardaki kontak kuvveti, meydana gelen deformasyon, aktarılan enerji ve gerilmeleri yapmış oldukları çalışmaların sonuçları olarak sunmuşlardır. 1999 yılına gelindiğinde Luo [19] üzerinde açık delik olan kompozit malzeme üzerindeki çarpma olayını incelemiştir. Araştırmalarında, bir deliğin çarpma bölgesinde oluşan hasar ve delik civarındaki göçme üzerindeki etkilerini ortaya çıkarmıştır. Bir delik içeren bir karbon/epoksi kompozit levhaya 0,59 J darbe için simülasyon (maksimum gerilme ve ikinci dereceden gerilme kırılma kriterlerini kullanan) ile deney arasında ayrıntılı bir karşılaştırma yapmıştır. Hem simülasyonda hem de deneyde, çarpma noktası ile delik arasında iki paralel matris çatlağı oluştuğunu gözlemlemiştir. Simülasyondan, başlangıçtaki çatlağın çarpma noktasında başladığını ve deliğe doğru ilerlediğini, geri tepme çatlağının ise delik kenarına yakın yerde başladığını ve çarpma merkezine doğru ilerlediğini görmüştür.

2003 yılında Parnas ve diğerleri [20], eğrisel elyaflar kullanarak oluşturulacak kompozit malzemelerin optimum tasarımı için bir metodoloji oluşturmuşlardır. Optimizasyonlarında, belirli koşullar altındaki kompozit laminaların ağırlıklarını gerilim kısıtlamaları altında en

aza indirmeyi amaçlamışlardır. Katman kalınlıklarını ve fiber açıları, sırasıyla bikübik Bezier yüzeyleri ve kübik Bezier eğrileriyle temsil etmişlerdir. Aynı yıl içerisinde Markopoulos ve Kostopoulos [21] düşük hızlı darbe altında herhangi bir tür katmanlı kompozit plakanın dinamik tepkisinin hesaplanması için sayısal bir yöntem geliştirmişlerdir. Doğrusal olmayan, ikinci mertebeden diferansiyel denklemleri, p-Ritz polinom fonksiyonları ve Hertz temas yasasının elastoplastik versiyonu kullanılarak türetmişlerdir. Oluşturdıkları yöntem ile ankstre bağlantı yöntemi ile sabitlenmiş, değişik serilim açlarına sahip katmanlı kompozit plakaların dinamik tepkilerini incelenmişlerdir. Her ve Liang [22] sonlu elemanlar modelleme yöntemi kullanarak, 2004 yılında kabuk yapıdaki katmanlı kompozit malzemelerin düşük hızlı çarpma analizlerini yapmışlardır. Çalışmalarında, ANSYS/LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımını kullanmışlardır. Programda kurmuş oldukları sonlu elemanlar modelini, Karas ve Wu'nun yapmış oldukları çalışmalarla doğrulamışlardır. Yükleme ve boşaltma süreçlerine bağlı olan Temas kuvvetini değiştirilmiş Hertz temas yasası ile hesaplamışlardır. Araştırmalarında iki tip kabuk yapısı, silindirik ve küresel kabuklar ele almışlardır. Kabuk eğriliği, sınır koşullarındaki değişiklikler ve çarpma hızı gibi parametrelerin etkilerini, parametrik çalışma yoluyla incelemişlerdir. Sonlu elemanlar modelinden aldıkları sonuçlarda, daha büyük rijitliğe sahip yapılarda, daha büyük bir temas kuvveti oluştuğunu ve daha küçük bir deformasyon oluştuğunu görmüşlerdir. Yapıda meydana gelen darbe tepkisi çarpma hızı ile orantılı olduğunu anlaştırmışlardır. 2006 yılına gelindiğinde Choi [23] katmanlı kompozitlerin düşük hızlı darbe tepkisini analiz etmek için yeni bir hesaplama yöntemi önermiştir. Çalışmasında, katmanlı kompozitlerin temas kuvveti geçmişini yaklaşık olarak hesaplamak için önerilmiş olan 'yığın kütle yöntemi' ve yay elemanı yöntemi kavramsal olarak açıklanmaktadır. Yay eleman yönteminin kompozit sandviç plakalara nasıl uygulanabileceğini makalesinde tartışmıştır. MSC/Nastran sonlu elemanlar programını kullanarak yay eleman yöntemine dayalı sonlu elemanlar analizinden elde ettiği sayısal sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır.

Aynı yıl içerisinde düşük hızlı darbelerin kompozitler üzerindeki etkileri incelenirken, Abdalla ve diğerleri [24] ise değişken katılığa sahip kompozitler kullanarak doğal frekansın arttırılması için çalışmalar yürütmüşlerdir. Çalışmalarında klasik laminasyon teorisine dayalı olarak temel frekans değerlerini bulmuşlardır. Sonuç olarak, sabit sertlikteki paneller ile değişken sertlikteki panellerin karşılaştırıldığında, optimal temel doğal frekansında, değişken sertlikteki katmanlı kompozit malzeme kullanımı ile önemli bir artış elde edilebileceğini görmüşlerdir. 2008 yılında Gürdal ve diğerleri [25] değişken katılığa sahip

kompozit malzemelerin basma yükü altında oluşan burkulma hareketini incelemişlerdir. Düzlem içi ve burkulma tepkilerini anlayabilmeleri için değişken katılığa sahip panellerinin analizleri, iki farklı katılık varyasyonu durumu için geliştirmişlerdir. İlk durum, yükleme yönünde bir rijitlik değişimi olan panellerin analizlerini yapmışlardır. Ortaya çıkan sayısal sonuçlar, panel üzerinde enine gerilimlerin uygun dağılımı nedeniyle bazı panel konfigürasyonları için burkulma yükünde küçük gelişmeler olduğunu görmüşlerdir. İkinci durumda, katılığı yüklemeye dik yönde değişen panel üzerinde analiz yapmışlardır. Bu analizin sonucunda, uygulanan yüklerin yeniden dağılımı nedeniyle çok daha yüksek derecede iyileştirme sağlandığını görmüşlerdir. Aynı zamanda, eşit burkulma yükleri ile farklı global katılık değerlerine sahip birçok konfigürasyonun mevcut olması nedeniyle, değişken katılık konseptinin tasarımcıya genel panel sertliği ve burkulma yükü arasındaki dengeler için bir esneklik sağladığını da göstermişlerdir.

2009 yılında Mishra ve Naik [26] kompozit yapıların düşük hızlı darbe yükünden nasıl etkilendiklerini incelemek istemişlerdir. Çalışmalarında, plakanın orta noktasında düşük hızlı darbeye maruz kalan dört tarafı da basitçe desteklenen dikdörtgen, ortotropik, simetrik katmanlı kompozit plakaların tepkisi için analitik bir model sunmuşlardır. Plakaya, yarım küre uçlu bir çarpma tertibatı tarafından düşük hızlı darbe yapılır. Çarpma bölgesindeki temas kuvveti, plakanın ve çarpan cismin yanal yer değiştirmeleri ve hızları, plakanın içindeki gerilme durumu modal çözüm tekniği sayesinde belirlemişlerdir. Katmanlı plakaların küçük eğilme elastik tepkisi için geçerli olan temel denklemler, kayma deformasyonu, döner atalet ve doğrusal olmayan Hertz temas yasasının birleşik etkilerini içerdiklerini belirtmişlerdir. Düzlem içi ve katmanlar arası kırılma fonksiyonları, ikinci dereceden kırılma kriterleri kullanılarak belirlenmiştir. Genel olarak, tek yönlü çapraz katmanlardan oluşan plakaların, dokuma kumaş kompozitler için genel başarısızlık fonksiyonunun daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Khalili ve diğerleri [27], 2011 yılında, kabuk yapı olarak modellenen plaka ve silindir şeklindeki katmanlı kompozit malzemelerin düşük hızlı darbeye karşı oluşacak tepkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, ABAQUS sonlu elemanlar kodu kullanılarak sayısal analiz yapmışlardır. İncelemelerinde, çeşitli koşullara sahip birkaç durum çalışması ele alınmış, var olan modelleme süreçlerinin geçerliliğini incelemişlerdir. Her durumda, çeşitli yöntemlerin sonuçlarını mevcut literatürdeki ilgili mevcut deneysel test sonuçlarıyla karşılaştırmışlar ve gelecekteki araştırmalar için kompozit yapıların düşük hızlı darbe modellemesinde kıyaslama yöntemi olarak kullanılabilecek en iyi prosedürü önermişlerdir. 2012 yılı içerisinde Pedro Ribeiro ve

Akhavan [28] değişken katılığa sahip kompozit malzemelerin doğrusal olmayan titreşimlerini analiz etmişler ve geleneksel katmanlı kompozit malzemeler ile karşılaştırmalarını yapmışlardır. Yapmış oldukları analiz, sayısal deneylere dayanmaktadır ve birinci dereceden kayma deformasyon teorisini izleyen, hiyerarşik temel fonksiyonlara sahip yeni bir p-versiyonu sonlu eleman türetmişlerdir. Doğrusal olmayan adi diferansiyel hareket denklemlerini Newmark'ın yöntemiyle çözmüşlerdir. Elyaf oryantasyonunun varyasyonunun, lineer olmayan yanıtın genliklerinde önemli farklılıklara yol açabileceğini göstermişlerdir. Bu çalışmadan bir sene sonra Wang ve diğerleri [29] geometrik olarak doğrusal olmayan katmanlı kompozit plakaların düşük hızlı darbe analizlerini incelemişlerdir. Oluşturdukları model, von Karman'ın doğrusal olmayan gerinim ve yer değiştirme ilişkisini içermektedir. Ortaya çıkan doğrusal olmayan dinamik problem, Newton-Raphson yinelemesi ile Newmark zaman adımlama şeması ile çözmüşlerdir. Oluşturdukları model aracılığıyla hesaplanan sonuçları, mevcut analitik ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır ve literatür sonuçlarına yakın sonuçlar bulmuşlardır. Aynı yıl içerisinde Amaro ve diğerleri [30] cam/epoksi malzemesinden oluşan katmanlı kompozitler üzerinde düşük hızlı çarpma etkisi altında deliklerin etkisini değerlendirmişlerdir. Bir delikli, iki delikli ve üzerinde delik olmayan plakaları test etmişlerdir. Ortaya çıkan hasarı ve deliklerin varlığı arasındaki etkileşimi daha iyi anlamak için birleşik karışık mod hasar modelini içeren bir sonlu eleman analizi yapmışlar ve ortaya çıkan sonuçları karşılaştırmışlardır. Deliklerin varlığının hasar tarafından emilen enerjiyi ve hasar alanlarını arttırdığını görmüşlerdir.

2014 yılına gelindiğinde Yazdani ve Ribeiro [31] değişken katılığa sahip kompozit malzemelerin doğal frekanslarını ve mod şekillerini bulabilmek için p-versiyonu sonlu elemanlar yaklaşımına dayalı yeni bir model ortaya koymuşlardır. Geliştirilen model ile, oldukça doğru bir şekilde, enine kesit çarpıklığını açıklamaya izin verir ve bu sayede kalınlığı fazla olan değişken katılığa sahip kompozit plakaların doğal frekansları ve titreşim mod şekilleri hesaplanabilmiştir. İlk olarak modellerini, yayınlanan sonuçlarla karşılaştırmalar yaparak doğrulamışlardır. Daha sonra değişken katılığa sahip plakaların titreşim modlarını incelemişlerdir. Aynı yıl içerisinde Teter ve diğerleri [32] eğrisel elyaf düzenine sahip kompozit malzemelerin mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında Değişken katılığa sahip kompozitler ile ilgili diğer konulara değinilse de, inceleme çoğunlukla eğrisel elyaflarla güçlendirilmiş kompozitlerin burkulma, bozulma ve titreşimlere hareketlerine odaklanmışlardır. Eğrisel fiberlere sahip değişken katılıklı

kompozit plakaların doğal titreşim frekansları, h-versiyonlu ve p-versiyonlu sonlu elemanlar kodu ile hesaplayıp, sonuçlarını karşılaştırmışlardır.

2015 yılına gelindiğinde Hadi ve Khaleel [33] üzerinde delik bulunan katmanlı kompozit plakalarla üzerine düşük hızlı darbe gelmesi durumunu araştırmışlardır. Çalışmalarında, delikli ve deliksiz kompozit plaka üzerindeki düşük hız etkisini sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. Sayısal hesaplamalar için ABAQUS sonlu elemanlar çözücüsünü kullanmışlardır, deneysel çalışmalar içinse E-Cam/Polyester kompozit levha imalatını yaparak mekanik özelliklerini hesaplamışlardır. 10 mm delik çaplarına sahip, bir delikli ve iki delikli olmak üzere iki farklı delikli kompozit üzerinde çalışmışlardır. Hem delikli hem de deliksiz plakalar için, değişik sınır koşulları altında, ilk beş modları belirlemişlerdir. Daha sonrasında değişik hızlardaki darbe yükü altında kompozit levhanın yer değiştirme ve temas kuvvetlerini incelemişlerdir. Kompozit levhaya çarpma sonucu oluşabilecek hasarın tespiti için ultrasonik test yapmışlardır. Deliklerin varlığının, kompozit plakanın doğal frekanslarını, plaka tarafından emilen enerjileri ve darbe kuvvetini azalttığı, kompozit plakanın yer değiştirmesinin ise deliklerin sayısı ve çapının artmasıyla arttığı sonucuna varmışlardır. Aynı yıl içerisinde Ahmed ve Wei [34] düşük hızlı darbe hasarı simülasyonları için, ABAQUS/Explicit sonlu elemanlar programını kullanarak, kompozit yapılardaki arıza modlarını tahmin etmeye çalışmışlardır. İncelemelerinde, darbe yüklerine maruz kalan kompozit yapılar için hasar mekanizmaları ve göçme kriterleri hakkında ayrıntılı tartışmalar yapmışlardır.

Choi [35], 2016 yılında, düşük hızlı darbelere maruz kalan kompozit lamine levha ve silindirik kabukların zamana bağlı tepkilerini sayısal olarak incelemiştir. Çalışmasında geometrik olarak doğrusal olmayan kabuk modellerin sonlu eleman programını geliştirebilmek için, kayma deformasyon teorisi ve von Karman'ın sapma teorisini kullanmıştır. 2016 yılında Gonzalez ve diğerleri [36] düşük hızlı darbelerin etkilerini incelemişlerdir. Delikli ve deliksiz, Cam/epoksi ve metal elyaflara sahip kompozit levhaların, düşük hızlı darbe tepkisini araştırmışlardır. Çarpma olayı sırasında ortaya çıkan hasarın boyutu, C-scan tahribatsız ultrasonik teknikten elde edilen görüntülerle gözlemlenmişlerdir. Sonuç olarak, alüminyum katmanlarla yapılan metal elyaflı kompozit malzemelerin, geleneksel kompozitlere kıyasla gelişmiş bir dinamik tepki sergilediğini görmüşlerdir. Ayrıca, metal elyaflı kompozit malzemelerin, geleneksel kompozit plakalardan daha iyi yük taşıma kapasitesini göstermişlerdir. 2017 yılında Santos ve diğerleri

[37] tarafından, darbe noktası ile delik arasındaki mesafenin cam elyaf/epoksi katmanlı kompozitlerin yorulma ömrü üzerindeki etkisini değerlendirmek için bir darbe yorulma çalışması yapılmıştır. Bu amaçla, çarpma noktasından 0, 5, 10 ve 20 mm mesafelerde delikler bulunan kare plakalar ile deneysel testler yapmışlardır. Oluşan sonuçları deliksiz plakalarda elde edilenlerle sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Yorulma ömrünün kontrol numunelerine göre 20 mm, 10 mm, 5 mm ve 0 mm mesafeler için sırasıyla %10,9, %40, %63.6 ve %69,1 oranında azaldığı sonucuna varmışlardır. Bu çalışmadan bir yıl sonra, Bogenfeld ve diğerleri [38], daha önceden yapılmış olan çalışmalardan faydalanan altı farklı modelleme yöntemi kullanarak, darbe hasarının kompozitler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Oluşturulan modellerden, tabakalar arası ayrılmaları, oluşan fiber ve matriks çatlaklarını, zamana bağlı kontak kuvvetlerini ve enerji dağılımını inceleyip, gerçek test verileri ile karşılaştırmışlardır. Yine 2018 yılı içerisinde Ahmad ve diğerleri [39] çapraz olarak serilmiş olan karbon elyafla güçlendirilmiş kompozit plakaların düşük hızlı darbe tepkilerini deneysel olarak incelemişler ve sonlu eleman kodu LS-DYNA'yı kullanarak sonlu elemanlar analizlerini yapmışlardır. Kompozit plakaları modellemek için iki farklı modelleme yaklaşımı kullanmışlardır. İlk sayısal modelleme yaklaşımında kompozit katmanlar için katı elemanlar kullanılırken, ikincisinde kabuk elemanlar kullanılmıştır. Kabuk elemanlarını kullanan sayısal model, deneysel sonuçlarla iyi bir korelasyon gösterdiğini görmüşlerdir.

2020 yılında Antunes ve diğerleri [40], değişken katlıklara sahip kompozit laminaların, değişik sınır koşulları altında titreşim modlarını incelemek için, klasik levha ve birinci derece kayma deformasyon teorilerini kullanarak matematiksel modeller oluşturmuşlardır. Oluşturmuş oldukları modelleri doğrulamak amacıyla deneysel çalışmalardan faydalanmışlardır. Hazırladıkları model ile deneysel sonuçların birbirlerine çok yakın olduğunu göstermişlerdir. Bu çalışmadan bir yıl sonra Milazzo ve Benedetti [41] değişken katılığa sahip plakalarda darbe kaynaklı dinamik etkileri analiz edebilmek için bir formülasyon önermişlerdir ve bu formülasyonlarını test etmişlerdir. Yöntem, birinci dereceden kesme deformasyon kinematiğine ve von Karman doğrusal olmayan şekil değiştirmelerine dayanmaktadır. Darbe yüklemesi Hertzian temas yasası ile modellemişlerdir. Mevcut literatür ile formülasyonlarını doğrulamışlardır. Aynı yıl içerisinde Liu ve diğerleri [42], çapraz katlı ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen fiber takviyeli polietilen termoplastik kompozit laminaların darbe davranışını araştırmak için, düşük hızda darbe testleri gerçekleştirmişlerdir. LS-DYNA programı kullanılarak

oluşturdukları üç boyutlu sonlu elemanlar (FE) modelini, deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulamışlardır. Analiz sonucunda, darbe enerjisinin esas olarak laminaların plastik deformasyonu ve tabakaların ayrılmasından dolayı dağıtıldığını gözlemlemişlerdir. 2022 yılında yapılan diğer bir çalışmada Coşkun ve Türkmen [43] kübik ve ikinci dereceden Bezier eğrilerini kullanarak oluşturulan değişken katılıklı katmanlı kompozit malzemeleri incelemişler ve optimizasyonlarını yapmışlardır. Kübik Bezier eğrilerini kullanan değişken katılıklı katmanlı kompozitlerin, yarı izotropik katmanlı kompozitler ile karşılaştırıldığında sertlikte %44 azalmaya karşı burkulma yükünde %103 artış gösterdiğini görmüşlerdir.



3. DÜŞÜK HIZLI DARBE ANALİZİ TEORİSİ

Darbe yüklemesi dört adet kategori grubu içerisinde incelenmektedir. Bu kategoriler düşük hız, orta hız, yüksek/balistik hız ve hiper hız başlıklarından oluşmaktadır. Darbe yükü kategorisinin belirlenmesi oldukça önemlidir, çünkü etki eden cisim ile etkilenen yüzey arasındaki enerji aktarımı ve enerji dağıtımı, etki eden cismin hızı değiştikçe aşırı şekilde değişmektedir. Etki eden cisimlerin hızları, düşük hızlı darbelerde 10 m/s'nin altında bir hıza sahipken, ara darbelerde 10 m/s ile 50 m/s arasında, yüksek hızlı (balistik) darbeler 50 m/s ile 1000 m/s arasında ve hiper hız grubunda 2 km/s ila 5 km/s aralığında hıza sahiptirler [44].

3.1. Yenilenmiş Hertzian Kontak Yasası

İki katı cisim temas halindeyken, temas bölgesinde deformasyon meydana gelir ve temas kuvveti ortaya çıkar. Oluşan temas kuvvetlerinin, özellikle temas eden parçaların üzerindeki deformasyon ve gerilme değerlerinin hesaplanabilmesi için bilinmesi gerekmektedir. Temas eden cisimlerdeki hasar boyutları da temas kuvvetine bağlıdır. Temas probleminin analiz edilmesinde genellikle en önemli adım, temas kuvveti ve temas eden yüzeylerin birbirlerine yapmış oldukları girinti değeri arasındaki ilişkinin belirlenmesidir.

En çok kullanılan temas yasalarından Hertzian Kontak Yasası, Hertz tarafından oluşturulmuştur:

$$F = k\alpha^{3/2} \quad (3.1)$$

Elastisite teorisine dayanan bu yasa, iki elastik izotropik kürenin teması için türetilmiştir. Bu sebepten dolayı Hertz tarafından bulunan bu yasa oldukça sınırlı durumlar için kullanılabilir. Yang ve Sun Hertz yasasında bulunan sınırlı durumdan dolayı, çelik bilyelerle temas eden katmanlı kompozit malzemeler için kullanılabilir bir analitik denklem bulmak için 1981 yılında çalışma yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışmalarda deneysel katsayılarından faydalanmışlardır. Çalışmaları sonucunda yükleme ve boşaltma durumlarına bağlı olarak değişen temas kuvveti denklemleri öne sürmüşlerdir. Çalışmalarında çarpan cisim ile kompozit plaka arasında ihmal edilebilir sürtünme değeri olduğunu varsaymışlardır. Önerdikleri denklemler aşağıda gösterilmiştir [54].

Yükleme Durumu için:

$$F = k\alpha^{3/2} \quad (3.2)$$

Boşaltma Durumu için:

$$F = F_{max} \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_{max} - \alpha_0} \right)^{2.5} \quad (3.3)$$

Geri Yüklem Durumu için:

$$F = F_{max} \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_{max} - \alpha_0} \right)^{1.5} \quad (3.4)$$

Denklemlerde kullanılan α_0 değeri yükleme – geri yükleme döngüsünde oluşan kalıcı girinti değeridir. Kalıcı girinti değeri bulunabilmesi için α_{cr} değerinin bilinmesi gerekmektedir. Yang ve Sun tarafından yapılan deneyler sayesinde, grafit/epoksi ve cam/epoksi kompozit plaklar için α_{cr} değerleri aşağıda verilmiştir [54]:

Grafit/Epoksi α_{cr} Değeri: 8.03×10^{-2} mm

Cam/Epoksi α_{cr} Değeri: 1.016×10^{-1} mm

Aşağıdaki denklemler kullanılarak α_0 değeri elde edilebilir.

Eğer $\alpha_{max} < \alpha_{cr}$ ise:

$$\alpha_0 = 0 \quad (3.5)$$

Eğer $\alpha_{max} \geq \alpha_{cr}$ ise:

$$\alpha_0 = \alpha_{max} \left[1 - \left(\frac{\alpha_{cr}}{\alpha_{max}} \right)^{2.5} \right] \quad (3.6)$$

Temas kuvvetinin hesaplamak için kullanılan denklemler içerisindeki k katsayısı aşağıdaki denklemlerle bulunabilir [54].

$$k = \frac{\frac{4}{3}\sqrt{r_i}}{\left(\frac{1-v_i^2}{E_i} + \frac{1}{E_2}\right)} \quad (3.7)$$

3.2. LS-DYNA Sonlu Elemanlar Programı ile Düşük Hızlı Darbe Analizi Teorisi

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM), yapısal, katı ve akışkanlar mekaniği alanlarındaki karmaşık fiziksel olayları analiz etmek için kullanılan yaygın teknik haline gelmiştir. Genel olarak analiz tipleri, doğrusal ve doğrusal olmayan analiz tipleri olarak ayrılırken aynı zamanda problemin zamana bağlı olup olmamasına göre de açık veya kapalı analiz tipi olarak da ayrılmaktadırlar.

Doğrusal statik analizlerde, uygulanan kuvvetler ve yer değiştirmeler arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Pratikte bu tipteki analizler ortaya çıkan gerilimlerin, kullanılan malzemenin lineer elastik aralığında kaldığı yapısal problemlere uygulanabilir. Doğrusal bir statik analizde, kurulan modelin sertlik matrisi sabittir ve aynı modelin doğrusal olmayan bir analiz yöntemi ile çözümüne kıyasla daha hızlı sonuç alınmaktadır. Doğrusal olmayan analizlerde ise, uygulanan kuvvetler ile yer değiştirmeler arasında doğrusal olmayan bir ilişki kurulmaktadır. Doğrusal olmayan etkiler genel olarak üç kategori içerisinde incelenmektedir:

- Malzemeden Kaynaklanan Doğrusal Olmayan Etkiler
- Geometriden Kaynaklanan Doğrusal Olmayan Etkiler
- Sınır Koşulları ve Kontaklardan Kaynaklanan Doğrusal Olmayan Etkiler.

Bu etkiler, yük uygulaması sırasında sabit olmayan bir rijitlik matrisi oluşmasına sebep olurlar. Sonuç olarak, doğrusal olmayan analiz için farklı bir çözüm stratejisi ve dolayısıyla farklı bir çözücü gerekmektedir. Doğrusal problemlerde, Kısmi Diferansiyel Denklemler (KDD) aşağıdaki gibi bir matris denklemine indirgenir:

$$\{f\} = [K]\{x\} \quad (3.8)$$

Doğrusal olmayan statik problemler için KDD'ler aşağıdaki gibi bir matris denklemine indirgenirler:

$$\{f\} = [K(x)]\{x\} \quad (3.9)$$

Dinamik problemler için ise matris denklemleri aşağıdaki şekilde oluşturulmaktadır:

$$\{f\} = [M]\{x''\} + [C]\{x'\} + [K]\{x\} \quad (3.10)$$

Tüm doğrusal olmayan ve statik olmayan analizler için artımlı yük bilgisinin bilinmesi gerekmektedir. Daha basit anlatımıyla, bir matematik problemini çözmek için, problemin fiziği ile zaman arasındaki ilişkinin anlaşılması gerekmektedir. Bu ilişkinin kurulabilmesi için, genel olarak problemler zamana bağlı veya zamandan bağımsız problemler olarak ayrılmaktadırlar. Bu sorunları çözmek için genellikle 'kapalı' veya 'açık' yöntemler kullanılmaktadır. Hızlanmanın etkileri belirgin olduğunda ve ihmal edilemediğinde sorunlara 'zamana bağlı' olarak değiniriz. Örneğin, bir düşürme testinde, en yüksek kuvvet, çarpan cismin yavaşlayarak durma noktasına geldiği ilk birkaç milisaniye içinde ortaya çıkar. Bu durumda, böyle bir yavaşlamanın etkisi hesaba katılmalıdır.

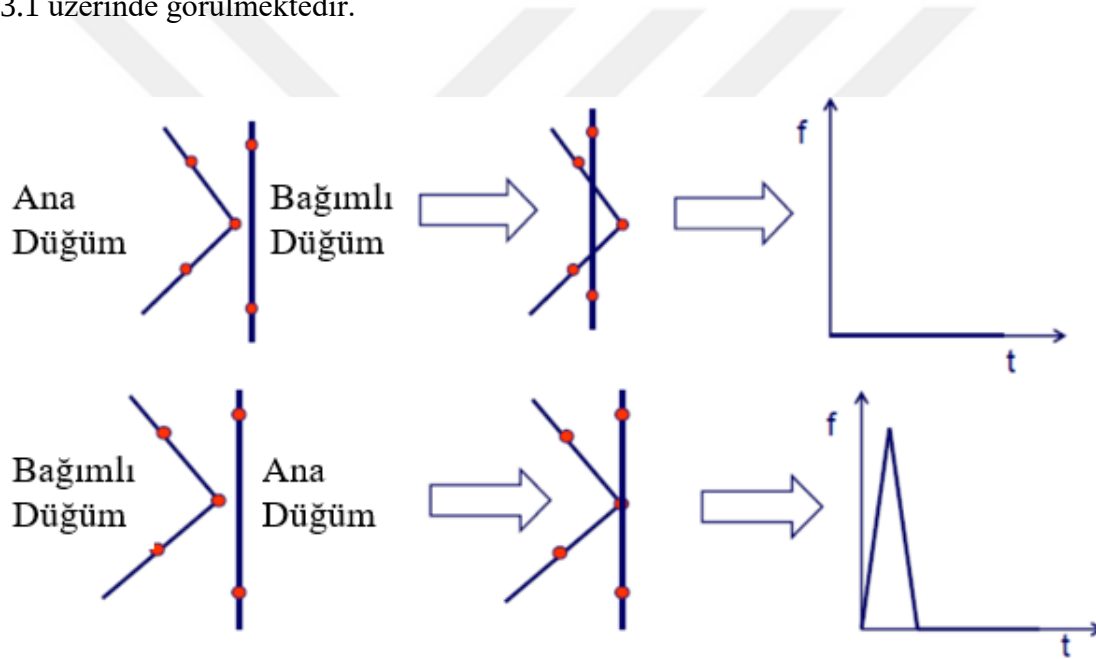
Açık analizlerde, sonlu elemanlar kodu cismin ivmesini hesaplar ve ardından ivmeyi yer değiştirmeye çevirmek için bir zaman adımı kullanır. Yer değiştirme, daha sonra yapı ile çarpan cisim arasındaki tepki kuvvetini hesaplamak için kullanılır. Tepki kuvveti ise daha sonra ilgili ivmeyi hesaplamak için yine sonlu elemanlar çözücüsü tarafından kullanılır.

Günümüzde, LS-DYNA programı özellikle açık analiz yöntemlerinde oldukça sık olarak kullanılmaktadır. LS-DYNA, kart tabanlı bir program olduğu için mevcut sonlu elemanlar çözücülerini ile benzer bir iş akışına sahiptir. Kart tabanlı programlar, ağların, malzeme özelliklerinin, sınır koşullarının, yüklerin vb. parametrelerin her birinin ön işlemcide ayrı kartlar olarak oluşturulduğu ve okunduğu programlardır. Çözüm yapıldıktan sonra, çözücü ortaya çıkan deformasyon, gerilme, kontak kuvvetleri gibi sonuçlar için kartlar yazar ve bu kartlar son işlemci tarafından okunur.

Kontak yüzeyleri, sonlu elemanlar modelinde bulunan parçaların, birbiri içerisinde geçmesini (veya ayrılmasını) önlemek için oluşturulan düğümlerden ve elemanlardan oluşan yüzeylerdir. Model içerisinde bulunan gövdeler arasındaki temas arayüzlerinin doğru bir

şekilde modellenmesi, sonlu eleman simülasyonlarının tahmin yeteneği için çok önemlidir. Kontak yüzeylerinin seçimini kullanan kontak tipi etkilemektedir. Aşağıda açıklanan şekilde tek yönlü kontak seçimlerinde seçilen yüzeyler önem arz etmekteyken, iki yönlü kontak seçimlerinde kontak yüzeylerinin seçimlerinde bir fark bulunmamaktadır.

Kontak tipleri genel olarak tek yönlü ve iki yönlü olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tek yönlü kontak tipi kontaklar, bağımlı düğümler ve ana düğümler arasında sıkıştırma yüklerinin aktarılmasına izin verir ve yalnızca kullanıcı tarafından belirlenen bağımlı düğümlerin, ana düğümlere girişimi kontrol edilmektedir. LS-DYNA'da kullanılan tek yönlü kontaklardaki ana düğüm ile bağımlı düğümlerin hareketlerinin kontak kuvveti üzerindeki etkisini Şekil 3.1 üzerinde görülmektedir.



Şekil 3.1. Tek Yönlü Kontaklardaki Ana Düğüm ile Bağımlı Düğümlerin Hareketlerinin Kontak Kuvveti Üzerindeki Etkisi [45]

LS-DYNA'da bulunan iki yönlü kontak tiplerinde hem bağımlı düğümlerin hem de ana düğümlerin girişimi kontrol edilmektedir. Bağımlı düğümlerin girişimleri için kontrol eden alt rutinlerin, ana düğümlerin girişimlerini kontrol etmek için ikinci kez çağrılması dışında, iki yönlü kontak tipi, yukarıda açıklanan tek yönlü kontak tipi ile aynı şekilde çalışır. Başka bir deyişle, işlem simetrik ve sonuçlar aynı olacağından bağımlı yüzey ile ana yüzeyin seçiminin iki yönlü kontak tipinde bir önemi yoktur. Ekstra alt program çağrıları nedeniyle yaklaşık iki kat artan işlem maliyeti vardır.

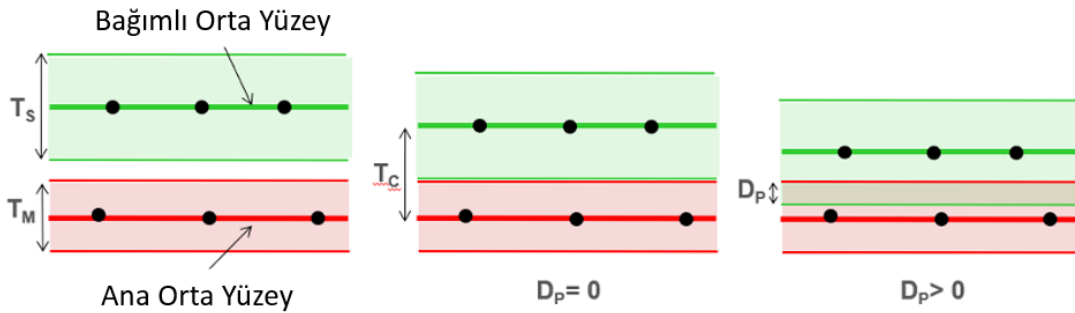
3.2.1. LS-DYNA ceza kontak algoritma teorisi

Bu algoritma en genel ve en çok kullanılan arayüz algoritmasıdır. Bu ceza yöntemini uygularken, her bir bağımlı düğümün ana yüzeylere girişim yapıp yapmadığı kontrol edilir. Bağımlı düğümler ana yüzeylere nüfuz etmezse, hiçbir şey yapılmaz. Eğer bir girişim olursa, bağımlı düğüm ile onun temas noktası arasında bir arayüz kuvveti uygulanır. Bu kuvvetin büyüklüğü penetrasyon (D_p) miktarı ile orantılıdır. Bu, bir arayüz yayının eklenmesi olarak düşünülebilir.

Arayüz kuvveti hesaplanırken ilk önce penetrasyon yani girişim tespit edilir ve penetrasyon derinliği D_p ile hesaplanır. Şekil 3.2’de iki yüzeyin birbirine yaptığı penetrasyon gösterilmektedir. Bu ceza kuvveti, bağımlı düğüme aşağıda verilen denklem ile değeri belirlendikten sonra uygulanır;

$$F_N = k * D_p \quad (3.11)$$

Daha sonra uygulanan bağımlı düğüm kuvvetine eşit olacak şekilde, ana segment düğümlerine bir tepki kuvveti uygulanır.



Şekil 3.2. Kontak Halindeki İki Yüzey Arasındaki Girişim [46]

Kontak kuvvetinin hesaplanmasındaki en önemli faktörlerden birisi kontak sertliğidir. LS-DYNA ceza metodu içerisinde genel olarak üç farklı kontak algoritması hesaplaması yapılmaktadır. Program tarafından hangi kontak algoritması formülünün kullanılacağını SOFT opsiyonlarından seçilmektedir.

Geleneksel ceza hesaplama kontak algoritması

Geleneksel ceza kontak algoritması genellikle iki sert malzeme arasında kullanımlar için uygundur. Bu kontak algoritmasında kontak sertliği değeri aşağıda verilen formüller ile hesaplanmaktadır.

Katı elemanlar için [53]:

$$k = \frac{(f_s)(Area^2)(K)}{Volume} \quad (3.12)$$

Kabuk elemanlar için [53]:

$$k = \frac{(f_s)(Area)(K)}{\max(shell\ diagonal)} \quad (3.13)$$

K değeri burada kütle modülü değeridir. K değeri aşağıdaki formül ile hesaplanabilir:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (3.14)$$

Kontak sertliği için kütle modülünü (K) hesaplamak için malzemenin E ve ν değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Farklı sertlikteki parçalar arasındaki temas kuvvetinin hesaplanması için LS-DYNA, sertliklerin en düşük olanını seçer. Katı ve kabuk elemanların temaslarında, kabuklar temas sertliklerini belirlemektedirler.

Yumuşak kısıtlamalı ceza formülasyonu

Çelik ile Köpük gibi farklı malzeme özelliklerine sahip gövdeler arasındaki teması daha iyi tespit edebilmek için Yumuşak Kısıtlamalı Ceza Formülasyonu (YKCF) kullanılmaktadır. Çok yumuşak malzemeler, kontak sertliği üzerinde istenmeyen bir etkiye sahiptir, değerini düşürür ve sonuçta aşırı derecede iki yüzeyin birbirine girişim yapmasına neden olur. Kontak sertliği hesaplaması ve simülasyon sırasında güncellenmesi Geleneksel Ceza Formülasyonundan farklıdır. Farklı bir formülasyon kullanılarak aşırı girişimin

engellenmesi amaçlanmaktadır. Aşağıda yumuşak kısıtlamalı ceza formülasyonu gösterilmiştir [53]:

$$k = 0.5 (SOF SCL) \frac{m}{\Delta t_0^2} \quad (3.15)$$

Burada SOFSCL opsiyonel olarak kullanılabilecek sertlik katsayını, m düğüm kütlelerini ve Δt_0^2 genel ilk zaman adımını temsil etmektedir. Son olarak standart ceza hesaplama algoritması kullanılarak hesaplanan kontak sertlik değeri ile YKFC kullanılarak hesaplanan kontak sertlik değeri karşılaştırılır ve büyük olan değer kontak kuvveti hesaplanmasında kullanılır [53]:

$$k_{used} = \max\{k_{SOFT=0}, k_{SOFT=1}\} \quad (3.16)$$

Segment bazlı ceza formülasyonu

Burada kullanılan yöntem ile düğüm-segment formülasyonunu segment-segment formülasyonuna çevirmektedir. Bir segmentin başka bir segmente girişimini algılar ve ardından her iki segmentin düğümlerine ceza kuvvetleri uygulanır. Ana yüzeye yansıtıldıklarında hiçbir bağımlı düğüm algılanmazsa bile, girişim algılanacak ve kontak kuvveti meydana gelecektir. Bu formülasyon türünde düğüm kütleleri yerine segment kütleleri kullanılır.

Aşağıda segment bazlı ceza formülasyonu (SBCF) gösterilmiştir [53]:

$$k = 0.5 (SLSFAC)(SFS \text{ or } SFM) \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right) \left(\frac{1}{\Delta t_0} \right)^2 \quad (3.17)$$

Bu formül içerisindeki SLSFAC, SFS ve SFM değerleri istenilen kontak sertliğinin elde edilebilmesi için gereken katsayılarıdır. Formülasyon içerisinde kullanılan diğer parametrelerden m_1 ve m_2 değerleri segment kütlelerini ifade ederken, Δt_0 ise genel ilk zaman adımını temsil etmektedir.

3.2.2. Zaman adımı kontrolü

En basit durumda (küçük, deformasyon teorisi), zaman adımı malzeme boyunca akustik dalga yayılımı tarafından kontrol edilir. Açık bir analizde, sayısal gerilim dalgası her zaman adım başına bir eleman genişliğinden daha az yayılmalıdır. Aşağıda verilen ilişkiye Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) koşulu denir ve bir elementteki kararlı zaman adımı bu koşul tarafından belirlenmektedir. CFL koşulu, açık analizlerdeki zaman adımının, fiziksel dalğanın elemanı geçmek için ihtiyaç duyduğu zamandan daha küçük olmasını gerektirir. Bu nedenle, sayısal zaman adımı, gerçek teorik zaman adımının bir kesridir (0.9 veya daha düşük).

$$C_{Akustik\ Dalga\ Hızı} = \sqrt{\frac{E_{Malzeme}}{\rho_{Malzeme} * Ağırlık\ Ölçekleme}} \quad (3.18)$$

$$\Delta_{Açık\ Zaman\ Adımı} = \frac{Uzunluk_{Eleman}}{C_{Akustik\ Dalga\ Hızı}} \quad (3.19)$$

$$\Delta_{CFL\ Zaman\ Adımı} = (TSSFAC) * \Delta_{ExplicitTimeStep} \quad (3.20)$$

LS-DYNA'da zaman adımı ölçek faktörü (ZAÖF) kontrol edilebilir. Varsayılan ZAÖF değeri 0.9'dur [53]. Tipik olarak, bu faktörün yalnızca şok yüklemesi veya yumuşak malzemelerle artırılmış temas kararlılığı için değiştirilmesi gerekmektedir. Ağırlık ölçekleme çok kullanışlı bir katsayıdır ve zaman adımını doğrudan artırmaya yol açar. Analizlerde daha büyük zaman adımının seçilmesi çözüm süresinin oldukça düşmesine sağlar.

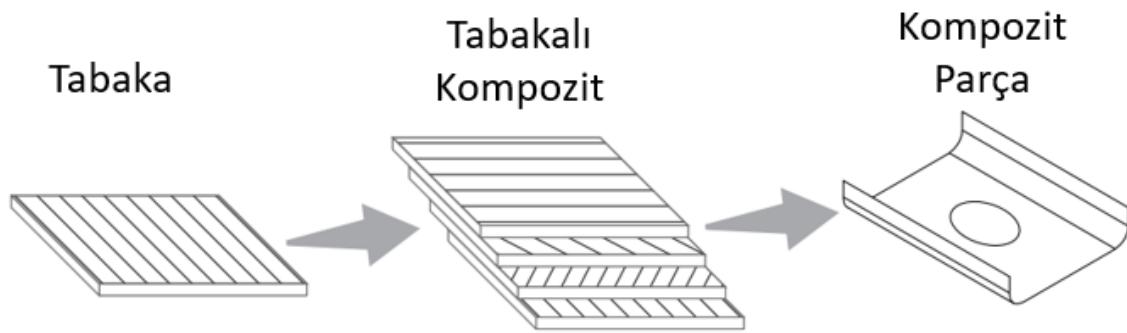


4. DEĞİŞKEN KATILIKLI KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla farklı malzemeyi makroskopik yapıda birleştirerek yeni özelliklere sahip malzemeler elde etmek şeklinde tanımlanabilir. Kompozit malzemelerin oluşturulmasındaki amaç, içerisinde var olan malzemelerin zayıflıklarını iyileştirmek ve istenilen yönde bileşenlerinden daha üstün özellikler gösteren bir malzeme elde etmektir. Günümüzde modern teknoloji sayesinde oluşturulan üstün özelliklere sahip malzemelerin kullanımı giderek artmaktadır. Özellikle yüksek mukavemetin ve bununla birlikte hafif yapılara yapılar oldukça sık tercih edilmektedir.

4.1. Tabakalı Kompozit Malzemeler

Tabakalı kompozitler, bir matris içinde elyaf malzemelerin eklenmesiyle oluşan tabakalardan meydana gelmektedirler. Şekil 4.1’te tabaka ve bu tabakalardan oluşan tabakalı kompozit gösterilmiştir. Elyaf malzemeler, başlıca takviye edici veya yük taşıyan elemanlardır ve tipik olarak güçlü ve katıdır. Matris malzemesi olarak ise; organik, metalik, seramik veya karbon malzemeler kullanılabilir. Matris, elyaf malzemeleri destekleyip korurken aynı zamanda yükü elyaflar arasında dağıtıp, elyaflar arasında iletimi sağlayan bir araçtır.

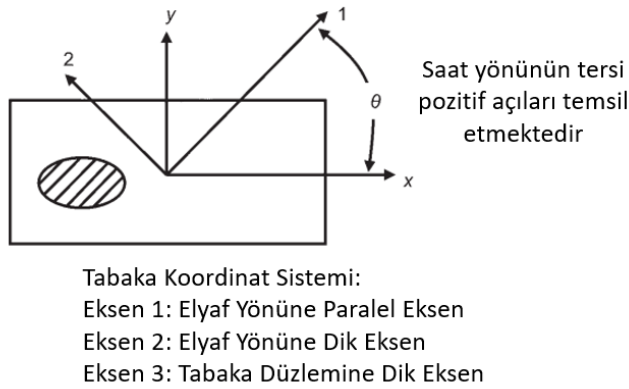


Şekil 4.1. Birden Fazla Tabakadan Meydana Gelen Tabaklı Kompozit [47]

Tabakaların istiflendiği sıra, tabaka istifleme sırası olarak adlandırılır. Tek bir elyaf takviyeli tabakanın sertlik ve mukavemet özellikleri, temel malzeme yönleri veya temel malzeme eksenini olarak adlandırılan karşılıklı olarak dik iki yönde önemli ölçüde farklılık gösterebilir. Yönden bağımsız elastik özellikler (izotropik) sergileyen homojen kompozit malzemelerin

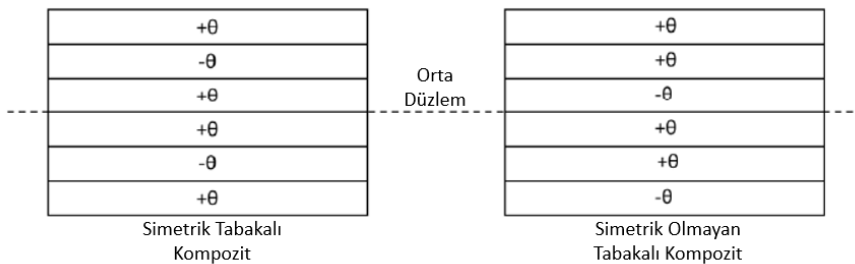
aksine, tek yönlü lamina ortotropik malzemeler olarak adlandırılırlar ve tabaka düzleminde yöne bağlı elastik özellikler sergilerler.

Tabakalı kompozitlerde 1 yönü genellikle elyaf yönünü temsil etmektedir. Elyaf yönüne dik olan yön 2 yönü olarak adlandırılmaktadır. Kompozit düzleme dik olan yüzey 3 yönü olarak gösterilmektedir. Tabakalı kompozitlerde açıların tanımları Şekil 4.2 içerisinde gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Tabaka Açısı Tanımı [48]

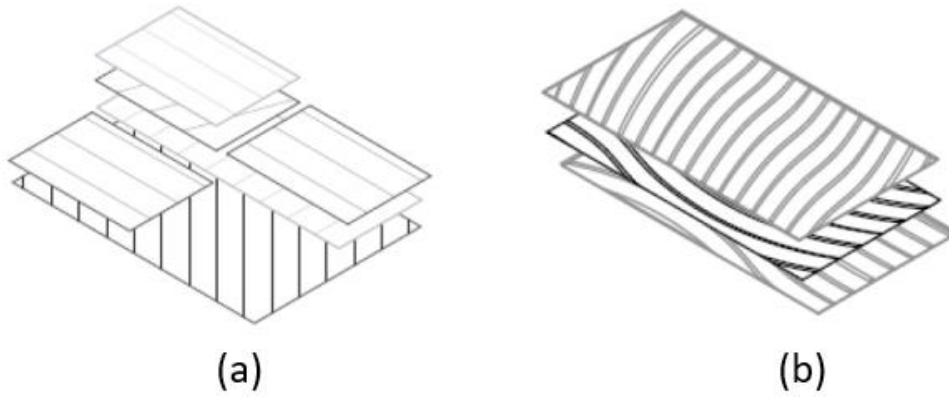
Elyaf yönündeki (E_1) sertlik özellikleri, genellikle enine doğrultudan (E_2) daha büyük değerler göstermektedir. Tek yönlü tabakaların mukavemet özellikleri hem elyaf yönüne hem de yük yönüne bağlıdır. Tabakaların mukavemeti tipik olarak beş parametrede karakterize edilir. Bu parametreler; boyuna çekme dayanımı (X_t), boyuna basınç dayanımı (X_c), enine çekme dayanımı (Y_t), enine basınç dayanımı (Y_c) ve kesme dayanımından (S) oluşmaktadır. Simetrik tabakalı kompozitler, tabakaların orta düzlemine göre iki simetrik istifleme düzenine birleştirilerek oluşturulmaktadır. Öte yandan, simetrik olmayan tabakalı kompozitler bu koşulu sağlamaz. Tabakalar orta düzleme göre simetrik değildir. Simetrik ve simetrik olmayan tabakalı kompozitler Şekil 4.3'de görülebilir.



Şekil 4.3. Simetrik ve Simetrik Olmayan Tabakalı Kompozitler

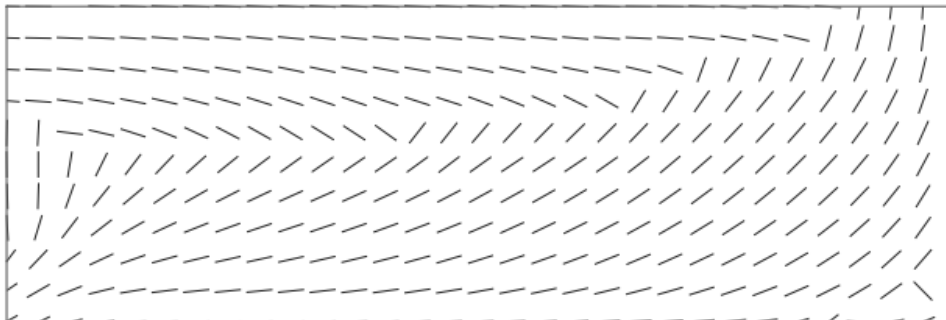
4.2. Değişken Katılığa Sahip Kompozit Plaka Tanımı

DK sahip plakalar, katılık özelliklerinin uzamsal konumun bir fonksiyonu olduğu, diğer bir ifade ile katılık özelliklerinin noktadan noktaya değiştiği plakalardır. Bu katılık varyasyonu, bir tabaka içinde değişik kalınlıklar oluşturmak amacıyla birkaç farklı yama tanımlayarak ayırık olarak oluşturulabilir veya bir katman alanı içinde fiber açı oryantasyonunu sürekli olarak değiştirerek sürekli olarak oluşturulabilir. Şekil 4.4 içerisinde hem ayırık hem de sürekli olarak oluşturulmuş olan değişken katınlıklı plakalar gösterilmiştir.



Şekil 4.4. a) Ayırık ve b) Sürekli Değişken Katınlıklı Plakalar [49]

DK sahip plakaları incelemek için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Ayırık katılık temsili bu yaklaşımlar içerisinde oldukça fazla kullanılan yaklaşımlardan birisidir. Ayırık fiber gösterimi, bir yapı içindeki katılık varyasyonunu tanımlamak için en yaygın kullanılan yöntemdir. Ayırık fiber gösteriminde, Şekil 4.5'de gösterildiği gibi, ayırık bir yapı içinde belirli noktalarda tanımlanan bir fiber açısı ve istifleme dizisi bulunmaktadır. Değişken katılıktaki tabaka ayırıklaştırması, sonlu elemanlar yöntemini kullanırken gerçekleştirilen ayırıklaştırmaya dayanmaktadır.

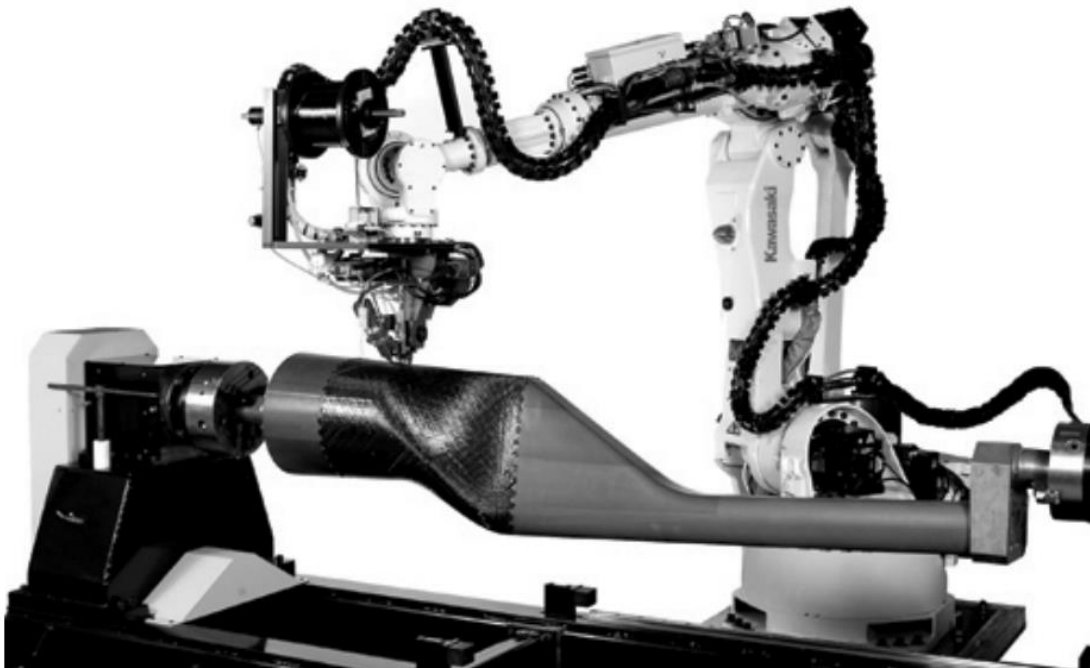


Şekil 4.5. Ayırık Fiber Gösterim Örneği [49]

4.3. Fiber Yerleştirme Teknolojisine Genel Bakış

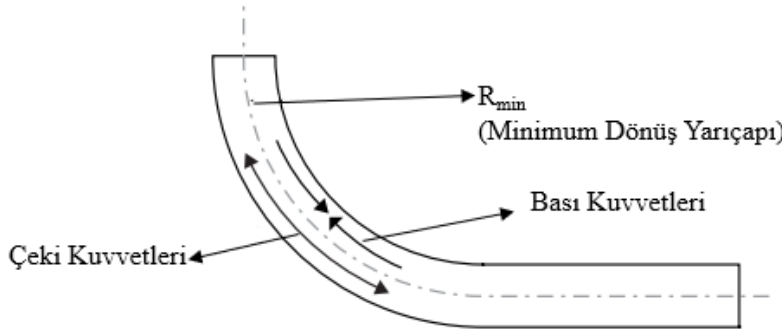
1980’li yılların sonuna doğru kompozit malzemelerde fiber yerleştirme yönteminin otomatikleştirilmesi üzerine ilk çalışmalar başlamıştır. Otomatik Elyaf Yerleştirme (OEY), filament sarma makinelerinde bulunan geleneksel çekme kontrolünü, otomatik bant döşemenin sıkıştırma ve kesme-tekrar başlatma yetenekleriyle birleştiren benzersiz bir kompozit üretim teknolojisidir. Şekil 4.6’de modern bir OEY makinesi görülmektedir. Modern fiber yerleştirme sistemleri yedi eksen, 6 eksenli robotik kol veya portal düzeneği ve mandrelin dönme ekseninden oluşmaktadır. Hali hazırda kullanılan OEY makineleri, 32 adede kadar ayrı ayrı kontrol edilen kitiğin keyfi olarak bir yüzeye yerleştirilmesine sağlamaktadırlar. Toplam dizi genişliğini gerektiği gibi artırmak veya azaltmak için, makine kafası yolu boyunca herhangi bir noktada kırıklar eklenebilir veya düşürülebilir. Kırıkların genişliği genel olarak sekizde bir inç (3,2 mm) ile bir inç (25,4 mm) arasında değişmektedir.

Günümüzde OEY makineleri; havacılık sektöründe oldukça sık kullanılan karbon, aramid ve cam gibi çeşitli elyaf malzemelerini kullanarak serim yapacak şekilde uyarlanabilir. Kullanımda olan çoğu OEY makinelerinin önceden emprenye edilmiş termoset malzeme kullanmaktadır. İlerleyen yıllarda termoplastik malzemelerin kullanımının arttırılması beklenmektedir.



Şekil 4.6. Örnek Bir Otomatik Elyaf Yerleştirme Makinesi [47].

Elyaf lar, yönlendirilmiş bir rotayı takip etmek için, düzlemde deforme olmaya zorlanırlar. Yönlendirilen elyaf lar üzerinde çekme kuvvetinin iç yarıçapı, dış yarıçaptan daha küçüktür, bu sebepten dolayısıyla iç kenar boyunca sıkıştırma kuvvetleri meydana gelirken ve dış kenar boyunca çekme kuvvetleri meydana gelir. Şekil 4.7 içerisinde oluşan bası ve çeki kuvvetleri gösterilmektedir. Basınç kuvvetleri belirli bir eşiği aştığı durumlarda, yerel olarak elyaf burkulması oluşmaktadır. Bunun sonucu olarak ortaya çıkan düzlem dışı dalgalanmalar, laminaların özelliklerini olumsuz etkilediği için istenmeyen bir durum oluşmaktadır. Bu sebeple yerel elyaf burkulmalarının engellenmesi için OEY makinalarının minimum dönüş yarıçapı veya izin verilen maksimum eğrilik değerleri vardır.



Şekil 4.7. OEY Makinasının Minimum Dönüş Yarıçapı

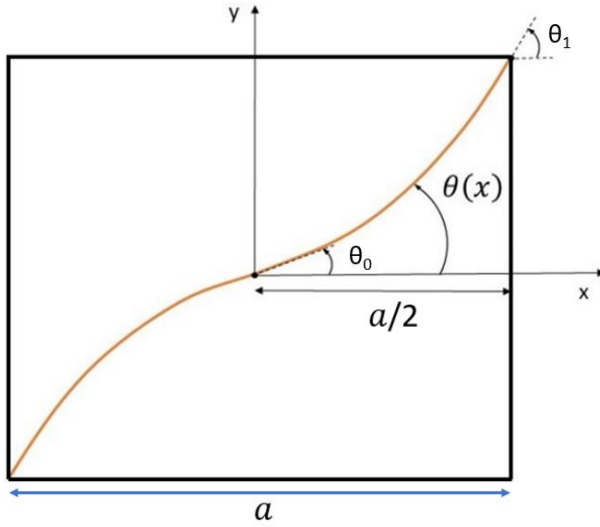
4.4. Eğrisel Olarak Serilen Elyaf ların Tanımlanması

Elyaf yolunu eğrisel bir yol olarak tanımlamanın temel amacı, plaka üzerindeki elyaf açısını değiştirmektir. İstenilen giriş ve çıkış açısına göre, seçilen eğri tipi ile giriş ve çıkış arasındaki elyaf oryantasyon açıları hesaplanabilir.

4.4.1. Doğrusal açı değişimi yöntemi

Kullanılan elyaf ların açısını değiştirmenin birkaç yolu vardır. Elyaf açısını doğrusal olarak değiştirmek bu yöntemlerden birisidir. Doğrusal açı değişimi yönteminde, açılar eşit mesafelerde eşit olarak değiştirilerek konuma göre elyaf açıları belirlenir. Bu sebeple doğrusal açı değişimi yönteminde açı değişimi sabittir. Doğrusal açı değişimi yöntemiyle fiber oryantasyon açıları x koordinatının bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Burada, y koordinatının açı değişimine katkısı yoktur ve aynı zamanda y koordinatı, x koordinatının fonksiyonundan oluşmaktadır.

Kompozit plakanın orta noktası Şekil 4.8’da gösterildiği gibi x-y koordinat eksenin başlangıç noktasına yerleştirildiğini varsayılırsa ve plaka uzunluğu a olarak kabul edilirse; elyaf açısı, plaka orta uzunluğu $x = 0$ ’da θ_0 açısından başlar ve plaka sonunda $x = a/2$ ’de θ_1 değerine ulaşır. Elyaf açısının değişiminin $x = 0$ ’a göre simetrik olduğu varsayılmaktadır. Bu nedenle, orijinden geçen bir elyaf yolu, x koordinatının düzgün bir antisimetrik fonksiyonudur.



Şekil 4.8. Doğrusal Elyaf Açı Değişimi ile Tanımlanan Elyaf Referans Yolu [50]

Şekil 4.8’da gösterilen konuma bağlı doğrusal açı değişimi ifadesi aşağıdaki eşitlikler ile ifade edilebilir:

$$\theta(x) = \begin{cases} \frac{2(\theta_1 - \theta_0)}{a}x + \theta_0 & 0 \leq x \leq \frac{a}{2} \\ \frac{2(\theta_0 - \theta_1)}{a}x + \theta_0 & -\frac{a}{2} \leq x \leq 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

Herbir x konumunun karşılık gelen $y(x)$ koordinatı aşağıda verilen eşitlikler ile bulunabilir:

$$y(x) = \left(\left(\frac{a}{2(\theta_0 - \theta_1)} \right) \ln \left(\cos \left(\theta_0 - \left(\frac{2(\theta_0 - \theta_1)}{a} x \right) \right) \right) \right) + c_1 \quad 0 \leq x \leq \frac{a}{2} \quad (4.2)$$

$$c_1 = (-a \ln(\cos(\theta_0))) / (2(\theta_0 - \theta_1))$$

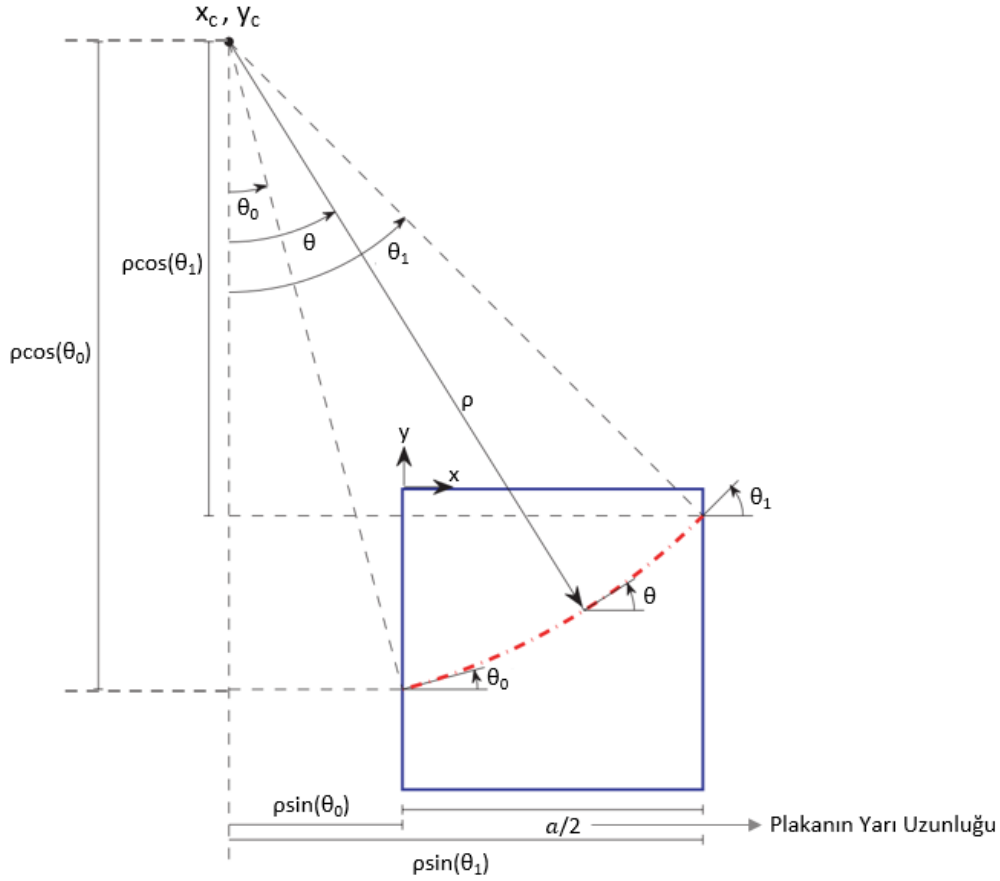
$$y(x) = \left(\left(\frac{-a}{2(\theta_0 - \theta_1)} \right) \ln \left(\cos \left(\theta_0 + \left(\frac{2(\theta_0 - \theta_1)}{a} x \right) \right) \right) \right) + c_2 \quad -\frac{a}{2} \leq x \leq 0 \quad (4.3)$$

$$c_2 = (a \ln(\cos(\theta_0))) / (2(\theta_0 - \theta_1))$$

4.4.2. Sabit eğriliğe sahip elyaf açısı tanımlaması

Elyaf açılarının değiştirilmesinde kullanılabilecek bir diğer metot ise sabit eğriliğe sahip elyaf açılarının belirlenmesidir. Bu metot sayesinde doğrusal olmayan elyaf açıları elde edilmektedir. Tanımlanan elyaf eğrisinde, eğrilik değeri belirli bir değerin üzerine çıktığında yerel olarak elyaf burkulmaları meydana gelmektedir. Bu sebeple OEY makineleri kullanılırken belirlenen eğrilerin eğrilik değerleri kontrol altında tutulmak istenir. Sabit eğriliğe sahip elyaf açısı tanımlanması ile bu kontrol işlemi çok daha rahat yapılabilmektedir. Ayrıca kullanılacak olan OEY makinasına bağlı olmak üzere, istenilen sabit eğrilik değerine sahip elyaf yolları oluşturulabilir.

Sabit eğriliğe sahip eğriler belirli bir merkezin etrafında dönen eğriyi temsil etmektedir. Şekil 4.9 içerisinde sabit eğrilikli bir elyaf yolunun nasıl tanımlanacağı gösterilmiştir. Şekil içerisinde a bir plakanın uzunluğunu temsil ederken, θ ise x konumuna bağlı elyaf açısını temsil etmektedir. x_c ve y_c eğrinin merkezini oluşturmaktadır.



Şekil 4.9. Sabit Eğriliğe Sahip Elyaf Referans Yolu [51]

Elyaf yolunun eğrilik değeri (K) aşağıda verilen denklemler ile bulunabilir:

$$K = \frac{1}{\rho}$$

$$\rho = \frac{(a/2)}{\sin(\theta_1) - \sin(\theta_0)} \quad (4.4)$$

x konum değeri pozitif olan elyaf pozisyonları için konuma bağlı açı değerleri aşağıdaki denklem ile bulunabilir:

$$\theta = \sin^{-1}(\sin(\theta_0) + (\sin(\theta_1) - \sin(\theta_0)) * (x/(a/2))) \quad (4.5)$$

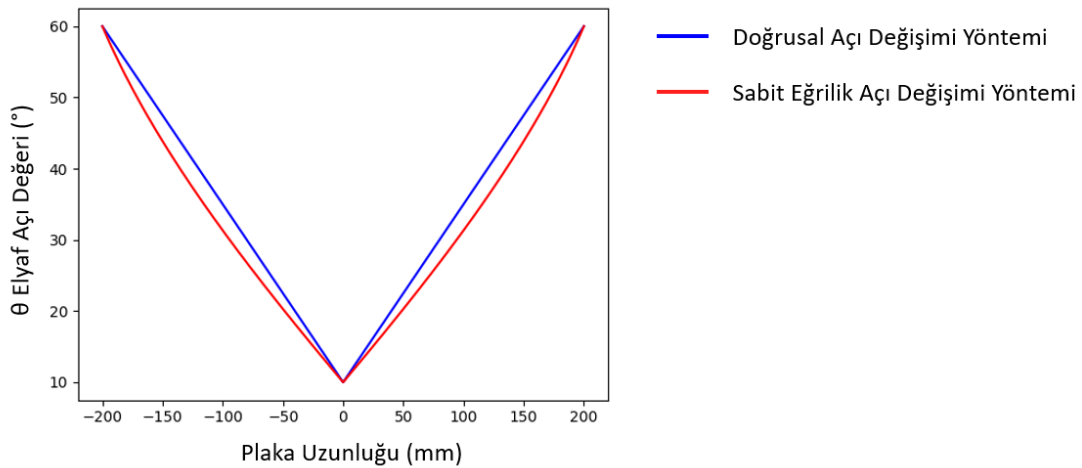
Herbir pozitif x değer konumuna karşılık gelen $y(x)$ koordinatı aşağıda verilen eşitlikler ile bulunabilir:

$$y(x) = (-1) * (p) * (\cos(\theta) - \cos(\theta_0)) \quad (4.6)$$

x konum değerlerinin negatif olduğu değerler için pozitif değerlerin x eksenine göre simetriği alınarak bulunabilir.

4.4.3. Doğrusal açı değişimi ve sabit eğrilik yöntemlerinin karşılaştırması

Aşağıda verilen Şekil 4.10 içerisinde plaka uzunluğuna bağlı olarak, doğrusal açı değişimi ve sabit eğrilik yöntemleri ile oluşturulmuş açı değişimlerinin karşılaştırmaları verilmiştir. Verilen örnekte plaka girişindeki elyaf açı değeri 60° iken plakanın orta kısmındaki açı değeri 10° olmaktadır. Şekilde de görüldüğü üzere giriş ve orta noktaları aynı açı değerlerine sahip olsalarda plaka boyunca iki yöntemin kullanılması ile farklı açı dağılımı görülmektedir.



Şekil 4.10. Doğrusal Açı Değişimi ve Sabit Eğrilik Açı Değişimi Yöntemlerinin Karşılaştırılması

4.5. Katmanlı Kompozit Plaka Teorisi

En basit katmanlı plaka teorisi, Kirchhoff (klasik) plaka teorisinin katmanlı kompozit plakalara bir uzantısı olan klasik katmanlı plaka teorisidir (KKPT). Kirchhoff varsayımı, hem enine kesme hem de enine normal etkilerin ihmal edilmesi anlamına gelir; yani, deformasyon tamamen bükülme ve düzlem içi gerilmeden kaynaklanmaktadır. Katmanlı plaka teorilerinin hiyerarşisindeki bir sonraki teori, birinci dereceden kayma deformasyon (BDKD) teorisidir.

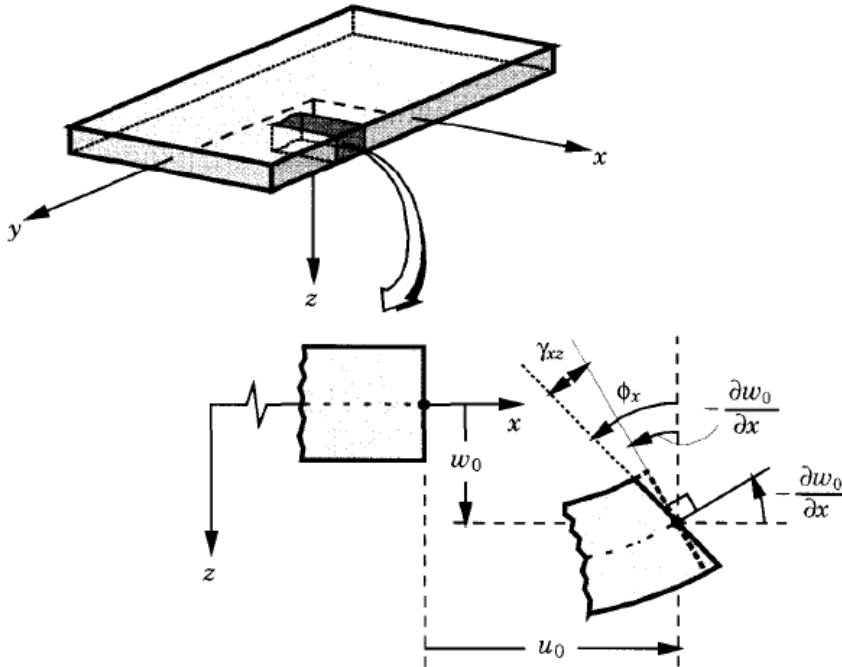
4.5.1. Birinci dereceden kayma deformasyon katmanlı plaka teorisi

Teori içerisinde yer alan yer değiştirmeler aşağıda verilen eşitlikler ile ifade edilebilir [52]:

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t) &= u_0(x, y, t) + z\phi_x(x, y, t) \\ v(x, y, z, t) &= v_0(x, y, t) + z\phi_y(x, y, t) \\ w(x, y, z, t) &= w_0(x, y, t) \end{aligned} \quad (4.7)$$

Şekil 4.11 içerisinde deforme olmuş bir şekil üzerinde yukarıda verilen yer değiştirmeler gösterilmektedir. ϕ_x ve ϕ_y kesitin enine normalinin deforme olmuş şekildeki dönüşünü temsil etmektedir. Aşağıda ϕ_x ve ϕ_y ' nin denklemleri verilmektedir [52]:

$$\begin{aligned} \phi_x &= \frac{\partial u}{\partial z} \\ \phi_y &= \frac{\partial v}{\partial z} \end{aligned} \quad (4.8)$$



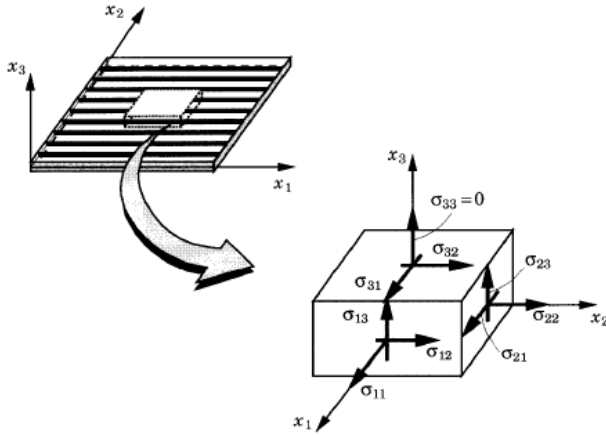
Şekil 4.11. BDKD Teorisi Altında Deforme Olmuş Plaka [52]

BDKD teorisi altında yer değiştirme denklemleri aşağıda verilen şekilde bulunabilir [52]:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} \right)^2 \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial y} \right)^2 \\ \frac{\partial w_0}{\partial y} + \phi_y \\ \frac{\partial w_0}{\partial x} + \phi_x \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial w_0}{\partial y} \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (4.9)$$

Düzlem gerilme yapısal ilişkileri

Birçok eşdeğer tek katman teorisinde düzlemin dışına doğru normal gerilme (σ_{33}) Şekil 4.12 içerisinde görüldüğü şekilde ihmal edilir.



Şekil 4.12. Bir Katman İçerisinde Gerilmelerin Şematik Gösterimi [52]

Bu koşul altında, bir ortotropik katmanlı kompozitin k. katmanı için gerilme-gerinim ilişkisi aşağıdaki gösterilmiştir [52]:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix}^{(k)} \quad (4.10)$$

$$\sigma_4^{(k)} = Q_{44}^{(k)} \quad (4.11)$$

$$\sigma_5^{(k)} = Q_{55}^{(k)} \quad (4.12)$$

Denklemler içerisinde kullanılan $Q_{ij}^{(k)}$ malzeme koordinat sistemindeki k. katmanın düzlem gerilimi azaltılmış katılıklandır [52]:

$$Q_{11}^{(k)} = \frac{E_1^{(k)}}{1 - \nu_{12}^{(k)}\nu_{21}^{(k)}} \quad (4.13)$$

$$Q_{22}^{(k)} = \frac{E_2^{(k)}}{1 - \nu_{12}^{(k)}\nu_{21}^{(k)}} \quad (4.14)$$

$$Q_{12}^{(k)} = \frac{\nu_{12}^{(k)} E_2^{(k)}}{1 - \nu_{12}^{(k)}\nu_{21}^{(k)}} \quad (4.15)$$

$$Q_{66}^{(k)} = G_{12}^{(k)} \quad (4.16)$$

$$Q_{44}^{(k)} = G_{23}^{(k)} \quad (4.17)$$

$$Q_{55}^{(k)} = G_{13}^{(k)} \quad (4.18)$$

Yukarıda gösterilmiş olan denklemler malzeme koordinat sistemi için verilmiştir. Global koordinat sistemindeki gerilme-gerinim ilişkisinin bulunabilmesi için koordinat sistemi dönüşümü yapılması gerekmektedir. Aşağıda verilen denklemler bu dönüşüm nasıl yapılacağını göstermektedir [52]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}^{(k)} \quad (4.19)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{44} & \overline{Q}_{45} \\ \overline{Q}_{45} & \overline{Q}_{55} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix}^{(k)} \quad (4.20)$$

Düzlem gerilimi katılıklarının dönüştürülmüş halleri, malzeme koordinat sistemi ile global koordinat sistemi arasındaki oryantasyon açısına (θ) bağlı olarak aşağıda verilen eşitliklerden bulunabilir [52]:

$$\overline{Q}_{11}^{(k)} = Q_{11}^{(k)} \cos^4 \theta + 2(Q_{12}^{(k)} + 2Q_{66}^{(k)}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22}^{(k)} \sin^4 \theta \quad (4.21)$$

$$\overline{Q}_{12}^{(k)} = (Q_{11}^{(k)} + Q_{22}^{(k)} - 4Q_{66}^{(k)}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12}^{(k)} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \quad (4.22)$$

$$\overline{Q_{22}}^{(k)} = Q_{11}^{(k)} \sin^4 \theta + 2(Q_{12}^{(k)} + 2Q_{66}^{(k)}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22}^{(k)} \cos^4 \theta \quad (4.23)$$

$$\overline{Q_{16}}^{(k)} = (Q_{11}^{(k)} - Q_{12}^{(k)} - 2Q_{66}^{(k)}) \sin \theta \cos^3 \theta + (Q_{12}^{(k)} - Q_{22}^{(k)} + 2Q_{66}^{(k)}) \sin^3 \theta \cos \theta \quad (4.24)$$

$$\overline{Q_{26}}^{(k)} = (Q_{11}^{(k)} - Q_{12}^{(k)} - 2Q_{66}^{(k)}) \sin^3 \theta \cos \theta + (Q_{12}^{(k)} - Q_{22}^{(k)} + 2Q_{66}^{(k)}) \sin \theta \cos^3 \theta \quad (4.25)$$

$$\overline{Q_{66}}^{(k)} = (Q_{11}^{(k)} + Q_{22}^{(k)} - 2Q_{12}^{(k)} - 2Q_{66}^{(k)}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{66}^{(k)} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \quad (4.26)$$

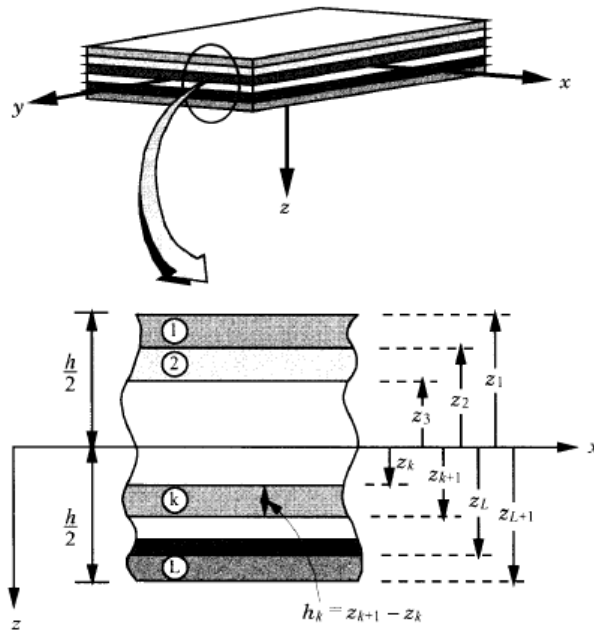
$$\overline{Q_{44}}^{(k)} = Q_{44}^{(k)} \cos^2 \theta + Q_{55}^{(k)} \sin^2 \theta \quad (4.27)$$

$$\overline{Q_{45}}^{(k)} = (Q_{55}^{(k)} - Q_{44}^{(k)}) \sin \theta \cos \theta \quad (4.28)$$

$$\overline{Q_{55}}^{(k)} = Q_{55}^{(k)} \cos^2 \theta + Q_{44}^{(k)} \sin^2 \theta \quad (4.29)$$

Hareket denklemlerinin yer deşistirmeler cinsinden bulunması

Şekil 4.13 içerisinde katmanlı plakalar için kullanılan koordinat sistemi ve katman numaralandırma sistemi gösterilmektedir. Z eksenini orta düzleminden aşağıya doğru pozitif olarak alınmaktadır.



Şekil 4.13. Katmanlı Plakalar İçin Kullanılan Koordinat Sistemi ve Katman Numaralandırma Sistemi [52]

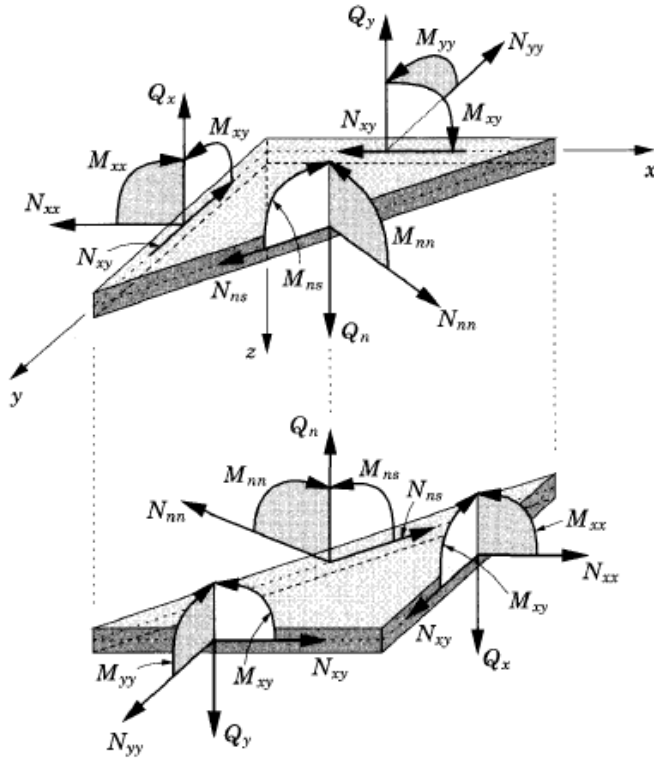
Katmanlı plakanın A_{ij} uzama katılığı, D_{ij} eğilme katılığı ve B_{ij} eğilme-uzama katılığı aşağıda verilen denklemler ile bulunabilir:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N \overline{Q}_{ij} (z_{k+1} - z_k) \quad (4.30)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \overline{Q}_{ij} (z_{k+1}^2 - z_k^2) \quad (4.31)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N \overline{Q}_{ij} (z_{k+1}^3 - z_k^3) \quad (4.32)$$

Aşağıda verilen Şekil 4.14’de düzlem içi kuvvet bileşkeleri (N_{xx} , N_{yy} , N_{xy}), moment bileşkeleri (M_{xx} , M_{yy} , M_{xy}) ve enine kuvvet bileşkeleri gösterilmektedir.



Şekil 4.14. Plaka Elemanı Üzerindeki Bileşke Kuvvet ve Momentler [52]

Oluşan kuvvet ve momentlerin, yer değiştirme cinsinden eşitlikleri aşağıda verilen denklemlerde gösterilmiştir:

$$\begin{aligned}
\begin{Bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{Bmatrix} &= \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} dz \\
\begin{Bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} \right)^2 \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial y} \right)^2 \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial w_0}{\partial y} \end{Bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.33}$$

$$\begin{aligned}
&+ \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \end{Bmatrix} \\
\begin{Bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} &= \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} z dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} z dz \\
\begin{Bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} \right)^2 \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial y} \right)^2 \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial w_0}{\partial y} \end{Bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.34}$$

$$\begin{aligned}
&+ \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \end{Bmatrix}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\begin{Bmatrix} Q_y \\ Q_x \end{Bmatrix} &= K \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{Bmatrix} \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{Bmatrix} dz \\
\begin{Bmatrix} Q_y \\ Q_x \end{Bmatrix} &= K \begin{bmatrix} A_{44} & A_{15} \\ A_{45} & A_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial w_0}{\partial y} + \phi_y \\ \frac{\partial w_0}{\partial x} + \phi_x \end{Bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.35}$$



5. DEĞİŞKEN KATILIĞA SAHİP PLAKANIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MALZEME MODELLEMESİ

Değişken katılığa sahip kompozit malzemeler dördüncü bölümde anlatıldığı üzere içerisinde eğrisel olarak serilmiş elyaf malzemelerinden oluşmaktadırlar. Bu nedenden dolayı elyaf malzemenin serim açısı x ve y koordinat eksenlerine göre değişmektedir. Malzemenin sonlu elemanlar modelinin oluşturulabilmesi için, bütün plaka yüzeyindeki eğrisel elyafın her bir x ve y koordinat eksenindeki serim açısının değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu değerlerin bulunabilmesi için Python programlama dili kullanılarak bir kod geliştirilmiştir. Devam eden bölümler içerisinde kodun çalışma mantığı anlatılmaktadır. Daha sonra elde edilen koordinat ve serim açısı bilgileri, kompozit malzeme modellemelerinde kullanılan Ansys ACP modülüne aktarılmaktadır. Aktarılan bilgiler Ansys ACP modülü içerisinde oluşturulmuş olan ağ yapısı üzerine malzeme modeli olarak eklenmektedir.

5.1. Değişken Katılığa Sahip Kompozit Elyaf Serim Açısının Belirlenmesi için Geliştirilen Python Kodu Algoritması

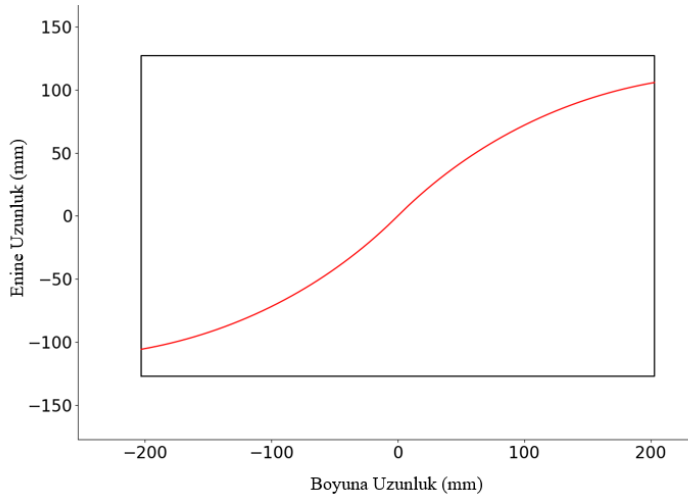
Plakalar üzerindeki serim açılarının bulunabilmesi için ilk önce plakanın hangi yönüne göre serim yapıldığının bilinmesi gerekmektedir. Plakalar üzerine iki yönde serim yapılabilir: enine yönünde veya boyuna yönünde. Hangi yönde serim yapılacağı belirlendikten sonra programa aşağıda verilen giriş bilgileri girilmektedir:

- Plakanın Boyuna Uzunluğu (a)
- Plakanın Enine Uzunluğu (b)
- Serim Yönüne Bağlı Olarak Plaka Başlangıç Serim Açısı (θ_1)
- Serim Yönüne Bağlı Olarak Plaka Orta Nokta Serim Açısı (θ_0)

Yukarıda verilen bilgiler belirlendikten sonra anlatılan eğrisel olarak serilen elyafın nasıl tanımlanacağını belirlemek gerekmektedir. Bölüm dört içerisinde eğrisel elyafların nasıl tanımlanacağı detaylı olarak anlatılmıştır. Program; doğrusal açı yöntemi ile serilmek istenilen elyaflar için, bölüm dört içerisinde verilen 4.1, 4.2 ve 4.3 denklemlerini kullanılarak referans olarak kullanılan eğrinin koordinat ve serim açılarını elde ederken, sabit eğriliğe

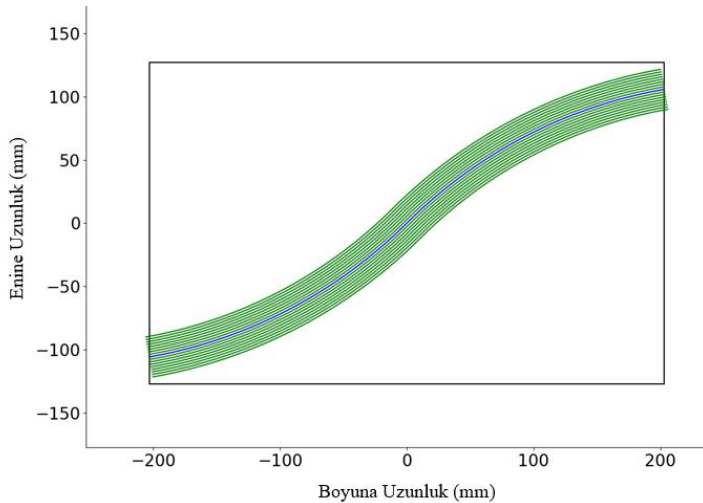
sahip elyaf serim yöntemi için yine bölüm dört içerisinde verilen 4.4, 4.5 ve 4.6 denklemlerini kullanmaktadır.

Şekil 5.1 içerisinde, boyuna yönde 406 mm, enine yönde 254 mm uzunluğa sahip olan örnek bir plaka üzerindeki referans elyaf eğrisi gösterilmiştir. Plaka başlangıç serim açısı (θ_1) 10° ve plaka orta nokta serim açısı (θ_0) 45° olan elyaf, sabit eğriliğe sahip serim yöntemi ile oluşturulmuştur.



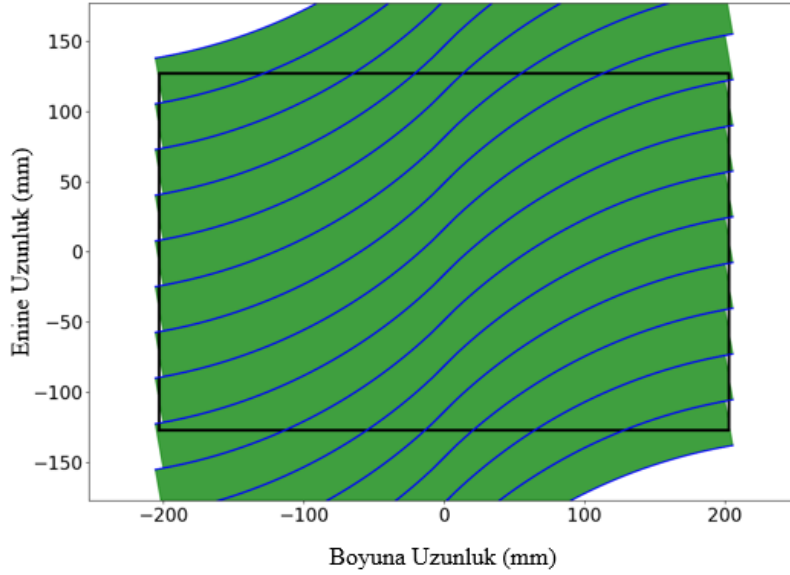
Şekil 5.1. Python Kodu ile Oluşturulan Örnek Referans Elyaf Eğrisi

Referans elyaf eğrisine paralel bir şekilde oluşturulan eğriler ile diziler meydana gelmektedir. Bir dizi serisinin kaç adet elyaftan oluşacağı elyaf kalınlığı ve dizi genişliğine bağlıdır. Şekil 5.2 içerisinde oluşturulmuş olan bir dizi gösterilmektedir.



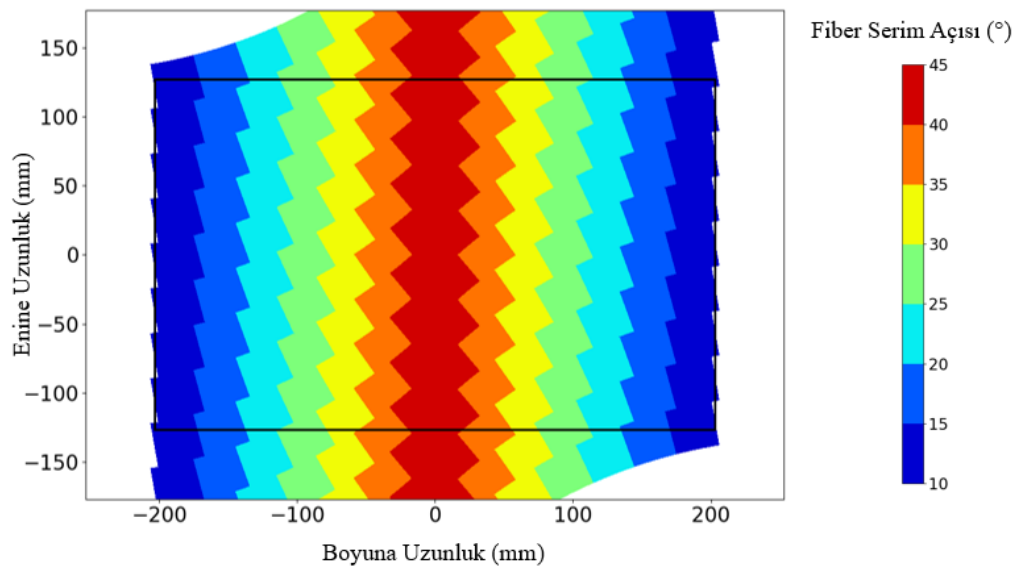
Şekil 5.2. Python Kodu ile Oluşturulan Örnek Dizi

Oluşturulmuş olan dizi serisi elyaf serim yönüne dik olacak yönde bütün plakayı kapsayacak şekilde ötelenmesi ile kompozit plaka üzerinde bulunan eğrisel elyafların konuma bağlı elyaf serim açıları elde edilmektedir. Şekil 5.3 içerisinde, Şekil 5.1 içerisinde bulunan plakanın üzerine serilen diziler gösterilmektedir.



Şekil 5.3. Python Kodu ile Oluşturulan Örnek Dizi Serisi

Şekil 5.4 içerisinde, Şekil 5.3'te gösterilen herbir dizinin konuma bağlı serim açısının değişimi gösterilmektedir.



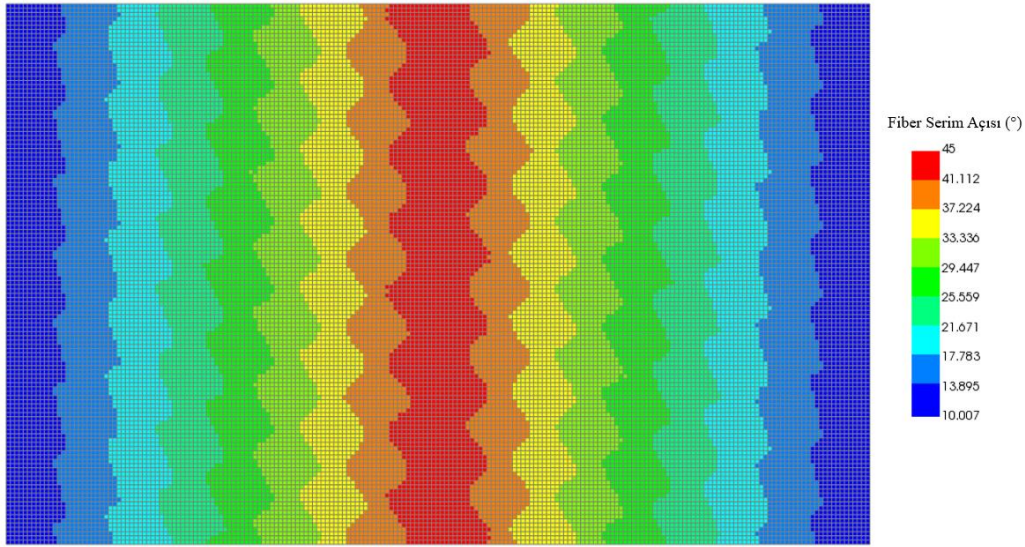
Şekil 5.4. Python Kodu ile Oluşturulan Örnek Dizinin Serim Açısı Değişimi

Elde edilen serim açısı bilgileri Ansys ACP modülüne tablo şeklinde aktarılmaktadır. Oluşturulmuş olan Python kodunun akış diyagramı EK-1 içerisinde gösterilmiştir.

5.2. Ansys ACP Modülü ile Değişken Katılıklı Kompozit Malzeme Modelinin Oluşturulması

ACP modülünde işlem yapılabilmesi için daha önceden malzeme özellikleri bilgileri ve geometriye bağlı ağ yapısı oluşturulması gerekmektedir. Python kodunun kullanılmasıyla elde edilen konuma bağlı serim açısı bilgileri tablo şeklinde ACP modülüne girilmektedir. Bu işlemin yapılabilmesi için Python kodu ACP arayüzünün işlem yapabileceği şekilde düzenlenmiştir. ACP modülün içerisinde, elde edilen tablo bilgileri oluşturulmuş olan ağ yapısının özelliklerine malzeme bilgilerine bağlı olarak işlenmektedir.

Şekil 5.5 içerisinde, Şekil 5.4'te gösterilen elyaf seriminin sonlu elemanlar modelindeki ağ yapısına işlenmiş hali gösterilmektedir. Oluşturulmuş olan ağ yapısı modeli daha sonra yapılacak olan modal ve darbe analizlerinde kullanılmaktadır.



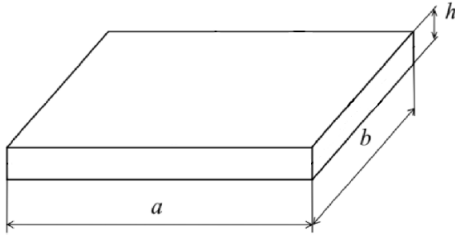
Şekil 5.5. Elyaf Seriminin Sonlu Elemanlar Modelindeki Ağ Yapısına İşlenmiş Hali

6. YAPILAN ANALİZLERİN DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI

6.1. DK Sahip Katmanlı Kompozit Plakanın Modal Analiz Doğrulaması

6.1.1. Oluşturulan model detayları

Yapılan modal analizlerin doğrulaması için, Antunes ve arkadaşlarının [40] DK kompozit plaka ile yapmış oldukları modal analiz sonuçları ile karşılaştırma yapılmıştır. Makale içerisinde kullanılan ve analizlerde plakanın boyutları Şekil 6.1 içerisinde gösterilmektedir.



Şekil 6.1. Doğrulama Çalışması 6.1 İçin Plaka Boyutlarının Şematik Gösterimi

Kullanılan plakanın, genişliği $a = 400$ mm, derinliği $b = 300$ mm ve kalınlığı $h = 1.8$ mm olarak belirlenmiştir. Plakada kullanılan katmanların elyaf serim açıları aşağıda gösterilen şekilde serilmiştir:

Katman Serim Açıları: $[(\theta_0^k/\theta_1^k), (-\theta_0^k/-\theta_1^k), (\theta_0^k/\theta_1^k), (-\theta_0^k/-\theta_1^k), (90^\circ/90^\circ)]_s$

Burada kullanılan $\theta_0^k = 30^\circ$ plakanın merkezindeki elyaf serim açısını ifade ederken, $\theta_1^k = 10^\circ$ plakanın kenarlarındaki serim açısını ifade etmektedir. Plaka malzemesi olarak Hexply AS4/8552 yüksek performanslı havacılık malzemesi kullanılmıştır. Kullanılan malzemenin özellikleri Çizelge 6.1 içerisinde verilmiştir.

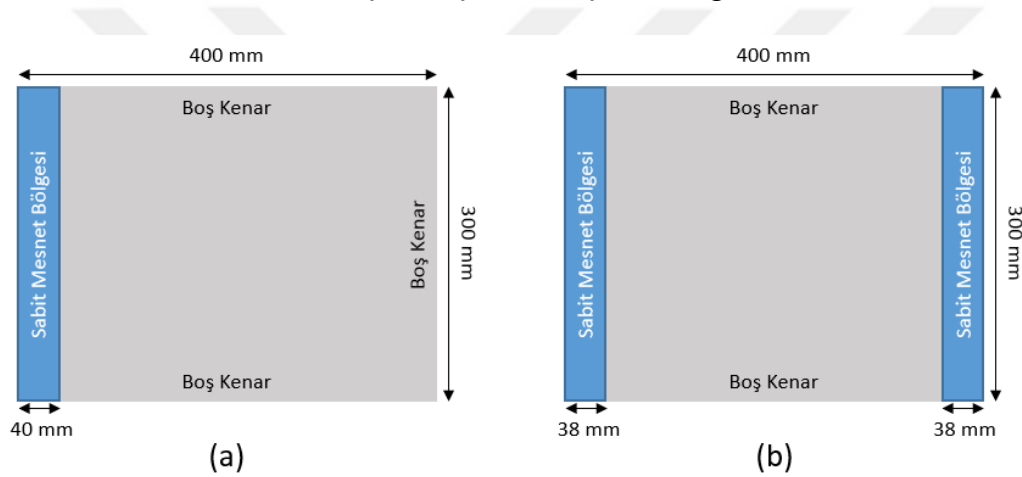
Çizelge 6.1. Hexply AS48552 Malzeme Özellikleri [40]

Parametre	Açıklama	Değer	Birim
E_1	Boyuna Yönde Elastik Modül	126,3	GPa
E_2	Enine Yönde Elastik Modül	8,765	GPa
G_{12}	Kayma Modülü	4,92	GPa

Çizelge 6.1. (devam) Hexply AS48552 Malzeme Özellikleri

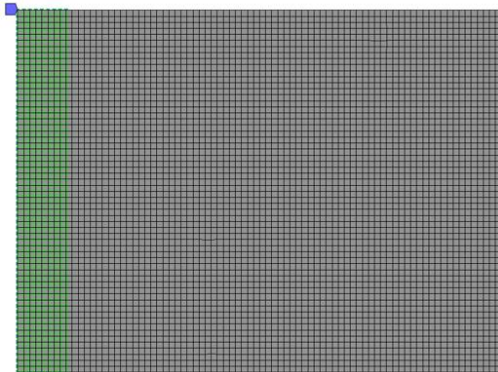
Parametre	Açıklama	Değer	Birim
G_{13}	Kayma Modülü	4,92	GPa
G_{23}	Kayma Modülü	3,35	GPa
ν_{12}	Poisson's Oranı	0,334	-
ρ	Yoğunluk	1556,7	kg/m ³

Çalışma içerisinde yazarlar iki farklı sınır koşulu ile çalışma yapmışlardır. Birinci sınır koşulunda plakanın bir kenarı sabit mesnetli diğer kenarları boşa durmaktadır (SBBB). İkinci sınır koşulunda ise iki kenarı sabit mesnetli ve iki kenarı boşa durmaktadır (SBSB). Kullanılan iki farklı sınır koşulları Şekil 6.2 içerisinde gösterilmektedir.



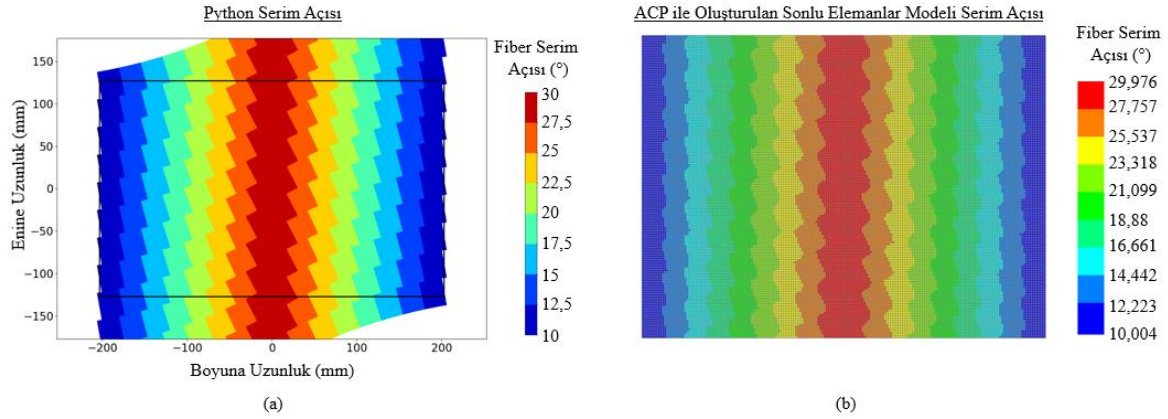
Şekil 6.2. Doğrulama Çalışması 6.1 İçerisinde Kullanılan Plakaların Sınır Koşulları: a) SBBB ve b) SBSB

DK plakanın x konumuna bağlı serim açılarının bulunabilmesi için oluşturulmuş olan Python kodu kullanılmıştır. Python kodu kullanılarak elde edilen serim açısı bilgileri sonlu elemanlar programına (Ansys ACP) programına girilerek kompozit plakanın katmanları modellenmektedir. Şekil 6.3 içerisinde oluşturulan sonlu elemanlar modeli gösterilmektedir.



Şekil 6.3. Doğrulama Çalışması 6.1 İçin Oluşturulan Sonlu Elemanlar Modeli

Şekil 6.4 içerisinde oluşturulan Python kodundan alınan serim açısı bilgisi ve bu bilgiler kullanılarak ACP modülü içerisinde sonlu elemanlar modeline işlenmiş serim açısı bilgileri gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Doğrulama Çalışması 6.1 İçin a) Python Kodundan Alınan Serim Açısı b) ACP Modülü İçerisinde Sonlu Elemanlar Modeline İşlenmiş Serim Açısı

6.1.2. Sonuçların karşılaştırılması

Karşılaştırma çalışmalarına öncelikle oluşturulmuş olan sonlu elemanlar modeli için ağ yapısındaki yakınsamanın sağlanması gerekmektedir. Bu sebeple ilk önce değişik ağ yapısı ölçüleri ile modal analizler yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda oluşan sonuçlar Çizelge 6.2 içerisinde gösterilmiştir.

Çizelge 6.2. Doğrulama Çalışması 6.1 İçin Ağ Boyutu-Mod Karşılaştırma Tablosu

	1 mm Ağ Boyutu	2 mm Ağ Boyutu	5 mm Ağ Boyutu	10 mm Ağ Boyutu	20 mm Ağ Boyutu
Mod 1 (Hz)	17,07	17,15	17,16	17,16	17,17
Mod 2 (Hz)	38,40	38,53	38,55	38,59	38,65
Mod 3 (Hz)	85,37	85,62	85,73	85,90	86,35
Mod 4 (Hz)	106,74	107,28	107,37	107,56	108,28
Mod 5 (Hz)	131,16	131,75	131,88	132,15	132,9
Mod 6 (Hz)	186,33	186,59	186,95	187,85	191,03
Mod 7 (Hz)	213,30	214,03	214,31	214,91	216,62

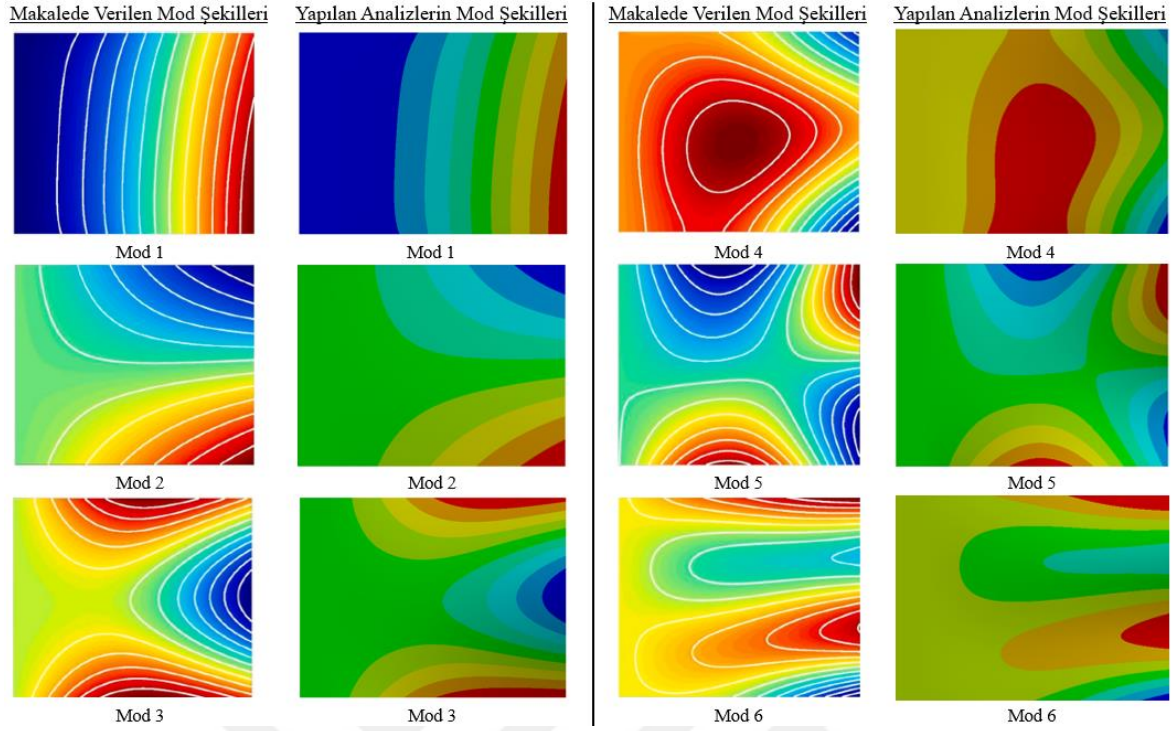
Yapılan analizler sonucunda oluşturulan tablodan görüldüğü üzere ağ boyutunun büyüklüğü sonuçlar üzerinde çok büyük bir etkisi olmadığı görülmüştür. Sonlu elemanlar ile çözüm süresi ve Çizelge 6.2'deki sonuçlara dayanarak 2 mm ağ boyutu büyüklüğü yapılacak analizler için uygun olarak kararlaştırılmıştır.

Her iki sınır koşulu içinde oluşturulan modellerle analizler yapılmıştır. Yapılan analizler sonucu ortaya çıkan sonuçlar ve bu sonuçların makalede bulunan sonuçlar ile kıyaslaması Çizelge 6.3 içerisinde verilmiştir. Yapılan analizler sonucunda elde edilen frekans değerleri ile makalede verilen frekans değerleri arasında %1'den daha küçük farklar olduğu görülmüştür. Bu çalışma ile DK sahip kompozit malzemenin katılık tanımlamasının doğru bir şekilde malzeme modeline eklendiği görülmüştür.

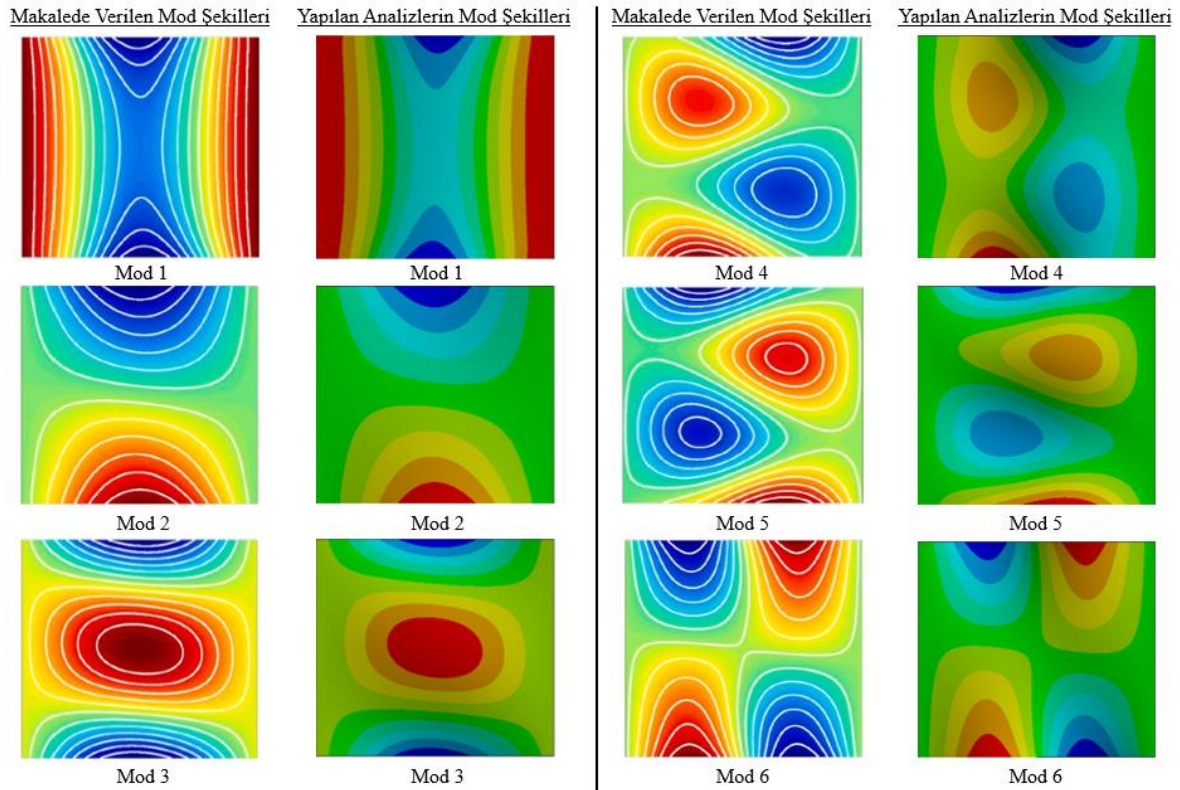
Çizelge 6.3. Doğrulama Çalışması 6.1 İçin Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

	SBBB Sınır Koşulu			SBSB Sınır Koşulu		
	Makale Sonucu	Analiz Sonucu	%Fark	Makale Sonucu	Analiz Sonucu	%Fark
Mod 1	17,17 Hz	17,15 Hz	0,12	136,7 Hz	136,42 Hz	0,20
Mod 2	38,63 Hz	38,53 Hz	0,26	153,1 Hz	152,45 Hz	0,42
Mod 3	85,97 Hz	85,62 Hz	0,41	211,7 Hz	210,64 Hz	0,50
Mod 4	107,40 Hz	107,28 Hz	0,11	315,7 Hz	313,98 Hz	0,54
Mod 5	132,20 Hz	131,75 Hz	0,34	379,9 Hz	377,88 Hz	0,53
Mod 6	187,10 Hz	186,59 Hz	0,27	403,0 Hz	400,66 Hz	0,58
Mod 7	214,90 Hz	214,03 Hz	0,40	486,1 Hz	482,28 Hz	0,79

Şekil 6.5 ve Şekil 6.6 içerisinde sınır koşullarına bağlı olarak yapılan analizler sonucunda oluşan mod şekilleri gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde analizler sonucu oluşan mod şekilleri ile makalede paylaşılan mod şekillerinin uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 6.5. Doğrulama Çalışması 6.1 İçin SBBB Sınır Koşulu ile Elde Edilen Mod Şekilleri



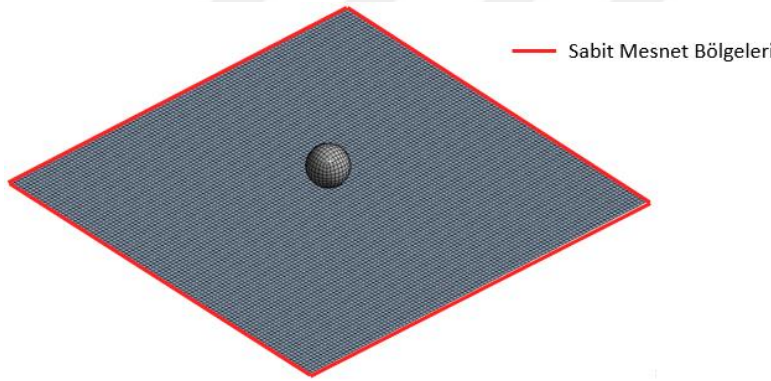
Şekil 6.6. Doğrulama Çalışması 6.1 İçin SBSB Sınır Koşulu ile Elde Edilen Mod Şekilleri

6.2. İzotropik Çelik Plaka Çarpma Analizi Doğrulaması

Karas [6] 1939 yılında izotropik bir plakanın çarpma analizi ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Tez çalışmalarındaki çarpma analizlerinin doğrulanabilmesi için Karas'ın yapmış olduğu çalışmalar ile yapılan sonlu elemanlar analizinin sonuçlarının karşılaştırmaları yapılmıştır. Daha önce Karas'ın çalışmalarını Lam ve Chun [18] ile Wu ve arkadaşları [10] kullanmış ve sonuçlarını paylaşmışlardır.

6.2.1. Oluşturulan sonlu elemanlar modelinin detayları

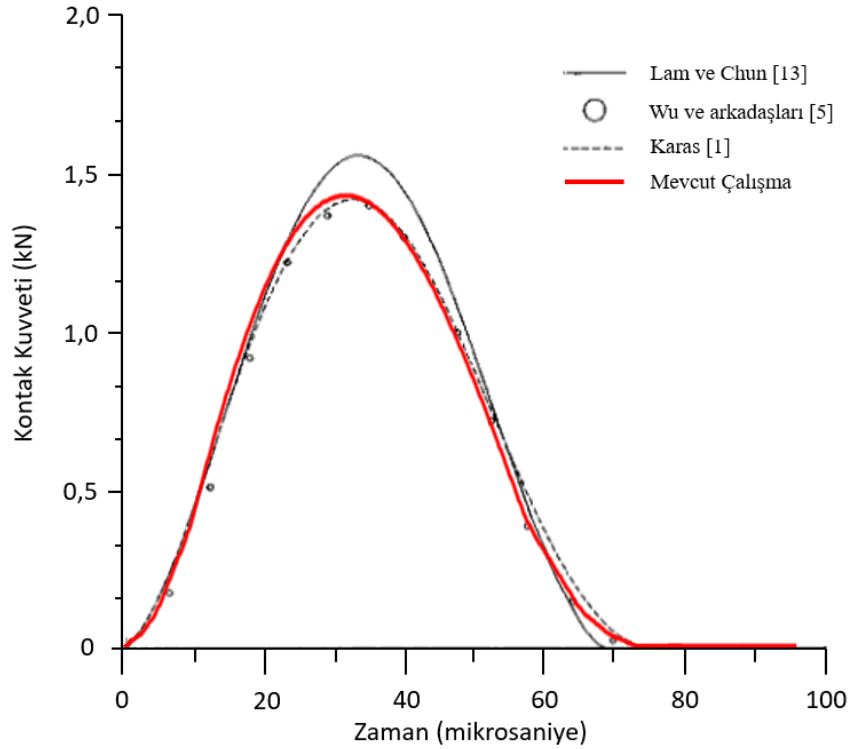
Analiz çalışmalarında, 200 mm uzunluğunda, 200 mm genişliğinde ve 8 mm kalınlığına sahip çelik bir plaka, dört kenarından mesnetli bağlantı ile bağlanmıştır. Çarpan Çelik bilyenin kütlesi, hızı ve yarıçapı sırasıyla 0,0329 kg, 1 m/s ve 10 mm'dir. Şekil 6.7 içerisinde oluşturulmuş olan sonlu elemanlar modeli gösterilmektedir.



Şekil 6.7. İzotropik Plaka Çarpma Analizinin Sonlu Elemanlar Modeli

Kullanılan çeliğin elastite modülü, poisson oranı ve akma gerilimi sırasıyla 200 GPa, 0,3 ve 325 MPa'dır. Sonlu elemanlar programında eleman formülasyonu olarak Belyschko-Tsay kabuk eleman formülasyonu kullanılmıştır. Çarpan çelik bilye rijit olarak modellenmiştir.

6.2.2. Sonuçların karşılaştırılması



Şekil 6.8. İzotropik Plaka Çarpma Analizinin Kontak Kuvveti- Zaman Grafiği

Çarpma noktasındaki, çarpan çelik bilye ve plakanın temas kuvvetinin zamana göre değişimi Şekil 6.8 içerisinde verilmiştir. Şekil içerisinde verilen grafik incelendiğinde Karas'ın elde etmiş olduğu maksimum kontak kuvveti ile yapılan analiz sonucu oluşan maksimum kontak kuvveti arasındaki farkın yaklaşık %0,9 olduğu görülmüştür.

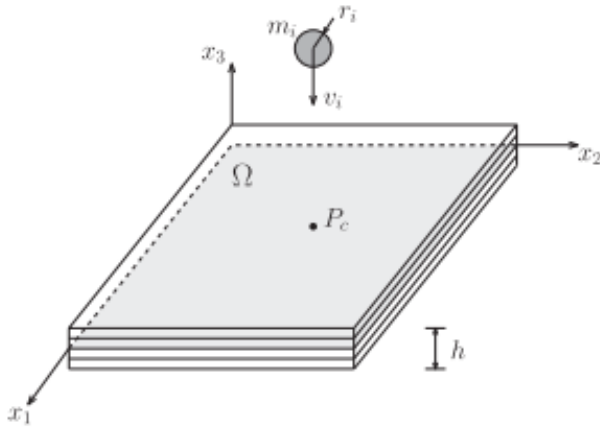
6.3. Sabit Katılığa Sahip Kompozit Plakanın Çarpma Analizinin Doğrulanması

Sabit katılığa sahip kompozit bir malzemenin çarpma analizinin doğrulama çalışması için literatürde bulunan bir çarpma durumunun analizi yapılmıştır. İncelenen çarpma durumunu daha önce literatürde; Cairns ve Lagace [11], Sun ve Chen [9], Wu ve Chang [10], Li ve Zhang [55] ile Milazzo ve Benedetti [41] çalışmışlardır.

6.3.1. Oluşturulan sonlu elemanlar modelinin detayları

Doğrulama çalışmasında içerisinde, bir kenarı 200 mm uzunluğa sahip kare plaka kullanılmıştır. Plaka her biri 0,269 mm'den oluşan on adet plakanın üst üste serilmesiyle

meydana gelmektedir. Çarpan cisim, yarıçapı 6,35 mm olan küresel şeklinden oluşmaktadır. Çarpan cisim çelik malzemeden yapılmıştır. Çarpan cismin ilk hızı 3 m/s'dir. Şekil 6.9 içerisinde yer alan şekilde, Milazzo ve Benedetti [41] çarpma analizinin şematik halini göstermişlerdir.



Şekil 6.9. Doğrulama Çalışması 6.3 İçin Çarpma Analizinin Şematik Gösterimi [41]

Plaka, $[0/90/0/90/0]_s$ serim açılarından oluşan plaklardan oluşmaktadır. Doğrulama çalışmasında kullanılan malzemenin özellikleri Çizelge 6.4 içerisinde gösterilmiştir.

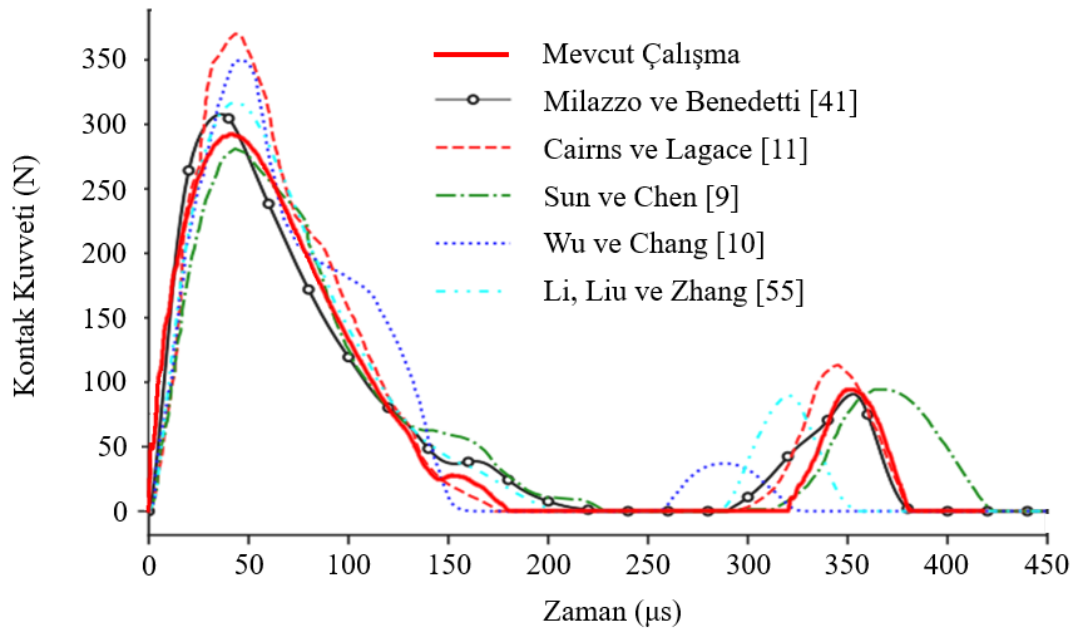
Çizelge 6.4. Doğrulama Çalışması 6.3 İçerisinde Kullanılan Malzemenin Özellikleri

Parametre	Açıklama	Değer	Birim
E_1	Boyuna Yönde Elastik Modül	141,2	GPa
E_2	Enine Yönde Elastik Modül	9,72	GPa
E_3	Plaka Düzlemine Dik Yönde Elastik Modül	9,72	GPa
G_{12}	Kayma Modülü	5,53	GPa
G_{13}	Kayma Modülü	3,74	GPa
G_{23}	Kayma Modülü	3,74	GPa
ν_{12}	Poisson's Oranı	0,3	-
ν_{13}	Poisson's Oranı	0,3	-
ν_{23}	Poisson's Oranı	0,3	-
ρ	Kütle Yoğunluğu	1536	kg/m ³

Model oluşturulurken öncelikle Ansys ACP modülü yardımıyla kompozit malzeme özelliklerine sahip plaka modellenmiştir. Daha sonra LS-DYNA'ya aktarılan malzeme özellikleri ile çarpma analizi yapılmıştır.

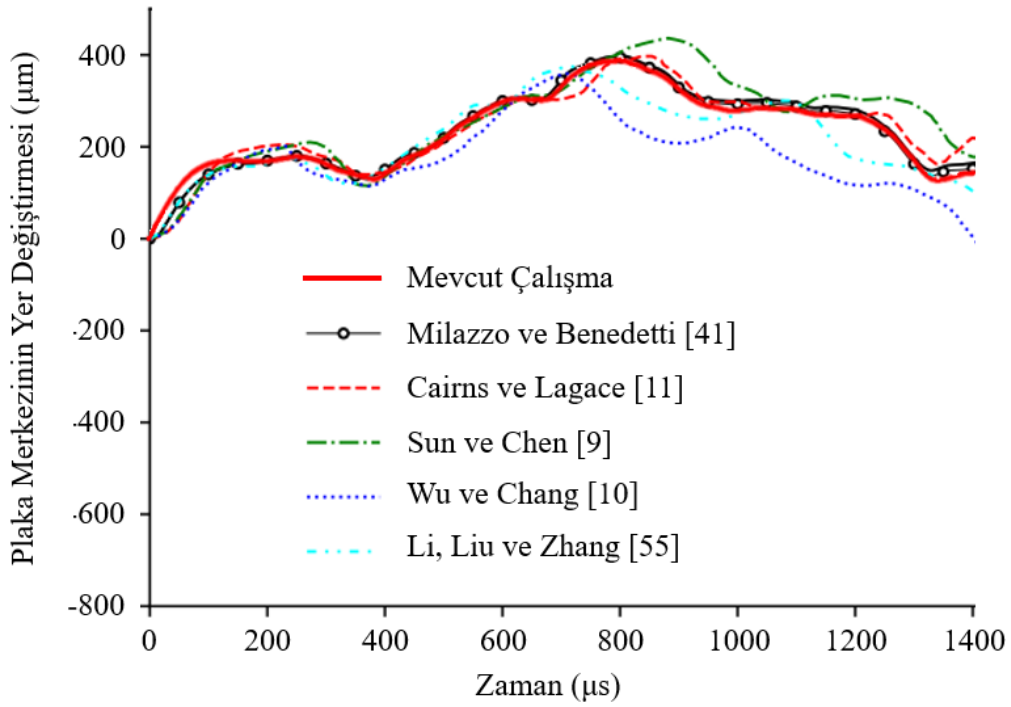
6.3.2. Sonuçların karşılaştırılması

Şekil 6.10 içerisinde elde edilen kontak kuvvetinin zamana bağlı değişimini gösteren grafik gösterilmektedir. Aynı şekil içerisinde, literatürde bulunan sonuçlar da paylaşılmaktadır. Grafik incelendiğinde, deneysel yöntemlere dayanan bir method kullanan Sun ve Chen'nin almış olduğu maksimum kontak kuvveti ile elde edilen analiz sonucu bulunan maksimum kontak kuvveti arasında yaklaşık %3,5'luk fark bulunmaktadır. Çarpmanın çok düşük hızından dolayı, geometrik olarak doğrusal olmayan tepkilerin, esasen küçük sapmaları harekete geçirdiği ve bu sebeple ihmal edilebilir farklılıklar gösterdiği gözlemlenmiştir.



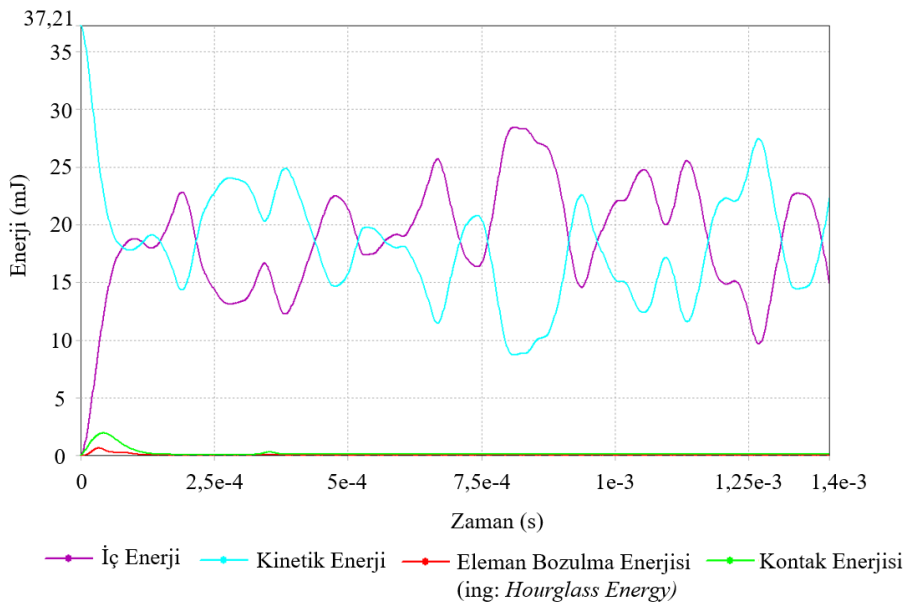
Şekil 6.10. Doğrulama Çalışması 6.3 İçin Sabit Katılığa Sahip Kompozit Plakanın Çarpma Analizinin Kontak Kuvveti- Zaman Grafiği

Şekil 6.11 içerisinde plakanın merkez noktasının yer değiştirme miktarının zamana bağlı grafiği gösterilmektedir. Alınan yer değiştirme grafiği ile literatürde verilen grafikler incelendiğinde, deneysel yöntemlere dayanan bir method kullanan Sun ve Chen'nin almış olduğu maksimum yer değiştirme miktarı ile elde edilen analiz sonucu bulunan maksimum yer değiştirme arasında yaklaşık %10'luk fark bulunmaktadır.



Şekil 6.11. Doğrulama Çalışması 6.3 İçin SK Sahip Kompozit Plakanın Çarpma Analizinin Plaka Merkezi Yer Değiştirme-Zaman Grafiği

Şekil 6.12 içerisinde yapılan analizdeki enerji değişiminin zamana bağlı grafiği gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde çapran cismin kinetik enerjisinin plakanın iç enerjisine dönüştüğü görülmektedir. Eleman bozulma enerjisinin, toplam iç enerjinin %10'nundan küçüktür.



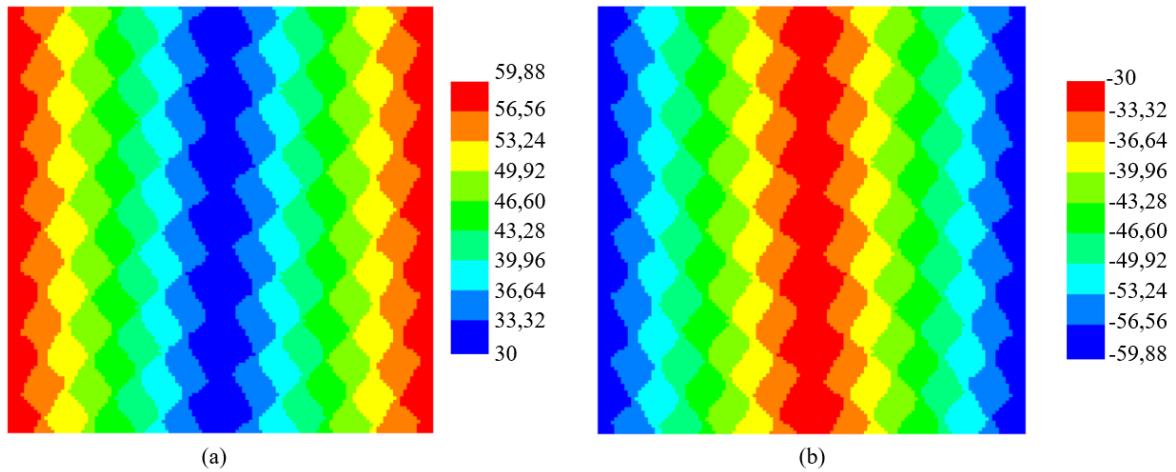
Şekil 6.12. Doğrulama Çalışması 6.3 İçin Sabit Katılığa Sahip Kompozit Plakanın Çarpma Analizinin Enerji - Zaman Grafiği

6.4. Değişken Katılığa Sahip Kompozit Plakanın Çarpma Analizinin Doğrulanması

Değişken katılığa sahip kompozit plakanın çarpma analizinin doğrulanması amacıyla, Milazzo ve Benedetti'nin [41] yapmış olduğu çalışma çalışmaların sonuçları ile yapılan analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Milazzo ve Benedetti çalışmalarında değişken katılıklı dikdörtgen şekle sahip bir kompozit plakanın analitik olarak çarpma analizini incelemişlerdir.

6.4.1. Oluşturulan sonlu elemanlar modelinin detayları

Doğrulama çalışması için yapılan analizlerde bir kenar uzunluğu 254 mm olan kare bir kompozit plaka kullanılmıştır. Plaka değişken katılığa sahip on iki adet plaktan oluşmaktadır. Herbir plak 0.127 mm kalınlığındadır ve toplam plaka kalınlığı 1.524 mm'dir. Plaklar $[0 \pm (\theta_0/\theta_1)]_{3S}$ şeklinde serim açılarına sahiptirler. Kullanılan serim açıları içerisinde plaka orta uzunluğundaki serim açısı $\theta_0 = 30^\circ$ ve plaka giriş serim açısının $\theta_1 = 60^\circ$ 'dir. Doğrusal açı değişimi yöntemi kullanılarak plakaların serim açıları elde edilmiştir. Python kodundan elde edilen pozitif ve negatif plaka serim açılarının sonlu elemanlar modülüne işlenmiş hali aşağıda bulunan Şekil 6.13 içerisinde gösterilmektedir.



Şekil 6.13. Doğrulama Çalışması 6.4 İçin a) Pozitif Serim Açıları b) Negatif Serim Açıları

Çarpan cisim yarıçapı 6,35 mm olan küresel şekle sahip çelik malzemeden üretilmiştir. Çarpan cisim 8,5 gram ağırlığında olup 3 m/s hızla plakaya çarpmaktadır. Aşağıda çarpan cismin kinetik enerjisi hesaplanmıştır:

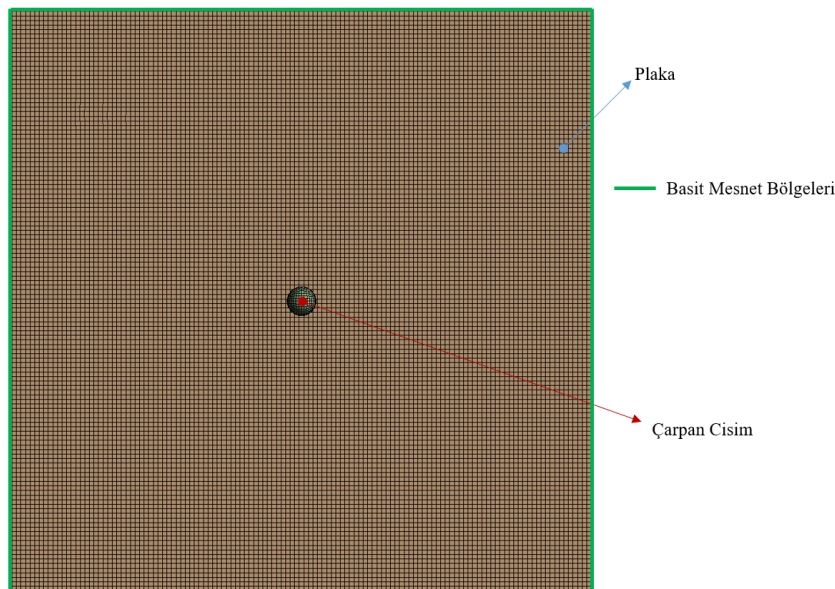
$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(0,0085 \text{ kg})(3 \text{ m/s})^2 = 0,038 \text{ Joule}$$

Plakalarda kullanılan malzemenin özellikleri Çizelge 6.5 içerisinde verilmiştir.

Çizelge 6.5. Doğrulama Çalışması 6.4 İçerisinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

Parametre	Açıklama	Değer	Birim
E ₁	Boyuna Yönde Elastik Modül	141,2	GPa
E ₂	Enine Yönde Elastik Modül	9,72	GPa
E ₃	Plaka Düzlemine Dik Yönde Elastik Modül	9,72	GPa
G ₁₂	Kayma Modülü	5,53	GPa
G ₁₃	Kayma Modülü	3,74	GPa
G ₂₃	Kayma Modülü	3,74	GPa
ν ₁₂	Poisson's Oranı	0,3	-
ν ₁₃	Poisson's Oranı	0,3	-
ν ₂₃	Poisson's Oranı	0,3	-

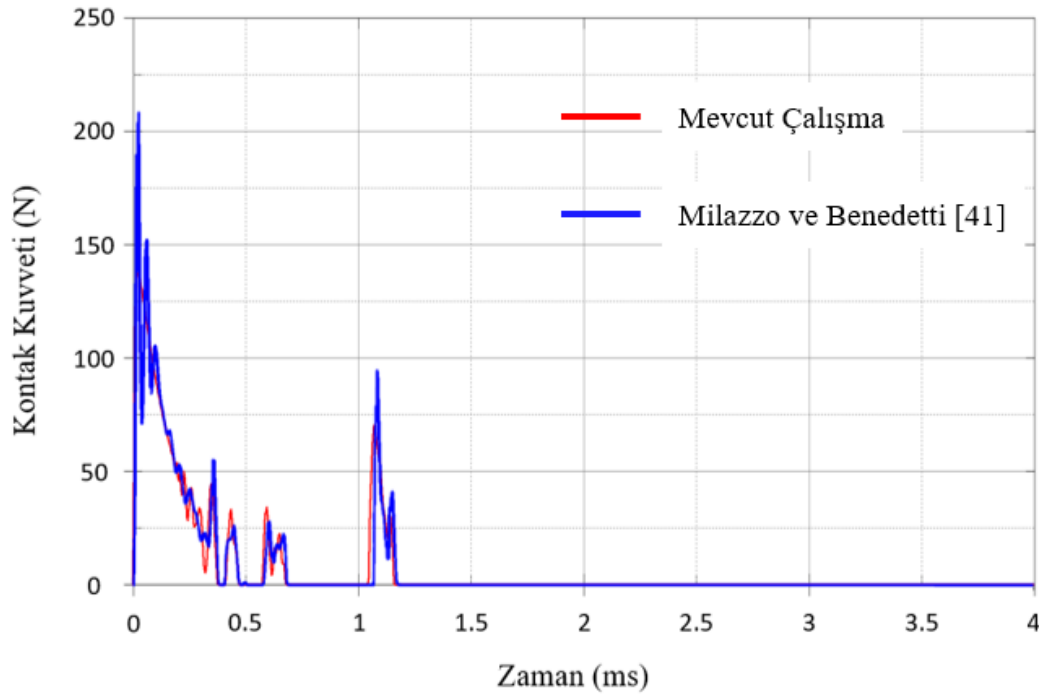
Oluşturulan sonlu elemanlar modeline sınır koşulu olarak dört kenarından basit mesnetli sınır koşulu oluşturulmuştur. Şekil 6.14 içerisinde oluşturulan sonlu elemanlar modeli ve sınır koşulları gösterilmiştir.



Şekil 6.14. Doğrulama Çalışması 6.4 İçin Oluşturulan Sonlu Elemanlar Modeli ve Sınır Koşulları

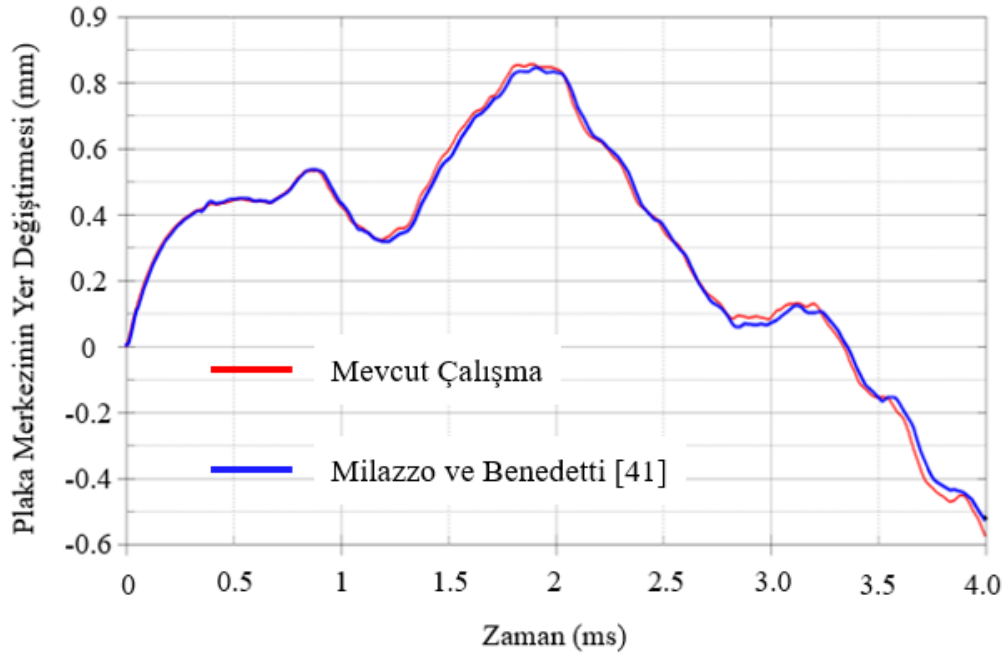
6.4.2. Sonuçların karşılaştırılması

Aşağıda verilen Şekil 6.15 içerisinde kontak kuvvetinin zamanla değişimi gösterilmektedir. Referans içerisinde alınan sonuçlarda aynı grafik içerisinde gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde ilk tepe noktası dışında, sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. İlk tepe noktasının zamanın çok küçük bir anında gerçekleştiği ve plaka davranışında bir etkiye yol açmadığı görüldüğü için ihmal edilebilir bir fark olduğuna karar verilmiştir.



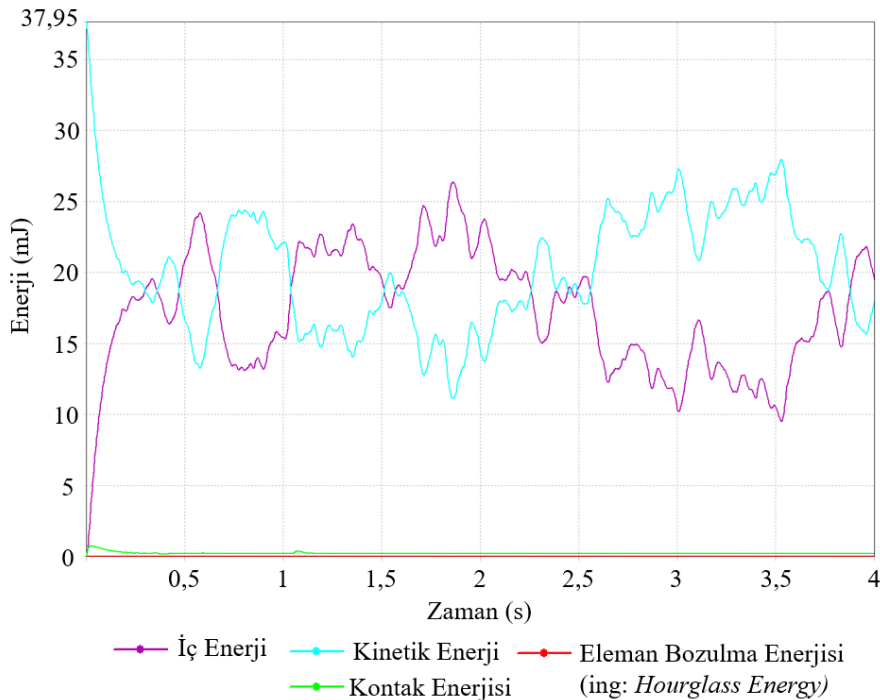
Şekil 6.15. Doğrulama Çalışması 6.4 İçin Kontak Kuvveti Karşılaştırması

Şekil 6.16 içerisinde doğrulama çalışmasında kullanılan plakanın merkez noktasının hareketinin zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde, literatürden elde edilen maksimum yer değiştirme miktarı ile analizlerden elde edilen maksimum yer değiştirme miktarı arasında yaklaşık %1 olduğu görülmüştür.



Şekil 6.16. Doğrulama Çalışması 6.4 İçin Plaka Merkezi Yer Değiştirme Miktarı Karşılaştırması

Yapılan analizin zamana bağlı enerji değişimi Şekil içerisinde gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde çarpan cismin kaybettiği kinetik enerjinin plaka iç enerji ve kontak enerjisi için harcandığı görülmüştür. Elemanların bozulma enerjisinin toplam iç enerjinin %10'nunda daha küçük olduğu görülmektedir.

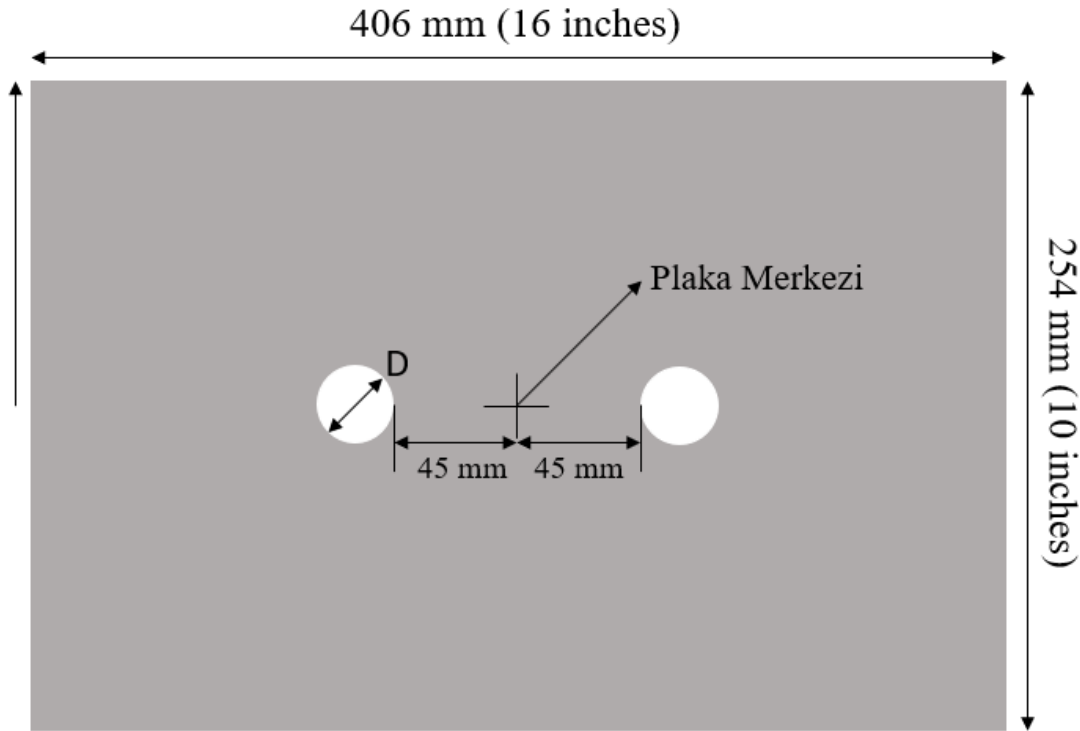


Şekil 6.17. Doğrulama Çalışması 6.4 İçin Enerji - Zaman Grafiği

7. DEĞİŞKEN KATILIĞA SAHİP DELİKLİ KOMPOZİT PLAKANIN ANALİZ MODELLERİ VE İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARI

Değişik çapta delik boyutlularına sahip olan DK plakaların öncelikle modal analiz modelleri oluşturulup, bu plakalar üzerinde iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Aynı geometrilere sahip plakalar daha sonra düşük hızlı darbe yükü altında analiz modelleri oluşturulup, dinamik karakteristikleri incelenip, plakalar üzerinde iyileştirme çalışmaları yapılmıştır.

Aşağıda verilen Şekil 7.1 içerisinde delikli plakanın uzunluk ve üzerlerindeki delik çapı bilgileri verilmektedir. Yapılmış olan analiz ve iyileştirme çalışmaları için değişik delik çaplarına sahip dört farklı geometri kullanılmıştır. Kullanılan plakaların uzunluğu 406 mm ve eni 254 mm'den oluşmaktadır. Plakalar üzerine, orta noktasından simetrik olacak şekilde iki adet delik yerleştirilmiştir. Deliklerin çapları “D” olarak gösterilmiştir. Deliklerin, plakaların orta noktalarına en yakın mesafeleri 45 mm'dir. Delik çapları 30 mm ve katları olacak şekilde belirlenmiştir. Deliklerin merkezleri arasındaki mesafeler, delik çaplarına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 7.1. Delikli Plakalarda Kullanılan Geometri Şekli

Kullanılan değişik dört farklı çap durumu aşağıda özetlenmiştir:

- 1D Delik Çapı = 30 mm
- 2D Delik Çapı = 60 mm
- 3D Delik Çapı = 90 mm
- 4D Delik Çapı = 120 mm

Plakalarda Karbon Epoksi G40-800/5276-1 malzemesi kullanılmıştır. Kullanılan malzemenin mekanik özellikleri O. Coşkun ve Halit S. [43] tarafından oluşturulan makaleden elde edilmiştir. G40-800/5276-1 malzemesinin mekanik özellikleri Çizelge 7.1 içerisinde gösterilmiştir.

Çizelge 7.1. G40-800/5276-1 Malzeme Özellikleri

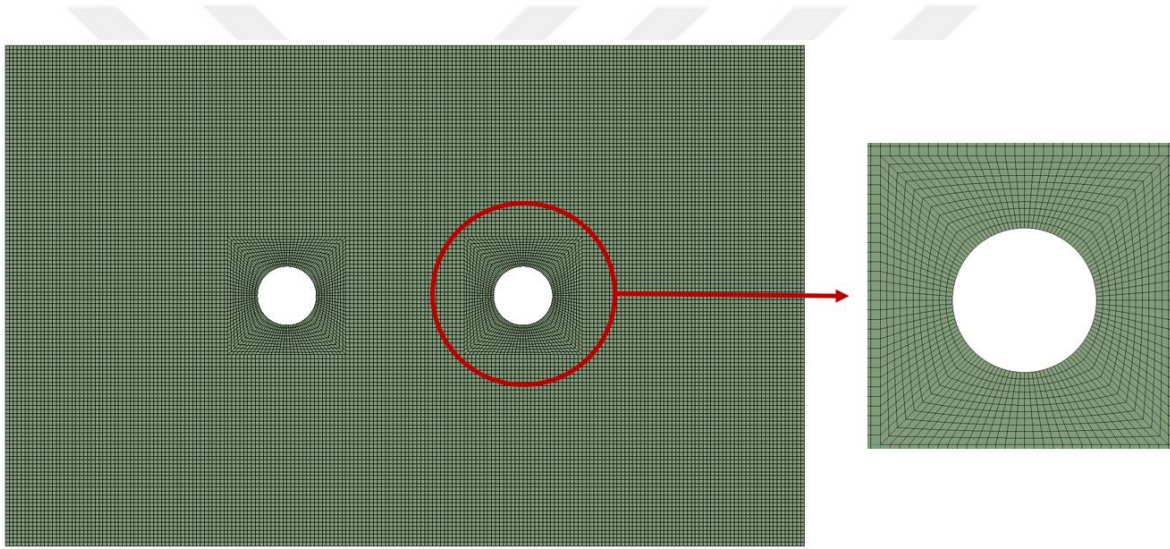
Parametre	Açıklama	Değer	Birim
E_1	Boyuna Yönde Elastik Modül	142,7	GPa
E_2	Enine Yönde Elastik Modül	9,1	GPa
E_3	Plaka Düzlemine Dik Yönde Elastik Modül	9,1	GPa
G_{12}	Kayma Modülü	4,82	GPa
G_{13}	Kayma Modülü	4,82	GPa
G_{23}	Kayma Modülü	4,82	GPa
ν_{12}	Poisson's Oranı	0,3	-
ν_{13}	Poisson's Oranı	0,3	-
ν_{23}	Poisson's Oranı	0,3	-
ρ	Yoğunluk	1580	kg/m ³

7.1. Değişken Katılığa Sahip Delikli Plakaların Modal Analiz Çalışmaları

Değişken katılık durumunun, plakaların modal karakteristikleri üzerindeki etkilerin daha iyi anlaşılabilmesi için öncelikle SK sahip delikli kompozitler ile DK sahip delikli kompozit plakaların modal analizleri karşılaştırılmıştır. Daha sonrasında delik boyutunun plakanın modal karakteristiği üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için dört farklı delik çapı durumu için modal analiz karşılaştırmaları yapılmıştır.

7.1.1. DK delikli kompozit plaka ile SK delikli kompozit plakanın modal karakteristiklerinin karşılaştırması

Delikli bir kompozit plakanın katılık değişiminin modal karakteristik üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için SK kompozitler ile DK kompozitlerin modal karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Oluşturulan sonlu elemanlar modelinde, dört kenarında basit mesnet sınır koşulu oluşturulmuştur. Yapılan analizlerde delik çapı 30 mm ve deliklerin merkezleri arasındaki mesafe ise 60 mm'dir. Şekil 7.2 içerisinde oluşturulmuş olan sonlu elemanlar modeli gösterilmektedir. Delik çevresinde ağ yapısının düzgün oluşturulabilmesi için, plaka parçalara ayrılıp daha sonra 2 mm boyutlu ağ yapısı oluşturulmuştur.



Şekil 7.2. Delikli Plaka için Oluşturulan Ağ Yapısı

Oluşturulmuş olan sonlu elemanlar modeli öncelikle, bütün plakların serim yönü aynı ve 0° olan plaka, çapraz olarak serilmiş plaka ve endüstride sıkça kullanılan simetrik yarı izotropik (SYİ) plakanın modal analiz sonuçları elde edilmiştir. Daha sonrasında birinci modu maksimum yapabilmek için SK sahip kompozit malzeme üzerinde iyileştirme çalışması yapılmıştır.

Yapılan iyileştirme çalışmasında plakanın simetrik dizilime sahip olduğu kabul edilmiştir. 16 adet katmana sahip olan plakanın serim açısı aşağıdaki gibidir:

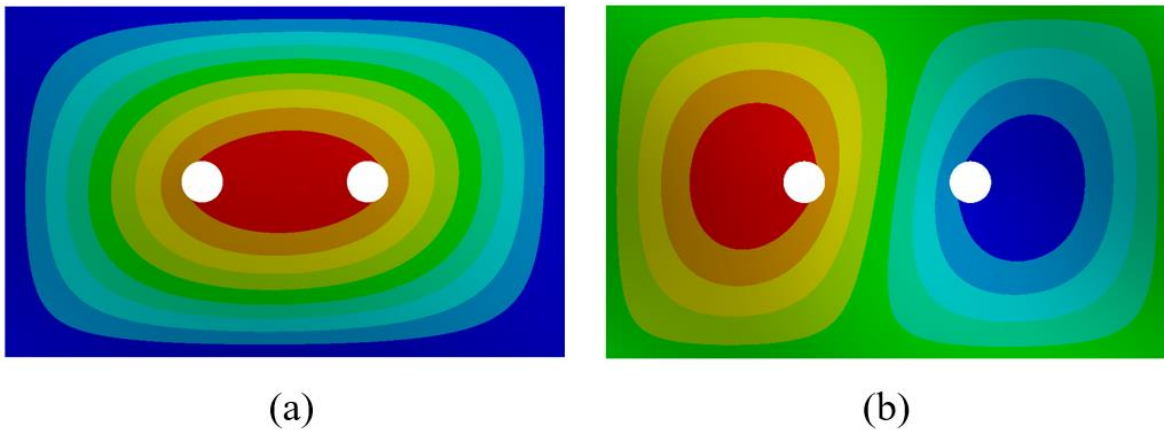
SK Plaka Serim Açısı: $[\theta_1/-\theta_1/\theta_3/-\theta_3/\theta_5/-\theta_5/\theta_7/-\theta_7]_s$

Plaka serim açısından görüleceği üzere θ_1 , θ_3 , θ_5 ve θ_7 olmak üzere dört adet plağın serim açısı iyileştirme çalışmasında değişken değerler olarak kabul edilmiştir. Herbir değişken değer için 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90° değerleri kullanılarak en yüksek birinci mod frekans değeri (BMFD) elde edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen değerler aşağıda bulunan Çizelge 7.2 içerisinde gösterilmiştir.

Çizelge 7.2. SK Sahip Plakaların Birinci ve İkinci Mod Frekans Değerleri

Plaka Serim Açılıarı	Mod 1 (Hz)	Mod 2 (Hz)
$[0]_{16}$	87,75	203,92
Çapraz Serilimli Plaka: $[0/90]_8$	135,78	239,47
SYİ Plaka: $[45/0/-45/90]_{2s}$	145,13	285,54
İyileştirme Çalışması Sonucu Oluşan Plaka: $[75/-75/60/-60/75/-75/90/-90]_s$	171,62	241,49

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde en yüksek birinci frekans modunu beklenildiği üzere iyileştirme çalışması sonucu ortaya çıkan serilim açılarında elde edilmiştir. Ama bununla birlikte SYİ delikli plakanın ikinci frekans mod değerlerinin (İMF), iyileştirilmiş serilimden çok daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmüştür. Aşağıda verilen şekil içerisinde SYİ delikli plakanın birinci ve ikinci mod şekilleri gösterilmiştir. Elde edilen mod şekilleri bütün serilim açıları benzerdir.



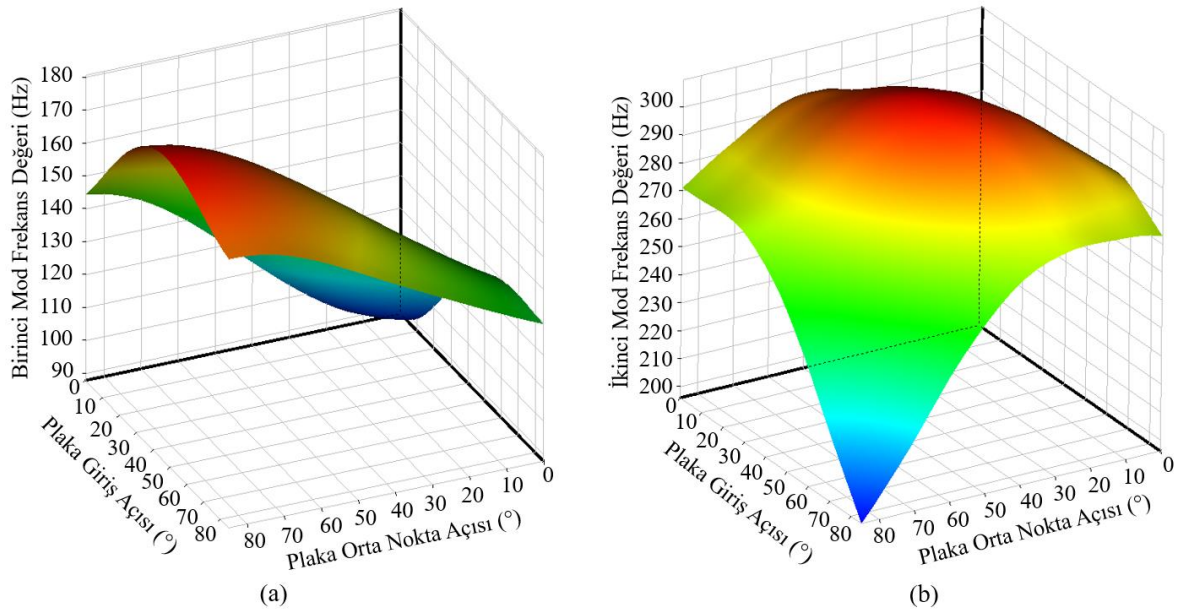
Şekil 7.3. SYİ Delikli Plakanın a) Birinci Mod Şekli b) İkinci Mod Şekli

DK delikli plakalar ile SK sahip delikli kompozit plakaların karşılaştırması yapılabilmesi amacı ile DK kompozit plakanın serim açıları üzerinde de iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Sabit eğrilikli açı değişimi yöntemi kullanılarak plakaların serim açıları elde edilmiştir. Oluşturulmuş olan DK plakaların katman serim açıları aşağıdaki gibi oluşturulmuştur:

DK Delikli Plaka Katman Serim Açıları: $[0 \pm (\theta_0/\theta_1)]_{4s}$

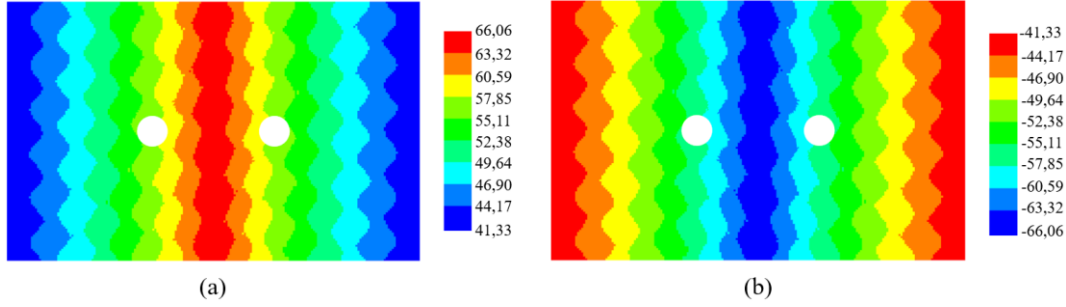
DK kompozit plakalarda yapılan iyileştirme çalışmalarında plaka giriş serim açısı θ_1 ve plakanın orta noktasındaki serim açısı θ_0 değişken değerler olarak kullanılmışlardır. Değişken değerlerin alt sınır değeri olarak 0° ve üst sınır değeri olarak 85° belirlenmiştir. Yapılan modal analiz iyileştirme çalışmasının akış diyagramı EK-2 içerisinde verilmiştir.

Şekil 7.4 içerisinde yapılan iyileştirme çalışmasında birinci ve ikinci mod frekans değerleri için oluşan cevap yüzeyleri gösterilmiştir. Yapılan iyileştirme çalışmasının (BMFD) için maksimum mutlak hata değeri %0,15 iken (İMFD) için elde edilen maksimum mutlak hata değeri %2,15'tir. Elde edilen maksimum hata değerlerinin çok düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 7.4. DK Delikli Plakanın İyileştirme Çalışmasında Elde Edilen Cevap Yüzeyleri a) BMFD İçin b) İMFD İçin

İyileştirme çalışması sonucunda $[0 \pm (66,1/41,3)]_{4s}$ serim açısı ile DK sahip kompozit plakanın İMFD 285 Hz üzerinde iken BMFD en yüksek değere getirdiği görülmüştür. Şekil 7.5 içerisinde Python kodundan elde edilen pozitif ve negatif iyileştirilmiş plaka serim açılarının sonlu elemanlar modülüne işlenmiş hali aşağıda gösterilmektedir.



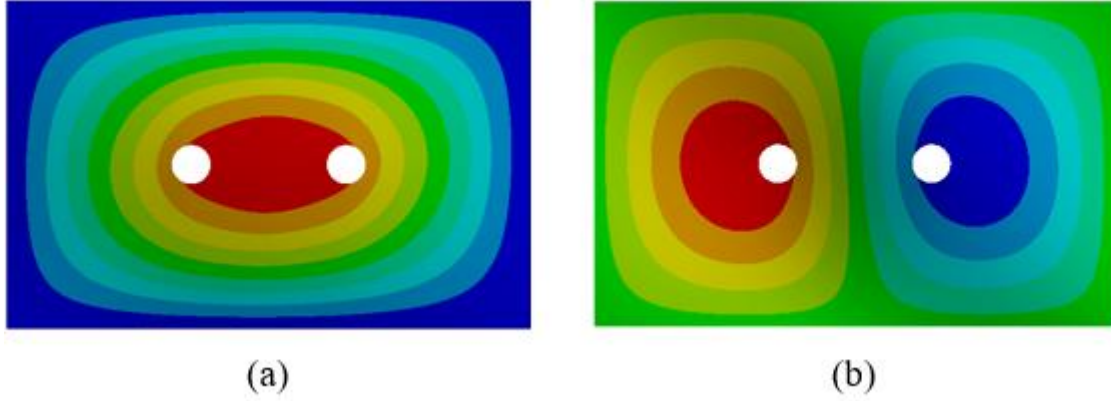
Şekil 7.5. Modal Analiz Çalışması İçin İyileştirilmiş Serim Açıları a) Pozitif Serim Açısı b) Negatif Serim Açısı

Aşağıda verilen çizelge içerisinde değişik serim açlarına sahip DK sahip delikli kompozit plakaların BMFD ve İKMD gösterilmektedir. Çizelge incelendiğinde iyileştirilmiş serim açısına sahip DK plakanın en yüksek BMFD verdiği görülmektedir. Elde edilmiş olan iyileştirilmiş serim açısına sahip DK delikli plakanın BMFD ile iyileştirilmiş serim açısına sahip SK delikli plakanın BMFD karşılaştırıldığında, DK plakanın frekans değerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Buna ek olarak iyileştirilmiş serim açısına sahip DK plakanın İMFD'nin, SYİ plakanın İMFD'den yüksek olduğu görülmektedir. DK sahip kompozit plakalarda mod şekline bağlı olarak bölgesel katılık değişimleri yapılabildiği için mod frekansları yükseltilebilmektedir. Sonuç olarak, SK sahip değişik serim açlarına sahip plakaların avantajlarını, DK sahip plaka kullanılarak tek bir serim açısı ile elde edilebilmekte olduğu görülmüştür. Buna ek olarak SK sahip plakalarda dört plakanın serim açısı değiştirilirken, DK sahip plakada sadece bir plakanın serim açısı değişken olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 7.3. DK Sahip Plakaların Birinci ve İkinci Mod Frekans Değerleri

Plaka Serim Açıları	Mod 1 (Hz)	Mod 2 (Hz)
$[0 \pm (0/45)]_{4s}$	123,78	267,29
$[0 \pm (30/60)]_{4s}$	151	298,98
$[0 \pm (30/45)]_{4s}$	148	307,68
$[0 \pm (60/45)]_{4s}$	171,6	291,89
İyileştirilmiş Serim Açısı: $[0 \pm (66,1/41,3)]_{4s}$	174,16	286,02

Aşağıda gösterilen şekil içerisinde iyileştirilmiş serim açısına sahip DK plakanın birinci ve ikinci mod şekilleri gösterilmiştir. Ortaya çıkan mod şekillerinin SK sahip plakalara benzer olduğu görülmüştür.



Şekil 7.6. İyileştirilmiş Serim Açısına Sahip DK Plakanın a) Birinci Mod Şekli b) İkinci Mod Şekli

7.1.2. DK delikli kompozit plakalarda delik boyutunun modal karakteristik üzerindeki etkileri

Delik çapı değişiminin DK sahip plakalar üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi için Bölüm 7'nin başında anlatılan dört farklı çap durumu için modal analizler yapılmıştır. Plakaların delik boyutlarına göre modal karakteristiklerindeki değişimleri daha iyi yorumlayabilmek için her bir durum için oluşturulan plaka geometrilerinin SYİ plaka olarak modellenip sonuçları alınmıştır. Her bir değişik delik boyutlu DK sahip plaka için iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. İyileştirme çalışmalarında Bölüm 7.1.1 olduğu gibi İMFD 285 Hz'den büyük olması beklenirken, BMFD en yüksek olduğu değer bulunmaya çalışılmıştır.

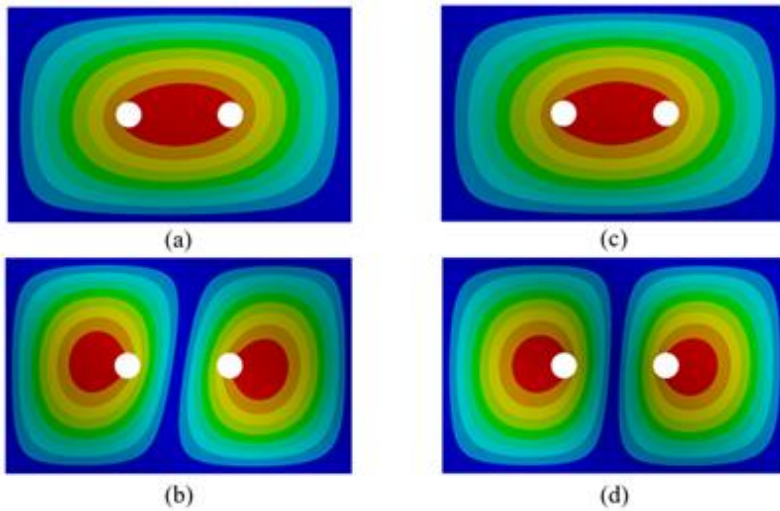
EK-3 içerisinde değişik delik çapı boyutlarına sahip plakaların doğal frekanslarına ait BMFD ve İMFD için oluşan cevap yüzeyleri gösterilmiştir. Plakalarda kullanılan değişkenler ve sınır değerleri Bölüm 7.1.1. içerisinde kullanılan değerlerle aynıdır. 1D delik çapına plakadan elde edilen hata oranları Bölüm 7.1.1 içerisinde verilmiştir. 2D delik çapına sahip plakadan alınan BMFD maksimum mutlak hata değeri %0,13 ve İMFD için %3,47'dir. 3D ve 4D delik çaplarına sahip plakalar için BMFD maksimum mutlak hata değeri sırasıyla %0,23 ve %0,48 olarak görülürken, İMFD için alınan maksimum mutlak hata değerleri sırasıyla %1,15 ve %1,65'tir.

SYİ delikli plakalar ve iyileştirilmiş serilime sahip DK plakaların BMFD ve İMFD, delik çapı boyutuna bağlı olarak aşağıda verilen Çizelge 7.4 içerisinde gösterilmiştir. Çizelge incelendiğinde SYİ delikli plakalarda delik çapı büyüdükçe BMFD düşerken, İMFD arttığı görülmüştür. İyileştirilmiş serimli DK sahip delikli kompozitlerde ise delik çapı büyüdükçe BMFD değerinin serilim açılarının değişmesine bağlı olarak arttığı görülmüştür.

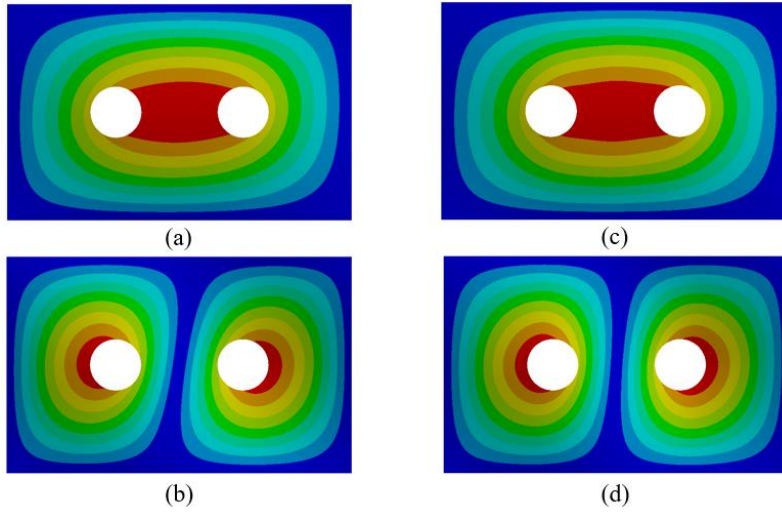
Çizelge 7.4. Delik Çapı Boyutuna Bağlı Olarak Plakaların BMFD ve İMFD Değerleri

	SYİ Delikli Plakalar: [45/0/-45/90] _{2s}		DK Sahip İyileştirilmiş Serimlilere Sahip Delikli Plakalar		
	1.Mod	2.Mod	1.Mod	2.Mod	İyileştirilmiş Serim Açısı
1D Delik Çapı	145,1	285,5	174,2	286,04	$[0 \pm (66,1/41,3)]_{4s}$
2D Delik Çapı	142,6	282,4	172,6	287,3	$[0 \pm (66,3/43,4)]_{4s}$
3D Delik Çapı	142,2	296,2	182,7	287,2	$[0 \pm (82,6/39,7)]_{4s}$
4D Delik Çapı	142,0	335,5	185,8	319,1	$[0 \pm (83,6/43,5)]_{4s}$

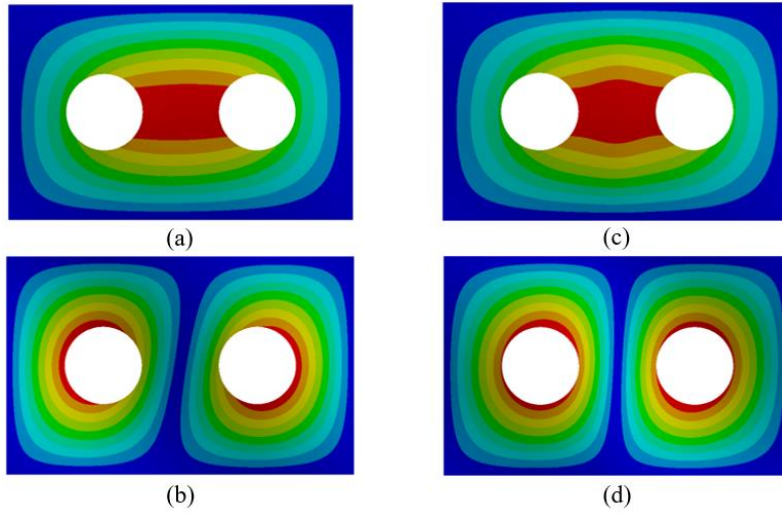
Aşağıda verilen Şekil 7.7, Şekil 7.8, Şekil 7.9 ve Şekil 7.10 içerisinde delik boyutuna bağlı olarak oluşturulan durumlara bağlı plakalarda oluşan birinci ve ikinci mod şekilleri gösterilmektedir. Şekiller detaylı olarak incelendiğinde delik çapları büyürken plakalar üzerinde katılık kaybı oluşurken, delik çapı büyüdükçe plakaların ikinci mod şekillerinde görülen efektif kütle azaldığı görülmüştür. Buna bağlı olarak plakaların İMFD'leri delik çapı büyüdükçe artmaktadır. Bu sebeple BMFD, DK sahip plakalarda artmıştır.



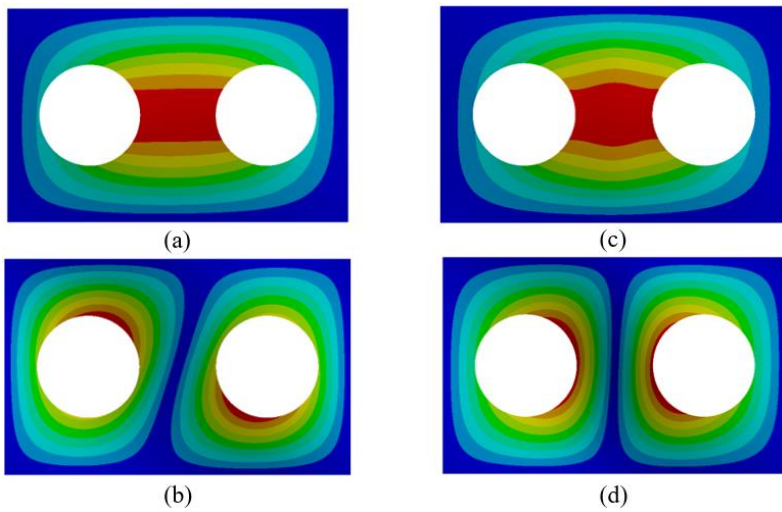
Şekil 7.7. 1D delik çapı için a) SYİ Plakanın 1. Mod Şekli, b) SYİ Plakanın 2. Mod Şekli, c) DK Sahip Plakanın 1. Mod Şekli, d) DK Sahip Plakanın 2. Mod Şekli



Şekil 7.8. 2D delik çapı için iç içe a) SYİ Plakanın 1. Mod Şekli, b) SYİ Plakanın 2. Mod Şekli, c) DK Sahip Plakanın 1. Mod Şekli, d) DK Sahip Plakanın 2. Mod Şekli



Şekil 7.9. 3D delik çapı için iç içe a) SYİ Plakanın 1. Mod Şekli, b) SYİ Plakanın 2. Mod Şekli, c) DK Sahip Plakanın 1. Mod Şekli, d) DK Sahip Plakanın 2. Mod Şekli



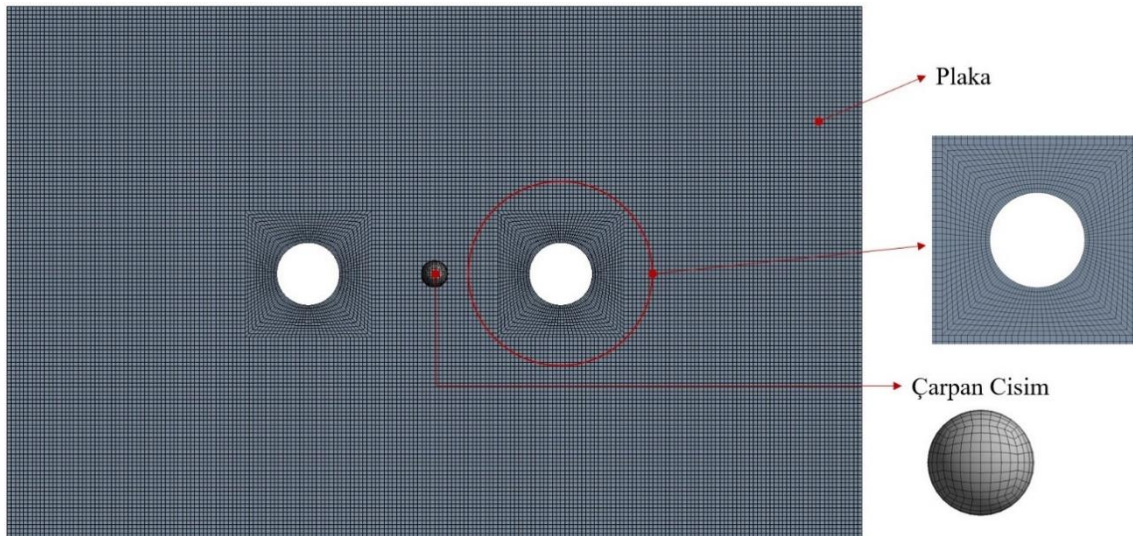
Şekil 7.10. 4D delik çapı için iç içe a) SYİ Plakanın 1. Mod Şekli, b) SYİ Plakanın 2. Mod Şekli, c) DK Sahip Plakanın 1. Mod Şekli, d) DK Sahip Plakanın 2. Mod Şekli

7.2. Değişken Katılığa Sahip Delikli Plakaların Düşük Hızlı Darbe Analiz Çalışmaları

7.2.1. bölümü içerisinde düşük hızlı darbe yükü altındaki DK sahip delikli plakaların dinamik davranışlarının, SK sahip delikli plakaların dinamik davranışları ile kıyaslanabilmesi için, aynı darbe yükü altında karşılaştırılmaları yapılmıştır. Daha sonra gelen bölümde, delik boyutunun düşük hızlı darbe yükü altındaki plakaların dinamik davranışını nasıl etkilediğini görebilmek için bölüm başında anlatılan dört farklı delik çapı boyutu için analiz ve iyileştirme çalışmaları yapıp, sonuçların karşılaştırmaları yapılmıştır.

7.2.1. Düşük hızlı darbe yükü altındaki değişken katılığa sahip delikli plakaların dinamik davranışlarının incelenmesi

DK sahip plakaların düşük hızlı darbe yükü altındaki dinamik davranışının daha iyi anlaşılabilmesi için bu bölüm içerisinde SK sahip kompozit malzemelerle karşılaştırmaları yapılmıştır. Karşılaştırma analizlerinde kullanılan plakardaki delik çapı 30 mm ve deliklerin merkezleri arasındaki mesafe 60 mm'dir. Plakalar, Çizelge içerisinde malzeme özellikleri verilen G40-800/5276-1 kompozit malzemesinden üretilmektedir. Bütün plakaların dört kenarına basit mesnet sınır koşulu oluşturulmuştur. Çarpan cisim, yarıçapı 6,35 mm olan küresel şekle sahip çelik malzemeden oluşmaktadır. Cismin kütlesi 8,5 gram ve hızı 3 m/s'dir. Aşağıda verilen Şekil 7.11 oluşturulmuş olan ağ yapısı gösterilmiştir. Yapılan analizlerde plakanın orta noktasındaki maksimum yer değiştirme miktarı ölçülmektedir. Malzeme modellerinde sabit eğriliğe sahip elyaf dizilimi kullanılmıştır.



Şekil 7.11. Delikli Plakanın Düşük Hızlı Darbe Analizi Oluşturulan Sonlu Elemanlar Modeli

Oluşturulmuş olan sonlu elemanlar modeli ile, bütün plakların serim yönü aynı ve 0° olan plaka, çapraz olarak serilmiş plaka ve SYİ plakanın düşük hızlı darbe yükü altındaki dinamik davranışları elde edilmiştir. Daha sonrasında aynı sonlu elemanlar modelini kullanılarak Python kodundan elde edilen serimler ile DK sahip kompozit plakaları dinamik davranışları elde edilip, iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan iyileştirme çalışmalarında ANSYS içerisinde gömülü olarak bulunan Çok Amaçlı Genetik Algoritma (ÇAGA) (ing: “Multi Objective Genetic Algorithm (MOGA)”) kullanılmıştır.

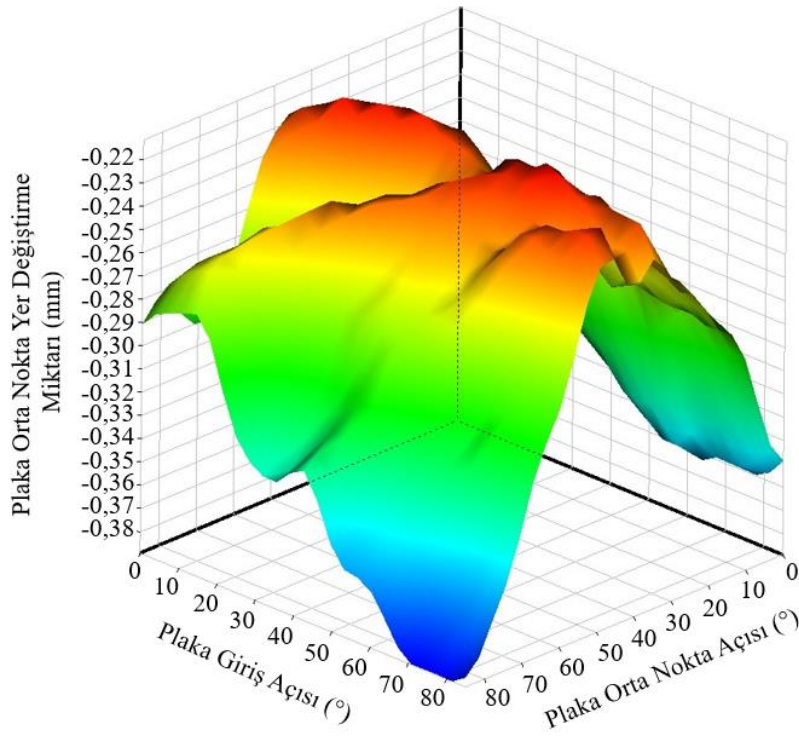
Yapılan iyileştirme çalışmalarında, DK kompozit plakalarda, plaka giriş serim açısı θ_1 ve plakanın orta noktasındaki serim açısı θ_0 değişken değerler olarak kullanılmışlardır. Değişken değerlerin alt sınır değeri olarak 0° ve üst sınır değeri olarak 85° belirlenmiştir. Yapılan darbe analizi iyileştirme çalışmasının akış diyagramı EK-4 içerisinde verilmiştir.

Yapılan iyileştirme çalışmalarında, toplam hesaplama süresi göz önüne alınarak, iyileştirme çalışmasında kullanılacak cevap yüzeylerinde oluşan mutlak maksimum hata miktarının azaltılabilmesi, kullanılan örnekleme sayıları ile çalışma yapılmıştır. Aşağıda verilen çizelgede örnekleme sayısına bağlı maksimum hata miktarı değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 7.5. Örnekleme Sayısına Bağlı Maksimum Hata Miktarı

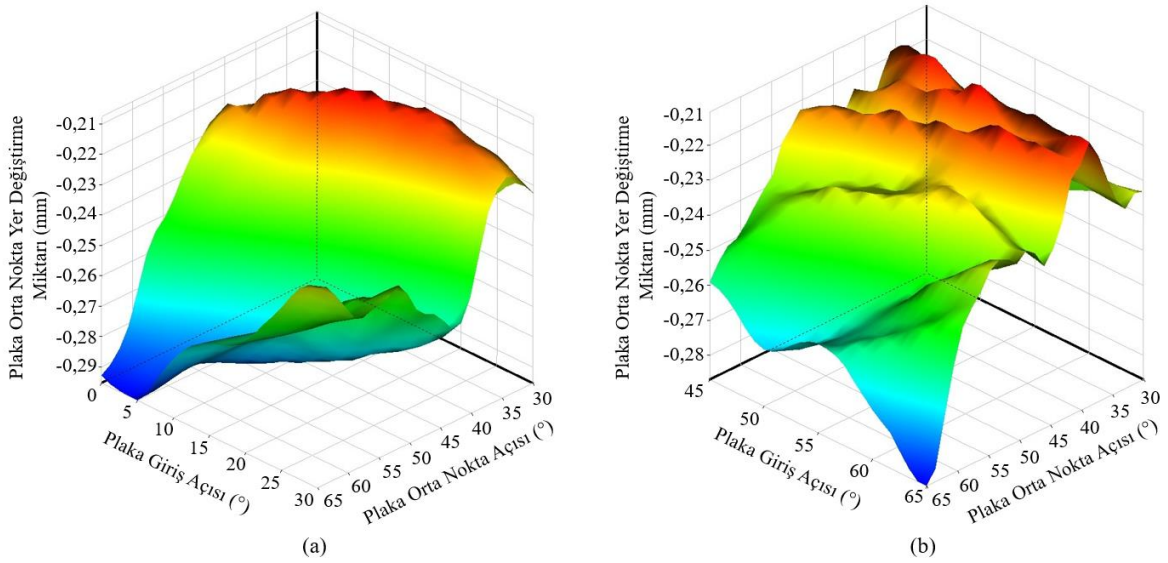
	100 Örnek	150 Örnek	200 Örnek	250 Örnek
Maksimum Hata Miktarı (%)	25,83	16,52	15,26	9,77

Maksimum hata miktarının 250 örnek kullanıldığı zaman %10'nun altına düştüğü görülmüştür. Aşağıda verilen Şekil 7.12 içerisinde 250 örnek kullanılarak plakanın orta noktasındaki yer değişime miktarı için oluşturulmuş olan cevap yüzeyi gösterilmektedir. Oluşan cevap yüzeyi incelendiğinde θ_0 değişken açısı için 30° - 65° aralığında orta nokta yer değiştirme değerini minimum yaptığı görülürken, θ_1 değişkeninin 0° - 30° ve 45° - 65° değer aralıklarında maksimum orta nokta yer değiştirme değeri minimum olmaktadır. Oluşan mutlak maksimum hata yüzde değerini azaltabilmek için bahsedilen değer aralıklarını kullanarak lokal bölge aramaları yapılmıştır.



Şekil 7.12. 250 Örnek Kullanılarak Orta Nokta Yer Değiştirme Miktarı İçin Oluşturulmuş Olan Cevap Yüzeyi

Şekil içerisinde yukarıda anlatılan lokal bölge aramaları için oluşan cevap yüzeyleri gösterilmiştir. Her iki lokal bölge aramasında da θ_0 değişkeninin sınır değerleri 30° - 65° olarak kullanılmıştır. θ_1 değişkeninin 0° - 30° sınır koşulu için oluşan cevap yüzeyinin maksimum mutlak hata yüzdesi %2,43 iken, 45° - 65° sınır koşulu için %2,84'dir.



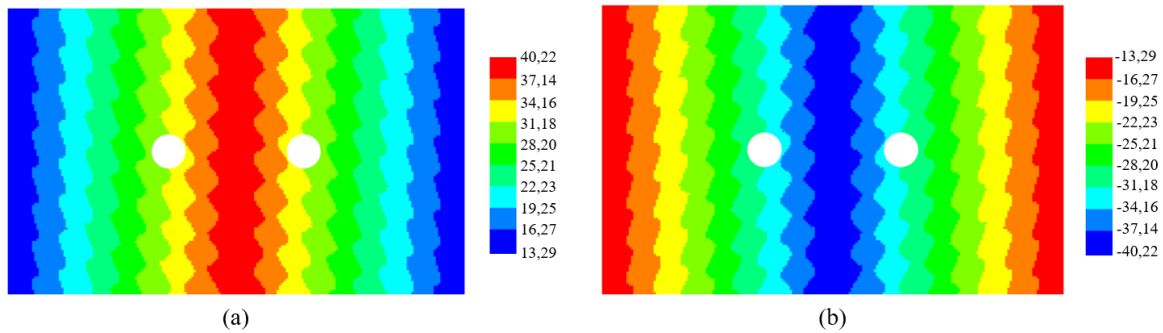
Şekil 7.13. Lokal Bölge Aramaları İçin Oluşan Cevap Yüzeyleri a) θ_1 Değişkeni 0° - 30° Sınır Koşulu İçin b) θ_1 Değişkeni 45° - 65° Sınır Koşulu İçin

İyileştirme çalışmasının sonucunda $[0 \pm (40,22/13,28)]_{4s}$ serim açısına sahip DK kompozit plakanın, belirlenen darbe yükü altında merkezinin maksimum 0,207 mm yer değiştirdiği bulunmuştur. Aşağıda verilen çizelge içerisinde DK ve SK sahip plakaların aynı darbe yükü altındaki merkezlerinin maksimum yer değiştirme miktarları gösterilmiştir. Plakaların merkezlerindeki maksimum yer değiştirme miktarının elde edilen iyileştirilmiş serim açılı DK katırlıklı kompozitte, SK sahip SYİ plakaya göre %17,5 daha az olduğu görülmüştür.

Çizelge 7.6. DK ve SK Sahip Plakaların Merkezlerinin Maksimum Yer Değiştirme Miktarları

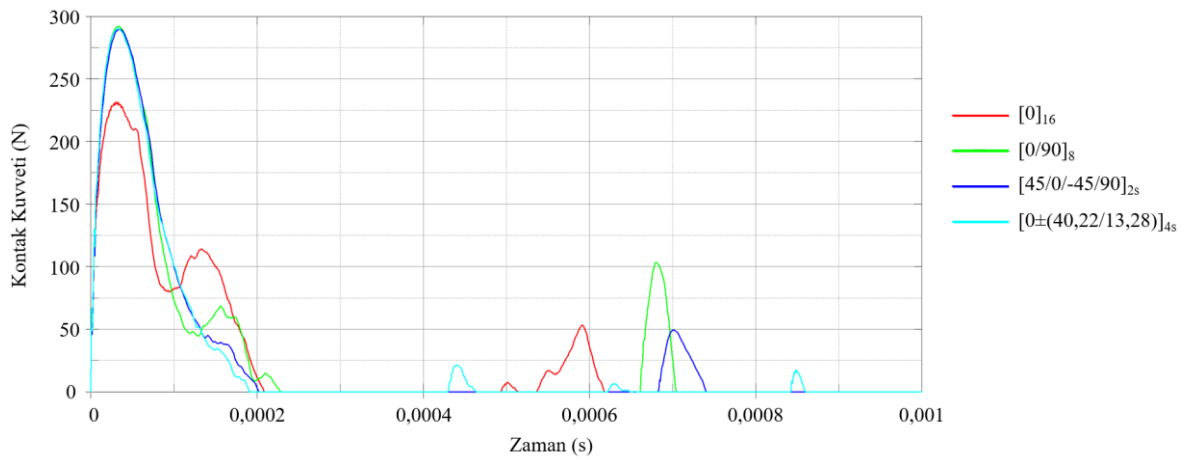
Serim Açıları	Plaka Merkezi Maksimum Yer Değiştirme Miktarı (mm)	SYİ Serilime Göre Fark
$[0]_{16}$	0,317	% 26.3
Çapraz Serilimli Plaka: $[0/90]_8$	0,265	% 5.6
SYİ Plaka: $[45/0/-45/90]_{2s}$	0,251	% 0
DK Sahip Plaka: $[0 \pm (30/10)]_{4s}$	0,278	% 10.8
DK Sahip Plaka: $[0 \pm (45/0)]_{4s}$	0,230	% -8.4
DK Sahip İyileştirilmiş Serim Açısına Sahip Plaka: $[0 \pm (40,22/13,28)]_{4s}$	0,207	% -17.5

Şekil içerisinde Python kodundan elde edilen pozitif ve negatif iyileştirilmiş plaka serim açılarının sonlu elemanlar modülüne işlenmiş hali aşağıda gösterilmektedir.



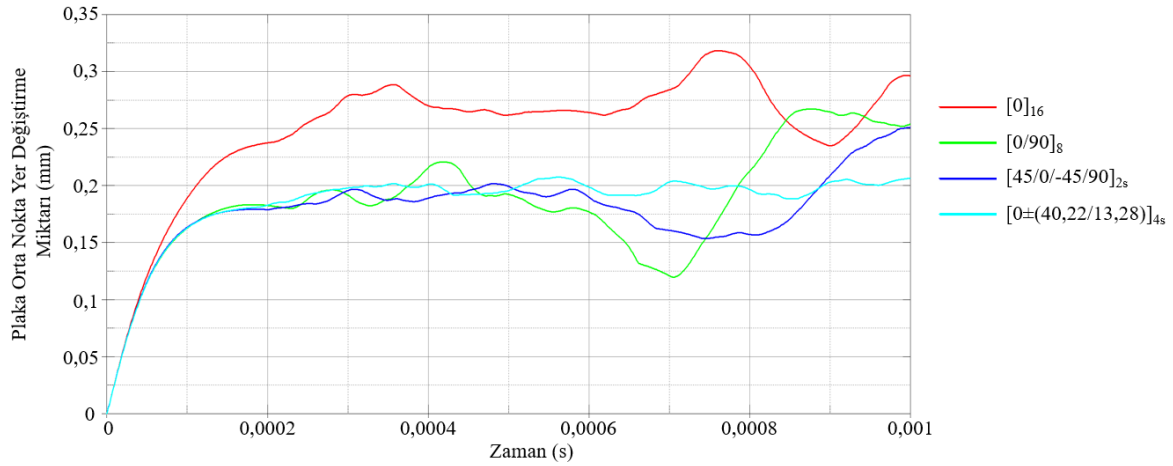
Şekil 7.14. Düşük Hızlı Darbe Analizi Çalışması İçin İyileştirilmiş Serim Açıları a) Pozitif Serim Açısı b) Negatif Serim Açısı

Şekil 7.15 içerisinde SK ve DK sahip delikli plakaların düşük hızlı darbe analizi sonucunda elde edilen kontak kuvvetinin zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde ilk kontak anında oluşan maksimum kontak kuvveti, $[0]_{16}$ serilimi hariç geri kalan bütün plakalarda çok yakındır. Zamanın ilerleyen anlarında, DK sahip plakada meydana gelen kontak kuvveti değerlerinin, SK sahip plakalardaki maksimum kontak kuvvetlerine göre çok küçük olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin olarak plaka merkezi yerdeğiştirme hareketinin DK sahip plakada daha az olmasından dolayı kontak yüzeylerinin girişim miktarının azalması olduğu düşünülmektedir.



Şekil 7.15. SK ve DK Sahip Delikli Plakaların Darbe Analizi ile Edilen Kontak Kuvvetinin Zamana Bağlı Değişimi

SK sahip delikli plakaların orta nokta yer değiştirmesi ile DK sahip plakaların orta nokta yer değiştirmesinin karşılaştırması aşağıda verilen şekil içerisinde verilmektedir. Şekil incelendiğinde 0,0002 saniyeden daha düşük zaman aralığında $[0]_{16}$ serilimi hariç geri kalan bütün serilimlerde çok yakın yer değiştirme hareketi görülmektedir. 0,0002 saniyeden daha büyük zaman aralıklarında SK sahip plakaların orta noktalarında dalgalanma hareketleri görülmektedir. En yüksek yer değiştirme hareketi $[0]_{16}$ serilimine sahip plakada görülmektedir. DK sahip kompozit plakanın orta noktası 0,0002 saniyeden, SK sahip plakaların orta noktasının yer değiştirmelerine göre çok daha az dalgalanma hareketi göstermektedir. DK sahip kompozitlerde, plaka üzerindeki hareketlerin lokal bölgelerin katılık değerleri değiştirilmesine bağlı olarak hem yük akışı düzenlenmektedir hemde istenilen konumlarda yer değiştirme azaltılabilmektedir.



Şekil 7.16. SK ve DK Sahip Delikli Plakaların Darbe Analizi ile Edilen Orta Noktanın Yer Değiştirme Miktarının Zamana Bağlı Değişimi

7.2.2. Düşük hızlı darbe etkisi altındaki DK sahip delikli plakalarda delik boyutunun dinamik davranış üzerindeki etkileri

Delik çapı değişiminin darbe etkisi altındaki DK sahip plakalar üzerinde oluşturacağı etkilerinin anlaşılabilmesi için bölüm başında anlatılan dört farklı değişik çap durumu için darbe analizleri yapıp, iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Bütün analizlerde Bölüm 7.2.1 içerisinde anlatılan çarpan cisim özellikleri kullanılmış olup yine çarpan cisim hızı 3 m/s'dir. İyileştirme çalışmalarında plakaların orta noktalarındaki yer değiştirme hareketinin minimum olması hedeflenmiştir.

EK-5 içerisinde değişik delik çaplarına sahip plakaların darbe yükü altındaki orta nokta yer değiştirmesine ait cevap yüzeyleri gösterilmiştir. Plakalarda kullanılan sınır koşulları ve değişkenler Bölüm 7.2.1 ile aynıdır. Herbir plakanın iyileştirme çalışmasında 250 örnekleme kullanılmıştır. Bir önceki bölümde anlatıldığı üzere 1D delik çapına sahip plaka için elde edilen mutlak maksimum hata değeri %9,77'dir. Bu bölüm içerisinde analizleri yapılan 2D, 3D ve 4D delik çapı durumları için elde edilen mutlak maksimum hata yüzdeleri sırasıyla %2,96, %5,43 ve %3,96'dır.

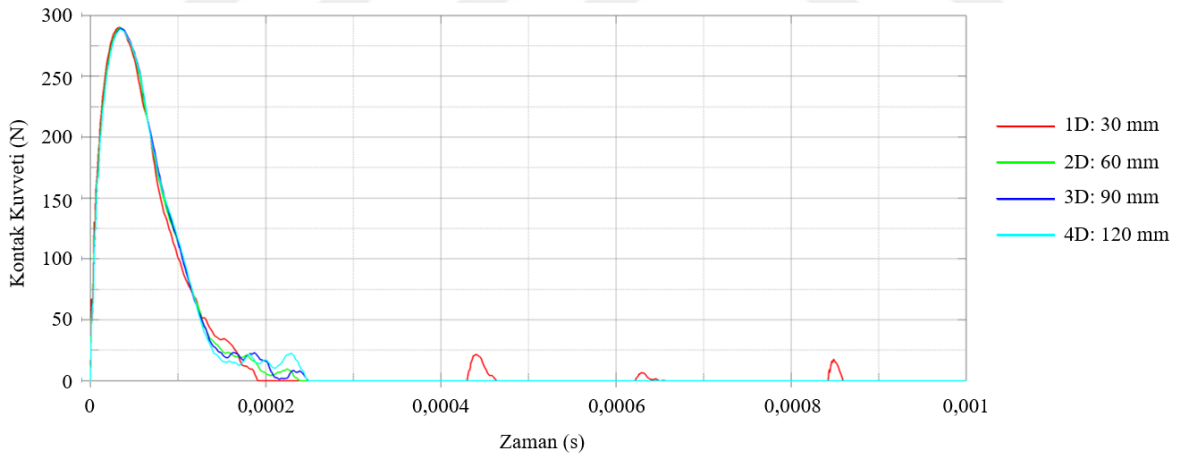
Aşağıda verilen çizelge içerisinde değişik delik çaplarına ait iyileştirme çalışması sonucunda bulunan minimum yer değiştirme miktarlarını ve serilim açıları gösterilmiştir. Çizelge içerisinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde, delik boyutu dört katına çıkarıldığında orta nokta maksimum yer değiştirme miktarı yaklaşık %34 oranında artmaktadır. Delik çapı

arttıkça plakanın genel katılık değerinin düşmesine bağlı olarak, plaka orta nokta yer değiştirme değerleri artmaktadır.

Çizelge 7.7. DK Sahip Delikli Plakaların Darbe Yüğü Altındaki Orta Nokta Maksimum Yer Değiştirme Miktarı

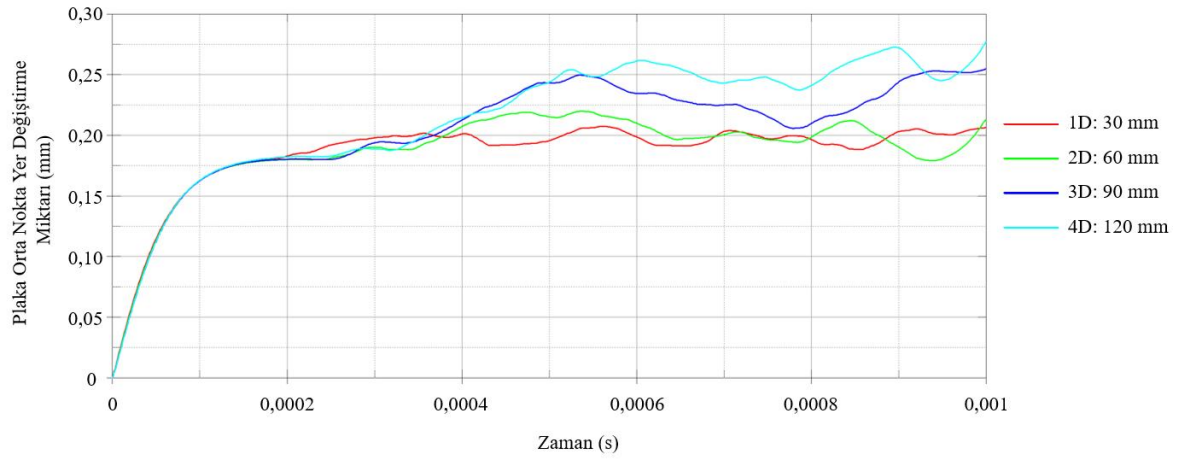
	Plaka Orta Nokta Maksimum Yer Değiştirme Miktarı (mm)	İyileştirilmiş Serim Açısı
1D Delik Çapı	0,207	$[0 \pm (40,22/13,28)]_{4s}$
2D Delik Çapı	0,219	$[0 \pm (49,48/40,78)]_{4s}$
3D Delik Çapı	0,255	$[0 \pm (44,92/67,90)]_{4s}$
4D Delik Çapı	0,277	$[0 \pm (49,60/41,96)]_{4s}$

Delik çapının boyutuna bağlı kontak kuvvetlerinin zaman bağlı değişimi Şekil 7.17 içerisinde gösterilmiştir. Oluşan maksimum kontak kuvvetleri bütün plaka durumları için yaklaşık 290 N olup, 0,000033 saniyesinde oluşmaktadır. 0,00025 anından sonra birinci duruma sahip plaka dışında diğer plakalarda oluşan kontak kuvveti oluşmamaktadır.



Şekil 7.17. DK Sahip Delikli Plakaların Darbe Yüğü Altında Oluşan Kontak Kuvvetleri

Delikli plakaların zamana bağlı orta nokta yer değişimleri Şekil 7.18 içerisinde gösterilmiştir. Delik çapı boyutları büyüdükçe plakaların merkezlerindeki yer değiştirme değerleri artmaktadır. Plaka üzerindeki deliklerin büyümesiyle daha yumuşak bir plaka elde edilmektedir. Bu sebeple orta nokta yer değiştirme miktarları artmıştır.



Şekil 7.18. DK Sahip Delikli Plakaların Darbe Yüğü Altındaki Zamana Bağlı Orta Nokta Yer Değiştirme Miktarı



8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, DK sahip delikli kompozit plakaların modal karakteristikleri ve düşük hızlı darbe yükü altındaki dinamik davranışları incelenmiştir. Oluşturulan DK sahip delikli plakalar ile SK sahip delikli plakaların sonuçları karşılaştırıldıktan sonra delik boyutunun değişiminin sonuçlara olan etkisi incelenmiştir.

DK sahip plakaların modellenebilmesi için kompozit malzemelerin içerisinde kullanılan elyaf malzemeler eğrisel serilimli olarak modellenmiştir. Eğrisel serilimli elyaf malzemelerin konuma bağlı serim açılarının bilgilerinin oluşturulabilmesi için Python programlama dili kullanılarak algoritma geliştirilmiştir. Oluşturulan kodun malzeme modeline işlenebilmesi için Ansys ACP modülü kullanılmıştır. Doğrulama çalışmalarının ve delikli plakalar ile yapılan karşılaştırma çalışmalarının sonucunda aşağıdaki bilgilere ulaşılmıştır:

Doğrulama Çalışmasında Elde Edilen Sonuçlar:

- DK sahip plakaların modal analiz sonuçlarının doğrulanması amacıyla referans verilen çalışmanın sonuçları ile tezde anlatılan yöntem ile elde edilen sonuçların karşılaştırmaları yapılmıştır. İki farklı sınır koşulları altında analiz çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen modların frekans değerleri ile makalede verilen frekans değerleri arasında %1'den daha küçük sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Ortaya çıkan mod şekillerinin, referansta verilen şekiller ile uyumlu olduğu görülmüştür.
- Darbe analizlerinin doğrulanması için ilk önce izotropik plakaya çarpma analizinin simülasyonu yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda elde edilen kontak kuvvetinin zamana bağlı değişim grafiği ile referans makalelerde verilen grafik karşılaştırıldığında, literatürdeki çalışma ile analiz sonucu elde edilen maksimum kontak kuvveti değeri arasında yaklaşık %0,9 oranında fark olduğu görülmüştür.
- Kompozit plakaların darbe analizlerinin doğrulanabilmesi amacıyla referans çalışmalarla karşılaştırılma çalışması yapılmıştır. SK sahip kompozit plakanın çarpma analizinin sonucu olarak ortaya çıkan kontak kuvveti – zaman grafiği ile referanslar içerisinde verilen grafikler ile karşılaştırıldığında, maksimum kontak kuvveti değerleri arasında yaklaşık %3,5 oranında fark olduğu görülmüştür. Plaka merkezi yer değiştirme

- zaman grafiğinin, referanslarda verilen grafiklerle karşılaştırıldığında maksimum yer değiştirme değerleri arasında yaklaşık %10'luk fark olduğu görülmüştür.
- DK sahip kompozit plakanın çarpma analizinin doğrulanması amacıyla son yıllarda yapılmış olan bir referans çalışma ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda elde edilen plaka merkezinin yer değiştirmesinin zamana bağlı değişim grafiği ile referansda verilen grafik incelenmiş ve maksimum yer değiştirme değerleri arasında %1 fark olduğu görülmüştür. Analiz sonucu oluşa enerji grafiği incelendiğinde elemanların bozulma enerjisinin, toplam iç enerjinin %10'undan daha küçük olduğu görülmüştür.

Delikli Kompozit Plakalar ile Yapılan Çalışmalar Sonucu Elde Edilen Sonuçlar:

- Aynı delik boyutuna sahip DK ve SK sahip plakaların modal karakteristikleri için iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan iyileştirme çalışmalarının sonucunda ortaya çıkan sonuçlar ile düz serilimli, çapraz serilimli ve SYİ serilimli plakaların sonuçları karşılaştırılmıştır. SK sahip iyileştirilmiş serilimli kompozit plakanın birinci mod frekans değerinin, düz, çapraz ve SYİ serilimli plakalardan daha yüksek olduğu görülmüştür. SK sahip plakalar içerisinde, ikinci mod frekans değeri için SYİ serilimli plakanın en yüksek değeri verdiği görülmüştür. DK sahip plakanın iyileştirilmiş serilim açısına sahip SK sahip plakalardan %1,5 oranında daha yüksek birinci mod frekans değeri elde edilirken aynı zamanda ikinci mod frekans değerinde SYİ serilime sahip SK sahip plakalardan %0.2 daha yüksek değerin elde edildiği görülmüştür. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, farklı serilimlere sahip SK plakalardaki frekans değerleri ile serilimi değiştirilmeyen DK kompozit sonuçları karşılaştırılmaktadır. Bu sayede iki farklı serilime sahip SK sahip kompozitin sahip olduğu avantajlar, tek bir serilime DK sahip kompozit plakada elde edilmiştir.
- Delik boyutunun DK sahip plakalar üzerinde etkilerinin görülebilmesi için, değişik delik çapı boyutları için modal analiz çalışmaları yapılmıştır. Delik çapı büyüdükçe efektif kütle kaybına bağlı olarak birinci ve ikinci mod frekans değerlerinin arttığı görülmüştür.
- Aynı plaka ve delik ölçülerine sahip DK ve SK sahip plakaların düşük hızlı darbe yükü altındaki dinamik davranışlarının karşılaştırılmaları yapılmıştır. DK sahip plakalar için iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen iyileştirilmiş serilim açısına sahip DK

sahip kompozit plakanın merkezinin maksimum yer değiştirme miktarının, SYİ serilimli plakalara göre %17,5 oranında daha az olduğu görülmüştür.

- Delik boyutunun DK sahip kompozit plakaların düşük hızlı darbe yükü altındaki dinamik davranışına etkilerinin görülebilmesi için, değişik delik çaplarına sahip DK kompozit plakaların darbe analizleri yapılmıştır. Plakalardaki delik çapı değişiminin maksimum kontak kuvveti üzerine etkisi çok küçük olduğu görülmüştür. Plakalarda meydana gelen katılık kaybına bağlı olarak delik çapı büyüdükçe plaka merkezinde oluşan maksimum yer değiştirme miktarı artmaktadır. Plaka delik çapı dört katına çıkarıldığında, plaka merkezi yer değiştirme miktarı %34 oranında artmaktadır.

Kompozit plakalardaki hasar durumu incelemelerinin gelecek çalışmalarda yapılabilereği değerlendirilmiştir ve yapılabilerecek üç boyutlu modellemeler ile her bir katmanın yer değiştirme karşılaştırmasının yapılabilereği önerilmiştir. Uygun ortam ve maliyet kriterleri sağlandığında, test ile doğrulamanın gelecek çalışmalarda yapılabilereği önerilmiştir.



KAYNAKLAR

1. Jones R. M. (1999). *Mechanics of Composite Materials* (2.Baskı). CRC Press. 1-90.
2. Herakovich. C. T. (1997). *Mechanics of Fibrous Composites* (1.Baskı). New York: John Wiley and Sons Inc., 1-96.
3. Rana S. and Fanguiero R. (2016). *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering* (1.Baskı). Woodhead Publishing, 1–15.
4. Biggers S, Fageau S. (1994). Shear Buckling Response of Tailored Rectangular Composite Plates. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*. 32(5), 3-1100.
5. Nagaraj M. H., Carrera E., Petrolo M. (2020). Progressive Damage Analysis of Composite Laminates Subjected to Low-Velocity Impact Using 2D Layer-Wise Structural Models. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 127(1).
6. Karas K. (1939). Platten Unter Seitlichem Stoss. *Ingenieur Archiv*. 250-237.
7. Dobyns AL. (1939). Analysis of Simply-Supported Orthotropic Plates Subject to Static and Dynamic Loads. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*. 19(5), 642–50.
8. Tan T. M., Sun C. T. (1985). Use of Statical Indentation Laws in the Impact Analysis of Laminated Composite Plates. *Journal of Applied Mechanics*. 52 (1), 6-12.
9. Sun C., Chen J. (1985). On The Impact of Initially Stressed Composite Laminates. *Journal of Composite Materials*. 19(6), 504-490.
10. Wu H. Y., Chang F. K. (1989). Transient Dynamic Analysis of Laminated Composite Plates Subjected to Transverse Impact. *Computers & Structures*. 31(3), 66-453.
11. Cairns D. S., Lagace P. A. (1989). Transient Response of Graphite/Epoxy and Kevlar/Epoxy Laminates Subjected to Impact. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*. 27(11), 6-1590.
12. Christoforou A., Swanson S. (1991). Analysis of Impact Response in Composite Plates. *International Journal of Solids and Structures*. 27(2), 70-161.
13. Hyer M., Lee H. (1991). The Use of Curvilinear Fiber Format to Improve Buckling Resistance of Composite Plates With Central Circular Holes. *Composite Structure*. 18, 261-239.
14. Gurdal Z., Olmedo R. (1993). In-Plane Response of Laminates with Spatially Varying Fiber Orientations- Variable Stiffness Concept. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*. 31(4), 8-751.

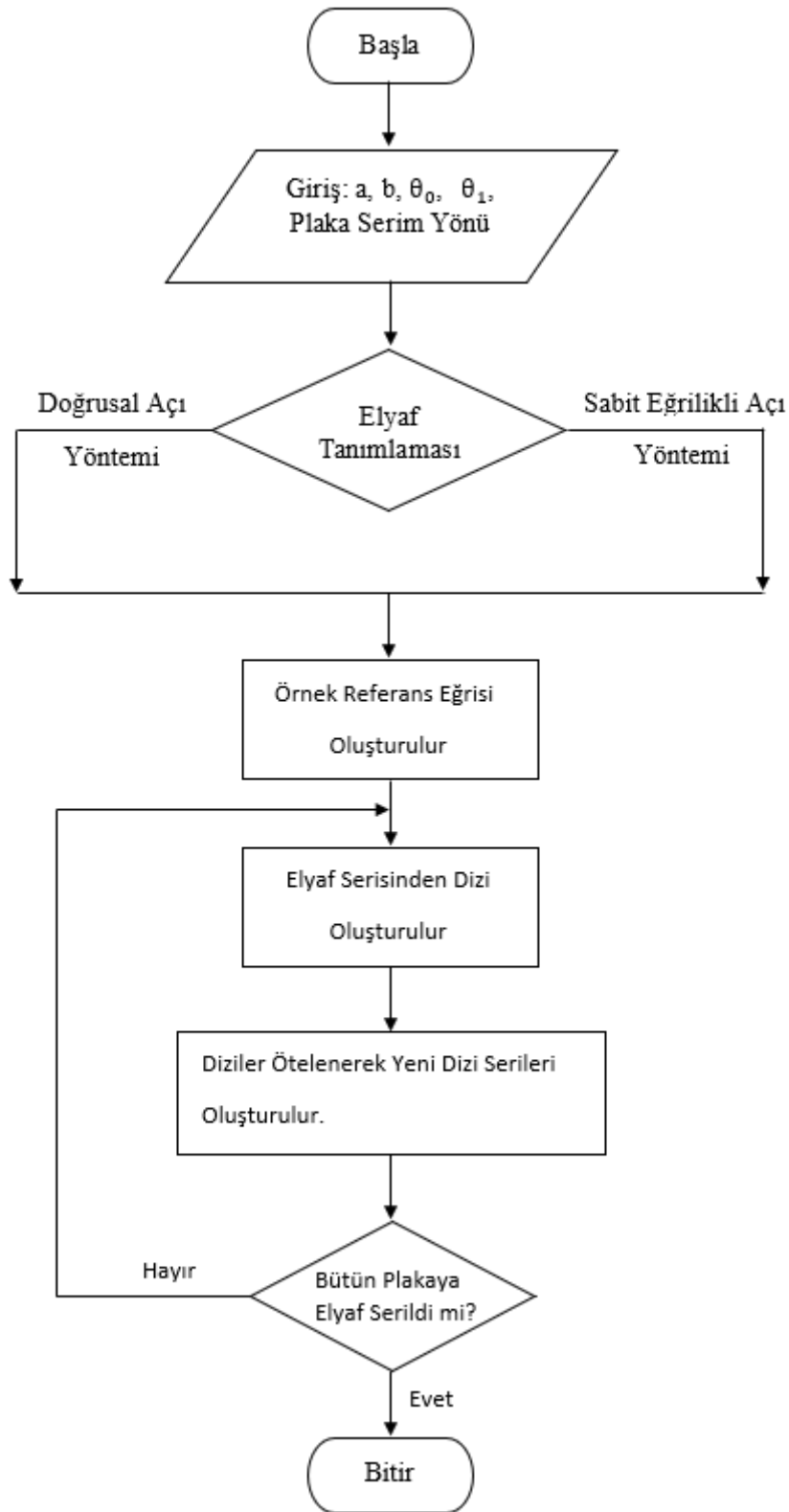
15. Carvalho A., Soares C. (1996). Dynamic Response of Rectangular Plates of Composite Materials Subjected to Impact Loads. *Composite Structure*. 34(1), 55–63.
16. Pierson M. O., Vaziri R. (1996). Analytical Solution For Low-Velocity Impact Response of Composite Plates. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*. 34(8), 40-1633.
17. Goo N., Kim S. (1997). Dynamic Contact Analysis of Laminated Composite Plates Under Low- Velocity Impact. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*. 35(9), 1518–21.
18. Chun L., Lam K. Y. (1998). Dynamic Response of Fully-Clamped Laminated Composite Plates Subjected to Low-Velocity Impact of A Mass. *International Journal of Solids and Structures*. 35(11), 963-979.
19. Luo R. K. (2000). The Evaluation of Impact Damage in a Composite Plate with a Hole. *Composites Science and Technology*, 49-58
20. Parnas L., Oral S., Ceyhan Ü. (2003). Optimum Design of Composite Structures with Curved Fiber Courses. *Composites Science and Technology*. 63(7), 1071–1082
21. Markopoulos Y, Kostopoulos V. (2003) On the Low Velocity Impact Response of Laminated Composite Plates Using The P-Version Ritz Method. *Advanced Composites Letters*. 12(5).
22. Her S. C., Liang Y. C. (2004). The Finite Element Analysis of Composite Laminates and Shell Structures Subjected to Low Velocity Impact. *Composite Structures*. 66, 277–285.
23. Choi I. (2006). Contact Force History Analysis of Composite Sandwich Plates Subjected to Low-Velocity Impact. *Composite Structure*. 75(4), 6-582.
24. Abdalla M. M., Setoodeh S., Gürdal Z. (2006). Design of Variable Stiffness Composite Panels for Maximum Fundamental Frequency Using Lamination Parameters. *Composite Structures*. 81, 283–291.
25. Gürdal Z., Tatting B., Wu C. (2008). Variable Stiffness Composite Panels: Effects of Stiffness Variation on The In-Plane and Buckling Response. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 39(5), 22-911.
26. Mishra A., Naik N.K. (2009). Failure Initiation in Composite Structures Under Low-Velocity Impact: Analytical Studies. *Composite Structures*. 92, 436–444.
27. Khalili S., Soroush M., Davar A., Rahmani O. (2011). Finite Element Modeling of Low-Velocity Impact on Laminated Composite Plates and Cylindrical Shells. *Composite Structure*. 93(5), 75-1363.
28. Ribeiro P., Akhavan H. (2012). Non-Linear Vibrations of Variable Stiffness Composite Laminated Plates. *Composite Structures*. 94, 2424–2432.

29. Wang S., Zhang X., Zhang Y., Zhang C. (2013). Geometrically Non-Linear Analysis of Composite Laminated Plates Subjected to Low-Velocity Impact. *International Journal of Composite Materials*. 3, 23–9.
30. Amaro A.M., Reis P.N.B., Moura M.F.S.F., Neto M.A. (2013). Influence of Open Holes on Composites Delamination Induced by Low Velocity Impact Load. *Composite Structure*. 97, 239–244.
31. Yazdani S., Ribeiro P. (2014). Modes of Vibration of Unsymmetric Multilayered Composite Plates with Curvilinear Fibres. *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics*.
32. Teter A., Ribeiro P., Akhavan H., Warminski J.. (2014). A Review on the Mechanical Behavior of Curvilinear Fibre Composite Laminated Panels. *Journal of Composite Materials*. 48(22), 2761–2777.
33. Hadi N. H., Khaleel H. H. (2015). The Low-Velocity Impact Response of Laminated Composite Plates with Holes. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*. 2(4).
34. Ahmed A., Wei L. (2015). The Low-Velocity Impact Damage Resistance of the Composite Structures – A Review. *Review on Advanced Material Science*. 40(2), 127–45.
35. Choi I. (2016). Geometrically Nonlinear Transient Analysis of Composite Laminated Plate and Shells Subjected to Low-Velocity Impact. *Composite Structure*. 142, 7–14.
36. Gonzalez C. R., Trujillo E. J., Chavez F., Ruiz A. (2016). Low Velocity Impact Response of Composites and Fiber Metal Laminates with Open Holes. *Journal of Composite Materials*. 51(6), 797-810
37. Santos R.A.M., Reis P.N.B., Santos M.J., Coelho C.A.C.P. (2017). Effect of Distance Between Impact Point and Hole Position on the Impact Fatigue Strength of Composite Laminates. *Composite Structures*. 168, 33–39.
38. Bogenfeld R., Kreikemeier J., Wille T. (2018). Review and Benchmark Study on the Analysis of Low-Velocity Impact on Composite Laminates. *Engineering Failure Analysis*. 86, 72–99.
39. Ahmad F., Abbassi F., Park M. K., Jung J. W., Hong J. W. (2019). Finite Element Analysis For The Evaluation of The Low-Velocity Impact Response of a Composite Plate. *Advanced Composite Materials*. 28(3), 271–85
40. 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.
41. Milazzo A., Benedetti I. (2021). A Non-Linear Ritz Method for The Analysis of Low Velocity Impact Induced Dynamics in Variable Angle Tow Composite Laminates. *Composite Structures*. 276.

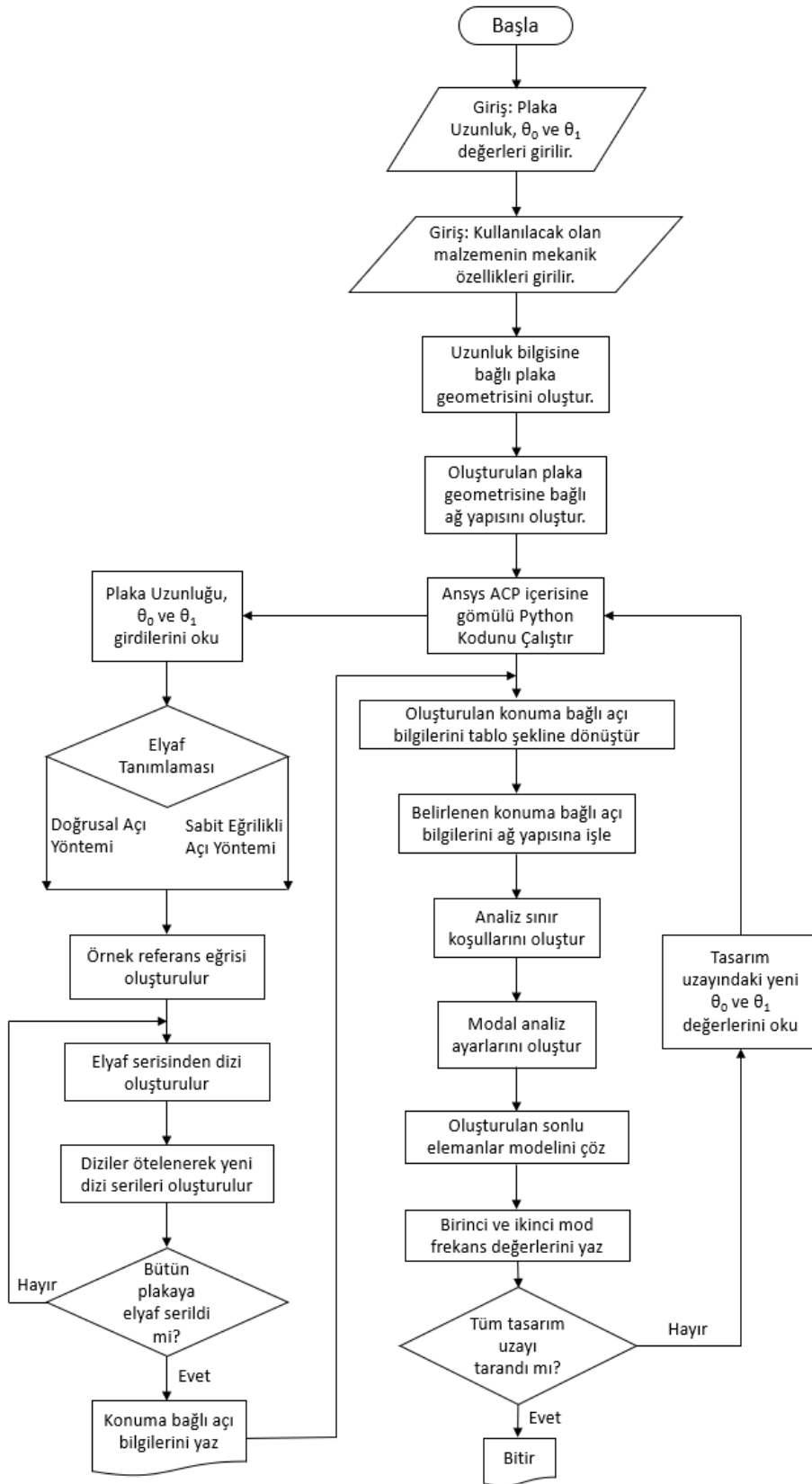
42. Liu L., Hu D., Wan D., Hu X., Han X. (2021). Low Velocity Impact Behavior and Simulation of Parametric Effect Analysis for UHMWPE/LLDPE Thermoplastic Composite Laminates. *Composite Structures*. 258.
43. Coşkun O., Türkmen H. S. (2022). Multi-Objective Optimization of Variable Stiffness Laminated Plates Modeled Using Bezier Curves. *Composite Structures*. 279.
44. Safri S.N.A., Sultan M.T.H., Yidris N., Mustapha F. (2014). Low Velocity and High Velocity Impact Test on Composite Materials – A review. *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*. 3, 50-60.
45. Rider K. A. (2012). *The Effect of a Low-Velocity Impact on The Flexural Strength and Dynamic Response of Composite Sandwiches With Damage Arrestment Devices*. Master of Science, The Faculty of California Polytechnic State University, California, 1-45.
46. Owen E. (2020). Webinar: LS-DYNA Introduction to Contacts. Oasys Limited.
47. Ijsselmuiden S. T. (2011). *Optimal Design of Variable Stiffness Composite Structures Using Lamination Parameters*. Doctor of Philosophy, Delft University of Technology. 1-74
48. Campbell F.C. (2010). Introduction to Composite Materials. *Structural Composite Materials*. ASM International
49. Barbosa L. M. (2014). *Design Optimization of Variable Stiffness Bi-Stable Composites using Curvilinear Fibers*. Master of Science, University of Lisbon. 1-40.
50. Arranz S., Sohoulı A., Suleman A. (2021). Buckling Optimization of Variable Stiffness Composite Panels for Curvilinear Fibers and Grid Stiffeners. *Journal of Composites Science*. 324.
51. 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.
52. Reddy J. N. (2004). *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells Theory and Analysis* (2.Baskı). CRC Press.109-161.
53. Livermore Software Technology Corporation. (2017). LS-DYNA R10 Theory Manual.
54. Yang S. H., Sun C. T. (1981). Indentation Law for Composite Materials. *Purdue University School of Aeronautics and Astronautics*.
55. Li D., Liu Y., Zhang X. (2014). Low-Velocity Impact Responses of the Stiffened Composite Laminated Plates Based on the Progressive Failure Model and the Layerwise/Solid- Elements Method. *Composite Structure*. 110, 249-275.



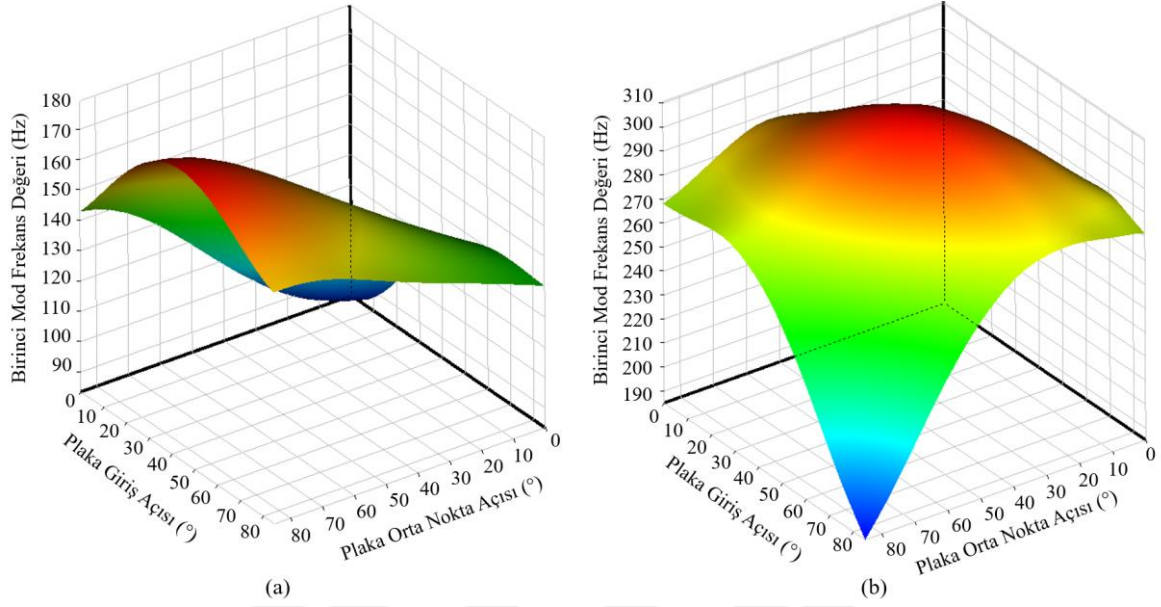
EK-1. Python kodunun akış diyagramı



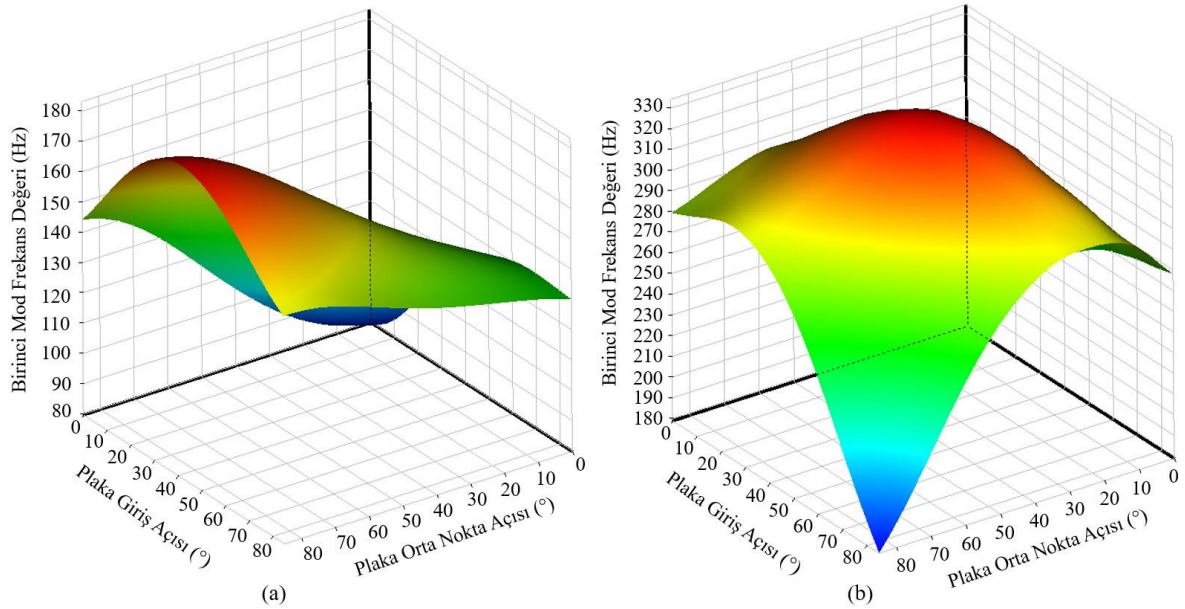
EK-2. Yapılan modal analiz iyileştirme çalışmasının akış diyagramı



EK-3. Değişik delik çapı boyutlarına sahip plakaların doğal frekanslarına ait BMFD ve İMFD için oluşan cevap yüzeyleri.

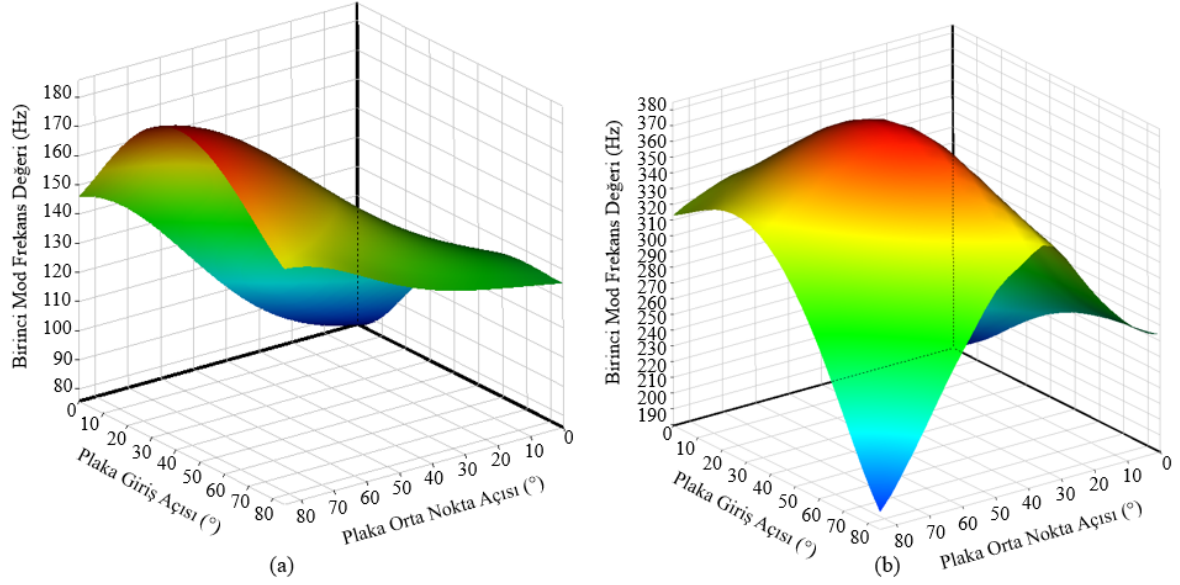


Şekil E3.1: 2D Delik Boyutuna Sahip DK Delikli Plakanın İyileştirme Çalışmasında Elde Edilen Cevap Yüzeyleri a) BMFD İçin b) İMFD İçin



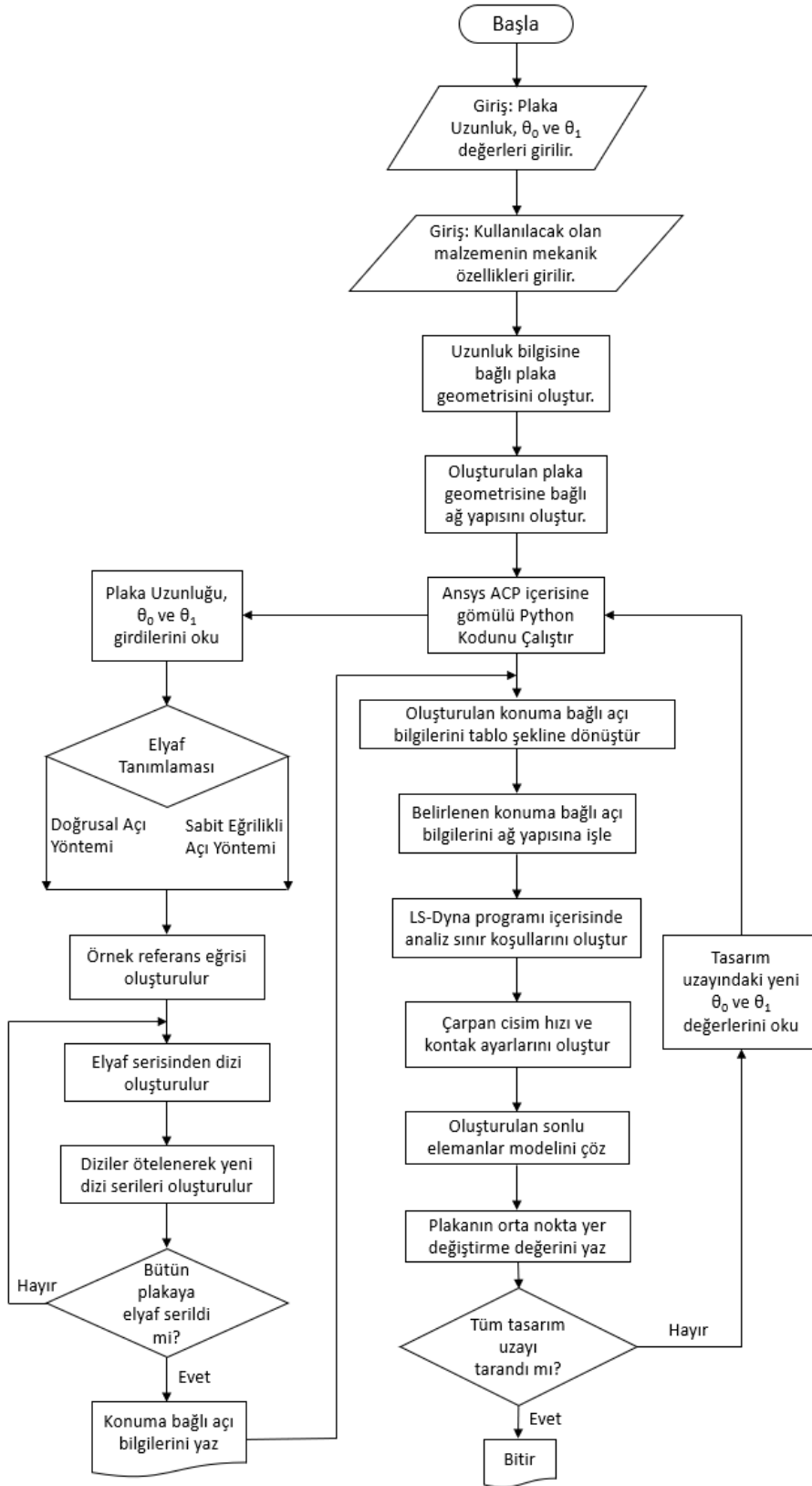
Şekil E3.2: 3D Delik Boyutuna Sahip DK Delikli Plakanın İyileştirme Çalışmasında Elde Edilen Cevap Yüzeyleri a) BMFD İçin b) İMFD İçin

EK-3. (devam) Değişik delik çapı boyutlarına sahip plakaların doğal frekanslarına ait BMFD ve İMFD için oluşan cevap yüzeyleri.

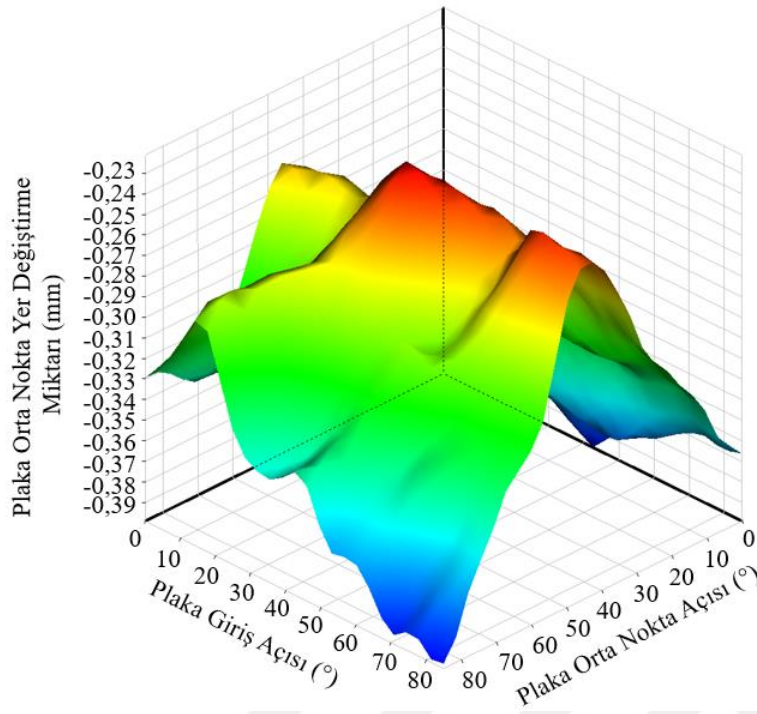


Şekil E3.3: 4D Delik Boyutuna Sahip DK Delikli Plakanın İyileştirme Çalışmasında Elde Edilen Cevap Yüzeyleri a) BMFD İçin b) İMFD İçin

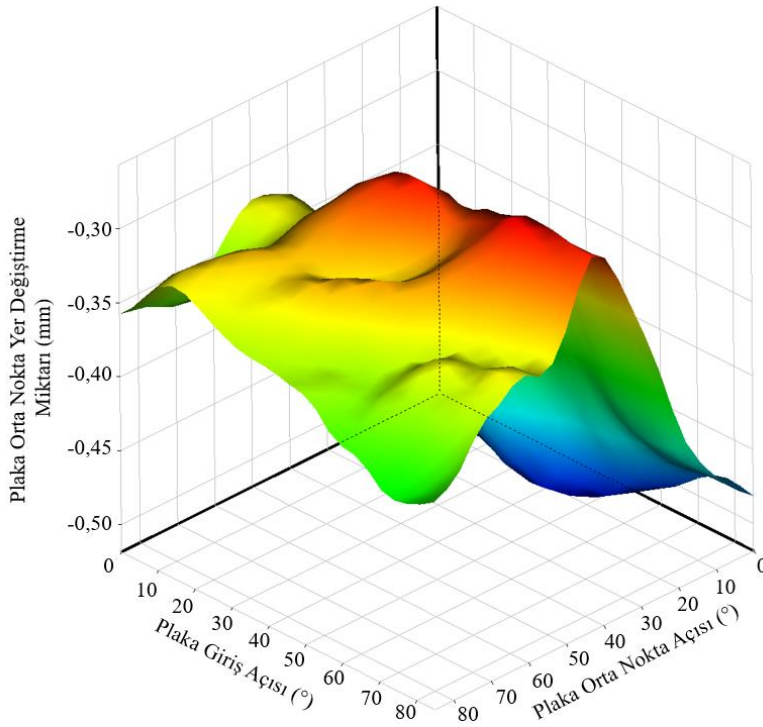
EK-4. Yapılan darbe analizi iyileştirme çalışmasının akış diyagramı



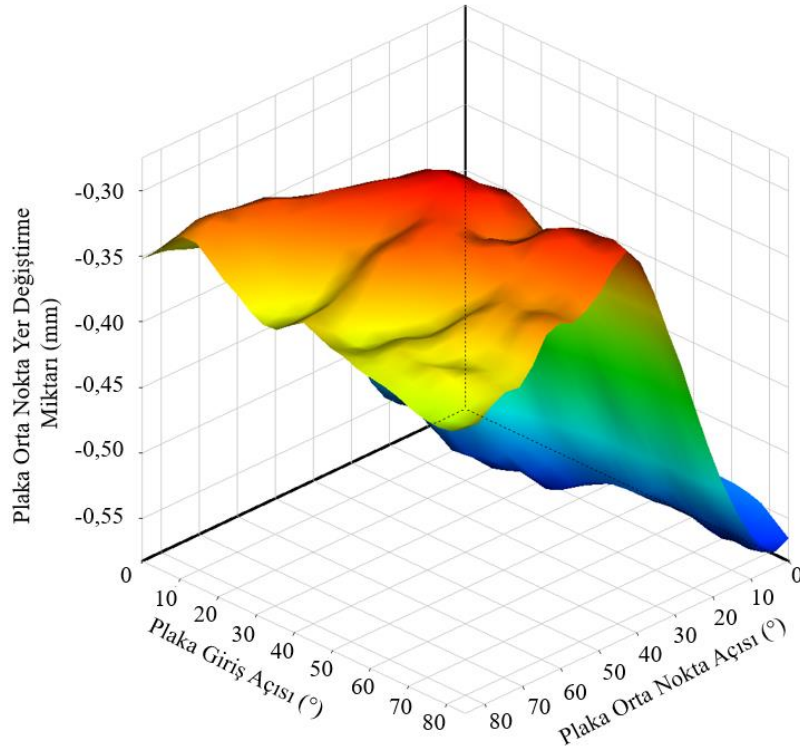
EK-5. Değişik Delik Çaplarına Sahip Plakaların Darbe Yüğü Altındaki Orta Nokta Yer Değişmesine Ait Cevap Yüzeyleri



Şekil E5.1: 2D Delik Çapına Sahip Plakanın Darbe Yüğü Altındaki Orta Nokta Yer Değişmesine Ait Cevap Yüzeyi



Şekil E5.2: 3D Delik Çapına Sahip Plakanın Darbe Yüğü Altındaki Orta Nokta Yer Değişmesine Ait Cevap Yüzeyi



Şekil E5.3: 4D Delik Çapına Sahip Plakanın Darbe Yüğü Altındaki Orta Nokta Yer Değiştirmesine Ait Cevap Yüzeyi



Gazili olmak ayrıcalıktır