



**DEĞİŞKEN KATILIKLI KATMANLI KOMPOZİT PLAKLARIN
PATLAMA YÜKÜ ALTINDA DİNAMİK DAVRANIŞININ
MODELLENMESİ, ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU**

Eray VARDAR

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2022

Eray VARDAR tarafından hazırlanan “DEĞİŞKEN KATILIKLI KATMANLI KOMPOZİT PLAKLARIN PATLAMA YÜKÜ ALTINDA DİNAMİK DAVRANIŞININ MODELLENMESİ, ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Ömer KELEŞ

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Taylan DAŞ

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 13/10/2022

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Cevriye GENCER
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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.

Eray VARDAR

13/10/2022

**DEĞİŞKEN KATILIKLI KATMANLI KOMPOZİT PLAKLARIN PATLAMA YÜKÜ
ALTINDA DİNAMİK DAVRANIŞININ MODELLENMESİ, ANALİZİ VE
OPTİMİZASYONU
(Yüksek Lisans Tezi)**

Eray VARDAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
EKİM 2022

ÖZET

Eğrisel fiberler ile oluşturulan katmanlı kompozit plakaların geliştirilmesi, yapıların mukavemet ve katılık gibi performanslarını iyileştirmek için çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Değişken katılığa sahip katmanlı kompozitler katılık / kütle oranı avantajı sebebiyle havacılık, askeri ve akademik alanlarda büyük ilgi uyandırmaktadır. Bu kritik alanlarda kullanılabilmeleri sebebiyle değişken katılığa sahip katmanlı kompozit yapılar titreşim ve patlama yüklerine maruz kalabilmektedirler. Bu çalışmada değişken ve sabit katılığa sahip katmanlı kompozit plakaların modal analizi ve patlama yükü altındaki geçici dinamik analizi yapılmıştır. Bu çalışmaların devamında ise optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında kompozit plakanın değişken katılık modellenmesi yapılmıştır. Plaka giriş ve orta nokta açılarına bağlı olarak lineer eğriler ile modeli oluşturan bir kod yazılmıştır. Bu kod ile serime bağlı olarak plakanın her bir birim noktasındaki fiber koordinatları ve açı değeri elde edilebilmektedir. Tezin bu aşamasında Python yazılımı kullanılmıştır. Titreşim yükü altında çalışan yapılarda modal karakteristiklerin belirlenmesi ve tasarımda mod frekans değerlerinin değiştirilebilmesi büyük öneme sahiptir. Teorik çalışmanın ikinci aşamasında değişken katılığa sahip katmanlı kompozit plakalar üzerine literatürde var olan bir çalışmanın modal analiz doğrulaması yapılmış ve çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Sonraki aşamada ise modal analiz optimizasyon çalışması yapılmış ve plakanın en yüksek birinci ve ikinci mod frekans değerini veren fiber serim açıları elde edilmiştir. Teorik çalışmanın üçüncü aşamasında ise değişken ve sabit katılığa sahip katmanlı kompozit plakaların patlama yükü altındaki geçici dinamik analizi sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmıştır. Yapılan analizler literatürdeki faklı sayısal çalışmalar ile doğrulanmıştır. Bu çalışmaların ardından değişken ve sabit katılığa sahip plakaların patlama yükü altındaki geçici dinamik analiz optimizasyon çalışmaları yapılmış ve plakaların belirli bir noktasındaki yer değiştirme değerleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde değişken katılığa sahip katmanlı kompozit plakaların eşdeğer patlama yüklerinde sabit katılığa sahip kompozit plakalara göre yüksek katılık ve mukavemete sahip olduğu ve plakanın belirli bir noktasının yer değiştirme değerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bütün bu çalışmalarda ANSYS yazılımı ile sayısal sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır.

Bilim Kodu	: 91417
Anahtar Kelimeler	: Katmanlı kompozit, değişken katılık, sabit katılık, geçici analiz, patlama yükü, modal analiz, optimizasyon
Sayfa Adedi	: 89
Danışman	: Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY

MODELING, ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF VARIABLE STIFFNESS COMPOSITE PLATES UNDER BLAST LOAD

(M. Sc. Thesis)

Eray VARDAR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE

October 2022

ABSTRACT

The development of laminated composite plates designed with curvilinear fibers offer several advantages to improve the performance of structures such as strength and stiffness. Variable Stiffness Composite Laminate arouse great interest in the aerospace, military, and academia due to their high stiffness/mass ratio. Since they can be used in these critical areas, Variable Stiffness Composite Laminates can be exposed to vibration and explosion loads. In this study, modal analysis of laminated composite plates with variable and constant stiffness and transient dynamic analysis under blast load have been performed. In the following of these studies, design optimization have been carried out. In the first stage of the study, variable stiffness modeling of the composite plate has been created. A code has been written that creates the model with linear curves depending on the plate entry and midpoint angles. With this code, fiber coordinates and angle values at each unit point of the plate can be obtained depending on the laying. At this stage of the thesis, Python software has been used. It is important to determine the modal characteristics in structures operating under vibration load and to be able to change the mode frequency values in the design. In the second stage of the theoretical study, modal analysis verification of a study in the literature on laminated composite plates with variable stiffness has been performed and very close results have been obtained. In the next stage, modal analysis optimization study has been carried out and fiber laying angles giving the highest first and second mode frequency values of the plate have been obtained. In the third stage of the theoretical study, the transient dynamic analysis of laminated composite plates with variable and constant stiffness under blast load has been carried out using the finite element method. The analyzes have been verified by different numerical studies in the literature. After these studies, transient dynamic analysis optimization studies have been carried out for plates with variable and constant stiffness under blast load and the displacement values at a certain point of the plates have been compared. According to results, it was determined that the laminated composite plates with variable stiffness had higher stiffness and strength than the composite plates with constant stiffness at equivalent burst loads, and the displacement value of a certain point of the plate was lower. In all these studies, numerical finite element method has been used via ANSYS software.

Science Code : 91417

Key Words : Laminated composite, variable stiffness, constant stiffness, transient analysis, blast load, modal analysis, optimization

Page Number : 89

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Tuncay KARAÇAY

TEŞEKKÜR

Yazar bu çalışmanın gerçekleşmesine katkılarından dolayı, aşağıdaki kişi ve kurumlara teşekkür eder.

Araştırmalarım boyunca yol gösteren, tavsiye, eleştiri, teşvik ve içgörülerini esirgemeyen, akademik birikimlerini paylaşarak çalışmaya farklı pencerelerden bakma olanağı sağlayan tez danışmanım değerli hocam Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY' a en derin şükranlarımı sunarım.

Değerli iş arkadaşım, Dr. Onur COŞKUN' a Değişken Katılığa Sahip Kompozitler konusundaki rehberliği için teşekkür ederim. Tez sürecinde karşılaşılan problemlerde büyük ilgi ile yapmış olduğu yorumları ve destekleriyle çalışmaya büyük katkı sağlamıştır.

Sevgili yol arkadaşım Göksu TOYGUN' a; güzel ailem Nuran VARDAR, Ercan VARDAR, Turan VARDAR ve Ceren İNAL VARDAR' a araştırma boyunca verdikleri sonsuz destek, teşvik ve sabır için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	İV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR.....	VI
İÇİNDEKİLER	VII
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	X
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XV
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. SABİT VE DEĞİŞKEN KATILIĞA SAHİP KOMPOZİT PLAKALARIN TANIMI.....	13
3.1. Sabit Katılık Değerine Sahip Kompozit Plakalar	13
3.2. Değişken Katılık Değerine Sahip Kompozit Plakalar	14
3.3. Eğrisel Fiber Yolu Tanımı.....	15
3.4. Gelişmiş Fiber Yerleştirme.....	17
3.5. Gelişmiş Fiber Yerleştirmenin Avantaj ve Dezavantajları.....	18
3.6. Gelişmiş Fiber Yerleştirmenin Uygulama Alanları.....	20
4. KATMANLI KOMPOZİT PLAKA TEORİSİ.....	21
4.1. Klasik Plaka ve Birinci Dereceden Kayma Deformasyon Teorisi	21
4.2. Yer Değiştirme ve Gerinim İlişkileri.....	22
4.3. Katman Bünye Denklemleri	23
5. PATLAMA YÜKÜ	27

Sayfa

6. ANALİZLER VE MODELLEME	31
6.1. Python Kodu ile Geometri Oluşturma ve Fiber Tanımlama.....	31
6.2. ANSYS APDL ile SE Modelinin Oluşturulması.....	34
6.3. Değişken Katılığa Sahip Kompozit Plakanın Modal Cevabı	35
6.3.1. Değişken katılığa sahip kompozit plakanın modal analiz doğrulama çalışması modeli.....	35
6.4. Patlama Yüğü Altındaki Plakaların Sonlu Elemanlar ile Analiz ve Simülasyonu	38
6.4.1. Doğrusal ve doğrusal olmayan analizler	39
6.4.2. Birinci dinamik analiz doğrulama çalışması modeli	40
6.4.3. İkinci dinamik analiz doğrulama çalışması modeli	41
6.4.4. Üçüncü dinamik analiz doğrulama çalışması modeli	42
6.5. Modelin İyileştirme Çalışmaları.....	44
6.5.1. Değişken katılık değerine sahip plakaların modal analiz iyileştirme çalışmaları modeli	45
6.5.2. Sabit katılık değerine sahip plakaların modal analiz iyileştirme çalışmaları modeli	47
6.5.3. Değişken katılıklı kompozit plakaların patlama yüğü altında geçici dinamik analiz iyileştirme çalışması modeli	49
6.5.4. Sabit katılıklı kompozit plakaların patlama yüğü altında geçici dinamik analiz iyileştirme çalışması modeli	51
7. BULGULAR YORUMLAR VE TARTIŞMA	53
7.1. Değişken Katılığa Sahip Kompozit Plakanın Modal Analiz Bulguları.....	53
7.2. Patlama Yüğü Altındaki Kompozit Plakanın Dinamik Analiz Bulguları	56
7.2.1. Birinci dinamik analiz doğrulama çalışması bulguları	56

	Sayfa
7.2.2. İkinci dinamik analiz doğrulama çalışması bulguları.....	58
7.2.3. Üçüncü dinamik analiz doğrulama çalışması bulguları.....	60
7.3. Değişken katılık değerine sahip plakaların modal analiz iyileştirme çalışması bulguları.....	62
7.4. Sabit Katılık Değerine Sahip Plakaların Modal Analiz İyileştirme Çalışması Bulguları	69
7.5. Değişken Katınlıklı Kompozit Plakaların Patlama Yüğü Altında Geçici Dinamik Analiz İyileştirme Çalışması Bulguları	70
7.6. Sabit Katınlıklı Kompozit Plakaların Patlama Yüğü Altında Geçici Dinamik Analiz İyileştirme Çalışması Bulguları	74
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR	81
EKLER.....	85
EK-1. Python kodu ile fiber serimi oluşturma algoritması	86
EK-2. Değişken katınlıklı kompozit plakanın dinamik analiz iyileştirme algoritması.....	87
EK-3. Değişken katınlıklı kompozit plakanın modal analiz iyileştirme algoritması.....	88
ÖZGEÇMİŞ	89

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.1. Antunes ve diğerlerinin analizlerinde kullandıkları plakanın malzeme özellikleri.....	37
Çizelge 6.2. Kazancı ve Mecitoğlu'nun analizlerinde kullandıkları plakanın malzeme özellikleri	40
Çizelge 6.3. Kazancı ve Mecitoğlu'nun analizlerinde kullandıkları plakanın malzeme özellikleri	41
Çizelge 6.4. Heydarpour ve Aghdam'ın analizlerinde kullandıkları plakanın malzeme özellikleri	43
Çizelge 6.5. Farklı yükleme fonksiyonları $P(t)$	43
Çizelge 6.6. Modal analiz iyileştirme çalışmalarında kullanılan malzeme özellikleri	46
Çizelge 6.7. DKK plakanın modal frekans değerlerinin iyileştirme çalışması için girdiler	47
Çizelge 6.8. SKK Plakaların iyileştirme çalışmasında Deney Tasarımı noktalarını oluşturan girdiler	48
Çizelge 6.9. DKK plakanın birinci geçici dinamik analiz iyileştirme çalışmasında kullanılan T_0 ve T_1 açısı değerleri.....	50
Çizelge 7.1. DKK plakanın modal analiz doğrulama çalışması sonuçları ve karşılaştırma tablosu.....	53
Çizelge 7.2. DKK plakanın 1. mod değeri için birinci iyileştirme sonuçları.....	62
Çizelge 7.3. DKK plakanın 1. ve 2. mod değeri için ikinci iyileştirme sonuçları	64
Çizelge 7.4. SKK plaka için modal analiz iyileştirme sonucu 1. ve 2.mod frekans değerleri.....	69
Çizelge 7.5. DKK plakanın birinci geçici dinamik analiz iyileştirme çalışmasından alınan yer değiştirme değerleri.....	71
Çizelge 7.6. DKK plakanın ikinci geçici dinamik analiz iyileştirme çalışmasından alınan yer değiştirme değerleri.....	72
Çizelge 7.7. SKK plakanın geçici dinamik analiz iyileştirme çalışmasından alınan yer değiştirme değerleri.....	75

Çizelge	Sayfa
Çizelge 7.8. DKK ve SKK plakaların patlama yükü altında en düşük yer değiştirme değerlerini veren serim açıları.....	75

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Sabit Katılık Değerine Sahip Katmanlı Kompozit Plakanın Fiber Yolu Serilimi.....	13
Şekil 3.2. Değişken Katılık Değerine Sahip Katmanlı Kompozit Plakanın Eğrisel Fiber Yolu Serilimi	14
Şekil 3.3. Referans eğrisinin tanımı.....	15
Şekil 3.4. DKK plakanın temsili fiber serilimi	16
Şekil 3.5. Gelişmiş Fiber Serim Sistemi	18
Şekil 3.6. Otomatik Fiber Serim İşlemi, (a) Fiber Serim Kafası, (b) Eğrisel Fiber Serileri.....	19
Şekil 4.1. Birinci Dereceden Kayma Deformasyon Teorisinde deforme olmamış ve deforme olmuş geometrinin gösterimi	22
Şekil 5.1. Patlama Dalgası Eğrisi.....	28
Şekil 6.1. T1 giriş ve T0 orta nokta açılı girdilerine bağlı olarak oluşturulan referans fiberi.....	32
Şekil 6.2. Referans fiberine bağlı oluşturulan fiber serisi.....	32
Şekil 6.3. Fiber serisinin aşağı ve yukarı ötelenmesiyle plakanın tüm yüzeyinin fiber serileri ile doldurulması	33
Şekil 6.4. Fiberin serildiği her bir noktanın koordinatlarının ve açılı değerlerinin elde edilmesi.....	33
Şekil 6.5. Plaka üzerine serilen fiberlerin, serim açısı değerlerinin Python kodu ile çizdirilmesi.....	34
Şekil 6.6. Eğrisel referans fiber yolunun temsili.....	36
Şekil 6.7. Python kodu ile elde edilen $T_0=30^\circ$ ve $T_1=10^\circ$ açıları için fiber serilimi.....	36
Şekil 6.8. Plakanın geometrik özellikleri.....	37
Şekil 6.9. Plakanın sınır koşulu.....	38
Şekil 6.10. Kazancı ve Mecitoğlu'nun analizlerinde kullandığı plakanın geometrik özellikleri	40

Şekil	Sayfa
Şekil 6.11. Kazancı ve Mecitoğlu ‘nun analizlerinde kullandığı plakanın geometrik özellikleri	42
Şekil 6.12. Heydarpour ve Aghdam’ın analizlerinde kullandığı plakanın geometrisi....	43
Şekil 6.13. Modal analiz iyileştirme çalışmalarında kullanılan plakanın geometrisi	45
Şekil 6.14. Modal frekans değerleri iyileştirilecek modelin sınır koşulu ve ağ yapısı ...	46
Şekil 6.15. SKK Plakalar için modal analiz iyileştirme döngüsünün kurulması	48
Şekil 6.16. DKK plakanın birinci geçici dinamik analiz iyileştirme çalışmasında yer değiştirme değerinin okunduğu noktanın konumu	50
Şekil 6.17. DKK plakanın ikinci geçici dinamik analiz iyileştirme çalışmasında yer değiştirme değerlerinin okunduğu noktaların konumu	51
Şekil 7.1. DKK plakanın modal analiz doğrulamasında mevcut çalışma ile Antunes ve diğerlerinin analiz sonuçlarındaki mod şekilleri	54
Şekil 7.2. Kazancı ve Mecitoğlu ile mevcut çalışmanın analiz sonuçları.....	57
Şekil 7.3. Kazancı ve Mecitoğlu ile mevcut çalışmanın analiz sonuçları.....	58
Şekil 7.4. Türkmen ile mevcut çalışmanın analiz sonuçları	59
Şekil 7.5. Heydarpour ve Aghman , Khdeir ve Reddy ile mevcut çalışmanın (patlayıcı yük fonksiyonu ile yapılan) analiz sonuçları	60
Şekil 7.6. Heydarpour ve Aghman , Khdeir ve Reddy ile mevcut çalışmanın (sinüs yük fonksiyonu ile yapılan) analiz sonuçları	61
Şekil 7.7. DKK plakanın birinci iyileştirme döngüsünde (a) birinci frekans değeri için yanıt yüzeyi grafiği (b) ikinci frekans değeri için yanıt yüzeyi grafiği.....	63
Şekil 7.8. DKK plakanın ikinci iyileştirme döngüsünde (a) birinci frekans değeri için yanıt yüzeyi grafiği (b) ikinci frekans değeri için yanıt yüzeyi grafiği.....	65
Şekil 7.9. DKK plakanın modal analiz iyileştirme çalışmasında 1.mod frekans değerini maksimum yapan $[\pm 85/75]_{4s}$ serimine ait (a) Python kodu ile serimin kanat geometrisi üzerinde gösterimi (b) Python kodu ile alınan kanat üzerindeki fiber aç değerlerini veren analize girdi olan noktalar...	66

Şekil	Sayfa
Şekil 7.10. DKK plakanın modal analiz iyileştirme çalışmasında 1.mod frekans değerini maksimum yapan $[\pm 85 75]_{4s}$ serimine ait (a) APDL programı ile analizi yapılan plakanın açılı dizilimi (b) açılıların Python kodu ile plaka üzerine çizdirilmesi	67
Şekil 7.11. DKK plakanın en yüksek 1. mod frekansını veren $[\pm 85 75]_{4s}$ serim açısı ile modal analiz sonucu elde edilen mod şekilleri	67
Şekil 7.12. DKK plakanın modal analiz iyileştirme çalışmasında 2.mod frekans değerini maksimum yapan $[\pm 40 85]_{4s}$ serimine ait (a) Python kodu ile serimin kanat geometrisi üzerinde gösterimi (b) Python kodu ile alınan kanat üzerindeki fiber açılı değerlerini veren analize girdi olan noktalar....	68
Şekil 7.13. DKK plakanın modal analiz iyileştirme çalışmasında 1.mod frekans değerini maksimum yapan $[\pm 40 85]_{4s}$ serimine ait (a) APDL programı ile analizi yapılan plakanın açılı dizilimi (b) açılıların Python kodu ile plaka üzerine çizdirilmesi	68
Şekil 7.14. SKK plakanın $[85 0 -85 90]_{4s}$ serim açısı ile modal analiz sonucu elde edilen mod şekilleri	70
Şekil 7.15. DKK plakanın birinci geçici dinamik analiz iyileştirme çalışmasında yer değiştirme değeri için yanıt yüzeyi grafiği	71
Şekil 7.16. DKK plakanın ikinci geçici dinamik analiz iyileştirme çalışmasında 1. noktanın yer değiştirme değeri için yanıt yüzeyi grafiği	73
Şekil 7.17. DKK plakanın ikinci geçici dinamik analiz iyileştirme çalışmasında 2. noktanın yer değiştirme değeri için yanıt yüzeyi grafiği	73
Şekil 7.18. DKK plakanın patlama yükü altında geçici dinamik analizi sonucu 1 numaralı noktanın yer değiştirme değerini minimum yapan $[\pm 85 70]_{4s}$ serimine ait (a) Python kodu ile serimin kanat geometrisi üzerinde gösterimi (b) Python kodu ile alınan kanat üzerindeki fiber açılı değerlerini veren analize girdi olan noktalar.....	74
Şekil 7.19. DKK plakanın patlama yükü altında geçici dinamik analizi sonucu yer değiştirme değerini minimum yapan $[\pm 85 70]_{4s}$ serimine ait (a) APDL programı ile analizi yapılan plakanın açılı dizilimi (b) açılıların Python kodu ile plaka üzerine çizdirilmesi	74

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
B_{ij}	Eğilme-uzama eş katılığı
D_{ij}	Eğilme katılığı
E₁	Boyuna elastik modül
E₂	Enine elastik modül
G₁₂	Düzlem içi kesme modülü
G₁₃	Birinci enine kesme modülü
G₂₃	İkinci enine kesme modülü
hz	Hertz
I_i	Uzama katılığı
K	Kayma düzeltme faktörü
kPa	Kilopaskal
mm	Milimetre
m²	Metrekare
m³	Metreküp
M_{ij}	Moment bileşkeleri
MPa	Megapaskal
N_{ij}	Düzlem içi kuvvet bileşkeleri
P	Anlık basınç
P_m	Şok dalgasının tepe aşırı basıncı
s	Saniye
t	Anlık zaman
tk	Katman kalınlığı
tp	Basınç yükünün pozitif süresi
T₀	Plakanın orta nokta fiber açısı
T₁	Fiberin plakaya giriş açısı

Simgeler**Açıklamalar** **q_0**

Enine yük

 Q_n

Enine kuvvet bileşkesi

 ρ

Yoğunluk

 ν

Poisson oranı

 α

Dalga biçimi parametresi

 γ_1

Patlayıcı patlama yükü

Kısaltmalar**Açıklamalar****APDL**

Ansys Parametrik Design Language

DKK

Değişken Katılıklı Kompozit

GFY

Gelişmiş Fiber Yerleştirme

SE

Sonlu Elemanlar

SKK

Sabit Katılıklı Kompozit

3B

Üç Boyutlu

2B

İki Boyutlu

1. GİRİŞ

Kompozitler yıllardır var olan ve günümüzde uzay, havacılık ve askeri alanlarda kullanılan iki veya daha fazla farklı fazdan oluşan heterojen ve ortotropik yapıya sahip malzemelerdir. Yüksek özgül mukavemetleri ve düşük özgül yoğunlukları sayesinde düşük ağırlıklı ve yüksek mukavemetli yapıların tasarlanmasına olanak sağlamaktadır.

Geliştirilmiş kompozit yapılar genellikle katmanlı kompozit şeklinde üretilir. Bir katmanlı kompozit, birlikte istiflenmiş bir veya daha fazla ince katmandan oluşur. Geleneksel olarak, her bir katman kat içinde, fiberler reçine malzemesine düz ve paralel olarak yerleştirilir. Düz ve paralel fiber açısı ile oluşturulan kompozitlerin katılık özellikleri, sabit fiber serim açıları, her katmanın kalınlığı, katman sayısı ve bunların istif sırası ile değiştirilebilir. Ancak Sabit serim açısına sahip kompozit plakalar, fiberler serilim yönünde tek eksenli çekme ve saf bükülme gibi basit yükleri taşımak için yüksek bir mukavemet gösterirken, fiber serimine dik yönlerde düşük mukavemet göstermektedir. Çünkü, fiberler serildikleri yönlerdeki yükleri taşıırken, fiberlere dik doğrultudaki yükleri matris taşımaktadır. Bu nedenle, son yıllarda üretim teknolojilerinin gelişmesi sebebiyle değişken fiber serim açısında üretilen ve değişken katılık özelliğine sahip olan kompozit plakalar ön plana çıkmaktadır. Değişken fiber serim açısına sahip kompozitler otomatik fiber serme teknolojisi (“ing: Automated Fiber Placement”) ile üretimi mümkündür. Bu yöntem ile fiberlerin serim yolu boyunca noktadan noktaya eğriselliği sürekli değişmektedir. Böylece, katmanlı kompozitin katılığı onun düzlem içi koordinatına göre değişir. Değişken fiber serim açılı kompozitlerin geleneksel düz serilime sahip kompozitlerden üstünlükleri araştırıldığında, bölgesel olarak plakanın katılık değerinin kontrol edilebilir olması sebebiyle, plakanın doğal frekans değerinin değiştirebilmesi, ağırlığının azaltılabilmesi ve yapısal yükler altındaki tepkisinin iyileştirilmesi gibi avantajlar sunabildiği görülmüştür. Bu avantajlara ek olarak, değişken katılığa sahip katmanlı kompozitlerin patlama ve darbe yükleri altındaki davranışının incelenmesi ile ilgili literatürde yeni bir alanın var olduğunu görmek mümkündür.

Kompozit plakaların uzay havacılık ve askeri alanlarda kullanılabilmeleri sebebiyle patlama sonrası anlık basınç yükleriyle karşılaşabilmektedirler. Uçak ve uzay araçları üzerindeki plaka ve kabuk elemanlardan meydana gelen parçalar ve uçak motorlarına ait bileşenler bu yüklere maruz kalabilmektedir. Ayrıca bu yapılar titreşim altında çalışmaları sebebiyle modal karakteristikleri de kritik bir öneme sahiptir. Böylece, bu çalışma ile değişken ve sabit

katılığa sahip katmanlı kompozit plakaların, modal karakteristikleri ve patlama yükü altındaki geçici dinamik analizleri nümerik olarak incelenmiş ve iyileştirme çalışmaları yapılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Günümüze kadar değişken ve sabit katılığa sahip katmanlı kompozit plakaların modal karakteristikleri, basınç yükü altındaki dinamik davranışları ve burkulma davranışları üzerine analiz ve optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. İlk olarak, literatürde yapılmış olan temel çalışmalar üzerinde duruldu. Bir sonraki paragrafta, değişken ve sabit katılıktaki katmanlı kompozit plakaların modal davranışları üzerine yapılan çalışmalardan bahsedildi. Bu çalışmalardan sonra, anlık basınç yükü altındaki dinamik davranışları üzerine yapılmış olan çalışmalara yer verildi. En son bölümde ise burkulma analizi ve optimizasyon çalışmaları üzerinde duruldu.

Kompozit plakaların değişken fiber açısıyla serilimi üzerine yapılan ilk yayınlardan Hyer ve Charette'nin [1], bir katmanlı kompozit plakadaki fiberlerin katmanlardaki ana gerilme yönleriyle hizalanmasıyla elde edilebilecek yapısal verimlilikteki kazanımlar üzerine yaptığı çalışma önem taşımaktadır. Çalışmalarında merkezi delik bir plakanın tek eksenli çekme yükü altındaki kapasitesini incelemişlerdir. Hyer ve Lee [2], eğim tabanlı optimizasyon yöntemiyle burkulma yükündeki potansiyelleri araştırmak için bu çalışmayı genişletmişlerdir. Benzer şekilde, eğrisel fiber tasarımı, ağ kesitinde gerilme sonuçlarının yeniden dağıtılması nedeniyle geliştirilmiş burkulma ve mukavemet performansı elde etmişlerdir. Doksanlı yılların sonunda, Langley [3] değişken katılığa sahip katmanlı kompozit plakalar için bir sonlu eleman modeli tanıtmış ve düzlem içi tepkilerinin yanı sıra deformasyon, bozunma ve gerilmeleri analiz etmiştir. Sonraki yılda çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemine yer veren Duvaut ve diğerleri [4] bir yapının her noktasında liflerin optimal yönünü ve hacim oranını belirlemek için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Fiber oryantasyonu ve fiber hacim fraksiyonunun modelin her elemanı içinde sabit olduğunu varsaymışlar, ancak bunları elemandan elemana değiştirmişlerdir. Varyasyon formülasyonlarını kullanarak bir algoritma elde etmişler ve sonuçların yakınsadığını göstermişlerdir. Bu çalışmaların ardından Gürdal ve Tatting [5] Genetik Algoritma Optimizasyon tekniklerine dayalı otomatik bir tasarım ortamında sonlu eleman modellerini kullanarak, katmanlı kompozit tasarımı üzerine çalışmalar yapmışlardır. Çekme yönlendirme tanımlarına elastik uyarlamayı dahil etmeleri, çeşitli geometriler ve yükleme koşulları için fiber takviyeli kompozit malzemelerin üstün tek yönlü özelliklerinin potansiyelini tam olarak keşfetme yeteneğine sahip, katmanlı kompozit analiz aracını daha da kullanışlı hale getirmiştir. Bu araştırma tarafından üretilen sonuçlar, düzlem içi yükleme

altında kompozit paneller için burkulma yüklerini iyileştirebilen birkaç yeni mekanizma ortaya çıkarmıştır. Aracın genelliği ve STAGS sonlu elemanlar çözücüsü içindeki elastik uyarılama konfigürasyonlarını tanımlamak için kullanıcı tarafından yazılan alt rutinlerin mevcudiyeti, tasarım ortamında hızlı bir şekilde uygulanacak değişken katılık tasarım konseptlerinin yeni uygulamalarına olanak tanımaktadır.

Literatürde sabit katılıktaki kompozit plakaların titreşimi üzerine geçmişten günümüze birçok çalışma yapılmışken, değişken katılıktaki kompozit plakaların titreşimi üzerine yapılmış çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bu konudaki ilk çalışmalardan biri Wu ve Lee [6] tarafından çevresel koordinatın fonksiyonu olarak değişken katılığa sahip konik bir kabuğun frekanslarını inceleme çalışmasıdır. Basit destekli ve ankastre mesnet (İng. “real clamped”) sınır koşullarıyla kabukların temel frekanslarında sırasıyla 20% ve 7% 'lik değişiklikler elde etmişlerdir. Sonraki yıllarda Abdalla ve diğerleri [7] Klasik Katmanlı Kompozit Teorisi'ni (İng. “Classical Lamination Theory”) kullanarak kompozit panellerin doğal frekansının maksimize edilmesini ele almışlardır. Çalışmalarında fiberlerin değişken açıda serim yöntemi ile plakanın her noktasında katılık özelliklerini değiştirerek optimum geometriyi elde etmeye çalışmışlardır. Sonuçlarında, sabit katılığa sahip panellere kıyasla değişken katılıktaki panellerin optimal temel doğal frekansında önemli bir artış elde edilebileceğini göstermişlerdir. Akhavan ve diğerleri [8] eğrisel fiberlere sahip değişken katılıktaki katmanlı kompozit plakaların doğal frekansları ve titreşim modu şekillerini incelemişlerdir. Değişken katılıktaki katmanlı kompozit dikdörtgen plakaların her katında, fiber oryantasyon açısı yatay koordinata göre lineer olarak değişen yapıyı kullanmışlardır. Plakaların titreşim modlarını tanımlamak için, Üçüncü Dereceden Kesme Deformasyon Teorisi'ni (İng. “Third Order Shear Deformation Theory”) izleyen yeni bir p-versiyonu sonlu eleman kullanılmış ve bu elemanın yakınsama özelliklerini araştırmışlardır. Geleneksel düz fiberler yerine eğrisel fiberlerin kullanılmasının, frekansları ve mod şekillerini ayarlamak için daha yüksek derecede bir esneklik sağlayabileceğini doğrulamışlardır. Houmat [9] değişken katılıktaki katmanlı kompozit dikdörtgen plakaların serbest titreşimini sonlu elemanlar yönteminin p-versiyonu ile birleştirilmiş üç boyutlu elastisite teorisi temelinde ilk kez incelemiştir. Her katmanı, eğrisel fiberlere sahip bir tuğla p-elemanı olarak modellemiştir. Eleman katılığı ve kütle matrislerini, sanal yer değiştirmeler ilkesine dayalı olarak türetmiştir. Ara elemanlar arası uyumluluğu, elemanlar tarafından paylaşılan köşeler, kenarlar ve yüzlerdeki genelleştirilmiş yer değiştirmeleri eşleştirerek elde etmiştir. Serbest, basit mesnet ve ankastre mesnetli sınır koşullarının çeşitli kombinasyonları ile simetrik ve anti-simetrik katmanlı

kompozit plakaların frekansları, modal yer değiştirmeleri ve modal gerilmeleri için sonuçlar elde etmiştir. Yöntemi, yakınsama çalışması ve sabit katılıktaki lamine kompozit plakalar için yayınlanmış üç boyutlu frekanslarla karşılaştırma yoluyla doğrulamıştır. Değişken katılıktaki lamine kompozit plakalar için yeni üç boyutlu frekanslar sağlamış ve gelecekteki çalışmalar için bir ölçüt olarak kullanılabileceğini açıklamıştır. Viglietti ve diğerleri [10] değişken katılığa sahip kompozitleri kullanarak karmaşık havacılık yapılarının dinamik tepkisini iyileştirme olasılığını araştırmışlardır. Çalışmalarını, yörüngeleri keyfi olarak tanımlanabilen eğrisel fiberlere sahip katmanlı kompozit plakaları inceleyebilen Carrera Birleşik Formülasyonu çerçevesinde geliştirilen yenilikçi bir sayısal yaklaşım kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Bu tür yapıların karmaşık davranışlarıyla başa çıkmak için rafine kinematik yapısal modeller kullanmışlardır. Bu yaklaşımı doğrulamak için klasik modelleme yaklaşımlarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Basit kiriş modelleri ve karmaşık kanat yapılarını ele alarak farklı açılardaki serimlerin etkileri de incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, kanat yapılarının performanslarını iyileştirmek için uygun bir değişken açıda serim düzeninin kullanılabileceğini, yani yenilikçi tasarım çözümlerinin elde edilebileceğini doğrulamaktadır.

Zhao ve Kapania [11] uzunlamasına kiriş ile güçlendirilmiş, değişken açıda fiberler ile katmanlaştırılmış bir plakanın öngerilmeli titreşim tepkisini incelemişlerdir. Nümerik analizler için sonlu eleman kodlarını oluşturmuşlar ve literatürde mevcut olan veya ticari yazılım ile analiz edilen örnekleri kullanarak doğrulamışlardır. Parametrik çalışmaları, düzlem içi yük ve sınır koşuluna bağlı olarak, lineer olarak değişen fiber yollarına sahip katmanlaştırılmış kompozit plakaların, düz fiber yolu ile katmanlaştırılmış kompozit plakalara kıyasla öngerilmeli titreşim temel frekansını artırabildiğini göstermektedir. Optimizasyon çalışmalarında, doğrusal olmayan şekilde değişen fiber yollarının kullanılmasının, lineer değişen fiber yollarıyla karşılaştırıldığında, burkulma yükünde önemli bir artışa neden olduğunu, ancak bunun yalnızca serbest veya öngerilmeli titreşim temel frekansları durumunda hafif artış olarak gerçekleştiğini bulmuşlardır. Basit kiriş ile güçlendirilmiş, değişken açıda serilim ile katmanlaştırılmış plakaların hem öngerilmeli titreşim tepkisini iyileştirmek için hem de elastik ve geometrik katılık matrislerini değiştirmek için kullanılabileceğini görmüşlerdir. Antunes ve diğerleri [12] değişken katılıklı katmanlı kompozit plakanın titreşim modlarını deneysel mod analizi ile elde etmiş ve teorik/matematiksel modellerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Farklı sınır koşulu altında deney ve analizlerini yapmışlardır. Tespit edilen doğal frekanslar ve titreşim

mod şekilleri, Klasik Plaka Teorisine ve Birinci Derece Kayma Deformasyon Teorisine dayalı modellerden elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki farkı en aza indirmek amacıyla matematiksel modellerinde sınırları yay olarak modellemişler ve ankastre mesnet sınır koşulu ile deneysel sonuçlarla çok iyi bir uyum elde etmişlerdir.

Literatürde sabit katılıktaki kompozit plakalar üzerinde patlama analizleri ve deneyleri ile ilgili çalışmalar yer almaktadır. Ancak bu çalışmada yapılan araştırmalar dikkate alındığında, günümüze kadar sadece bir yayında değişken katılıktaki kompozit plakalar üzerinde patlama analizi yapıldığı görülmüştür. Bu konudaki ilk çalışmalardan biri Reddy'nin [13] izotropik, ortotropik ve katmanlı anizotropik kompozit plakaların geçici tepkisi üzerine yaptığı çalışmadır. Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak yaptığı çalışmasında, elemanların yakınsama ve kararlılığını Newmark'ın doğrudan entegrasyon tekniğini kullanılarak belirlemiştir. Çalışmasında zaman adımının, sonlu eleman ağının, katman şemasının ve ortotropinin geçici tepki üzerindeki parametrik etkilerini araştırmış ve literatürdeki çalışmalar ile yakın sonuçlar elde etmiştir. Sonraki yıllarda Mallikarjuna ve Kant [14] çok katmanlı simetrik kompozit plakaların dinamik analizi için daha yüksek dereceli bir yer değiştirme modeline dayanan basit bir izoparametrik sonlu eleman formülasyonunu doğrusal olmayan analiz yöntemiyle çalışmıştır. Yüksek Mertebeden Teoriyi (İng: "Higher-Order Theory"), farklı türdeki dinamik yükler altındaki plaka tepkisinin değerlendirilmesi için uygulamıştır. Zaman adımının, sonlu eleman ağının, katman şemasının ve ortotropinin geçici tepki üzerindeki parametrik etkilerini araştırmıştır. Birkaç sayısal örneği diğer kaynaklardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırmıştır. Doksanlı yılların sonunda Türkmen ve Mecitoğlu'nun [15] normal bir patlamanın şok dalgasına maruz bırakılan uzunlamasına kiriş ile güçlendirilmiş katmanlı kompozit plakaların deneysel ve sayısal çalışması bu alandaki önemli çalışmalardandır. Deneysel çalışmalarında, patlama sonrası, güçlendirilmiş katmanlı kompozit levha ve mukavemet sağlayan kiriş üzerinde farklı noktalarda gerilmeleri ölçmüşlerdir. Ayrıca, patlama yükü altındaki güçlendirilmiş kompozit plakanın sonlu eleman modellemesi ve analizini yapmışlar ve sayısal sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Hem doğrusal hem de doğrusal olmayan aralıklarda deneysel ve sonlu eleman sonuçları arasında bir uyum olduğunu görmüşlerdir. Bununla birlikte, plaka ve kiriş arasındaki yapışkan tabaka nedeniyle, kiriş üzerinde ölçülen ve tahmin edilen gerinimler arasında bir tutarsızlık görmüşlerdir.

Wang ve diğeri [16] simetrik katmanlı plakaların geçici rejim tepkisini araştırmak için şerit eleman yönteminin bir uzantısı geliştirmişlerdir. Bu yöntemde, klasik katmanlı levha teorisine dayanan iki boyutlu denklemleri, minimum potansiyel enerji ilkesi kullanarak bir dizi adi diferansiyel denkleme indirgemişlerdir. Elde ettikleri adi diferansiyel denklemler dizisini daha sonra frekans alanındaki dinamik yanıtları elde etmek için analitik olarak çözmüşler ve zaman alanı yanıtını Fourier dönüşümü tekniği ile elde etmişlerdir. Dikdörtgen simetrik katmanlı bir plakanın çeşitli yükleme ve sınır koşulları için geçici tepkilerini incelemişler. Şerit eleman yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçların, literatürde mevcut olan kesin veya analitik çözümlerle uyum içinde olduğunu görmüşlerdir. Wei ve Dharani [17] patlama yüklemesine maruz kalan dikdörtgen lamine mimari camlar için klasik küçük sehim ve büyük sehim levhası teorilerine dayalı çözümler üzerine çalışmışlardır. Geçmişte yapılmış olan çalışmaların çoğunda yapısal tepkiyi belirlerken patlama yüklemesinin pozitif fazının etkisinin dikkate alındığını vurgulayan yazarlar, kendi çalışmalarında belirli lamine cam panel konfigürasyonları için, bir patlama yüklemesinin negatif fazının da dinamik tepki üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir. Nayak ve diğeri [18] Reddy'nin üst düzey teorisinin rafine edilmiş bir formunun iki yeni sonlu eleman formülasyonunu kullanarak kompozit sandviç plakaların geçici analizini yapmışlardır. Bu rafine edilmiş üçüncü mertebeden teoriyle, enine kayma gerilmelerinin parabolik değişimini ve hiçbir kayma düzeltme faktörü gerektirmediğini açıklamışlardır. Plaka en boy oranı, uzunluk-kalınlık oranı, sınır koşulları ve katman şemasının geçiş tepkisi üzerindeki parametrik etkilerini araştırmışlardır.

Simmons ve Schleyer [19] patlama basınç yüklemesi altında uçak yapılarını temsil eden panellerin tepkisini, deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile çalışmışlardır. SE modelleri ile deneysel olarak gözlemlenen başlıca hasar modlarının çoğunu doğru bir şekilde modellemişlerdir. Merkezi panel yer değiştirmesi de hasarın başladığı zamana kadar iyi bir şekilde tahmin edilmiştir. Kazancı ve Mecitoğlu [20] patlama yüküne maruz kalan katmanlı bir kompozit plakanın doğrusal olmayan dinamik tepkisinin analizi ve tartışılması üzerine çalışmışlardır. Plakanın dinamik denklemlerini, sanal çalışma prensibini kullanılarak elde etmişlerdir. Geometrik doğrusal olmama etkilerini, Von Karman'ın ince levhaların büyük sapma teorisi ile hesaba katmışlardır. Uzay alanı için basit bir şekilde desteklenen bir plaka için yaklaşık çözümler varsaymışlardır. Tek terimli yaklaşım fonksiyonlarını, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen plakanın doğrusal olmayan statik deformasyonları dikkate alarak seçmişlerdir. Zaman alanında doğrusal olmayan diferansiyel

denklemleri elde etmek için Galerkin Metodu'nu kullanmışlardır. Birleştirilmiş doğrusal olmayan denklem sistemini çözmek için sonlu farklar yöntemini uygulamışlardır. Yaklaşık-sayısal analiz sonuçları elde etmişler ve literatür ve sonlu elemanlar sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Titreşimlerin karakteri ve frekansları için iyi bir uyum bulmuşlardır. Dolce ve diğerlerinin [21] yaptığı çalışma her kenarı ankastre mesnetli kompozit dikdörtgen plakalar üzerinde hava patlamasının neden olduğu hasarın 3 boyutlu sayısal simülasyonları ile ilgilidir. Bu çalışma ile delaminasyonu temsil eden bir kohezyonlu hasar modeli de dahil olmak üzere ticari LS-DYNA yazılımı kullanılarak patlama yüklerine maruz kalan karbon elyaf takviyeli polimer katmanlı kompozit plakaların performansını incelemişlerdir. Patlama yükünü, Euler patlaması ve Lagrange hedef modelleri arasında Akışkan Yapısı Etkileşimi (ing: "FSI") ile bir Çok Malzemeli Keyfi Lagrange Eulerian (ing: "MMALE") yaklaşımını kullanılarak simüle etmişlerdir. Simülasyon sonuçlarını, hasar dağılımı ve hasar değerlendirmesi açısından iyi bir uyum gösteren deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Arora ve diğerleri [22] cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) sandviç yapıları belirli mesafede C4 patlayıcı yüküne maruz bırakmışlardır. Patlamalar sırasında yapıların deformasyonunu izlemek için dijital görüntü korelasyonu ile yüksek hızlı fotoğraflama kullanmışlardır. Deneylerindeki başarısızlık mekanizmalarını dijital görüntü korelasyonu verileriyle ortaya çıkarmış ve test sonrası kesitlerde doğrulamışlardır. Elde ettikleri deneysel verileri, analitik ve hesaplamalı modellerin geliştirilmesinde kullanmışlardır. Sonlu eleman simülasyonlarında sınır katılığının panel deformasyonunu güçlü bir şekilde etkilediğini ayrıntılı olarak analiz etmişlerdir.

Vo ve diğerleri [23] alüminyum alaşımının özelliklerinin fiber-metal katmanlı kompozit plakaların patlama tepkisi üzerindeki etkisini araştırmak için parametrik bir çalışma yapmışlardır. Sonlu elemanlar modellerini, 2024-O alüminyum alaşımı ve dokuma cam-fiber/polipropilen kompoziti bazlı fiber-metal katmanlı kompozit plakalar üzerindeki testlerden elde edilen deneysel verileri kullanılarak geliştirmiş ve doğrulamışlardır. Doğrulanmış modeller kullanılarak, 2024-O, 2024-T3, 6061-T6 ve 7075-T6 olmak üzere dört alüminyum alaşımına dayalı fiber-metal katmanlı panellerinin patlama direncini araştırmak için parametrik bir çalışma yapmışlardır. Burada incelenen tüm alüminyum alaşımları için boyutsuz arka yüz yer değiştirmesi ile boyutsuz darbe arasında yaklaşık doğrusal bir ilişki olduğunu göstermişlerdir. Li ve diğerleri [24] altıgen alüminyum petek çekirdekli kare sandviç panellerin patlama direncini araştırmak için bir patlama deneyi ve SE analiz çalışması yapmışlardır. Şok dalgası ve panel arasındaki etkileşimin yanı sıra yüzey

tabakası ve merkezdeki deformasyon/hasar modları tartışılmıştır. Sandviç panelin dinamik tepkisini araştırmak için sonlu eleman simülasyonu da yapmışlardır. Simülasyon, deformasyon modellerinin ayrıntılarının çoğunu yakalamıştır. Baştürk ve diğerleri [25] patlama yüklü lamine bazalt kompozit levhanın doğrusal olmayan dinamik tepkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Yaklaşık-sayısal ve ANSYS sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırdıklarında belirli noktalar için iyi bir uyum elde etmişlerdir. SKK plakaların dinamik yükler altındaki davranışı üzerine yapılan çalışmaların ardından DKK plakaların dinamik yükleme altındaki davranışı üzerine çalışan Heydarpour ve Aghdam [26] eğrisel fiberlere sahip DKK bir plakanın üç boyutlu geçici analizini yapmışlardır. Çalışmalarındaki fiber oryantasyon açısı, her katmandaki yatay koordinata göre doğrusal olarak değişmektedir. Farklı sınır koşulları kombinasyonlarıyla çalışmalarını tekrarlamışlardır. Katmanlı diferansiyel kareleme yöntemini (İng: “LW-DQM”), uzamsal alandaki her katman için elde edilen yönetim denklemlerini ayırklaştırmak için verimli ve doğru bir sayısal araç olarak kullanmışlardır. Daha sonra ortaya çıkan diferansiyel denklem sisteminin zaman alanında çözümü için, Bézier eğrilerine dayanan yeni birçok adımlı yöntemi uygulamışlardır. Yöntemin sayısal kararlılığının yanı sıra Newmark zaman entegrasyon şemasına göre yeni çoklu adımın çok daha düşük hesaplama süresi sunduğunu görmüşlerdir. Yöntemin yakınsama ve doğruluğunun yanı sıra, fiber yolundaki değişimin, farklı geometrik parametrelerin ve sınır koşullarının dinamik yükleme altında DKK plakalarının geçici tepkisi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

Kerber ve diğerleri [27] üç boyutlu tekstil kompozitlerinin hasar direncini bir patlamanın neden olduğu şok dalgası yüklemesi ile deneysel olarak incelemişlerdir. Yüksek patlama darbesinde, 3B tekstil kompozitlerinin, büyük delaminasyon çatlak büyümesine direnmede oldukça etkili ve 2B katmanlı kompozitle karşılaştırıldığında üstün hasar direnci gösterdiğini görmüşlerdir. 3B tekstil kompozitlerinin yüksek patlama darbesinde delaminasyon direncinin, z-bağlayıcı iplik içeriği ile daha yüksek mod I ve II tabakalar arası kırılma tokluğu özelliği göstermesinden kaynaklandığını görmüşlerdir. Nelson ve diğerleri [28] patlama yüklü kompozit yapılar tasarlanırken uygulanabilecek bir hesaplama metodolojisi geliştirmek üzerine çalışmışlardır. Spesifik olarak, LS-DYNA ile kullanım için dinamik olarak yüklü kompozit yapılarda büyük ölçekli deformasyonu ve kompozit hatalarını tahmin etmek için verimli analiz prosedürleri geliştirmişlerdir. Modelleme metodolojisini geliştirme sürecinde, LS-DYNA içinde mevcut olan patlatma modelleme yöntemleri üzerine araştırma yapmışlar ve hem doğruluk hem de hesaplama maliyeti göz önünde bulundurularak uygun

bir yöntem elde etmişlerdir. Geliştirilen yöntemleri daha sonra küçük, içi boş kompozit silindirlere patlama yüklemesini ve tepkisini simüle etmek için kullanmışlar ve enstrümanlı patlayıcı testlerinden ölçülen sonuçları model doğrulaması için kullanmışlardır. Viglietti ve diğerleri [29] eğrisel fiberlere sahip katmanlarla karakterize edilen DKK plakaların serbest titreşim analizleri için Carrera Birleşik Formülasyonuna dayalı rafine bir kiriş modeli üzerine çalışmışlardır. Bu modelleri, bir 3B yer değiştirme alanı elde etmek için kesit üzerinde rafine bir kinematik açıklama sunmuşlardır. Modelleri, serim açısının sürekli değişimi göz önünde bulundurularak değişken katılıkta kompozit malzemeler ile oluşturmuşlardır. Yakınsama analizleri ve ticari kodlarla karşılaştırmalar dahil olmak üzere modellerin kapsamlı doğrulamasını yapmışlardır. Mevcut modeller kullanılarak elde ettikleri sonuçları, farklı kalınlık, serim ve sınır koşulları değerlerine sahip kompozitler dikkate alarak açık literatürden elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Sonuçlarında, karmaşık serimlerin güçlü mekanik bağlantılar oluşturabileceği bu tür yapıların analizi için rafine modellerin kullanılmasının zorunlu olduğunu göstermişlerdir. Nia ve diğerleri [30] cam polipropilen ve alüminyum alaşım 2024-T3'ten imal edilen fiber metal katmanlı kompozit plakaların yakın mesafeli patlama yüklemesinin etkilerini araştırmışlardır. Plakaların patlama tepkilerini incelemek için, 4 kablolu enstrümanlı sarkaç patlama kurulumu kullanmışlardır. Patlama darbesi ve mesafesinin etkilerini incelemişlerdir. Fiber metal katmanlı kompozit plakaların enine kesitinin incelenmesi, fiber kırılması, ayrılması ve küresel deformasyon gibi hasarları incelemişlerdir.

Coşkun ve Türkmen [31] Doğrudan Fiber Yolu Parametreleme tekniği ile tasarlanan DKK plakalar için kübik ve ikinci dereceden B'ezier eğrilerini kullanarak, segment/istasyon açıları ve çarpanlar/eğrilik gibi basit tasarım değişkenleri tarafından tanımlanan doğrusal olmayan açı değişimine sahip fiber yolları oluşturmuşlardır. En basit haliyle, iki segment/istasyon açısı ile tanımlanan dengeli simetrik DKK plakaları, tek eksenli sıkıştırma altında sonlu eleman modelinde uygulanmakta ve maksimum burkulma yükü ve katılık için çok amaçlı baskın olmayan sıralama genetik algoritması kullanılarak optimize etmişlerdir. Fiber yolları olarak kübik B'ezier interpolasyonu ve ikinci dereceden B'ezier yaklaşım eğrilerini kullanan DKK plakaların optimizasyon sonuçlarını, üç farklı plaka boyutu ve sınır koşulu için karşılaştırmışlardır. Fiber yolu olarak sabit eğriliğe sahip kübik B'ezier eğrilerini kullanan en büyük basit destekli DKK plakayı, yarı izotropik katmanlı kompozitle karşılaştırdıklarında katılığında 44% azalmaya karşı burkulma yükünde 103% artış görmüşlerdir. José ve diğerleri [32] Genetik algoritma kullanarak evrimsel bir optimizasyon

yoluyla topolojik olarak optimize edilmiş değişken katılığa sahip izotropik olmayan bir yapının kesit optimizasyonunu gerçekleştirmek üzere çalışmışlardır. Optimizasyon formülasyonuna, üretilebilir fiber desenleri oluşturmak için kısıtlamalar getirerek değişken açılı fiber serilim sürecinin üretim özelliklerini hesaba katmışlardır. Topolojisi ve kesiti optimize edilmiş yapının, yarı izotropik katman dizisinden 330% daha yüksek bir spesifik katılığa sahip olduğu sonucunu elde etmişlerdir. Kesit optimizasyonunun, topolojik olarak optimize edilmiş yapıya kıyasla spesifik yapısal katılığı 22% oranında artırdığını görmüşlerdir. Razaqpur ve diğerleri [33] doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri incelemek amacıyla deneysel çalışmalar yapmışlardır. Deneysel çalışmalarında betonarme levhalar kullanmışlar ve levhaların belirli bir mesafe uzaklığına yerleştirilmiş patlayıcılar ile deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Gelen, yansıyan basınçlar ve yansıyan darbeler dahil olmak üzere patlama dalgası özelliklerini ölçmüşlerdir. Doğrusal ve doğrusal olmayan analiz modellerini kurarak, nümerik sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Her bir levhanın patlama sonrası hasarı ve kırılma şeklini gözlemlemişlerdir. Yaptıkları dinamik analiz çerçevesinde, doğrusal olmayan analizin doğrusal analizden daha iyi modelleme sağladığı sonucunu elde etmişlerdir.

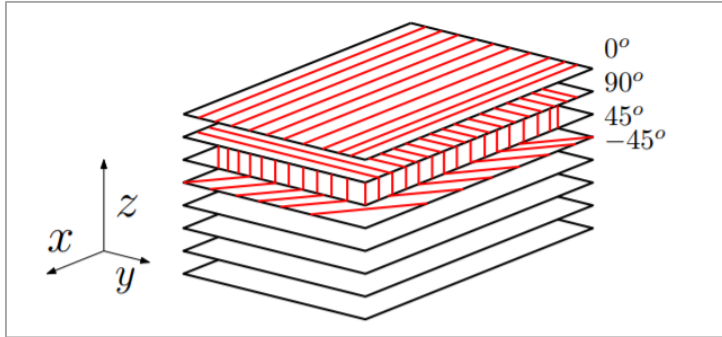
nceki çalışmalarda kompozit plakalar üzerine modal, dinamik ve burkulma konularında yapılmış olan analiz, analitik hesaplar ve testler incelenmiştir. Bu alışmalar temel alınarak, mevcut çalışmada değişken ve sabit katılığa sahip kompozit plakaların modal ve patlama yükü altındaki dinamik davranışları incelenmesi uygun grlmştir. Bu tezin kapsamında yapılacak olan çalışmalar ile DKK plakaların SKK plakalara göre üstünlüklerinin önceki çalışmalar kaynak alınarak ortaya çıkarılması ana hedeftir.

3. SABİT VE DEĞİŞKEN KATILĞA SAHİP KOMPOZİT PLAKALARIN TANIMI

3.1. Sabit Katılık Değerine Sahip Kompozit Plakalar

Geliştirilmiş kompozitler genellikle katmanlar halinde üretilirler. Bir katmanlı kompozit plaka, birlikte istiflenmiş bir veya daha fazla ince katmandan oluşmaktadır. Katmanlı kompozit plakalar kendi içlerinde sabit katılık ve değişken katılık değerine sahip olacak biçimde tasarım ve üretimleri yapılabilmektedir. Bu bölümde sabit katılık değerine sahip kompozit plakalar anlatılacaktır. Değişken katılıklı kompozitler ise bir sonraki başlık altında incelenecektir.

Sabit katılıklı kompozit plakaların tasarımında fiber serilim açısı her bir katman için sabit tutulmaktadır ve farklı katmanlarda fiber açıları değişebilmektedir. Şekil 3.1’ de görüldüğü üzere birinci katman 0° ve ikinci katman 90° olacak şekilde $(0^\circ|90^\circ|45^\circ|-45^\circ)_s$ serilimi yapılmıştır.



Şekil 3.1. Sabit Katılık Değerine Sahip Katmanlı Kompozit Plakanın Fiber Yolu Serilimi [34]

Geleneksel olarak, her bir katman içinde, fiberler reçine malzemesine düz ve paralel olarak yerleştirilir. Bu nedenle, her bir katmanın yapısal özellikleri, fiber ve reçineyi oluşturan malzemelerin yanı sıra bunların nispi miktarları (hacim oranı) değiştirilerek ayarlanabilir. Ek olarak, bir katmanlı kompozit plakanın belirli sertlik özellikleri, fiber açıları, her katın kalınlığı, kat sayısı ve bunların istif sırasının doğru seçilmesiyle elde edilebilir.

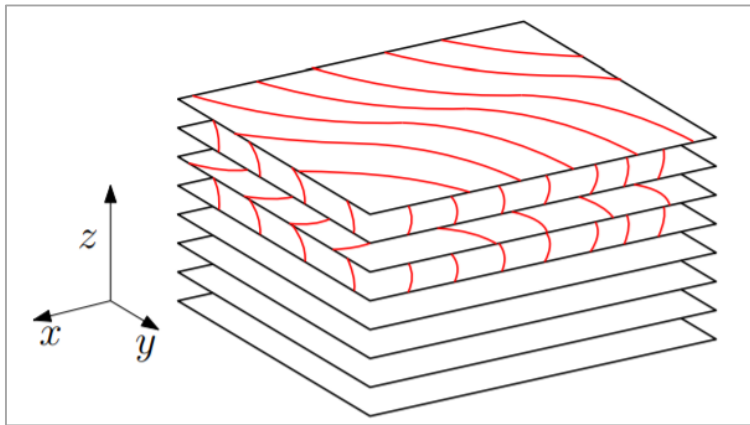
Sabit serim açılına sahip katmanlardan oluşturulmuş bir kompozit plakanın, farklı yükleme koşulları altındaki davranışı açı değerleri değiştirilerek iyileştirilebilir. Ancak, bu serim için

her bir katmanın katılık değeri sabit olacağından, katmanların bir araya getirildikten sonra elde edilecek plakanın da katılık değeri yapının tüm yüzeyinde sabit olacaktır. Bir kompozit plakanın yüzeyi boyunca farklı katılık değerlerinin elde edilebilmesi, fiber serim açısının yüzey boyunca değiştirilmesiyle mümkün olabilir. Böylece, farklı yükleme koşulları göz önüne alındığında, değişken katılıklı kompozit plakaların önemini ortaya çıkmaktadır.

3.2. Değişken Katılık Değerine Sahip Kompozit Plakalar

Kompozit plakalar serilim açılara ve üretim yöntemlerine göre farklı özellikler göstermektedir. Sabit katılık değerine sahip katmanlı kompozit plakalar, her bir serilim katmanında sabit bir açı ile serilmektedir ve bu yöntem kompozit plakaların tasarım ve üretiminde uzun yıllar boyunca kullanılmaktadır. Ancak, Son yıllarda kullanımı yaygınlaşan değişken katılıklı katmanlı kompozit plakalar tasarım esnekliği sunmakla birlikte kompozit yapıların çalışma performanslarında da iyileştirmelere olanak tanımaktadır. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda, değişken katılıklı katmanlı kompozit plakaların her bir katmanının seriliminde kat açılarını uzamsal olarak değiştirerek sabit katılıklı katmanlı kompozit plakalara göre daha iyi sonuçların edilebildiği görülmüştür.

Bir katmanlı kompozit plakayı oluşturmanın daha esnek bir yöntemi fiber oryantasyonunu, her bir katman boyunca yönlendirerek noktadan noktaya değiştirmek, böylece katman özelliklerini düzlemsel koordinatları boyunca değiştirmektir. Şekil 3.2’ de görüldüğü gibi her bir katmanda fiber serilim açısı değişkendir ve her bir katmanda da fiberin giriş ve orta nokta açısı farklı olabilmektedir.

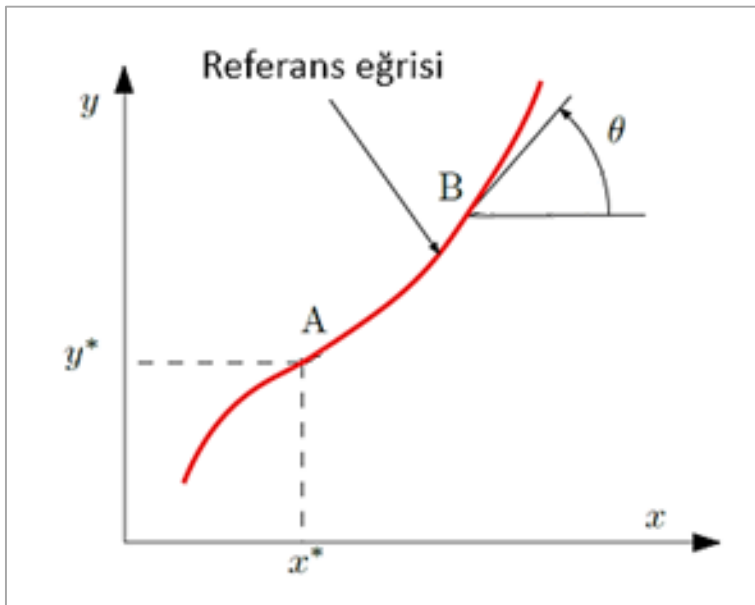


Şekil 3.2. Değişken Katılık Değerine Sahip Katmanlı Kompozit Plakanın Eğrisel Fiber Yolu Serilimi [34]

Bilgisayar kontrollü otomatik fiber serme teknolojisi gibi üretim tekniklerindeki son gelişmeler, eğrisel fiber serim yolunu kullanan kompozit panellerin üretilmesini mümkün kılmaktadır. Bu yöntem ile fiberlerin serim yolu boyunca noktadan noktaya eğriselliği sürekli değişmesiyle, plakanın katılığı onun düzlem içi koordinatına göre değişir. Değişken fiber serim açısıyla üretilen kompozitlerin geleneksel düz serilime sahip kompozitlerden üstünlükleri araştırıldığında, bölgesel olarak plakanın katılık değerinin kontrol edilebilir olması sebebiyle, plakanın doğal frekans değerinin değiştirebilmesi, ağırlığının azaltılabilmesi, farklı bölgelerinden gelen yükleri yönlendirmesi ve yapısal yükler altındaki tepkisinin iyileştirilmesi gibi avantajlar sunabildiği görülmüştür. Bu avantajlara ek olarak, değişken katılıklı katmanlı kompozitlerin patlama ve darbe yükleri altındaki davranışının incelenmesi ile ilgili literatürde yeni bir alanın var olduğunu görmek mümkündür.

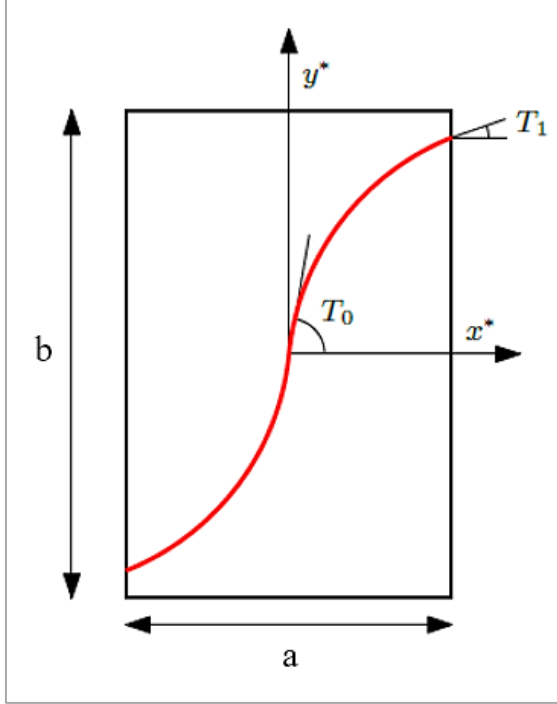
3.3. Eğrisel Fiber Yolu Tanımı

Bu bölümde, otomatik fiber serim makineleri tarafından izlenebilen eğrisel yolun tanımı yapılacaktır. Bu çalışmada lineer fiber açısı değişimi ve denklemleri kullanılmıştır. Şekil 3.3’de gösterildiği gibi bir rotanın merkez çizgisinin yerleştirilebileceği bir referans eğrisi tanımlanır. A ve B, referans eğrisi üzerindeki genel noktalar. Global koordinat sistemi x-y koordinat sistemidir. θ , küresel koordinat sisteminin x eksenine göre B noktasındaki teğetin açısıdır.



Şekil 3.3. Referans eğrisinin tanımı

Şekil 3.4’de verilen plaka üzerinde tanımlanan fiber giriş ve çıkış açısı T_1 ile plakanın merkez noktası T_0 değerlerine bağlı olarak, x koordinat eksenini boyunca fiber oryantasyon açısının doğrusal değiştirilmesiyle rastgele seçilen A ve B noktaları arasında referans fiberi tanımlanabilir [35].



Şekil 3.4. DKK plakanın temsili fiber serilimi [34]

Referans eğrisinin x eksenini boyunca açı değişimini tanımlayabilecek fonksiyon $\theta^*(x^*)$ olarak verilmiştir. Şekil 3.4’te gösterilen boyutlara sahip bir katman için, lineer fiber açı değişimi ifadesi eşitlik (3.1) ile temsil edilebilir [36], [34].

$$\theta^*(x^*) = \begin{cases} \frac{2(T_1 - T_0)}{a}x + T_0 & 0 \leq x \leq \frac{a}{2} \\ \frac{2(T_0 - T_1)}{a}x + T_0 & -\frac{a}{2} \leq x < 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

Burada T_0 ve T_1 , fiberin x ’e göre merkez ($x = 0$) ve kenarındaki ($x = a/2$) açısıdır. Fiberin y koordinat eksenine karşılık gelen $y^*(x^*)$ ise eşitlik (3.2) ile tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned}
y^*(x^*) &= \left(\left(\frac{a}{2(T_0 - T_1)} \right) \ln \left(\cos \left(T_0 - \left(\frac{2(T_0 - T_1)}{a} x \right) \right) \right) \right) + C_1 & 0 \leq x \leq \frac{a}{2} , \\
C_1 &= (-a \ln(\cos(T_0))) / (2(T_0 - T_1)) , \\
y^*(x^*) &= \left(\left(\frac{-a}{2(T_0 - T_1)} \right) \ln \left(\cos \left(T_0 + \left(\frac{2(T_0 - T_1)}{a} x \right) \right) \right) \right) + C_2 & -\frac{a}{2} \leq x < 0 , \\
C_2 &= (a \ln(\cos(T_0))) / (2(T_0 - T_1))
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Böylece, otomatik fiber serim sistemi aracılığıyla bu referans eğrisi boyunca bir rota oluşturulabilir. Rotanın merkez çizgisi referans eğrisini karşılar ve bu eğri referans fiber serisi olarak adlandırılır. Tüm katmanı oluşturmak için referans fiber serisi yerleştirilmesi tekrar edilebilir. Katmanlı kompozit plakanın yerleşim tanımındaki değişken katılık her katman için temsili [T0|T1] fiber yolu ile verilir. Ayrıca referans eğrisinin diğer tanımları da literatürde mevcuttur [36], [34].

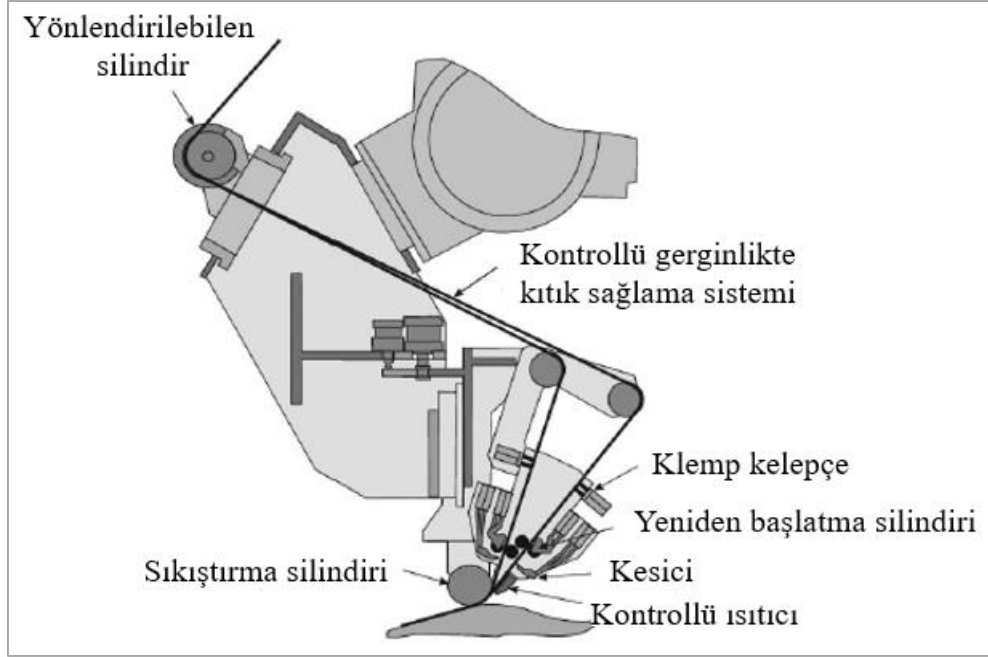
3.4. Gelişmiş Fiber Yerleştirme

Bilgisayar kontrollü üç eksenli filament sarma, şerit döşeme makineleri ve otomatik fiber serme teknolojisi (ing: “Automated Fiber Placement”) gibi üretim tekniklerindeki son gelişmeler, eğrisel fiber konseptini kullanan kompozit panellerin üretilmesini mümkün kılmaktadır. Bu yöntem ile fiberlerin serim yolu boyunca noktadan noktaya eğriselliği sürekli değişmesiyle, plakanın katılığı onun düzlem içi koordinatına göre değişir.

Fiber yönlendirmeli katmanlı kompozit tasarımları, fiberlerin doğru açılarda serilimi ve bu serilim anında belirli bir sıcaklıkta kürlenmesi sebebiyle geleneksel elle döşeme yöntemleriyle üretilemezler. Bu katmanlı kompozitlerin üretimi, doğru bir elyaf yerleştirme sistemi gerektirir.

GFY, filaman sarmanın diferansiyel çekme-sarma kapasitesi ile otomatik şerit döşemenin sıkıştırma ve kesme-tekrar başlatma özelliklerini birleştiren bir teknolojidir. Bir GFY makinesi, herhangi bir insan müdahalesi olmaksızın kompozit bir bileşen üretmek için bilgisayar kontrollü, geniş hareket özgürlüğüne sahip, yüksek hassasiyetli bir robottur. İstenen açılarda fiber sermek için çevrimdışı programlama kullanır. Fizibiliteyi simülasyonlarla doğrulanır. GFY teknolojisi, elle döşemenin mümkün olmadığı, diğer

otomatik yöntemlerle son derece zor ve hatta imkânsız olan bileşenlerin tasarımına ve üretimine izin verir. Sürecin yeniliğine ve yüksek makine maliyetlerine rağmen, fiber yerleştirme sistemlerinin mevcudiyeti hızla artmaktadır. Gelişmiş fiber serim sistemi içerisindeki modülleri Şekil 3.5’de gösterilmektedir [34,37,38].



Şekil 3.5. Gelişmiş Fiber Serim Sistemi [39]

3.5. Gelişmiş Fiber Yerleştirmenin Avantaj ve Dezavantajları

GFY'nin küçük fiber lifi serme, fiber kesme ve yeniden başlatma özelliği, fiberlerle karmaşık geometrileri oluşturma esnekliği sağlar. Ayrıca, Measom ve diğerleri [38], GFY'den karmaşık parça üretiminin malzeme israfını 62%'den 6%'ya düşürebildiğini ve Filaman Sarma ve manuel yerleştirme yöntemiyle yapılan bileşene göre verimliliğin 450% artırılabilirliğini göstermiştir [34,37,38].

Fiber yerleştirmenin kompozit parçanın manuel yerleşimine göre diğer avantajı, üretim sürecinin otomasyonundan kaynaklanmaktadır. Elyaf döşeme prosedürünü otomatikleştirerek, işlemin tekrarlanabilirliği büyük ölçüde iyileştirilir, dolayısıyla hızı artar. Bullock ve diğerleri [40], GFY sürecinin elle döşemeden yedi kat daha hızlı olduğunu görmüşler. Ek olarak, bir makine tarafından üretilen bir parça, amaçlanan tasarıma daha yakın olabilir ve bu nedenle, elle üretilenden daha iyi kalite gösterebilir. GFY sistemlerinin başlangıç ve kullanım maliyetinin çok yüksek olması ise bu yöntemin bir dezavantajıdır.

Fiber yerleştirme işlemiyle, önceden reçine emdirilmiş fiberler lifi bir fiber dağıtım sistemi aracılığıyla fiber yerleştirme kafasına beslenir ve burada tek bir fiber bandı olarak çalışma yüzeyi üzerine serilirler. Çekme kafası 32 fiber lifini bir arada serilime hazırlayabilecek kapasiteye sahiptir. Genel olarak fiber lifleri 3,175 mm (1/8 inç), 6,35 mm (1/4 inç) veya 12,7 mm (1/2 inç) genişlikleri vardır ve sırasıyla 101,6 mm, 203,2 mm ve 406,4 mm fiber serisi oluşturur. Bir fiber serisi oluşturulurken, fiber lifleri tek tek kafadan beslenir ve bir yüzey üzerine sıkıştırılır. Fiber serisi serilimi sırasında, fiber yerleştirme kafası her bir fiber lifini kesebilir veya yeniden başlatabilir. Bu nedenle, fiber bandın genişliği, bitişik sıralar arasındaki aşırı boşlukların veya üst üste binmelerin ortadan kaldırılmasına izin verecek şekilde artırılabilir veya azaltılabilir. Tasarlanan parkurun sonunda, kalan fiber lifleri, katman sınırının şekline uyacak şekilde kesilir. Bu, bir işlem için gerekli malzeme atığı ve kütleme sonrası işleme miktarını azaltır [34,37,38].

Bir çekme serme kafası (Şekil 3.6(a)) yedi serbestlik derecesinde hareket edebilir: üç konum eksen, üç yönlendirme eksen ve iş milini döndürmek için bir eksen. Çekme yerleştirme başlığı tarafından tanımlanan hareket aralığı, çekmelerin herhangi bir yönde hizalanmasına izin verir ve sonuç olarak diğer otomatik yöntemlerle üretilmesi mümkün olmayan çift kavisli parçaların üretilmesini sağlar [34,37,38].

Bir fiber serisinin serilimi sırasında, her bir lif parçanın yüzeyine bağımsız olarak uyum sağlayabileceği kendi hızında serilir. Bu diferansiyel sistem sayesinde, fiberler, Şekil 3.6(b)'de gösterildiği gibi, belirtilen tasarımları karşılayacak şekilde yönlendirilebilir. Bu, diğer otomatik yöntemlerle karşılaştırıldığında tamamen yenilikçi bir yetenektir.



(a)



(b)

Şekil 3.6. Otomatik Fiber Serim İşlemi, (a) Fiber Serim Kafası, (b) Eğrisel fiber serileri [39], [37]

Yapışkanlığın arttırılması için ısı ile birleştirilmiş yuvarlanan bir sıkıştırma cihazı, fiber liflerini serilim yüzeyine belirli bir kuvvet uygulayarak serilim yapar. Fiber liflerinin çalışma yüzeyine bastırılarak serilmesi, vakumla hava boşaltma ihtiyacını en aza indirir ve sıkışan havayı ortadan kaldırır. Düşük gerilimli konumlandırma ile sıkıştırma, fiberlerin içbükey yüzeylere döşenmesine olanak tanır [34,37,38].

3.6. Gelişmiş Fiber Yerleştirmenin Uygulama Alanları

GFY teknolojisi 1980'li yılların ortalarında geliştirilmeye başlanmıştır ve bu robotlar halen fiber seriliminde nispeten yenidir. GFY makineleri, büyük ve karmaşık yapılar üretme kabiliyetini göstermiştir. 1990'lı yılların başında bu yeni teknoloji Boeing Helikopter şirketi tarafından uçak üretiminde uygulanmıştır. Hercules şirketi bu üretim yöntemi ile kanat direklerinden ana gövde yapılarına kadar çeşitli parçalar üretebileceğini kanıtlamıştır [41]. Boeing ve Hercules, Bell/Boeing V-22 Osprey35 için arka gövdeye fiber yerleştirmek ve tasarım sürecini geliştirmek için bir program yürütmüştür. Bu parçalar, GFY üretim yönteminin benzersiz özelliklerinden yararlanmak için tasarlanmıştır. İlk dört prototipte V-22 arka gövdesi, elle yerleştirilmiş dokuz bölümden yapılmıştır. Fiber yerleştirme yekpare yapıya geçilerek bağlantı elemanı sayısında 34% oranında azalma sağlanmıştır. Döşeme ve montaj işçiliği de 53% oranında azalmıştır. Tasarım optimizasyonu ve fiber yerleştirme kombinasyonu sayesinde Boeing, malzeme atığını da 90% oranında azaltmıştır. Fiber yerleşimlerinin benzersiz yeteneklerinden yararlanan bir diğer askeri uçak ise F/A-18 E/F Super Hornet36'dır. El yatırması ile karşılaştırıldığında, bu teknolojinin gövde yüzeyine uygulanması işçilik süresinde 38%, işlem süresinde 80% tasarruf sağlamıştır [39].

GFY teknolojisi ticari uçaklarda da kullanılmaktadır. Raytheon Aircraft, Premier I ve Hawker Horizon iş jetlerinin [42] gövde bölümleri üretmek için Cincinnati Milacron'un FPX makinesini kullanmaktadır. Petek sandviç tasarımı, çerçeve ve takviye içermeyen bir gövde kabuğu oluşturur. Kabuklarda ayrıca perçinler, yüzey bağlantıları ve çerçeveler yoktur. Böylece, yolcular veya kargolar için daha fazla kullanılabilir alan elde edilir. Raytheon Aircraft, gövdeleri imal etmek için GFY teknolojisini kullanarak, ağırlık, parça sayısı ve takım sayısında azalmanın yanı sıra malzeme tasarrufu, atölye akış süresinin kısalması ve parça kalitesini artırmayı da başarmıştır.

4. KATMANLI KOMPOZİT PLAKA TEORİSİ

Bir bünye denklem, iki veya daha fazla fiziksel nicelik arasındaki matematiksel bir ilişkidir ve malzemelerin elastik davranışları bünye denklemleri (“ing: constitutive equations”) ile çözümlenmektedir. Kompozit malzemeler ortotropik yapıdadırlar ve üç boyutlu uzay için dokuz elastik sabitleri vardır. Bu sabitler, düzlem dışı sabitleri ortadan kaldırarak ve düzlem gerilim problemi çözülerek altıya düşürülebilir. Kompozit malzemelerde ortotropik yapısı sebebiyle uzama- kesme bağlantısı dikkate alınmaz ve sabit sayı dörde düşürülür. Böylece, E_1 , E_2 , ν_{12} ve G_{12} elastik sabitleri ile bir katmanlı kompozit belirlenebilir. Ancak, Fiber Takviyeli Polimerler enine yönde zayıf olmaları sebebiyle enine gerilim bileşenleri yapıya hasar verebilmektedir. Bu nedenle, enine kayma gerilmesi bileşenleri ihmal edilmez ve G_{13} ile G_{23} elastik sabitleri de eklenir [36].

Katmanlı kompozitler, istenen fiber oryantasyonu ile birkaç katmanın istiflenmesiyle oluşturulur. Genel olarak, katmanlı kompozitlerin kalınlıkları, düzlemsel boyutlarına kıyasla oldukça küçüktür. Bu nedenle, katmanlı kompozitler plakalar olarak incelenebilir.

Kompozit plakalar, Klasik Plaka Teorisi ve Birinci Dereceden Kayma Deformasyon Plaka Teorisi gibi plaka teorileri kullanılarak araştırılabilir. Bu tezde Birinci Dereceden Kayma Deformasyon Plaka Teorisi kullanılacaktır.

4.1. Klasik Plaka ve Birinci Dereceden Kayma Deformasyon Teorisi

Kirchhoff-Love teorisi, Euler-Bernoulli kiriş teorisinin ince plakalara bir uzantısıdır. Bu teoride, üç boyutlu levhayı iki boyutlu biçimde temsil etmek için bir orta yüzey düzleminin kullanılabileceği varsayılmaktadır ve aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır [43]:

- Orta yüzeye dik düz çizgiler deformasyondan sonra düz kalır.
- Deformasyondan sonra orta yüzeye normal düz çizgiler orta yüzeye normal kalır.
- Plakanın kalınlığı deformasyon sırasında değişmez.

Birinci Dereceden Kayma Deformasyon Teorisi ise bir plakanın kalınlığı boyunca kayma deformasyonlarını hesaba katan klasik plaka teorisinin bir uzantısıdır.

4.2. Yer Değiştirme ve Gerinim İlişkileri

Birinci Dereceden Kayma Deformasyon Teorisi'nde yer değiştirmeler aşağıdaki gibi yazılır[43]:

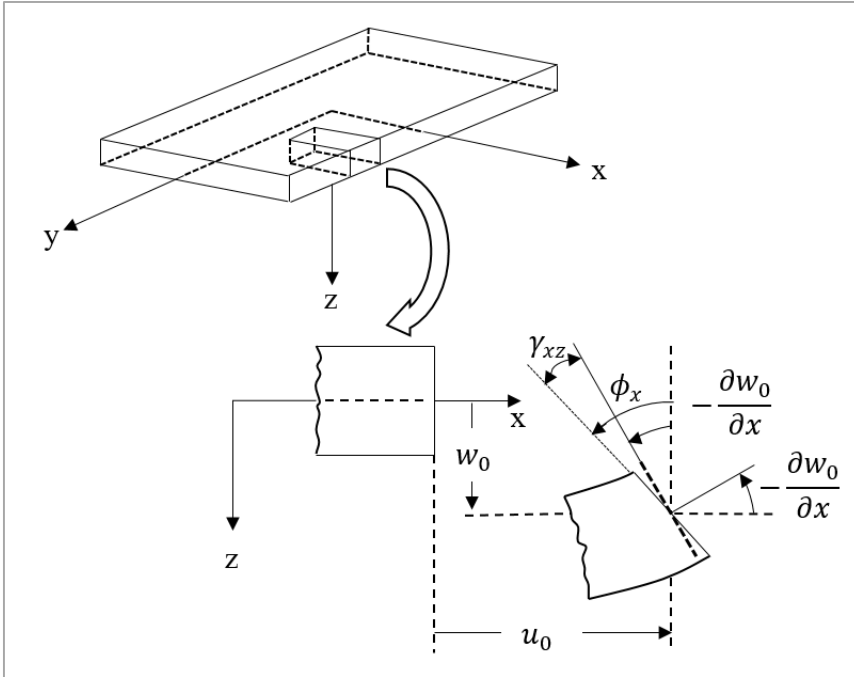
$$u(x, y, z, t) = u_0(x, y, t) + z\phi_x(x, y, t) \quad (4.1)$$

$$v(x, y, z, t) = v_0(x, y, t) + z\phi_y(x, y, t) \quad (4.2)$$

$$w(x, y, z, t) = w_0(x, y, t) \quad (4.3)$$

Burada ϕ_x ve ϕ_y ifadeleri bir enine normalin sırasıyla y ve x eksenleri etrafındaki dönüşlerini ifade eder ve şu şekilde formüle edilir:

$$\phi_x = \frac{\partial u}{\partial z} \quad \phi_y = \frac{\partial v}{\partial z} \quad (4.4)$$



Şekil 4.1. Birinci Dereceden Kayma Deformasyon Teorisinde deforme olmamış ve deforme olmuş geometrinin gösterimi

Böylece, gerinimler aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir [43]:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(0)} \\ \varepsilon_{yy}^{(0)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} \\ \gamma_{xz}^{(0)} \\ \gamma_{yz}^{(0)} \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(1)} \\ \varepsilon_{yy}^{(1)} \\ \gamma_{xy}^{(1)} \\ \gamma_{xz}^{(1)} \\ \gamma_{yz}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} \right)^2 \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial y} \right)^2 \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial w_0}{\partial y} \\ \frac{\partial w_0}{\partial x} + \phi_x \\ \frac{\partial w_0}{\partial y} + \phi_y \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

4.3. Katman Bünye Denklemleri

Katmanlı kompozitlerin birbirleri üzerine istiflenen katmanlardan meydana gelmektedir. Bir katmanlı kompozitin tepkisini belirlemek için katmanın tepkisi analitik olarak belirlenmelidir.

Bir katmanlı kompozitin düzlemsel gerilim durumunda olduğu varsayılabilir. Bu nedenle, ortotropik katman için gerilme-şekil değiştirme ilişkisi aşağıdaki gibi yazılabilir [43]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_4 \\ \sigma_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{44} & 0 \\ 0 & Q_{55} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Q_{ij} 'nin indirgenmiş katılık olarak tanımlanır ve elastik sabitler kullanılarak ifade edilebildiği yerde:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (4.8)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (4.9)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (4.10)$$

$$Q_{66} = G_{12} \quad (4.11)$$

$$Q_{44} = G_{23} \quad (4.12)$$

$$Q_{55} = G_{13} \quad (4.13)$$

Bir lamina için gerilme-gerinim ilişkisi hesaplanır. Ancak, bir katmanlı kompozit birkaç katmandan oluşur ve verilen denklem katman koordinat sistemi içindir. Katman koordinat sistemi, katman üzerindeki fiber serim açısına bağlı olan (1-2) koordinat sistemidir ve her katmanın küresel koordinat sistemine (x,y) göre koordinatı dönüştürülmelidir. Katmanlı kompozit aynı malzemeden yapılmış katmanlardan oluşursa, katmanlı kompozitin küresel koordinat sisteminde (x-y) gerilme-şekil değiştirme ilişkisini kurmak için koordinat sistemi dönüşümü aşağıdaki gibi kullanılabilir [43]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{44} & \overline{Q}_{45} \\ \overline{Q}_{45} & \overline{Q}_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Burada $[\bar{Q}]$ verilen eşitlik kullanılarak hesaplanır[43]:

$$[\bar{Q}] = [T]^{-1}[Q][T]^{-T} \quad (4.16)$$

Dönüşüm matrisi $[T]$, dönüşüm matrisi yerel koordinat sistemini global koordinat sistemine (x-y) dönüştürdüğünden, katmanın oryantasyon açısı olan θ ile ilişkilidir. Yukarıda yer alan eşitlikler ile bir katmana ait bünye denklemleri verilmiştir. Bir katmanlı kompozitin tüm katmanlarının kuvvet ve moment sonuçları, gerinimleriyle bünye denklemleri vasıtasıyla ilişkilendirilir. Katman gerinimleri ile ilgili kuvvet ve moment bileşkeleri şu şekilde tanımlanır [43]:

$$\begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} dz \quad (4.17)$$

$$\begin{bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} z dz \quad (4.18)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{N}_{nn} \\ \hat{N}_{ns} \end{bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{bmatrix} \hat{\sigma}_{nn} \\ \hat{\sigma}_{ns} \end{bmatrix} dz \quad (4.19)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{M}_{nn} \\ \hat{M}_{ns} \end{bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{bmatrix} \hat{\sigma}_{nn} \\ \hat{\sigma}_{ns} \end{bmatrix} z dz \quad (4.20)$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ z \\ z^2 \end{bmatrix} \rho_0 dz \quad (4.21)$$

$$\hat{Q}_n = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \hat{\sigma}_{nz} dz \quad (4.22)$$

Burada, N_{ij} düzlem içi kuvvet bileşkeleri, M_{ij} moment bileşkeleri, Q_n enine kuvvet bileşkesi ve I_i kütle atalet momentidir. Eşitlik (4.18)' den (4.23)' e kadar olan bu sonuçlar katmanlı kompozit üzerine entegre edilirse [43]:

$$\begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} dz \quad (4.23)$$

$$\begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} \right)^2 \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial y} \right)^2 \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial w_0}{\partial y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$\begin{bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} z dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} z dz \quad (4.25)$$

$$\begin{bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} \right)^2 \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial y} \right)^2 \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial w_0}{\partial y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$$\begin{bmatrix} Q_y \\ Q_x \end{bmatrix} = K \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{bmatrix} \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} dz \quad (4.27)$$

$$\begin{bmatrix} Q_y \\ Q_x \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} A_{44} & A_{15} \\ A_{45} & A_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial w_0}{\partial y} + \phi_y \\ \frac{\partial w_0}{\partial x} + \phi_x \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Burada A_{ij} uzama katılığı, D_{ij} eğilme katılığı ve B_{ij} eğilme-uzama eş katılığı olarak tanımlanır [43]:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N \overline{Q_{ij}} (z_{k+1} - z_k) \quad (4.29)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \overline{Q_{ij}} (z_{k+1}^2 - z_k^2) \quad (4.30)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N \overline{Q_{ij}} (z_{k+1}^3 - z_k^3) \quad (4.31)$$

ve K , kayma düzeltme faktörüdür. 5/6 olarak alınır.

5. PATLAMA YÜKÜ

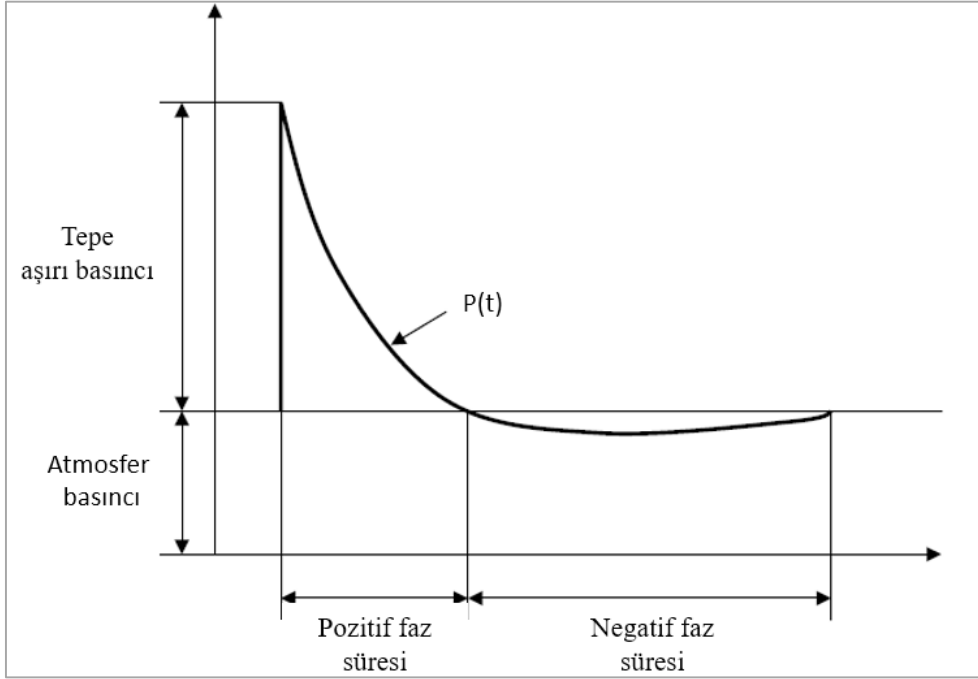
Hava araçları, uçaklar roketler ve füzelerin uçuşu sırasında türbülanslar, sonik patlama ve şok dalgaları nedeniyle ses hızının üzerindeki uçuşlarda hava patlama yükleri meydana gelir. Patlama olayı sonucu hızlı bir enerji salınımı meydana gelmektedir. Ayrıca, nükleer patlamalar, yakıt patlamaları vb. gibi kimyasal patlamalar yüksek basınç açığa çıkarabilecek bir patlama kaynağı olabilir. Böylece patlamalar fiziksel nükleer veya kimyasal olarak kategorize edilebilir.

Fiziksel patlamalar, herhangi bir kimyasal reaksiyonun olmadığı fiziksel bir dönüşümden kaynaklanır. İçerisine gaz sıkıştırılmış basınçlı kapların limitlerinin dışında basınçlandırılması sonucu fiziksel patlama gerçekleşebilir. Ayrıca, iki sıvının farklı sıcaklıklarda şiddetli bir şekilde karıştırılması veya sıcak parçacık halindeki bir malzemenin soğuk bir sıvı ile karıştırılması sonucu da meydana gelebilir. Buna ek olarak, türbülanslar, sonik patlama ve şok dalgaları nedeniyle ses hızının üzerindeki uçuşlarda oluşan hava patlama yükleri de bu kategoridedir.

Patlayıcı bileşik içinde bulunan yakıt elementlerinin (karbon ve hidrojen atomları) hızlı tepkimesi sonucu kimyasal bir patlama meydana gelmektedir. Bu reaksiyon için gerekli oksijen de bileşik içinde bulunur ve havanın varlığı gerekli değildir. Bir kimyasal patlayıcının kullanılabilir olması için, yalnızca gerektiğinde patlaması ve normal koşullar altında kimyasal olarak aktif olmaması ve kararlı olması gerekir. Patlayıcılar reaksiyona girdiklerinde ısı ve gaz açığa çıkararak ayrışırlar. Gazların hızlı genleşmesi sonucu, patlayıcının temas halinde olduğu herhangi bir katı malzemede şok basınçlarının oluşmasına veya genleşme hava gibi bir ortamda meydana gelirse patlama dalgalarının oluşmasına neden olur.

Şekil 5.1 [44], bir basınç-zaman geçmişi olarak en tipik patlama dalgası eğrisini gösterir. Şekilde görüldüğü gibi patlama merkezine olan uzaklık nedeniyle bir varış zamanı vardır. Ardından, aşırı basınç adı verilen bir tepe basıncına aniden bir sıçrama olur ve üstel bir düşüşe geçer. Hasar boyutunu etkileyen parametreler, patlayıcının mesafesine bağlı olarak, tepe aşırı basıncı (atmosfer basıncının üzerindeki basınç) ve pozitif bölgede geçen süredir. Patlama dalgasının negatif fazı genellikle göz ardı edilir. Şok cephesindeki aşırı basınç ne kadar yüksek olursa, şok dalgasının hızı o kadar büyük olur. Patlama dalgası dışı doğru

ilerledikçe, şok önündeki basınç azalır ve buna bağlı olarak hız düşer. Uzun mesafelerde, aşırı basınç 7 kPa' a düştüğünde, patlama dalgasının hızı, sesin ortam hızına yaklaşır. Aşırı basınç fazının



Şekil 5.1. Patlama Dalgası Eğrisi [44]

süresi, patlayıcı veriminin enerjisi ve patlamadan uzaklaştıkça artar. İdeal bir hava dalgasının pozitif fazının anlık basıncı $p(t)$, Friedlander eşitliği ile [45] olarak verilir.

$$P(t) = P_m \left[1 - \left(\frac{t}{t_p} \right) \right] e^{-\alpha t/t_p} \quad (5.1)$$

Burada, t anlık zamandır, t_p basınç yükünün pozitif süresidir ve α , şok dalgasının tepe aşırı basıncı P_m 'ye bağlı olan dalga biçimi parametresi olarak adlandırılır. Dalga biçimi parametresi α , aşırı basınç-zaman ilişkilerinin patlama darbesinin uygun değerlerini sağlaması için seçilen ayarlanabilir bir parametre olarak kabul edilir.

Literatürde patlayıcı patlamasının dışında, sinüzoidal, kademeli ve üçgensel geçici yükler yer almaktadır. Sinüzoidal geçici yük eşitliği aşağıda verilmiştir.

$$q(x, y, t) = q_0 \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi y}{b}\right) P(t)$$

$$P(t) = \begin{cases} \sin(\pi t/t_1) & t \leq t_1 \\ 0 & t > t_1 \end{cases}$$
(5.2)

Burada, q_0 enine yük, a ve b değerleri sinüzoidal yükün etki ettiği bölgenin kenar uzunluklarıdır. Verilen eşitliğe göre yük zamana ve mesafeye bağlı olarak değişmektedir.

6. ANALİZLER VE MODELLEME

Bu çalışma ile değişken katılığa sahip kompozit plakaların, modal karakteristikleri ve patlama (basınç) yüküne cevabı nümerik olarak incelenmiş ve iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Nümerik çalışmalar için ANSYS Workbench ve APDL sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. İyileştirme çalışmaları ise ANSYS APDL’de betik dili ile yapılmıştır. Bütün bu analizlerin kurulabilmesi için modeller, değişken katılıktaki kompozit plaka katmanları üzerindeki fiber serimlerinin her bir açı değerini elde etmek amacıyla Python kodlama dili kullanılarak oluşturulmuştur. Bu bölümde verilen modellerin analiz sonuçları “BULGULAR YORUMLAR VE TARTIŞMA” bölümü altında anlatılmıştır.

6.1. Python Kodu ile Geometri Oluşturma ve Fiber Tanımlama

Tasarım süreci, yeni bir ürünü ortaya çıkarmak amacıyla birbirini takip eden adımlardan meydana gelmektedir. Öncelikle bir tasarıma başlanabilmesi için geometrinin belirlenmesi ve tanımlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bölümde, tez çalışmamızda kullanılan geometrinin seçimi, fiberin geometri üzerine tanımlanması, modellenmesi ve yazılan Python kodunun EK- 1 ile verilen algoritmasının işleyişi anlatılacaktır.

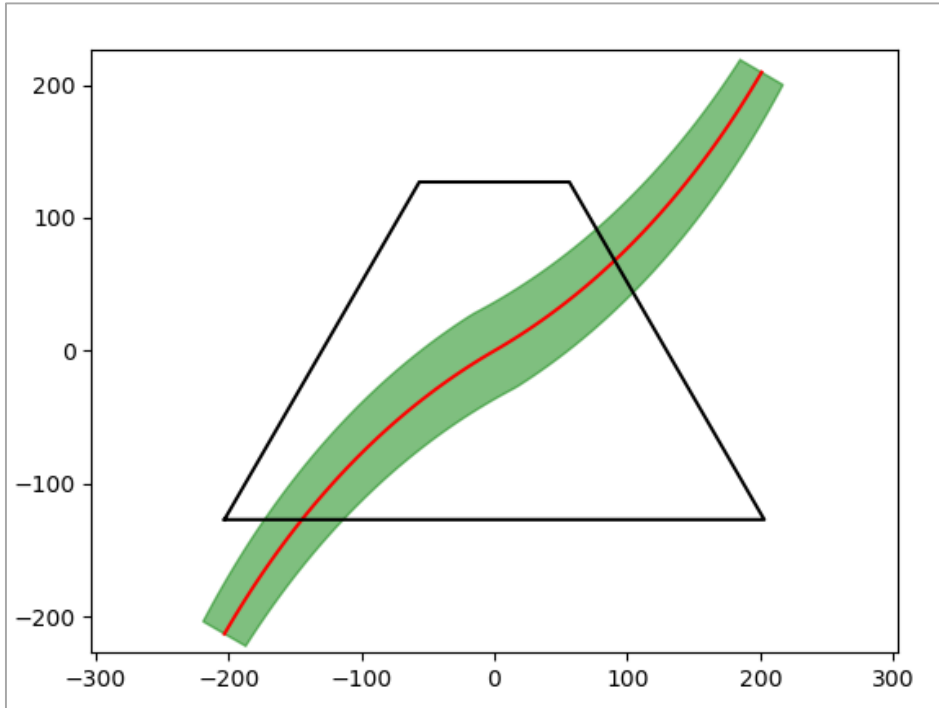
Kanat yapıları turbo fan, turbo jet motor rotorlarının palelerinde, yolcu-savaş uçağı ve insansız hava araçlarında yer alan, yüksek titreşime maruz kalan önemli yapılardır. Bu sebeple, tezin ilk aşamasında geometri olarak basit bir üçgen kanat yapısı seçilmiş ve tüm iyileştirme çalışmaları bu geometri üzerinden yürütülmüştür.

EK- 1 ile verilen algorithmada öncelikle, fiber serimlerinin geometri üzerine tanımlanması için geometrinin orta noktasından geçecek şekilde bir referans fiberi lineer eğri oluşturma denklemleri (Bkz. (3.1),(3.2)) kullanılarak oluşturulur. Şekil 6.1’de gösterilen referans fiberi T_1 ve T_0 (Bkz. Şekil 3.4) girdilerine bağlı olarak tanımlanır.



Şekil 6.1. T1 giriş ve T0 orta nokta açi girdilerine bağı olarak oluşturulan referans fiberi

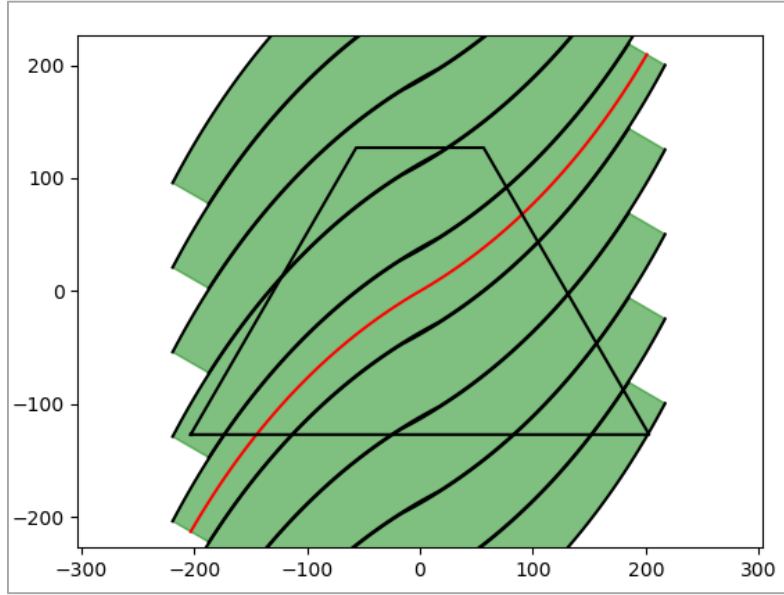
Referans fiberinin oluşturulmasıyla birlikte bu fibere bağı olarak Şekil 6.2’ de görüldüğü gibi fiber serileri oluşturulur.



Şekil 6.2. Referans fiberine bağı oluşturulan fiber serisi

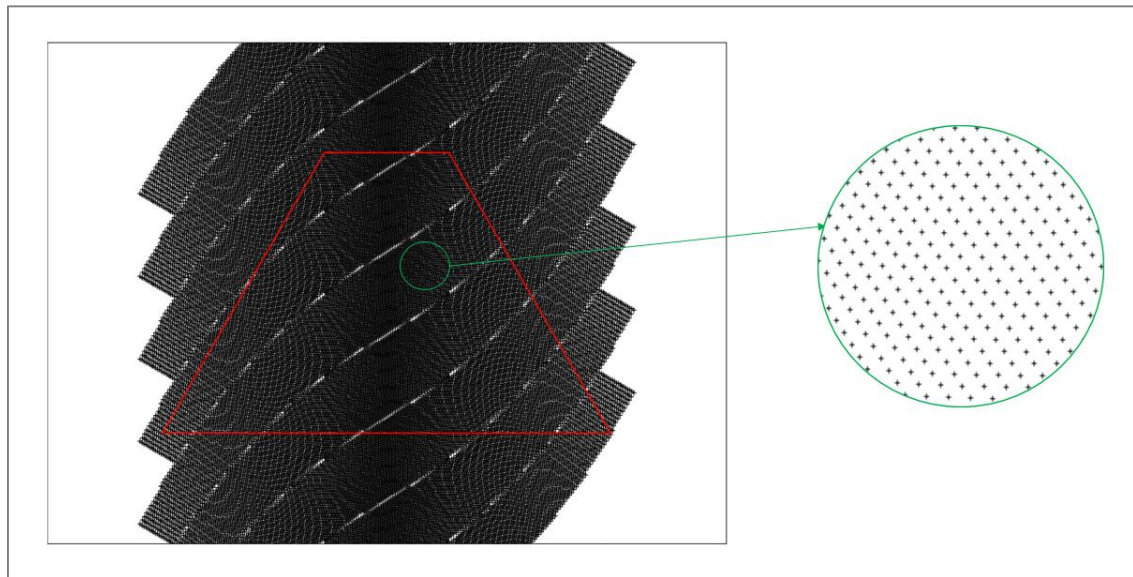
Oluşturulan fiber serisi geometrinin merkezinden aşağı ve yukarı ötelenerek tüm yüzey fiber serileri ile doldurulur. Plakanın alt ve üst kenar uzunluğuna bağı bir dikdörtgenin içi fiber

serileri ile tamamen doldurulacak şekilde fiber serilerinin ötelenmesi yapılır ve ardından kod fiber ötelenmesini durdurur. Plakanın tüm yüzeyi fiber serileri ile Şekil 6.3' de görüldüğü gibi elde edilir.



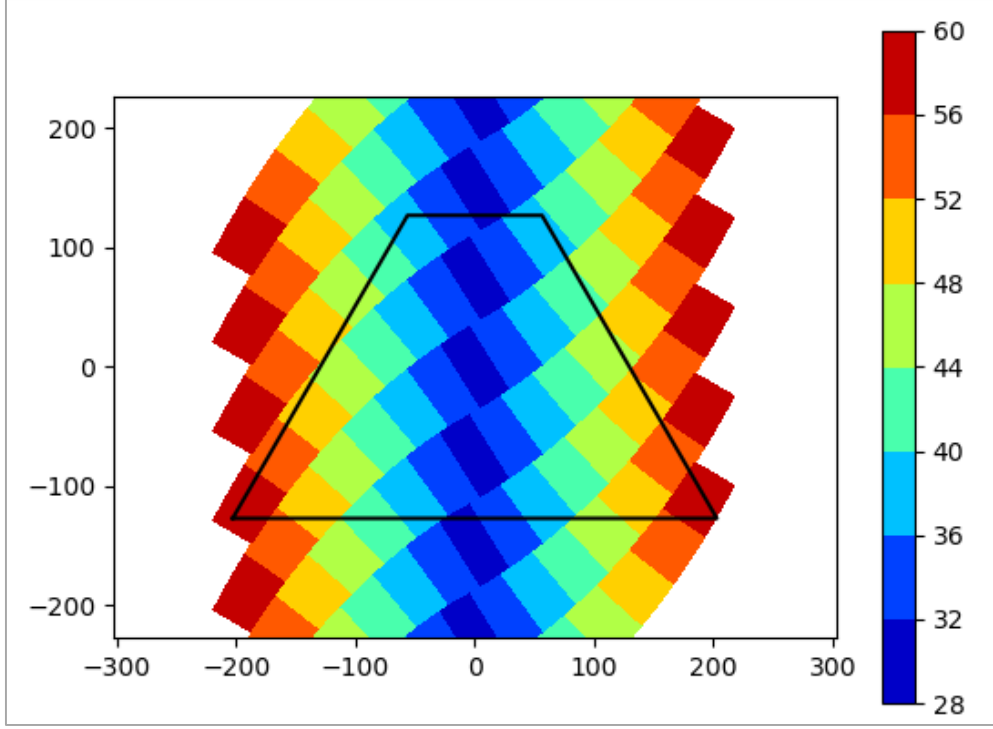
Şekil 6.3. Fiber serisinin aşağı ve yukarı ötelenmesiyle plakanın tüm yüzeyinin fiber serileri ile doldurulması

Plakanın tüm yüzeylerinin fiber serileri ile doldurulması ile lineer eğri oluşturma denklemleri (Bkz. (3.1),(3.2)) ile Şekil 6.4'te görüldüğü gibi fiberin serildiği her bir birim adımdaki noktaların koordinatları ve yatay eksenle yapmış olduğu açı değerleri elde edilir.



Şekil 6.4. Fiberin serildiği her bir noktanın koordinatlarının ve açı değerlerinin elde edilmesi

Ayrıca yazılan kod ile T_1 ve T_0 (Bkz. Şekil 3.4) girdilerine bağlı olarak denklem (Bkz.) ((3.1) ile plaka üzerindeki her bir birim nokta için elde edilen açı değerlerinin çıktısı Şekil 6.5’de görüldüğü gibi elde edilmektedir. Bu görsel ile fiberlerin plaka üzerine doğru bir açı ile serilip serilmediği kontrol edilmektedir.



Şekil 6.5. Plaka üzerine serilen fiberlerin, serim açısı değerlerinin Python kodu ile çizdirilmesi

6.2. ANSYS APDL ile SE Modelinin Oluşturulması

Plaka üzerindeki her bir noktanın koordinatlarının ve açısının Python kodu ile elde edilmesi sayesinde tasarımda bir sonraki adım olan sonlu elemanlar modellemesine geçilmiştir. ANSYS APDL programında, Python’dan alınan nokta verilerini okuyup sonlu elemanlar modelini otomatik olarak kuran bir betik dili (ing: “script”) yazılmıştır. Modelin APDL programında kodlama ile otomatik olarak oluşturulabilmesi, tasarımda iyileştirme adımına geçilmesine olanak sağlayacaktır.

APDL kodunun modeli kurabilmesi için arka planda Python kodunu çalıştırıp nokta koordinat ve açı değerlerini çekerek okuması gerekmektedir. Bu amaçla APDL kodu içerisine T_0 ve T_1 girdileri ve geometriyi oluşturacak gerekli değerler tanımlanır ve bu girilen parametreler bir dosyaya yazdırılır. Bir sonraki adımda APDL kodu Python kodunu çalıştırır

ve bu parametreleri okutarak istenen açılardaki fiber serimini geometri üzerine oluşturur. Elde edilen koordinat ve açı değerleri APDL koduna okutulur. APDL kodu içerisine malzeme özellikleri, analiz türü, analiz seçim ayarları ve analiz sonucunda istenen çıktılar girilir. Artık APDL kodu geometriyi ve ağ yapısını oluşturup, gerekli koordinat ve açı değerlerini ağ yapısına eşleyerek çözüm almak için gerekli tüm bilgilere sahiptir. Sonlu elemanlar çözümünün Python ve APDL kodları ile elde edilebilmesi sonucu bir sonraki adım olan iyileştirme adımına geçilecektir.

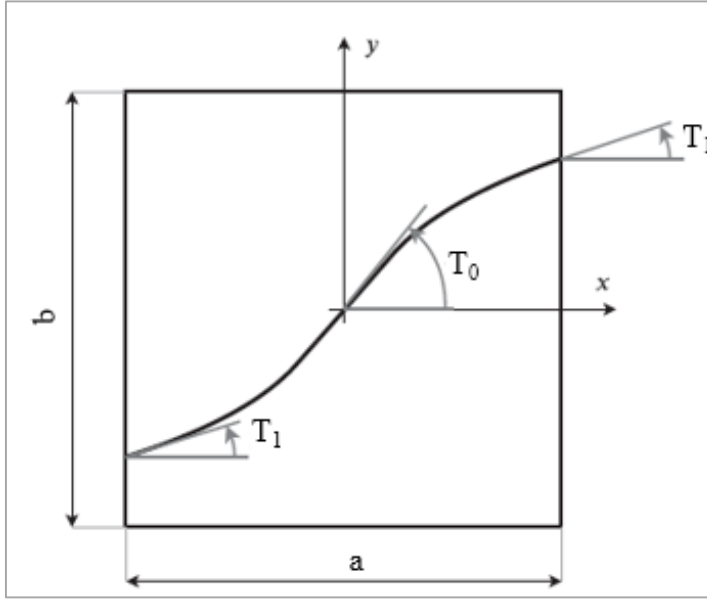
6.3. Değişken Katılığa Sahip Kompozit Plakanın Modal Cevabı

Titreşim altında çalışan parçaların tasarım süreçlerinde modal davranışlarının belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Yolcu uçaklarının veya turbofan-turbojet gibi savaş uçaklarının rotor kanatçıkları sürekli titreşim altında çalışan parçalardır. Ayrıca uçakların alçalıp yükselmesini, havada asılı kalmasını ve manevra yapabilmesini sağlayan kanatları da yoğun titreşimlere maruz kalmaktadırlar. Bu örneklerdeki ve benzer koşullar altında çalışan parçaların tasarım aşamalarında modal analiz çalışmalarının yapılarak doğal frekanslarının ve mod şekillerinin elde edilmesi, çalışma şartlarındaki frekans değerleri ile doğal frekanslarının uyuşmayacak şekilde tasarımlarının yenilenmesi kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada değişken katılığa sahip kompozit kanat geometrisinin kullanılması doğal frekansın değiştirilebilmesi açısından büyük esneklik sağlamıştır. Bu bölümde DKK plaka için literatürde yapılmış olan bir modal analiz çalışmasının doğrulaması mevcut çalışmamızdaki Python kodumuz ve Ansys APDL kullanılarak yapılmıştır.

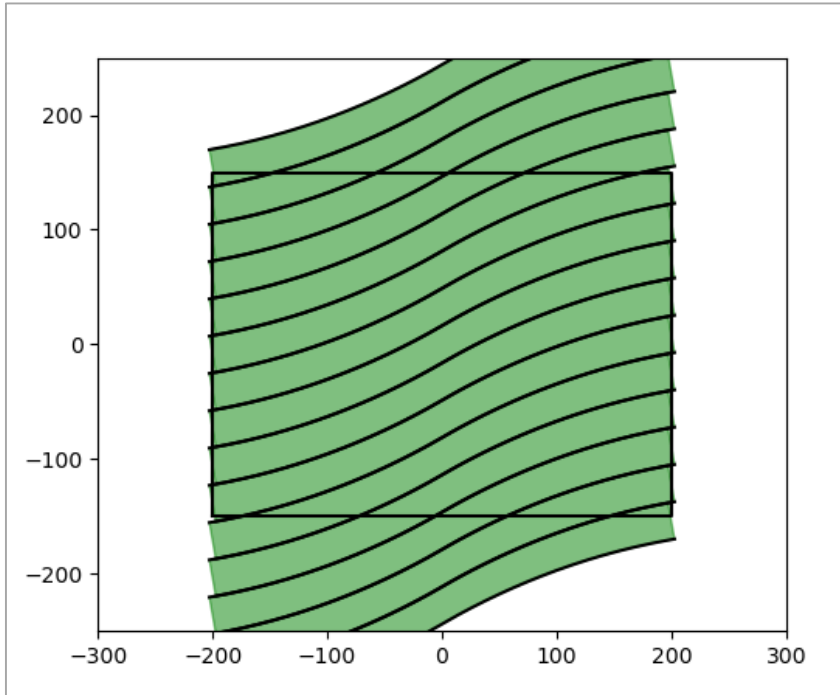
6.3.1. Değişken katılığa sahip kompozit plakanın modal analiz doğrulama çalışması modeli

Tez çalışmamızda değişken katılığa oluşturduğumuz plaka için yapılacak modal analizlerin ve plaka üzerine fiber serimi sonrası koordinat ve açı değerlerini veren Python kodumuzun doğruluğundan emin olmak amacıyla bir doğrulama çalışması yapılmıştır. Literatürde yapılan araştırmalar sonucu, Antunes ve diğerlerinin [12] yapmış olduğu farklı sınır koşulları altındaki değişken katınlı katmanlı kompozit plakaların deneysel ve nümerik modal analiz çalışması doğrulama açısından uygun bulunmuştur.

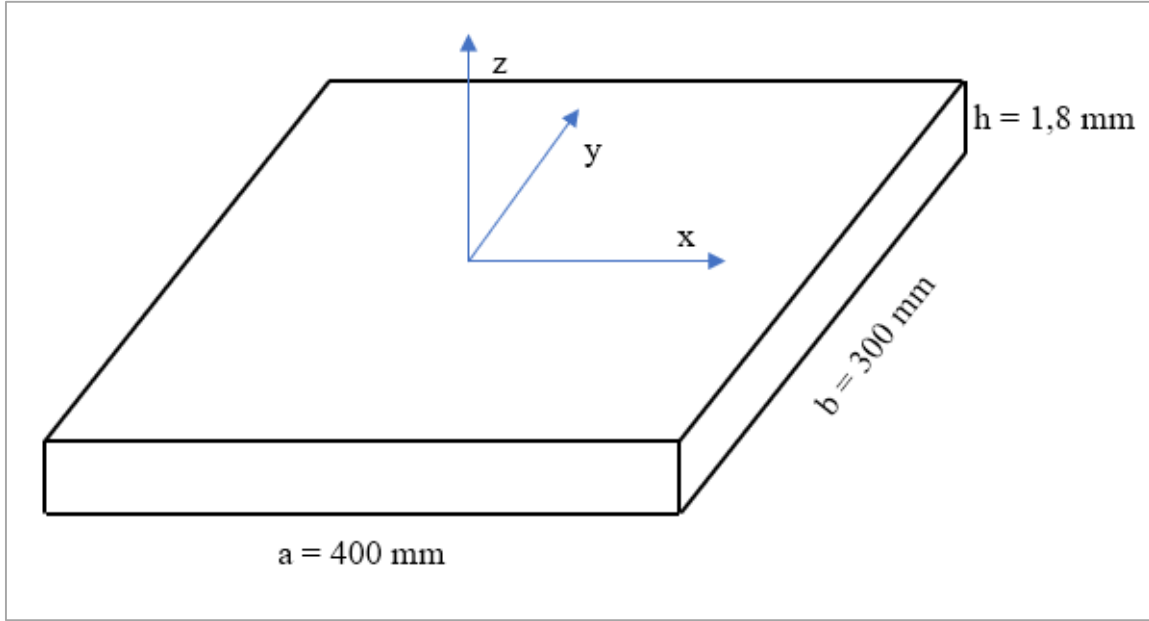
Şekil 6.6 ile verilen T_1 ve T_0 sırasıyla plakanın kenar ve merkez noktalarındaki açıları temsil etmektedir ve fiber yolu $\langle T_0 | T_1 \rangle$ olarak gösterilmektedir. Plakanın katman serimi ($\langle T_0 | T_1 \rangle$, $\langle -T_0 | -T_1 \rangle$, $\langle T_0 | T_1 \rangle$, $\langle -T_0 | -T_1 \rangle$, $\langle 90^\circ | 90^\circ \rangle$)_s $T_0=30^\circ$, $T_1=10^\circ$ alınarak Şekil 6.7’de verildiği gibi serim yapılmıştır. Katman sayısı 10 olan plakanın geometrik özellikleri ise (Şekil 6.8): $a = 400$, $b = 300$, $h = 1,8$ mm’dir. Plakanın malzemesi ise havacılık sektöründe yüksek performans gösteren Hexply AS4/8552’dir ve özellikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.6. Eğrisel referans fiber yolunun temsili



Şekil 6.7. Python kodu ile elde edilen $T_0=30^\circ$ ve $T_1=10^\circ$ açıları için fiber serilimi

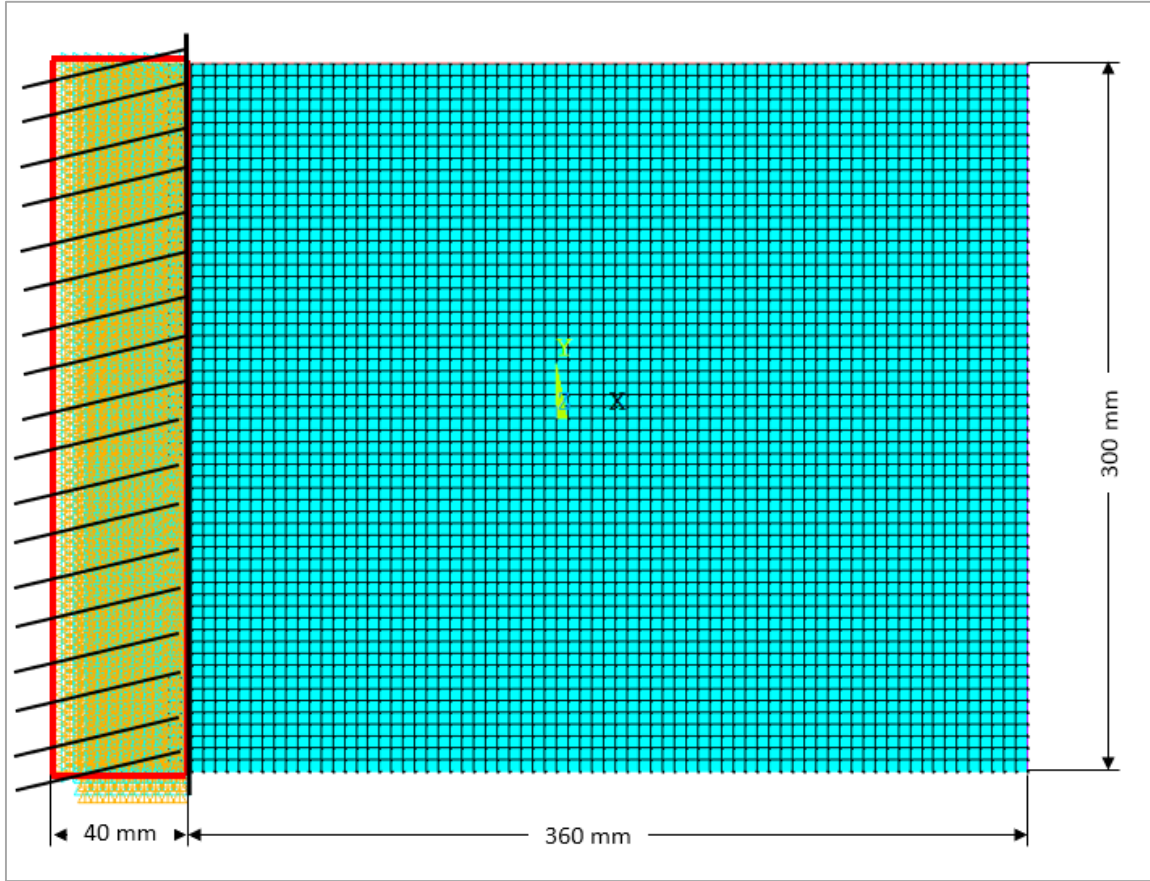


Şekil 6.8. Plakanın geometrik özellikleri

Çizelge 6.1. Antunes ve diğerlerinin analizlerinde kullandıkları plakanın malzeme özellikleri

Özellik	Değer	Birim
Boyuna Elastik Modülü, E_1	126,3	GPa
Enine Elastik Modülü, E_2	8,765	GPa
Düzlem İçi Kesme Modülü, G_{12}	4,92	GPa
Enine Kesme Modülü, G_{13}	4,92	GPa
Enine Kesme Modülü, G_{23}	3,35	GPa
Poisson Oranı, ν_{12}	0,334	-
Yoğunluk, ρ	1556,7	kg/m ³

Plakanın sınır koşulu ise Şekil 6.9’da gösterildiği gibi bir kenarı ankastre mesnet iken diğer üç kenara sınır koşulu uygulanmamıştır.



Şekil 6.9. Plakanın sınır koşulu

6.4. Patlama Yüğü Altındaki Plakaların Sonlu Elemanlar ile Analiz ve Simülasyonu

Tez çalışmamızın bu başlığı altında patlama yüküne maruz kalan plakanın SE ile modellenmesi ve simülasyonu anlatılacaktır. Bu bölümdeki amaç değişken katırlıklı katmanlı kompozit plakaların patlama yükü altında analizlerini yapma kabiliyetinin kazanılmasıdır. Bu sebeple öncelikle patlama analizi ve simülasyon modelleri oluşturulmuş ve literatürdeki çalışmalar ile doğrulanacaktır. Sonrasında ise, bir önceki başlıkta modal analiz doğrulama çalışması ile doğru modellendiğinden emin olduğumuz değişken katırlıklı katmanlı kompozit plakalar ile bu bölümde doğrulayacağımız patlama analizi birleştirilerek patlama yükü altında değişken katırlıklı katmanlı kompozit plakaların analiz ve simülasyon çalışması yapılmıştır.

Patlama analizleri doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler ile analiz edilebilir. Literatürde patlama yükü analizi çalışmalarının yapıldığı çalışmalar incelendiğinde çalışmaların geçici (doğrusal) analiz olarak yapıldığı görülmüştür.

6.4.1. Doğrusal ve doğrusal olmayan analizler

Patlama analizleri zamana bağlı olarak çözülen analiz türleridir ve doğrusal geçici ya da doğrusal olmayan analiz yöntemleriyle çözülebilirler.

Geçici dinamik analiz (bazen zaman tanım alanı analizi olarak da adlandırılır), herhangi bir genel zamana bağlı yükün etkisi altında bir yapının dinamik tepkisini belirlemek için kullanılan bir tekniktir. Statik, geçici ve harmonik yüklerin herhangi bir kombinasyonuna yanıt veren bir yapıdaki zamanla değişen yer değiştirmeleri, gerinimleri, gerilimleri ve kuvvetleri belirlemek için bu tür bir analiz kullanılabilir.

Doğrusal geçici analizler düğüm yer değiştirme ve katılık matrisine bağlı olarak eşitlik (6.1) ile arka planda çözülmektedir. Ansys programı New-mark zaman integrasyonu metodu ile belirlenmiş zaman adımları için yinelemeli olarak çözüm alır. Çözüm alınabilmesi için katılık matrisinin tersinin alınması gerekmektedir bu sebeple büyük bir modelde çözüm süresini uzatabilmektedir. Yinelemeli çözüm yapması sebebiyle her bir yinelemede yakınsama olması gerekmektedir. Doğrusal geçici analizlerde zaman adımı doğru sonucun alınabileceği gerekli büyüklükte oluşturulabilmektedir.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (6.1)$$

Doğrusal olmayan analizlerde de arka planda eşitlik (6.1) çözerek sonuçlar elde edilmektedir. Burada hareket denklemleri genel toplu kütle matrisi oluşturularak çözülür. Hız ve yer değiştirme, hareket denklemlerinin çözülmesinin ardından merkezi farklar yöntemi ile çözülür. Bu yöntemde bağımsız denklemler çözülerek sonuç alınması sebebiyle matrisin tersinin alınmasına gerek yoktur, böylece çözüm süresi hızlı gerçekleşmektedir. Denklem çözümleriyle sonuca gidilmesi sebebiyle yinelemeli bir analiz yapılmaz ancak eleman boyutunun küçülmesi zaman adımlarının küçülmesine ve çözüm süresinin uzamasına sebep olmaktadır.

6.4.2. Birinci dinamik analiz doğrulama çalışması modeli

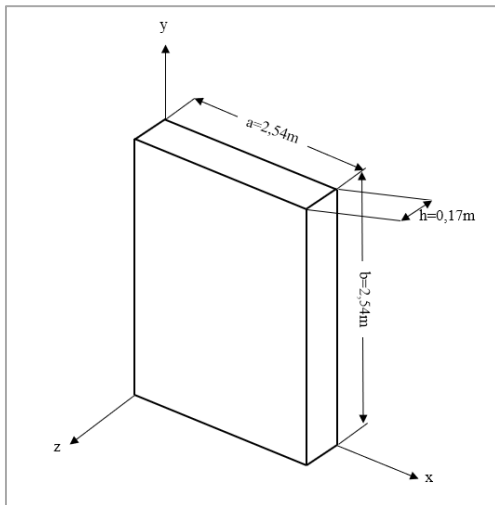
Literatürde yapılan araştırmalar sonucunda Kazancı ve Mecitoğlu'nun [20] ankastre mesnetli katmanlı kompozit plakanın patlama yükü altında doğrusal olmayan dinamik analiz çalışmasını doğrulamaya karar verilmiştir.

Kazancı ve Mecitoğlu'nun analizlerinde kullandıkları malzeme özellikleri Çizelge 6.2'de verilmiştir. Bu çalışmada, Friedlander denklemi (5.1) kullanılarak şok dalgasının tepe aşırı basıncı $P_m = 3447$ kPa, basınç yükünün pozitif süresi $t_p = 0,1$ s, dalga biçimi parametresi $\alpha = 2,0$ olarak alınmıştır.

Çizelge 6.2. Kazancı ve Mecitoğlu'nun analizlerinde kullandıkları plakanın malzeme özellikleri

Boyuna Elastik Modülü, E_1	132,4	GPa
Enine Elastik Modülü, E_2	10,8	GPa
Düzlem İçi Kesme Modülü, G_{12}	5,6	GPa
Poisson Oranı, ν_{12}	0,24	-
Yoğunluk, ρ	1443	kg/m ³

Kompozit plakanın boyutu Şekil 6.10'da verildiği üzere a ve b kenarı 2,54 m, plakanın kalınlığı h ise 0,17 m'dir.



Şekil 6.10. Kazancı ve Mecitoğlu'nun analizlerinde kullandığı plakanın geometrik özellikleri

Plaka sabit serim açısına sahip üç katmandan oluşturulmuş ve serim açıları ($\langle 0^\circ | 90^\circ | 0^\circ \rangle$) olarak verilmiştir. Plakaya dört kenarından ankastre mesnet olacak şekilde sınır koşulu uygulanmıştır. Modelleme aşamasından plaka 400 elamana bölünecek şekilde ağ yapısı oluşturulmuş ve analiz süresi 30 ms olacak şekilde analizler yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda plakanın patlama yükü altındaki zamana bağlı plaka orta noktasının yer değiştirme değeri elde edilecektir.

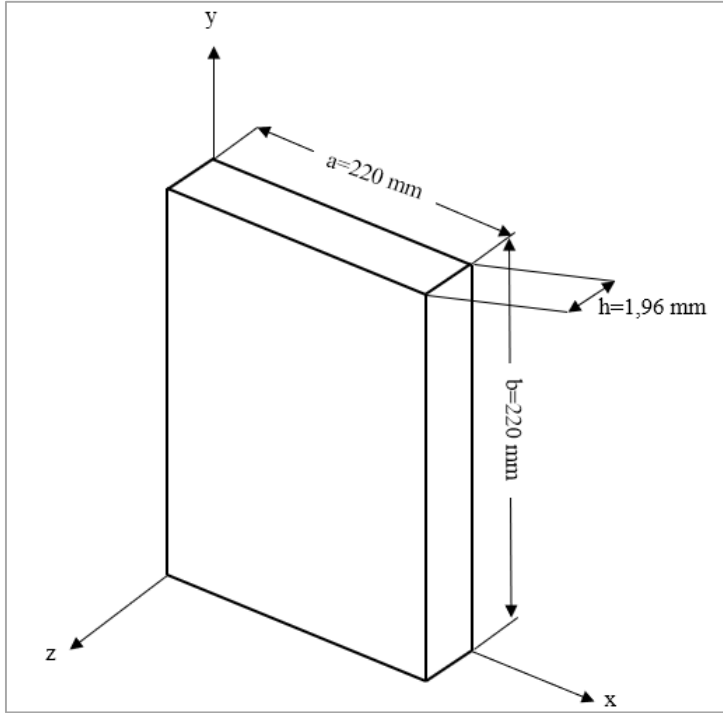
6.4.3. İkinci dinamik analiz doğrulama çalışması modeli

Patlama yükü altında dinamik analizini yaptığımız ilk doğrulama çalışmasında plakanın kenar uzunlukları ve kalınlığının büyük olması sebebiyle daha kısa kenarlı ve ince bir plaka için de doğrulama çalışmasının yapılmasına karar verilmiştir. Kazancı ve Mecitoğlu'nun [20] daha küçük bir plaka üzerinde yaptıkları analiz çalışmasının doğrulanması uygun bulunmuştur. Literatürde yapılan araştırmalar sonucunda Kazancı ve Mecitoğlu'ndan önce bu çalışmanın Türkmen'in [46] doktora çalışmasında yer aldığı görülmüştür. Kazancı ve Mecitoğlu, Türkmen'in çalışmasını bir ileri seviyeye çıkarmak amacıyla aynı malzeme özellikleri, basınç yükü, geometri, katman sayısı ve serim açılarını kullanarak analizlerini yapmışlardır. Bu çalışmada hem Türkmen'in sonuçları hem de Kazancı ve Mecitoğlu'nun sonuçları üzerinde doğrulama ve karşılaştırmalar yapılacaktır.

Plakanın malzeme ve geometrik özellikleri sırasıyla Çizelge 6.3 ve Şekil 6.11'de verilmiştir. Friedlander denklemi (5.1) kullanılarak şok dalgasının tepe aşırı basıncı $P_m = 28,9$ kPa, basınç yükünün pozitif süresi $t_p = 0,0018$ s, dalga biçimi parametresi $\alpha = 0,35$ olarak alınmıştır. Plaka serim açıları ($\langle 0^\circ | 90^\circ | 0^\circ | 90^\circ | 0^\circ | 90^\circ | 0^\circ \rangle$) olacak şekilde cam elyaf kumaş ile yedi katmandan oluşturulmuştur. Plakanın dört kenarı ankastre mesnettir.

Çizelge 6.3. Kazancı ve Mecitoğlu'nun analizlerinde kullandıkları plakanın malzeme özellikleri

Boyuna Elastik Modülü, E_1	24,14	GPa
Enine Elastik Modülü, E_2	24,14	GPa
Düzlem İçi Kesme Modülü, G_{12}	3,79	GPa
Poisson Oranı, ν_{12}	0,11	-
Yoğunluk, ρ	1800	kg/m ³



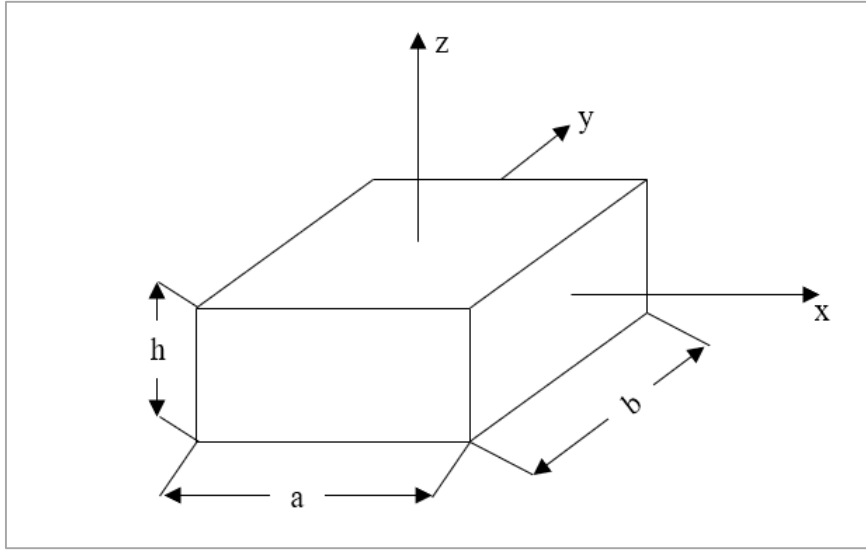
Şekil 6.11. Kazancı ve Mecitoğlu ‘nun analizlerinde kullandığı plakanın geometrik özellikleri

Kazancı ve diğerleri 400 eleman ile modellerini oluştururken Türkmen ise 256 eleman ile ağ yapısını oluşturmuştur. Analiz süresini Kazancı ve Mecitoğlu 50 ms alırken, Türkmen 10 ms olarak almıştır. Analiz çıktısı olarak plakanın orta noktasının zamana bağlı yer değiştirme değeri incelenecektir.

6.4.4. Üçüncü dinamik analiz doğrulama çalışması modeli

Bu başlık altındaki son doğrulama çalışmamız Heydarpour ve Aghdam’ın [26] geliştirdikleri yöntemle değişken katırlıklı kompozitler üzerinde yaptıkları geçici analiz çalışmalarındır. Heydarpour ve Aghdam’ın yayınlarında yer verdikleri patlama yükü ve sinüzoidal yük ile yaptıkları doğrulama çalışmalarını mevcut çalışmamız ile de doğrulamaya karar verilmiştir. Bu çalışmada aynı malzeme özellikleri ve geometri için iki farklı yük denklemi kullanılarak alınan analiz sonuçlarının doğrulaması yapılmıştır.

Çalışmada kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 6.4 ile aşağıda verilmiştir ve plakanın geometrik özellikleri, $a=b=5h$, $h=0,1524$ m’dir. Plaka üç katman olacak şekilde ($\langle 0^\circ | 90^\circ | 0^\circ \rangle$) serim açısı ile oluşturulmuştur. Sinüzoidal geçici yük denklemi ile yapılan analizlerde $q_0 = 68,9476$ MPa, $t_1 = 0,006s$, $\gamma_1=330 s^{-1}$ olarak alınmıştır.



Şekil 6.12. Heydarpour ve Aghdam'ın analizlerinde kullandığı plakanın geometrisi

Çizelge 6.4. Heydarpour ve Aghdam'ın analizlerinde kullandıkları plakanın malzeme özellikleri

Boyuna Elastik Modülü, E_1	172,369	GPa
Enine Elastik Modülü, E_2	6,895	GPa
Düzlem İçi Kesme Modülü, G_{12}, G_{13}	3,448	GPa
Enine Kesme Modülü, G_{23}	1,379	GPa
Poisson Oranı, $\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$	0,25	-
Yoğunluk, ρ	1603,03	kg/m ³

Modellerde yükler, sinüzoidal geçici yük denklemi (5.2) ile elde edilmiş olup, denklemde yer alan $P(t)$ değeri Çizelge 6.5'de verilen patlayıcı ve sinüs fonksiyonu olacak şekilde iki farklı yükleme durumu oluşturulmuştur. İki yükleme durumu için de plakaların sınır koşulu dört kenarından ankastre mesnet olacak şekilde modellenmiştir. Patlayıcı fonksiyonu ile modellenen analiz için çözüm süresi 0,008 saniye iken sinüs fonksiyonu ile modellenen analizin çözüm süresi 0,006 saniye olarak alınmıştır.

Çizelge 6.5. Farklı yükleme fonksiyonları $P(t)$

Yük	Patlayıcı	Sinüs
$P(t)$	$e^{-\gamma_1 t}$	$P(t) = \begin{cases} \sin(\pi t/t_1) & t \leq t_1 \\ 0 & t > t_1 \end{cases}$

6.5. Modelin İyileştirme Çalışmaları

Mevcut çalışmamızda yaptığımız DKK plakanın modal analiz doğrulama çalışması sonucu Python kodumuz ile DKK plakaları doğru bir şekilde modelleyebildiğimiz görülmüştür. Ardından SKK plakalar üzerinde geçici patlama yükü analizlerinin doğrulama çalışmalarıyla dinamik bir yapının geçici analiz ile çözebilme kabiliyeti kazanılmış ve DKK plakalar üzerinde de geçici bir patlama analizi yapabilme becerisine sahip olduğumuz görülmüştür. Doğrulama çalışmalarının ardından iyileştirme çalışmaları için gerekli algoritmanın oluşturulmasına karar verilmiştir.

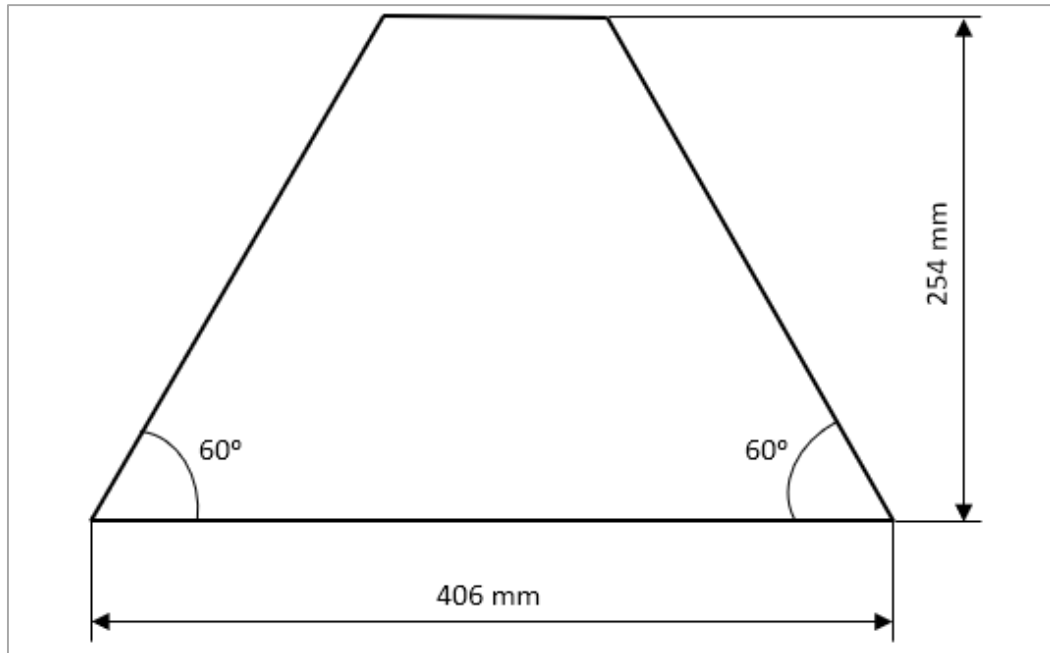
Tasarım çalışmasında en iyi sonucu elde edebilmek için tasarım uzayındaki farklı birçok girdinin çözülmesi gerekmektedir. Çalışmamızda istediğimiz çıktıya bağlı olarak farklı T_0 ve T_1 girdi değerlerinin çözülerek en optimum sonucun elde edilmesi hedeflenmiştir. İyileştirme çalışmasında Python ve APDL kodlarını alarak, tasarım uzayındaki farklı birçok girdi için bu kodları arka planda çalıştırıp sonuçlara bağlı olarak yanıt yüzeyi oluşturan bir program gerekli görülmüştür. Böyle bir iyileştirme çalışmasının ANSYS Workbench ile yapılabileceği araştırmalar sonucunda bulunmuştur. Workbench ile EK- 2 ve EK- 3’ de görüldüğü gibi bir iyileştirme çözüm şeması kurulmuş ve algoritma oluşturulmuştur.

Modal analiz iyileştirme çalışmasında Deney Tasarımı (“ing: Design of Experiment (DOE)”) ve Yanıt Yüzeyi Optimizasyonu (“ing: Response Surface Optimization”) kullanılmıştır. Deney Tasarımı ile tasarımı etkileyen girdi faktörleri ile analiz çıktıları arasındaki ilişki kurulur. İyileştirme sürecinde farklı girdiler oluşturarak optimum çıktının elde edilmesi hedeflenir. Oluşturulan her bir girdi noktası için SE analiz hesapları yapılır (ilgili katılık matrisinin tersi alınır) ve bu adım iyileştirme sürecinin en çok zaman alan adımı olması sebebiyle optimum sonucun en kısa sürede elde edilebilmesi için istatistiksel teknikler kullanır. Yanıt Yüzeyi Optimizasyonu ise Deney Tasarımı sürecinde kullanılan optimizasyonda çıktılar ile girdiler arasındaki ilişkiyi belirleyen bir dizi matematiksel yöntemdir ve girdi değişkenleri ile çıktıların iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Program uygunluk fonksiyonlarına göre yanıt yüzeylerini uygular ve değişken katılıklı plaka fiber yerleşimleri kontrollü elitizm kavramlarına dayalı olarak NSGA-II’yi kullanan MOGA kullanılarak iyileştirilir.

EK-2 ve EK-3 ile verilen iyileştirme çözüm şemaları kullanılarak birçok farklı analiz türü için optimum sonuçlar alınabilmektedir. Bu çalışmada üçgen kanat geometrisine sahip katmanlı kompozit plaka için modal ve patlama yükü altında geçici analizler iyileştirilmiştir. Modal analizde plakanın ilk yedi mod değeri için çözümler alınmıştır. İlk iki mod olan 1. mod ve 2. mod değerlerini maksimum yapacak T_0 ve T_1 açılı girdileri elde edilmiştir. Plakanın modal iyileştirme çalışması, geometrisi, katman sayısı, malzeme özellikleri, sınır koşulları, ağ yapısı ve analiz özellikleri aynı olan DKK ve SKK plaka için yapılmış olup sonuçlar karşılaştırılmıştır. Modal analizdeki iyileştirme ve karşılaştırmalar yapıldıktan sonra plakanın patlama yükü altındaki geçici analizi ile elde edilen yer değiştirme çıktıları iyileştirilmiştir. Plakanın üzerinde belirlenen bir noktanın patlama yükü altındaki deplasman değeri DKK ve SKK plaka için aynı koşullar altında yapılmıştır.

6.5.1. Değişken katılık değerine sahip plakaların modal analiz iyileştirme çalışmaları modeli

Modal analiz mod frekansı iyileştirme çalışmasında değişken katılık ve sabit katılık değerine sahip olan katmanlı kompozit kanat geometrisine sahip plaka kullanılmış ve özellikleri Şekil 6.13'te verilmiştir. Karbon epoksi G40- 800/5276-1 önceden reçine emdirilmiş (“ing : prepreg”) [31] malzemenin Çizelge 6.6 ile paylaşılan özellikleri kullanılmıştır.

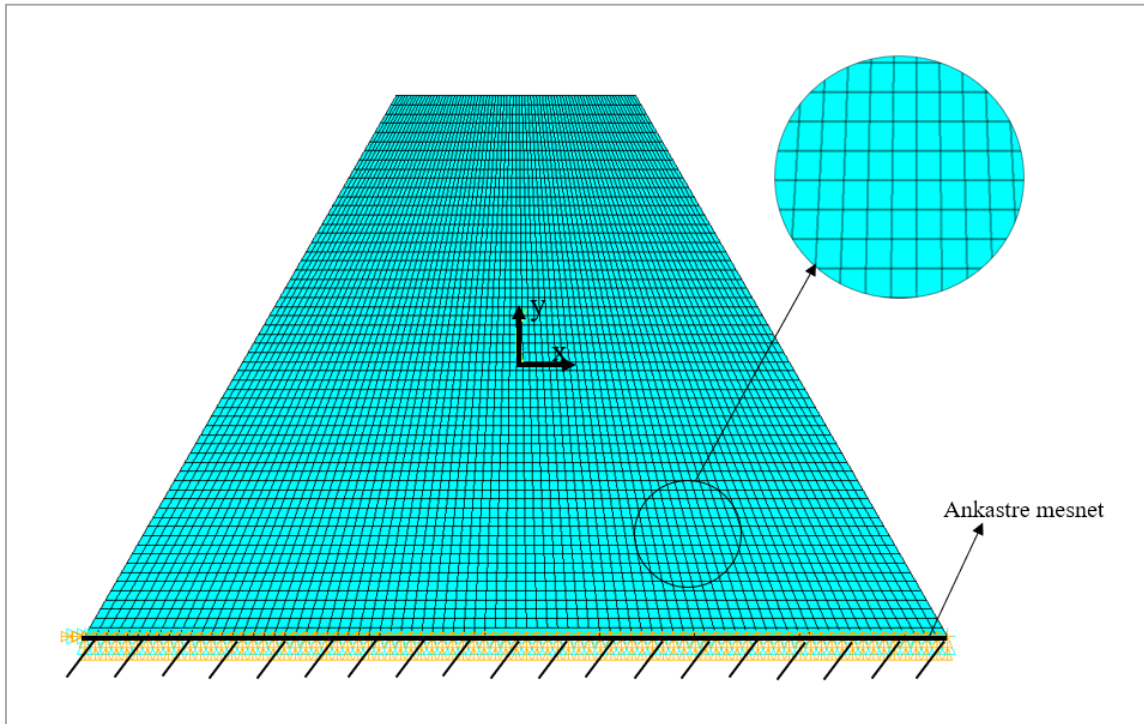


Şekil 6.13. Modal analiz iyileştirme çalışmalarında kullanılan plakanın geometrisi

Çizelge 6.6. Modal analiz iyileştirme çalışmalarında kullanılan malzeme özellikleri [31]

Boyuna Elastik Modülü, E_1	142,7	GPa
Enine Elastik Modülü, E_2	9,1	GPa
Düzlem İçi Kesme Modülü, G_{12}	4,82	GPa
Poisson Oranı, ν_{12}	0,3	-
Yoğunluk, ρ	1310	kg/m ³

Plaka simetrik 16 katmandan oluşacak şekilde modellenmiştir. Her bir katmanın kalınlığı $t_k = 1,59$ mm olarak alınmıştır. Plakanın 406 mm uzunluğundaki tabanı ankastre mesnet diğer üç kenarı serbest olacak şekilde sınır koşulu uygulanmıştır (Şekil 6.14). Değişken katınlıklı katmanlı kompozit kanat geometrili plakanın sonlu elemanlar modeli Ansys Mekanik APDL programında her bir düğüm noktasında 6 serbestlik derecesine sahip SHELL181 eleman tipi kullanılarak toplamda 4838 eleman ile ağ yapısı oluşturulacak şekilde kodlanmıştır.



Şekil 6.14. Modal frekans değerleri iyileştirilecek modelin sınır koşulu ve ağ yapısı

DKK plakanın modal analiz iyileştirme çalışmasında Deney Tasarımı (“ing: Design of Experiment (DOE)”) ve Yanıt Yüzeyi Optimizasyonu (“ing: Response Surface Optimization”) kullanılmıştır.

İyileştirme çalışması iki aşamada yürütülmüştür. Birinci aşama Deney Tasarımı girdilerinin ayrıık olarak elle girilmesi, ikinci aşama ise girdiler için belirli bir maksimum minimum aralığına bağlı olarak sürekli Deney Tasarımı girdilerinin oluşturulmasıdır. İki farklı iyileştirme yapılmasının amacı ise birinci aşamada elle girilen T_0 ve T_1 girdileri için istenilen çıktıların elde edilebileceği girdi aralığının belirlenerek daha küçük bir alanda en iyi açı değerlerinin elde edilmesini sağlamak ve iyileştirme süresini kısaltmaktır. Birinci aşamada girdiler Çizelge 6.7’de verildiği gibi T_0 ve T_1 açı değerleri 5 ile 85 derece arasında 5’er derece artacak şekilde oluşturulmuştur. Böylece çıktılarımız olan modal frekans değerlerinden model1 ve model2 frekanslarını maksimize edecek açı değer aralığı kolaylıkla belirlenebilmiştir. Çizelge 6.7 ile verilen açı değerleri için 289 farklı Deney Tasarımı girdisi oluşturulmuş ve her bir girdi için çözüm alınmıştır.

Çizelge 6.7. DKK plakanın modal frekans değerlerinin iyileştirme çalışması için girdiler

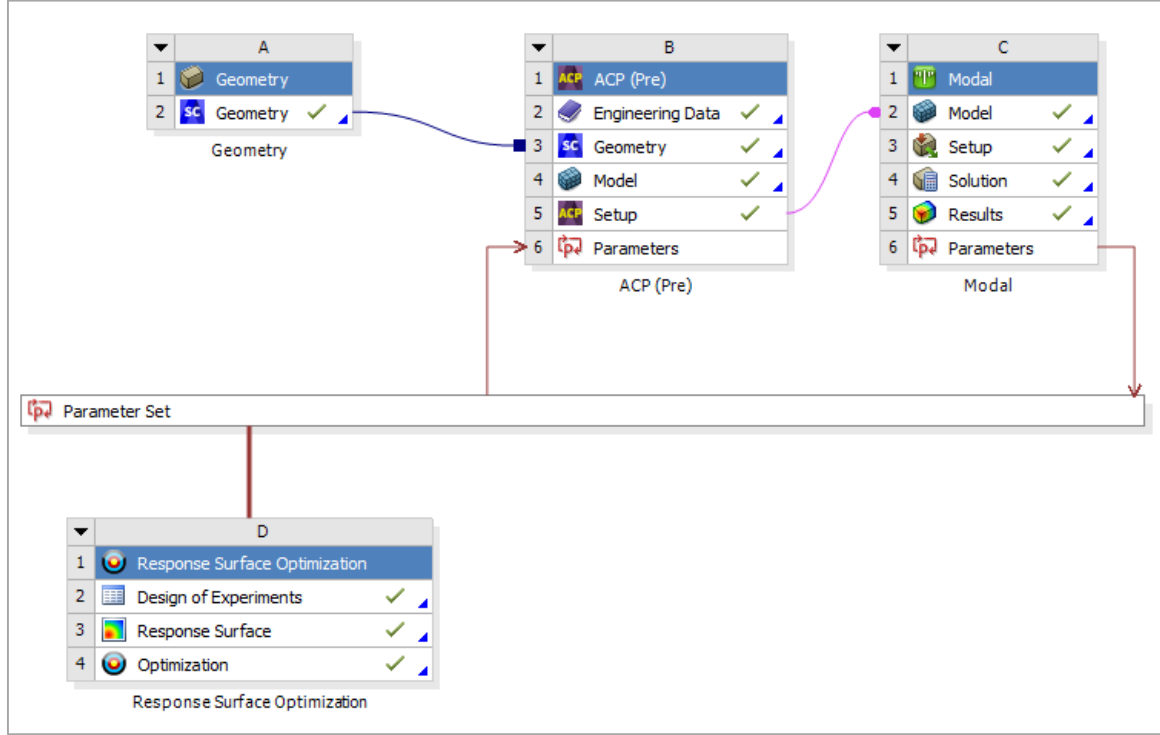
Girdiler	Açı Değerleri
T_0	5,10,15,20,25,30,35,40,45,50,55,60,65,70,75,80,85
T_1	5,10,15,20,25,30,35,40,45,50,55,60,65,70,75,80,85

6.5.2. Sabit katılık değerine sahip plakaların modal analiz iyileştirme çalışmaları modeli

SKK plakalar ile DKK plakaların modal davranışı arasındaki farkı görebilmek, DKK plakaların tasarım uzayında nasıl bir etki yarattıklarını ortaya koyabilmek için, bu bölümde SKK plakaların iyileştirme çalışması yapılarak DKK plakaların iyileştirme sonucu ile karşılaştırılacaktır. SKK plakanın iyileştirme çalışmasında kullanılan geometri (Bkz.Şekil 6.13), malzeme özellikleri (Bkz.Çizelge 6.6), sınır koşulları (Bkz.Şekil 6.14), ağ yapısı, katman sayısı (16 katman) ve kalınlığı ($t_k=1,59\text{mm}$) DKK plakanın iyileştirme çalışmasında kullanılan değerler ile birebir aynı olacak şekilde modeli oluşturulacaktır

Plaka 16 katmandan oluşacak şekilde modellenmiştir. SKK plakaların iyileştirme çalışmasında Ansys Workbench modülü kullanılmış ve ACP modülü ile modellenmiştir. DKK plakaların iyileştirme çalışmasında Ansys Workbench modülüne APDL modülü bağlanarak ve değişken katılık özelliğini sağlayan açı değerlerini elde ettiğimiz Python kodumuzu bir arada çalıştıran bir algoritma kurulmuştu. Ancak SKK plakalar sabit açı

değerlerine sahip olmaları sebebiyle herhangi bir koda ihtiyaç olmadan ACP modülü ile rahatlıkla modellenip optimizasyona Şekil 6.15’de görüldüğü gibi bağlanabilmektedir.



Şekil 6.15. SKK Plakalar için modal analiz iyileştirme döngüsünün kurulması

SKK plakalar için iyileştirme kurgusu $[T1|T2|T3|T4]_4$ serim açısı için T1 açısı değerleri 5 ile 80 derece arasında 5'er, 80 ile 85 arasında 1'er derece artan ve T3 açıları ise T1 açısının negatif olarak olacak şekilde oluşturulmuştur. T2 ve T4 açıları ise 0 ya da 90 derece olan olacak şekilde girilmiş ve tüm açısı değerleri ile Deney Tasarımı noktaları oluşturulmuştur. Dengeli ve simetrik bir yapı oluşturmak amacıyla T2 ve T4 açıları 0 ve 90 derecede sabit bırakılmıştır.

Çizelge 6.8. SKK Plakaların iyileştirme çalışmasında Deney Tasarımı noktalarını oluşturan girdiler

Girdiler	Açı Değerleri
T1	5,10,15,20,25,30,35,40,45,50,55,60,65,70,75,80,81,82,83,84,85
T2	0,90
T3	-5,-10,-15,-20,-25,-30,-35,-40,-45,-50,-55,-60,-65,-70,-75,-80,-81,-82,-83,-84,-85
T4	0,90

6.5.3. Değişken katırlıklı kompozit plakaların patlama yükü altında geçici dinamik analiz iyileştirme çalışması modeli

Katmanlı Kompozit plakaların geçici dinamik analizi ile ilgili doğrulama çalışmalarının yapılması ile iyileştirme çalışması adımına geçilmeye karar verilmiştir. DKK plakanın iyileştirme çalışmasında kullanılan geometri modal analiz iyileştirme çalışmalarında kullanılan geometri (Bkz. Şekil 6.13), malzeme özellikleri (Bkz. Çizelge 6.6) [31], sınır koşulları (Bkz. Şekil 6.14), ağ yapısı, katman sayısı (16 katman) ve kalınlığı ($t_k=1,59\text{mm}$) ile eştir.

Patlama yükü Friedlander denklemi (5.1) kullanılarak şok dalgasının tepe aşırı basıncı $P_m = 28,9 \text{ kPa}$, basınç yükünün pozitif süresi $t_p = 0,0018\text{s}$, dalga biçimi parametresi $\alpha = 0,35$ olarak alınmıştır [20] ve aşağıda denklem (5.1) ile paylaşılmıştır. Analiz çözüm süresi $t = 0,005$ saniye olarak alınmıştır.

$$P(t) = P_m \left[1 - \left(\frac{t}{t_p} \right) \right] e^{-\alpha t/t_p} \quad (5.1)$$

DKK plakanın Ansys APDL ile modellenip iyileştirme çalışmasının yapılabilmesi için modelin APDL kodu ile oluşturulması gerekmektedir. Bu sebeple plaka üzerine serim yapılacak fiber açılarının koordinatlarının alındığı Python kodunu çalıştırıp açı değerlerini çeken, plakanın geometrisini, ağ yapısını, sınır koşulunu ve patlama yükünü patlama denklemi ile modelleyebilen APDL kodu yazılmıştır. APDL kodunun başarıyla çalışmasının ardından, APDL ve Python kodumuzu Ansys Workbench modülüne okutarak Deney Tasarımı ve Yanıt Yüzeyi Optimizasyonu ile iyileştirme çalışması EK- 2 ile verilen algoritma kullanılarak yapılmıştır.

Bu çalışmada sistemin sönümleme etkisi korunum denkleminde ihmal edilmiştir ve böylece patlama yükü ile elde edilen enerji döngüler içerisinde sönümleme ile harcanmamıştır. Geçici analiz çözüm ayarlarında büyük yer değiştirmeler aktif hale getirilmiş ve zaman entegrasyonu olarak Newmark algoritması seçilmiştir.

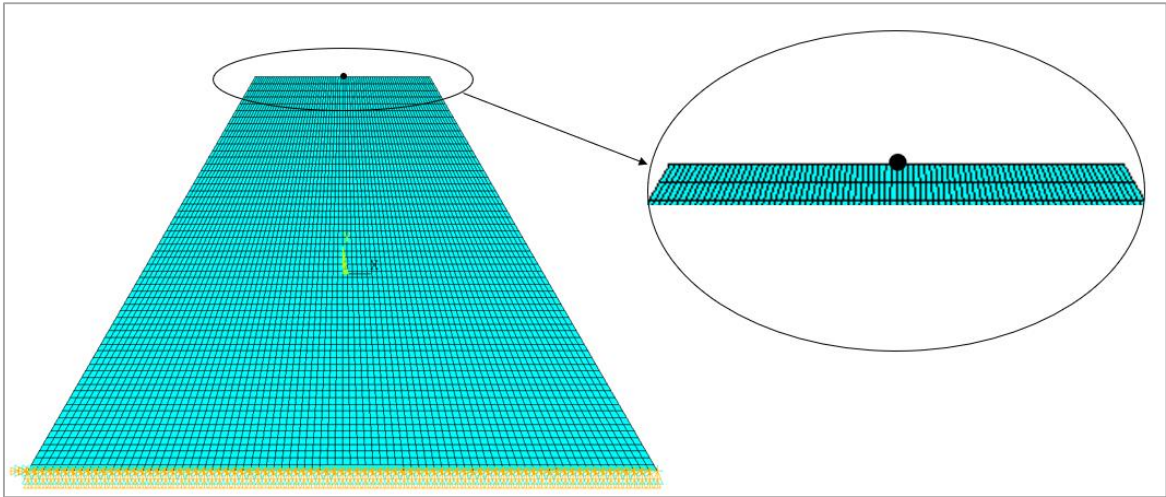
Birinci iyileştirme çalışması modeli

DKK plakanın geçici dinamik analiz iyileştirme çalışmasında iki farklı çalışma yapılmıştır. Birinci iyileştirme adımında girdiler Çizelge 6.9’da verildiği gibi T_0 ve T_1 açı değerleri 5 ile 85 derece arasında 5’er derece artacak şekilde oluşturulmuştur. Böylece plakanın patlama yükü sonrası yer değiştirme değerini minimum yapacak eğrisel fiber serim açılarının değer aralığı kolaylıkla belirlenebilmiştir.

Çizelge 6.9. DKK plakanın birinci geçici dinamik analiz iyileştirme çalışmasında kullanılan T_0 ve T_1 açı değerleri

Girdiler	Açı Değerleri
T_0	5,10,15,20,25,30,35,40,45,50,55,60,65,70,75,80,85
T_1	5,10,15,20,25,30,35,40,45,50,55,60,65,70,75,80,85

Analiz çıktısı olarak Şekil 6.16’da verilen plakanın üst kenarının orta noktasındaki yer değiştirme değeri incelenmiştir.

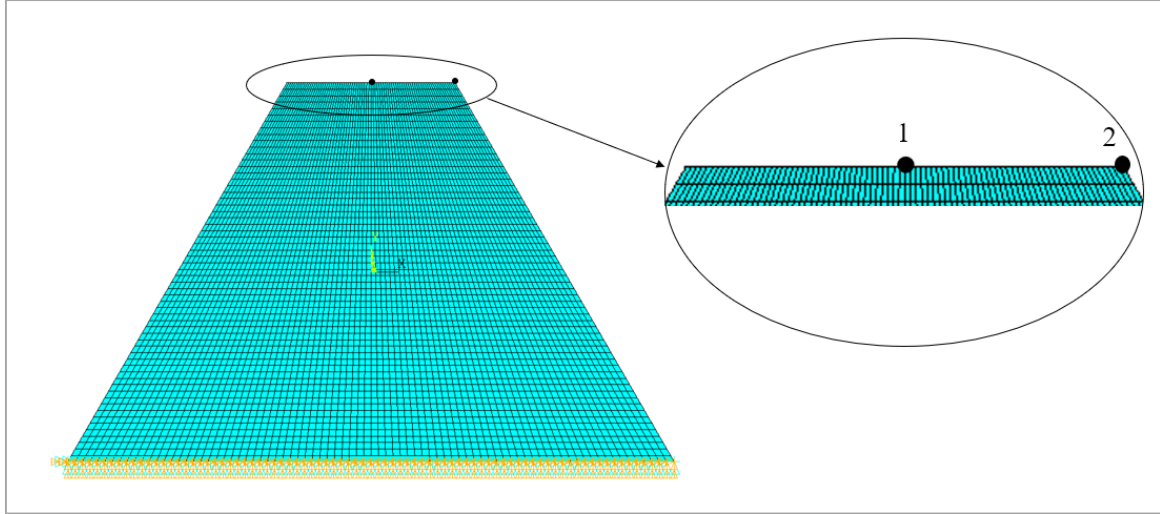


Şekil 6.16. DKK plakanın birinci geçici dinamik analiz iyileştirme çalışmasında yer değiştirme değerinin okunduğu noktanın konumu

İkinci iyileştirme çalışması modeli

İkinci iyileştirme aşamasında ise yer değiştirme değerini minimum yapan eğrisel fiber açı aralıkları için sürekli bir Deney Tasarımı girdileri ile daha detaylı bir iyileştirme çalışması

yapılmıştır. Birinci iyileştirme aşamasında elde edilen veriler doğrultusunda yer değiştirme değerini minimum yapan T_1 ve T_0 açı girdilerinin sırasıyla 60-85 derece aralığında olması sebebiyle 300 Deney Tasarımı girdisi bu aralık için oluşturulmuştur. Bu aşamada birinci iyileştirme çalışmasından farklı olarak Şekil 6.17 ile verilen plakanın üst kenar orta noktası (1) ile üst kenar köşe noktasındaki (2) yer değiştirme değerleri analiz çıktısı olarak alınmıştır.



Şekil 6.17. DKK plakanın ikinci geçici dinamik analiz iyileştirme çalışmasında yer değiştirme değerlerinin okunduğu noktaların konumu

6.5.4. Sabit katırlıklı kompozit plakaların patlama yükü altında geçici dinamik analiz iyileştirme çalışması modeli

SKK plakaların sabit serim açısı ile DKK plakaların değişken fiber serim açısıyla üretilmesinin yapının dinamik yük altındaki davranışını nasıl etkileyeceğini gözlemlemek bu başlık altındaki çalışmanın ana konusudur. SKK plakalar ile DKK plakaların patlama yükü altındaki dinamik davranışları arasındaki farkı görebilmek için patlama yükü sonrasında plakanın belirli bölgelerindeki yer değiştirme değerleri karşılaştırılmıştır. SKK plakanın patlama yükü altında geçici dinamik analiz iyileştirme çalışmasında, geometri (Şekil 6.13), malzeme özellikleri (Çizelge 6.6), sınır koşulları (Şekil 6.14), ağ yapısı, katman sayısı (16 katman) ve kalınlığı ($t_k=1,59\text{mm}$) DKK plakanın iyileştirmesinde kullanılan değerler ile birebir aynı olacak şekilde alınmıştır. (Bkz. Şekil 6.17) ile verilen 1 ve 2 numaralı noktaların yer değiştirme değerleri incelenecektir.

7. BULGULAR YORUMLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde (Bkz.) 6.bölüm altında anlatılan analiz modellerinin sayısal olarak çözdürülmesi sonucu elde edilen bulgular alt başlıklar halinde yorumlanacak ve tartışılacaktır.

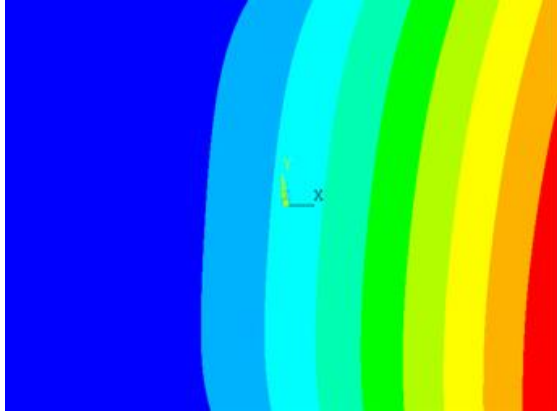
7.1. Değişken Katılığa Sahip Kompozit Plakanın Modal Analiz Bulguları

DKK plakanın modal analizinde kullanılan malzeme özellikleri (Bkz. Çizelge 6.1), geometrik özellikleri (Bkz. Şekil 6.8) ve sınır koşulu (Bkz. Şekil 6.9) uygulanarak modal analizi sonlu elemanlar yöntemi ile Ansys APDL programında çözdürülmüştür. Analiz sonucu elde edilen bulgular literatürde yer alan Antunes ve diğerlerinin [12] çalışmasındaki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Plakanın ilk yedi mod değeri için analiz sonucu alınmış ve karşılaştırma tablosu Çizelge 7.1’de verilmiştir.

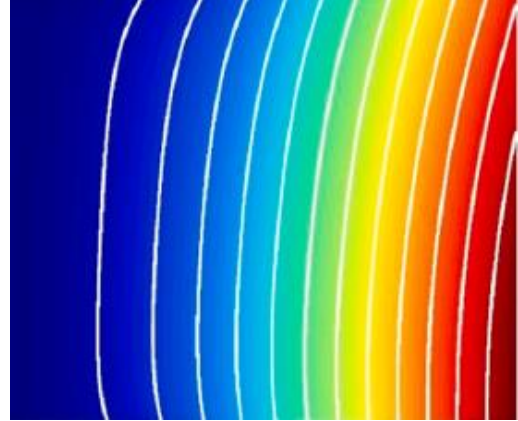
Çizelge 7.1. DKK plakanın modal analiz doğrulama çalışması sonuçları ve karşılaştırma tablosu

Mod	Antunes ve Diğerleri (hz)	Mevcut Çalışma (hz)	Fark (%)
1	17,16	17,158	0,01
2	38,57	38,554	0,04
3	85,78	85,726	0,06
4	107,3	107,36	0,06
5	131,9	131,88	0,02
6	186,7	186,92	0,12
7	214,4	214,33	0,03

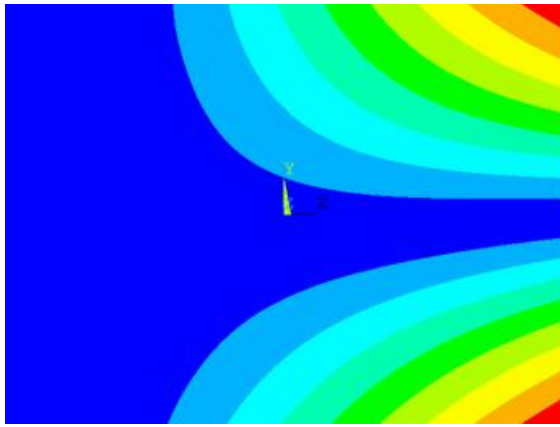
Mevcut çalışma ile Antunes ve diğerlerinin elde ettikleri ilk yedi mod şekilleri karşılaştırmalı olarak Şekil 7.1 ile verilmiştir.



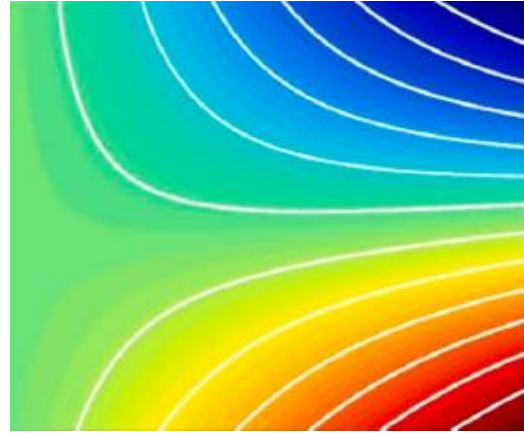
(Mod 1) Mevcut Çalışma



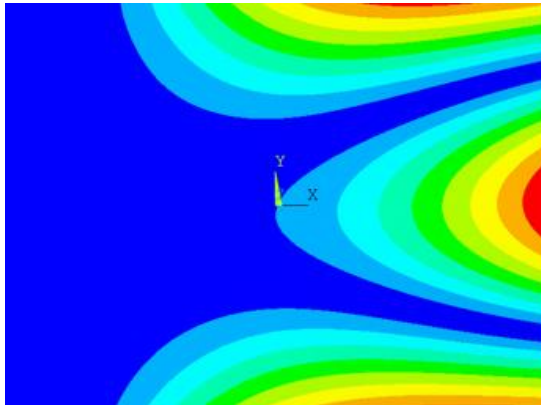
(Mod 1) Antunes ve Diğerleri



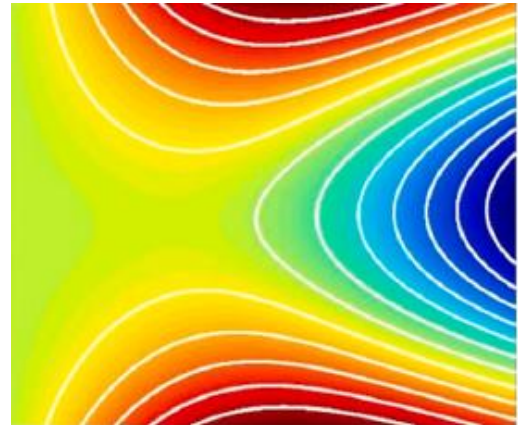
(Mod 2) Mevcut Çalışma



(Mod 2) Antunes ve Diğerleri

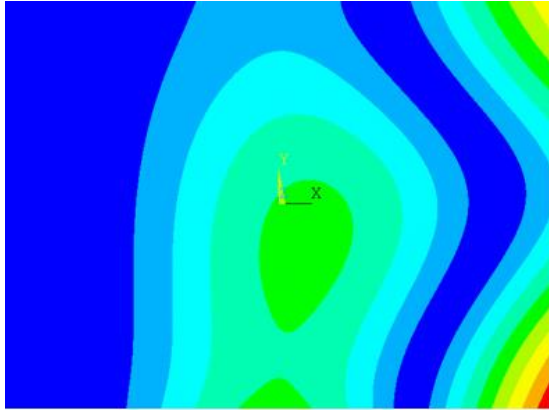


(Mod 3) Mevcut Çalışma

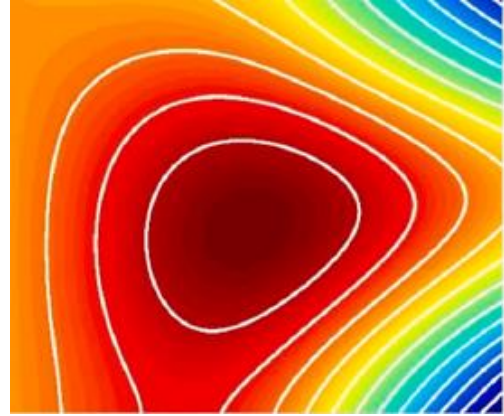


(Mod 3) Antunes ve Diğerleri

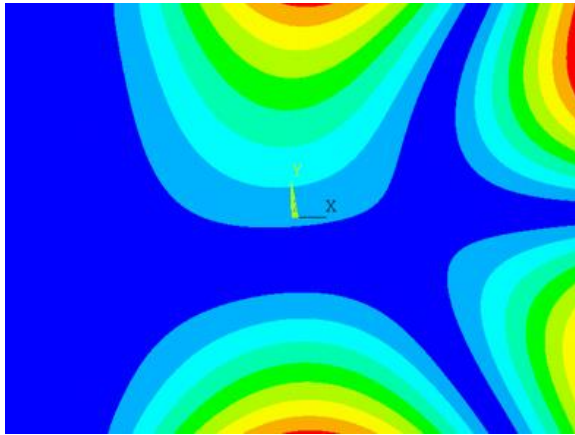
Şekil 7.1. DKK plakanın modal analiz doğrulamasında mevcut çalışma ile Antunes ve diğerlerinin analiz sonuçlarındaki mod şekilleri [16]



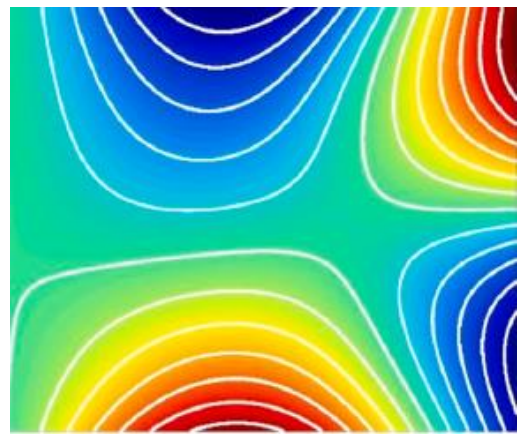
(Mod 4) Mevcut Çalışma



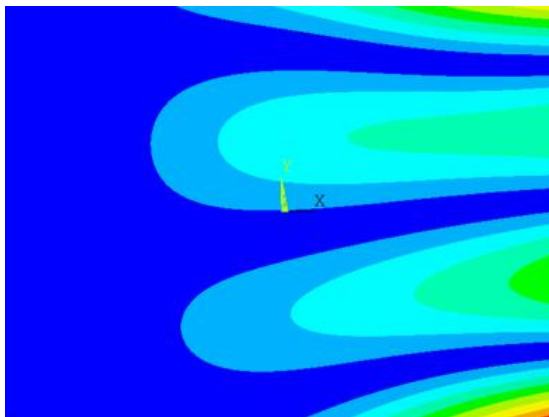
(Mod 4) Antunes ve Diğerleri



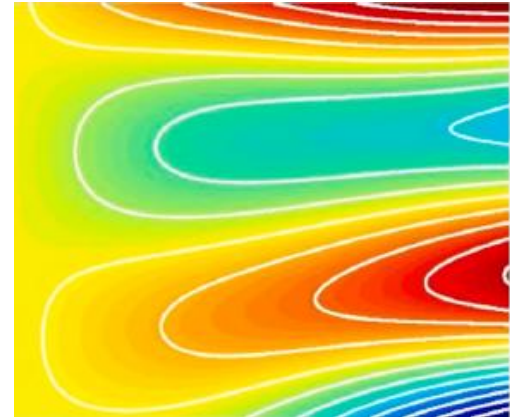
(Mod 5) Mevcut Çalışma



(Mod 5) Antunes ve Diğerleri

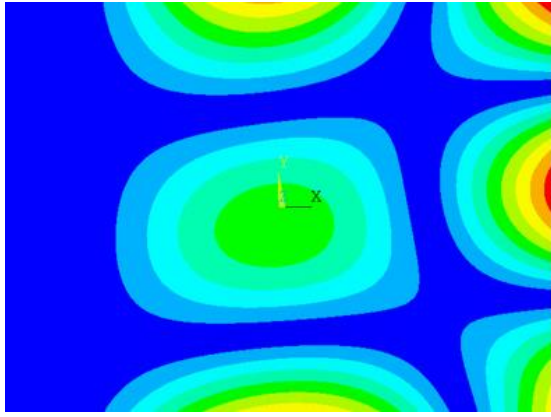


(Mod 6) Mevcut Çalışma

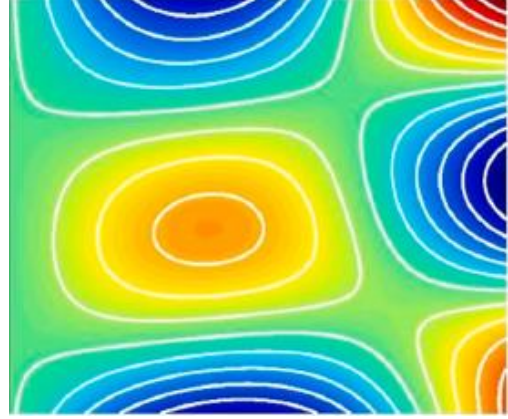


(Mod 6) Antunes ve Diğerleri

Şekil 7.1. (devam) DKK plakanın modal analiz doğrulamasında mevcut çalışma ile Antunes ve diğerlerinin analiz sonuçlarındaki mod şekilleri [16]



(Mod 7) Mevcut Çalışma



(Mod 7) Antunes ve Diğerleri

Şekil 7.1. (devam) DKK plakanın modal analiz doğrulamasında mevcut çalışma ile Antunes ve diğerlerinin analiz sonuçlarındaki mod şekilleri [16]

Çizelge 7.1. DKK plakanın modal analiz doğrulama çalışması sonuçları ve karşılaştırma tablosu (Bkz. Çizelge 7.1) incelendiğinde doğrulamasını yaptığımız makalenin sonuçları Antunes ve diğerleri sütununda, bu tezde elde edilen sonuçlar ise mevcut çalışma sütununda yer almaktadır. Sonuçlar arasında farklar hesaplandığında ilk yedi mod değeri için 0,12% ile 0,01% arasında çok küçük farklar olduğu görülmüş ve doğrulama çalışması tamamlanmıştır. Bu çalışmadaki sonuçlar ile, Python kodumuzdan elde ettiğimiz DKK plakanın fiber serim koordinat ve açı değerlerinin doğruluğu, model içerisinde bu değerlerin ağ yapısına doğru bir şekilde eşlendiği ve doğru bir modal analiz çalışması yapıldığı kanıtlanmıştır. Değişken fiber yolu ile tanımlanan değişken katırlıklı kompozit plakanın Python kodumuz ile doğru modellenebiliyor olması farklı türdeki analiz çalışmalarında da doğru sonuçlar vereceğini göstermiştir.

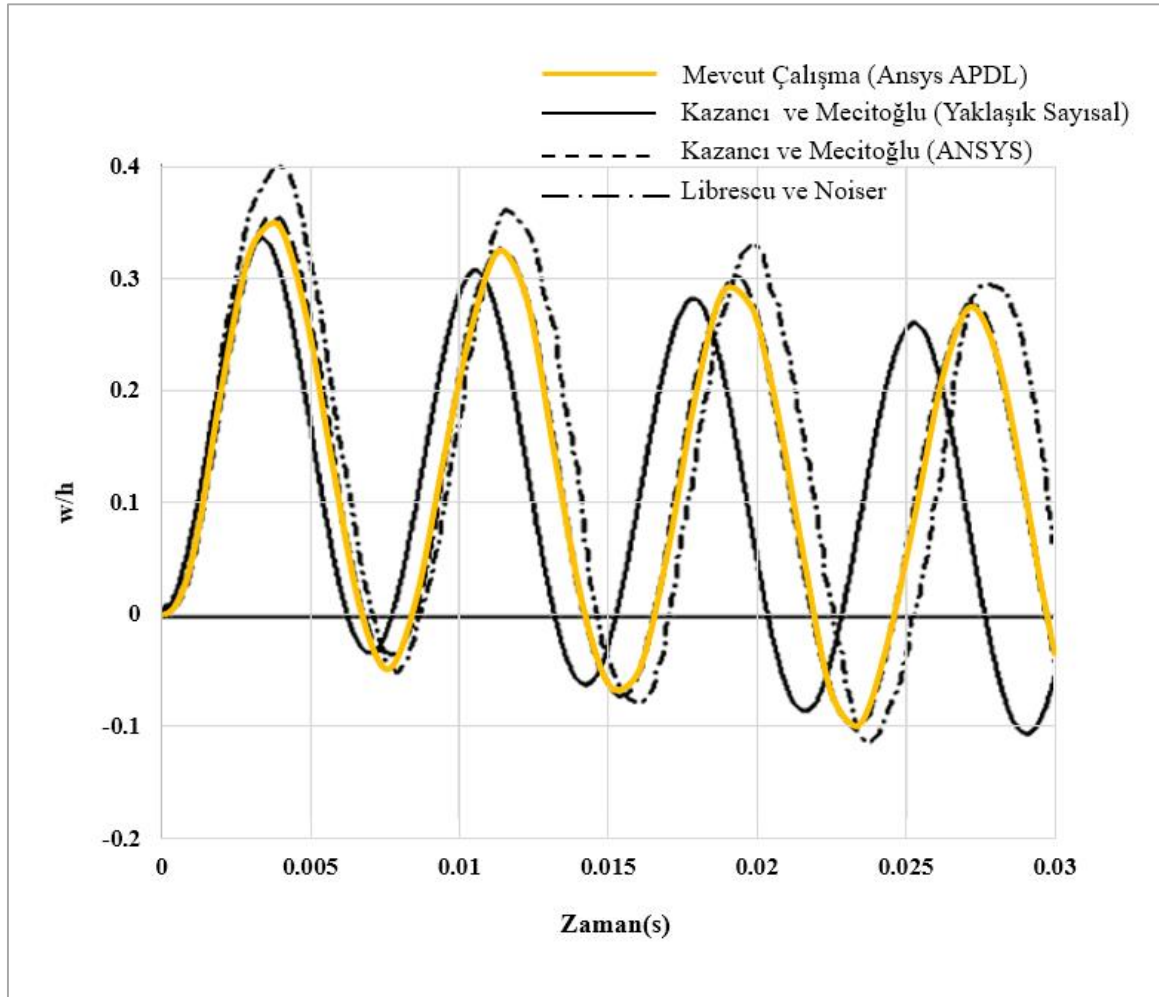
7.2. Patlama Yüğü Altındaki Kompozit Plakanın Dinamik Analiz Bulguları

Bu başlık altında geçici dinamik analiz modelleme çalışması yapılmış olan kompozit plakların bulguları verilecek ve literatürdeki yapılmış olan çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

7.2.1. Birinci dinamik analiz doğrulama çalışması bulguları

Analiz ve Modelleme başlığı altında malzeme özelliği (Bkz. Çizelge 6.2), geometrisi (Bkz. Şekil 6.10) ve patlama yüğü verilen katmanlı kompozit modelin geçici dinamik analiz

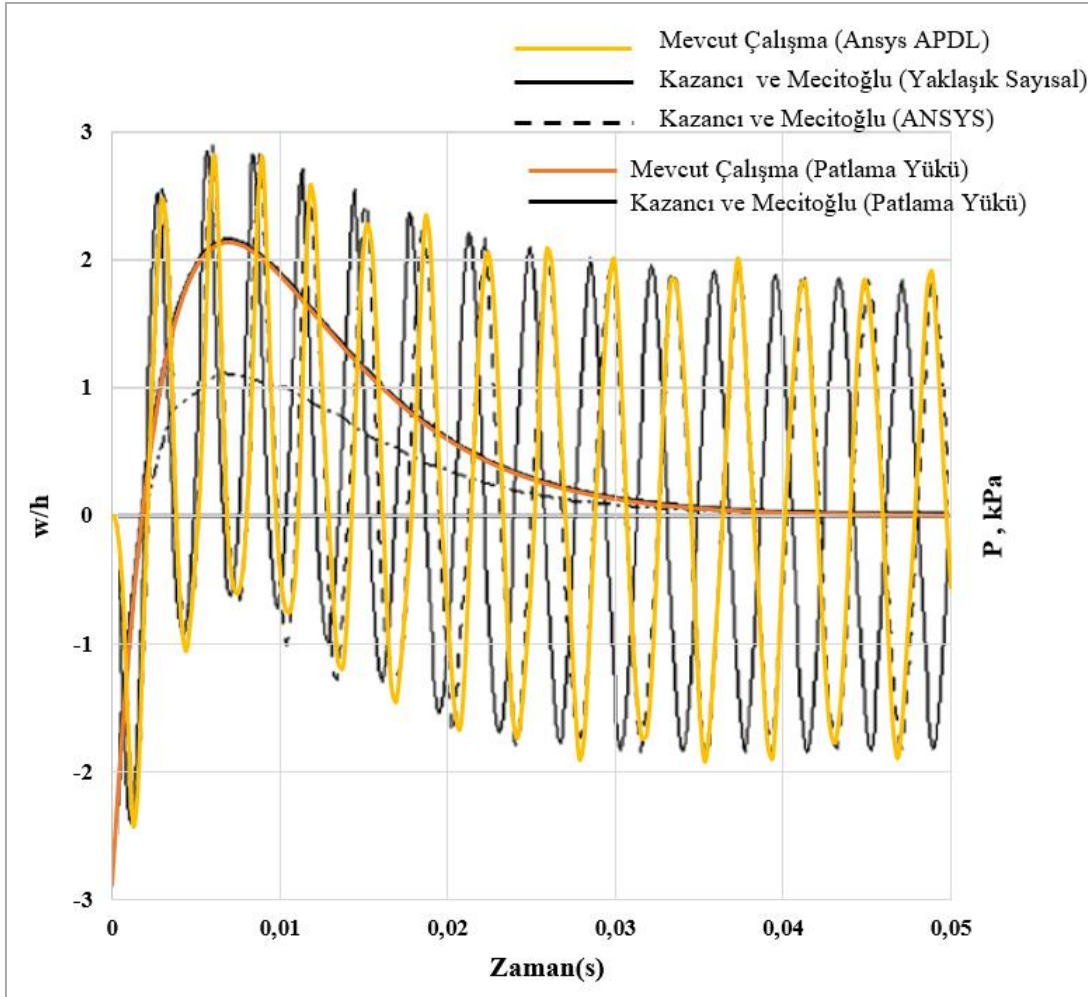
çalışması yapılmış ve Kazancı ve Mecitoğlu'nun [20] çalışmalarındaki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yaptığımız doğrulama çalışması ile elde ettiğimiz mevcut analiz sonucu ve Kazancı ve Mecitoğlu'nun [20] yaptıkları çalışmalardan elde ettikleri sonuçların karşılaştırma grafiği Şekil 7.2'de verilmiştir. Doğrulama çalışması süresince doğrusal olmayan ve doğrusal geçici analiz çalışmaları yapılmıştır ve iki analiz türünde de yakın sonuçlar elde edilmiştir. Kazancı ve diğerlerinin analiz çalışmalarını doğrusal geçici yapmaları sebebiyle en yakın sonuç doğrusal geçici analiz ile elde edilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde Kazancı ve diğerlerinin ANSYS ile elde ettikleri grafik ile APDL sonuçlarımızın zamana bağlı yer değiştirme ve genliklerinin üst üste çok iyi bir şekilde örtüştükleri görülmüştür.



Şekil 7.2. Kazancı ve Mecitoğlu ile mevcut çalışmanın analiz sonuçları

7.2.2. İkinci dinamik analiz doğrulama çalışması bulguları

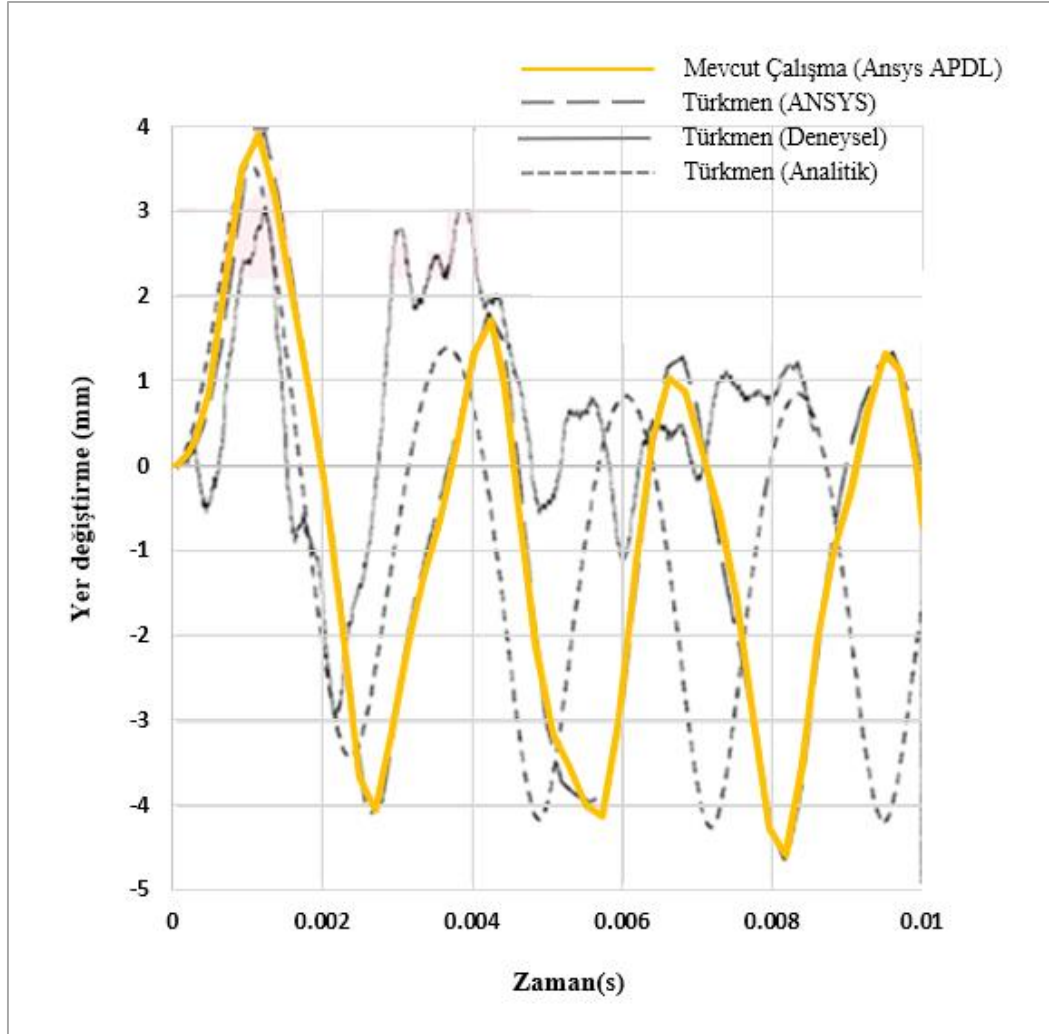
Dinamik analiz doğrulaması için oluşturulan ikinci model (Bkz. Şekil 6.11), (Bkz. Çizelge 6.3) ile patlama yükü altında doğrusal geçici analizini yaptığımız ikinci doğrulama çalışmasında elde ettiğimiz analiz sonucunun, Kazancı ve Mecitoğlu'nun [20] yaptıkları çalışmadaki sonuç ile çok yakın olduğu Şekil 7.3'de verilen grafik ile görülmektedir. Bu grafik daha detaylı incelendiğinde ANSYS kullanarak elde ettikleri grafik ile mevcut çalışmamızdaki ANSYS APDL sonucunun zamana bağlı yer değiştirme ve genliklerinin çok yakın oldukları görülmüştür.



Şekil 7.3. Kazancı ve Mecitoğlu ile mevcut çalışmanın analiz sonuçları

Şekil 7.4'da ise Türkmen'in [46] yaptığı çalışma ve doğrulamak amacıyla elde ettiğimiz mevcut sonuçlar yer almaktadır. Sonuçlar incelendiğinde Türkmen'in ANSYS grafiği ile

mevcut çalışmadaki ANSYS APDL grafiğinin birbirleriyle uyum içinde olduğu görülmektedir.



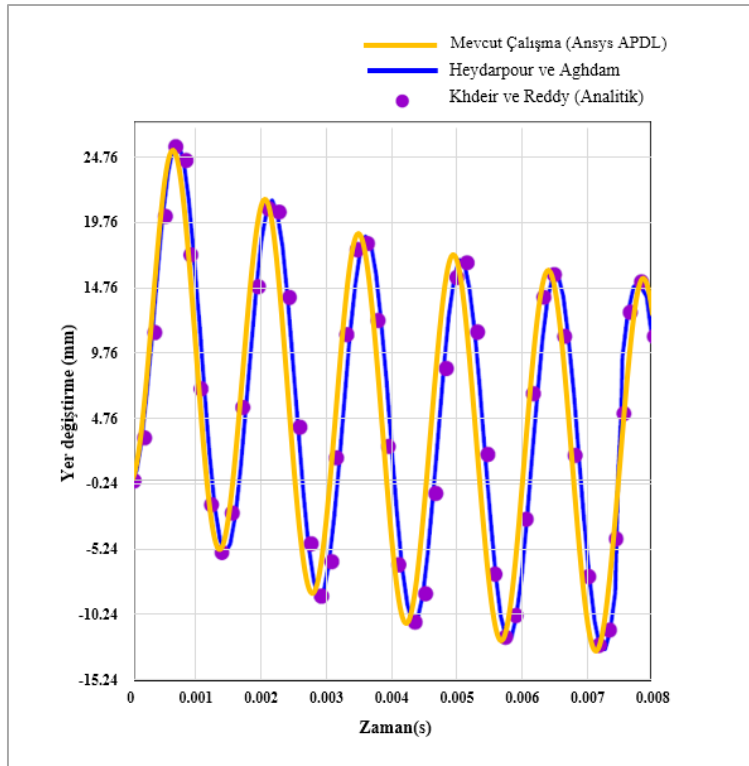
Şekil 7.4. Türkmen ile mevcut çalışmanın analiz sonuçları

Türkmen, Kazancı ve Mecitoğlu ile bizim mevcut çalışmalarımızı karşılaştırdığımızda, Türkmen'in analiz çalışması 450 zaman adımı aralığına bölünerek doğrulanırken, Kazancı ve Mecitoğlu'nun çalışması 1690 zaman adımı aralığına bölünerek doğrulanabilmektedir. Türkmen'in daha büyük zaman adımı aralığı ile çalışmalarını yapması (Bkz.) Şekil 7.4'de yer alan grafikte görüldüğü gibi keskin geçişlerin olmasına sebep olmuş ancak analizin doğruluğunu etkilememiştir. Kazancı ve diğerlerinin sonraki yıllarda yaptığı aynı çalışmada analizlerini daha çok zaman adımına bölerek ve daha fazla sayıda eleman ile ağ yapısını oluşturması sebebiyle grafiklerinde daha az keskin geçişler görülmektedir. Türkmen'in analizlerini 90'lı yılların sonunda alması çözücülerin güçlü olmaması sebebiyle daha büyük

zaman adımı aralığı ve daha az eleman sayısı ile analizlerini yapmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Sonraki 10 yıl içerisinde çözücülerin güçlenmesi ile Kazancı ve Mecitoğlu dinamik analizlerini daha uzun çözüm süresi, daha küçük zaman adımı aralığı ve daha fazla eleman sayısı ile modellemeyebilmişlerdir. Bu çalışma ile hem patlama yükü altındaki plakanın doğrusal geçici analizi doğrulanmış hem de bu analizlerde zaman adımı aralığı ve eleman sayısı gibi faktörlerin sonucu nasıl etkilediği doğrusal geçici analizleri göz önüne alınarak yorumlanmıştır.

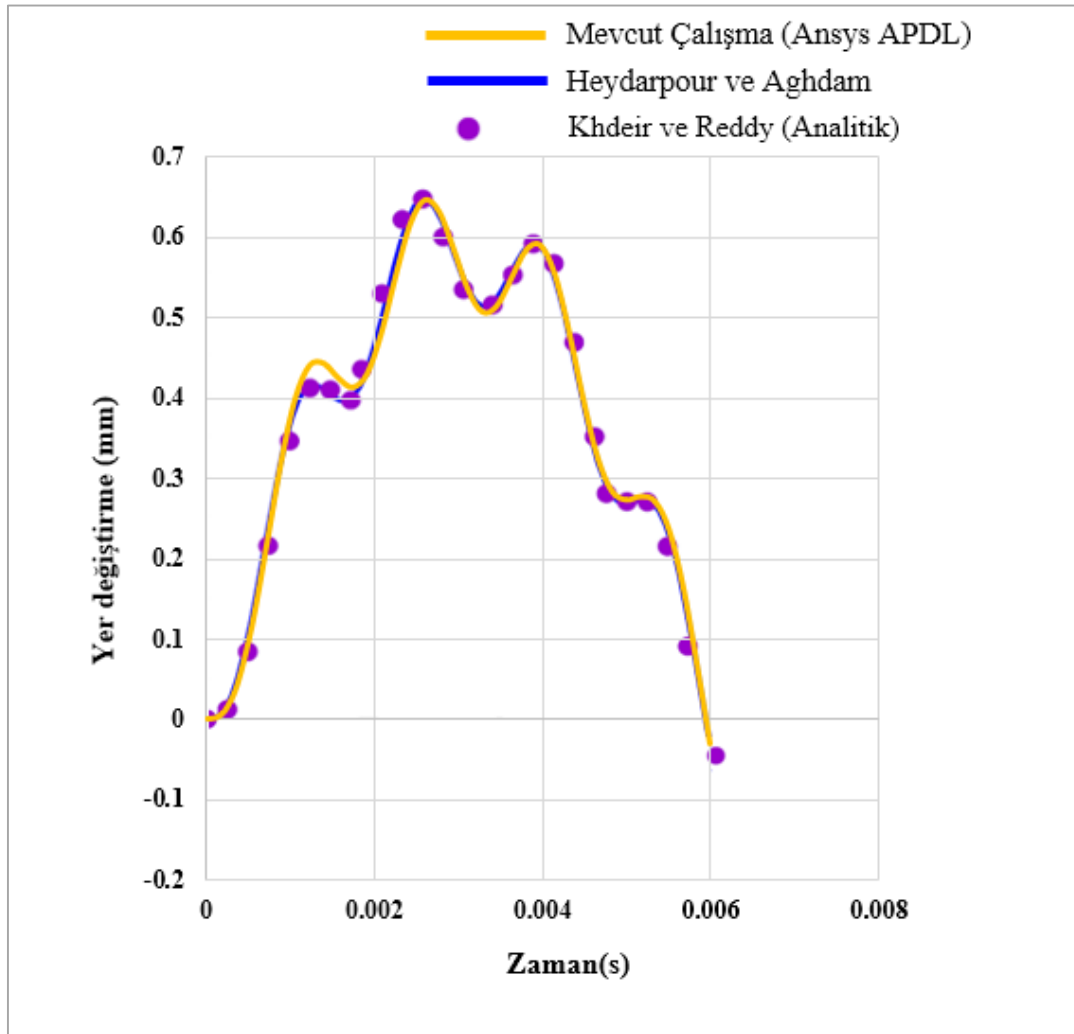
7.2.3. Üçüncü dinamik analiz doğrulama çalışması bulguları

Patlayıcı yük fonksiyonu (Bkz. Çizelge 6.5) ile oluşturulan katmanlı kompozit modeldeki (Bkz. Şekil 6.12 ve Çizelge 6.4) plakanın merkez noktasının zamana bağlı yer değiştirme grafiği Şekil 7.5’de verilmiştir. Burada mevcut çalışmamız ile Heydarpour ve Aghdam’ın [26] sayısal çalışması ve Khdeir ve Reddy’nin analitik çalışması üst üste çizdirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde mevcut çalışmamızdaki plakanın merkez noktasının yer değiştirmesinin diğer yayınlardan elde edilen analiz sonuçları ile uyum içinde olduğu görülmüştür.



Şekil 7.5. Heydarpour ve Aghdam, Khdeir ve Reddy ile mevcut çalışmanın (patlayıcı yük fonksiyonu ile yapılan) analiz sonuçları

Sinüs yük fonksiyonu ile oluşturulan modeldeki plakanın merkez noktasının zamana bağlı yer değiştirme grafiği Şekil 7.6 incelendiğinde diğer doğrulama çalışmalarında elde ettiğimiz grafiklerden farklı bir grafik elde edilmiştir. Bunun sebebi diğer doğrulama çalışmalarımızda Friedlander denklemi (5.1) kullanılarak yük oluşturulurken burada sinüs yük fonksiyonuna bağlı olarak sinüzoidal bir yük ile analiz yapılmasıdır. Sinüzoidal yük altında yapılan geçici analiz sonucunda Heydarpour ve Aghdam'ın sayısal ve Khdeir ve Reddy'nin analitik çalışması ile yakın sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 7.6. Heydarpour ve Aghdam, Khdeir ve Reddy ile mevcut çalışmanın (sinüs yük fonksiyonu ile yapılan) analiz sonuçları

Bu çalışma ile patlama yükü altındaki bir plakanın doğrusal geçici analizleri literatürde farklı malzeme, geometri, patlayıcı yükü, fiber serim açısı, fiber katman sayısı, zaman adımı aralığı ve eleman ağ yapısı ile literatürde yapılmış olan farklı çalışmalar doğrulanmış ve patlama yükü altındaki kompozit plakaların geçici analizlerini doğru bir şekilde yapabilme

kabiliyeti kazanılmıştır. Bu çalışmanın devamında değişken katırlıklı katmanlı kompozit plakalarda yapılmış olan iyileştirme çalışmaları bulguları anlatılacaktır.

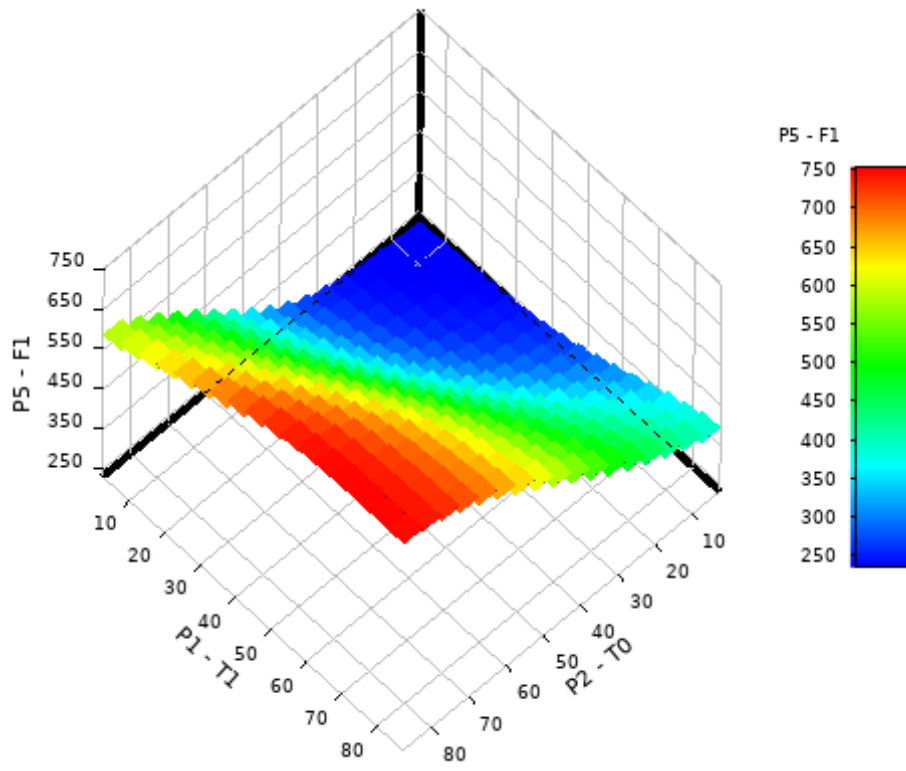
7.3. Değişken katılık değerine sahip plakaların modal analiz iyileştirme çalışması bulguları

Modelleme çalışması yapılan (Bkz. Şekil 6.13, Şekil 6.14 ve Çizelge 6.6) değişken katırlıklı katmanlı kompozit plakanın modal analiz mod frekansları iyileştirme çalışması bulguları bu başlık altında verilecektir.

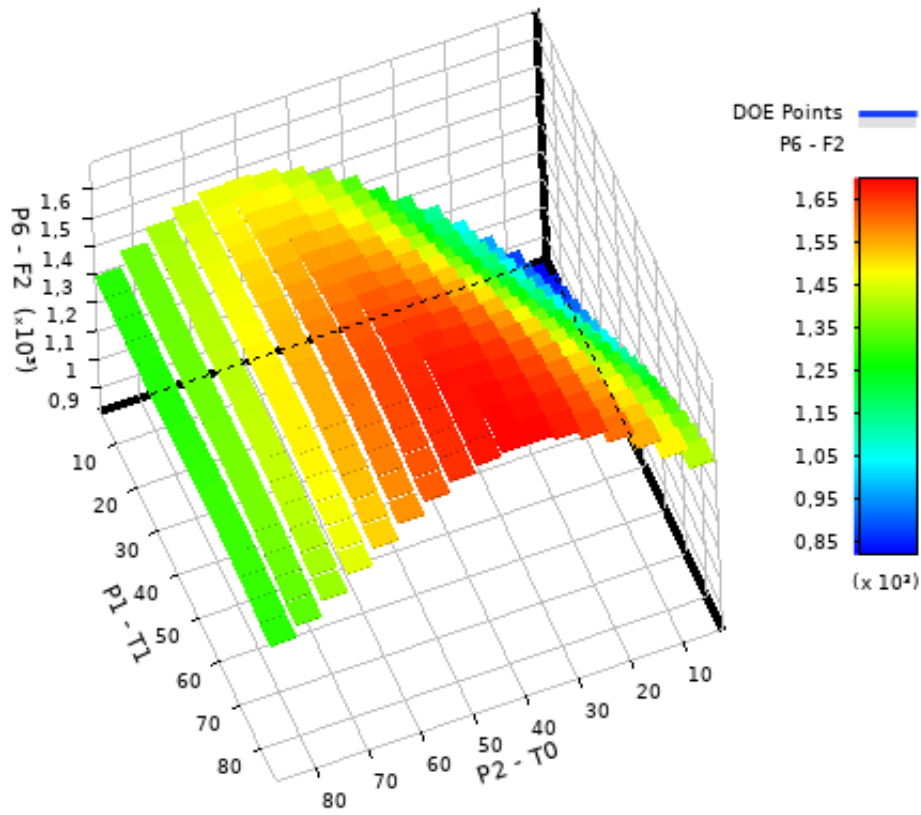
Modelin modal frekans değeri iyileştirme çalışması sonucunda birinci ve ikinci frekans değerleri için yanıt yüzeyi grafikleri Şekil 7.7 ile verilmiştir. Grafikler incelendiğinde 1.mod değeri için T_0 ve T_1 değerlerinin 85-70 derece aralığında olması durumunda en yüksek frekans değerinin elde edildiği görülmektedir. Ayrıca 1.mod frekans değerinin iyileştirme ile elde edilen sonuçları Çizelge 7.2’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde en yüksek 1.mod frekans değerinin $[\pm 85|75]_{4s}$ serim açıları ile edildiği görülmektedir. T_0 ve T_1 açısı değerlerinin küçülmesi 1. mod frekans değerini düşürmektedir. 2.mod frekans değerini maksimum yapan serim ise $[\pm 40|85]_{4s}$ olarak elde edilmiştir. İkinci modu maksimize eden açısı değerleri ise T_0 değerinin 35-40 derece ve T_1 değerinin ise 85 dereceye yaklaştığı durumlarda gerçekleşmiştir.

Çizelge 7.2. DKK plakanın 1.mod değeri için birinci iyileştirme sonuçları

Serim Açısı	1. Mod Frekans Değeri (hz)	2. Mod Frekans Değeri (hz)
$[\pm 85 75]_{4s}$	751,92	1307,3
$[\pm 85 70]_{4s}$	751,76	1310,8
$[\pm 85 80]_{4s}$	751,25	1302,6
$[\pm 85 65]_{4s}$	750,03	1312,7
$[\pm 75 50]_{4s}$	686,57	1428,6
$[\pm 60 50]_{4s}$	589,73	1593,7
$[\pm 40 85]_{4s}$	577,44	1697
$[\pm 25 45]_{4s}$	329,27	1433,5
$[\pm 25 30]_{4s}$	282,45	1358,8



(a)



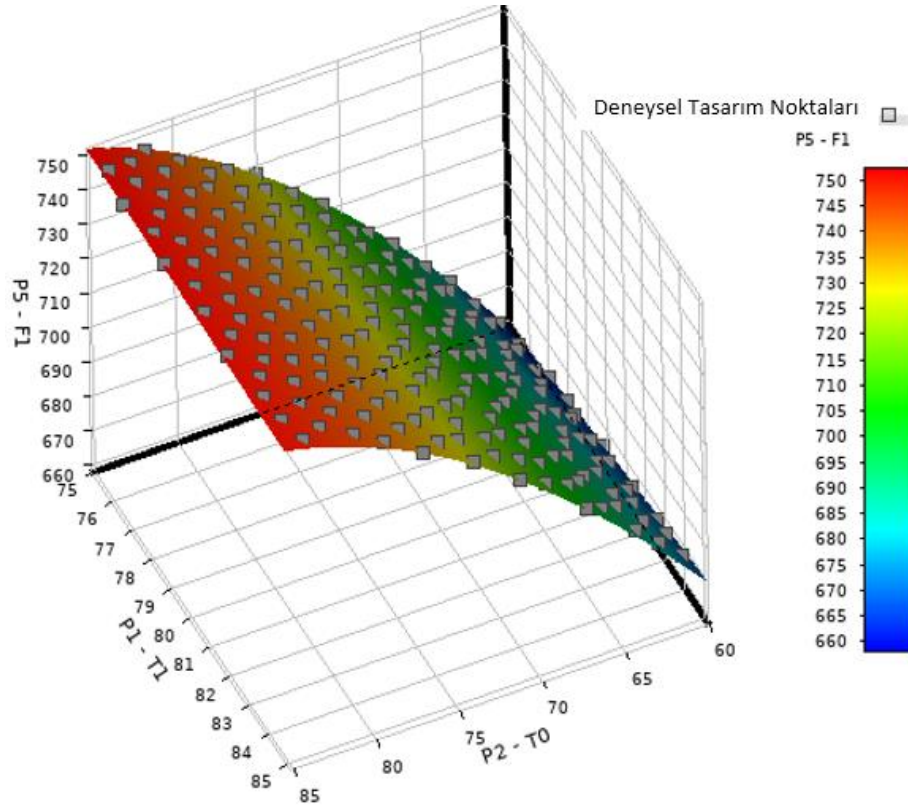
(b)

Şekil 7.7. DKK plakanın birinci iyileştirme döngüsünde (a) birinci frekans değeri için yanıt yüzeyi grafiği (b) ikinci frekans değeri için yanıt yüzeyi grafiği

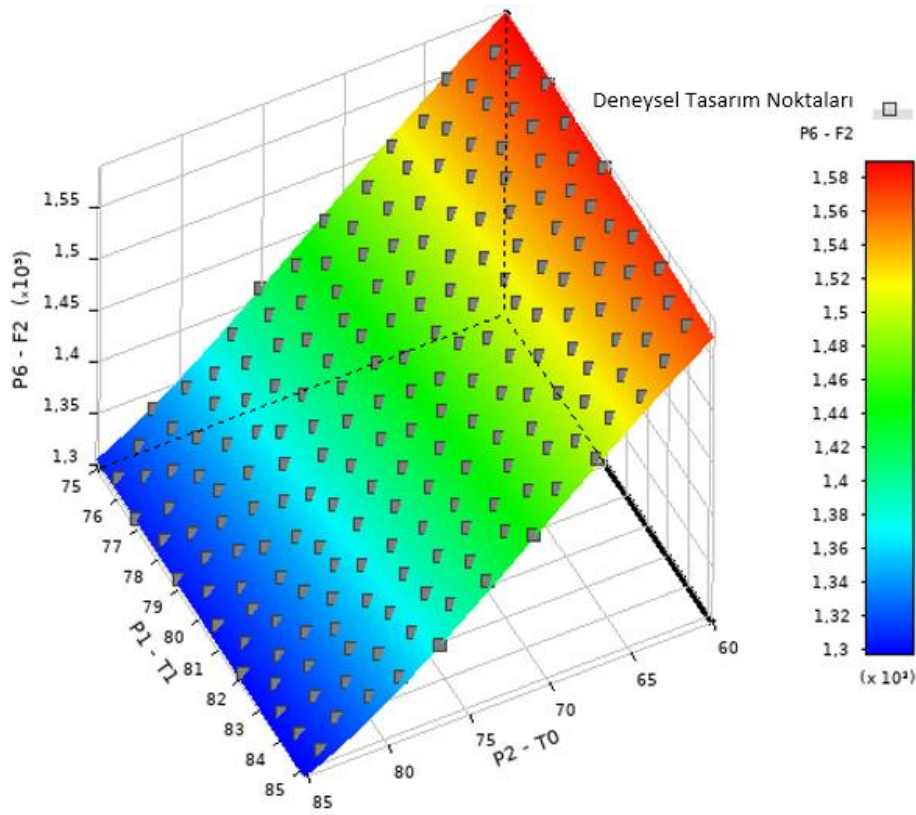
DKK plakanın modal analiz iyileştirme çalışmasında amaç plakanın en düşük değere sahip olan 1.mod frekans değerinin maksimize etmektir. Birinci iyileştirme aşamasında elde edilen veriler doğrultusunda 1.mod frekans değerini maksimize edecek T_0 ve T_1 açılı girdilerinin 85-70 derece aralığında olması sebebiyle ikinci iyileştirme aşamasında 85-70 derece aralığında sürekli Deney Tasarımı Girdileri ile daha detaylı bir iyileştirme yapılmıştır. Bu çalışmada 200 Deney Tasarımı girdisi oluşturulmuştur. İkinci iyileştirme sonuçları incelendiğinde birinci iyileştirmede bulunan değere çok yakın açılı değerleri elde edilmiş ve aşağıda Çizelge 7.3’de verilmiştir. İkinci iyileştirme çalışmasında $[\pm 85,137|76,913]_{4s}$ serilimi ile elde edilen 1. mod frekans değeri 751.9 hz ile birinci iyileştirme çalışmasında $[\pm 85|75]_{4s}$ serilimi ile elde edilen 751,92 hz frekans değerinden yakın sonuçlar elde edilmiştir. İyileştirme sonucunda en iyi sonucu veren $[\pm 85|75]_{4s}$ serimine ait Python kodumuzdan alınan veriler Şekil 7.9 ve Şekil 7.10 ile aşağıda paylaşılmıştır.

Çizelge 7.3. DKK plakanın 1. ve 2.mod değeri için ikinci iyileştirme sonuçları

Serim Açısı	1. Mod Frekans Değeri (hz)	2. Mod Frekans Değeri (hz)
$[\pm 85,137 76,913]_{4s}$	751,9	1304,6
$[\pm 84.759 75.791]_{4s}$	751,51	1308,5
$[\pm 84.633 80.585]_{4s}$	750,72	1304,6



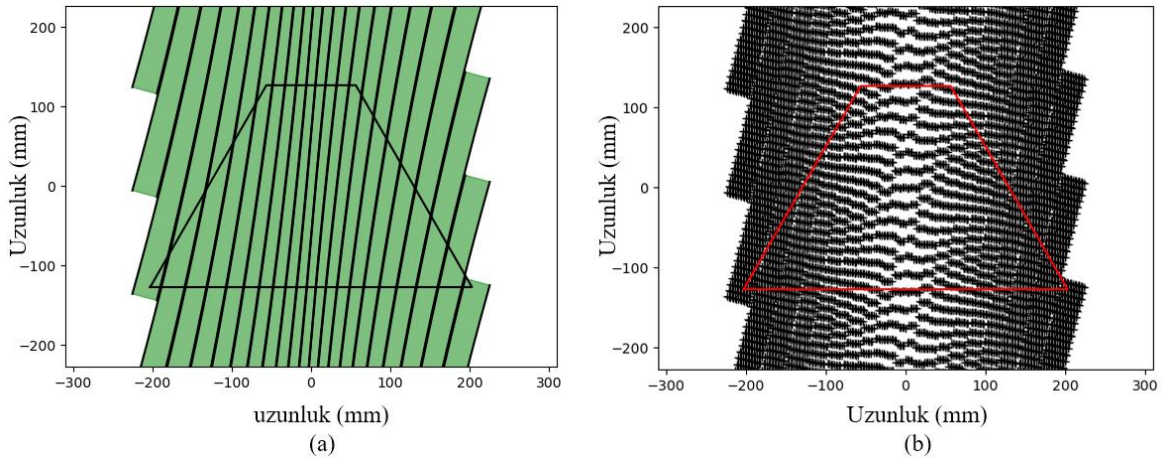
(a)



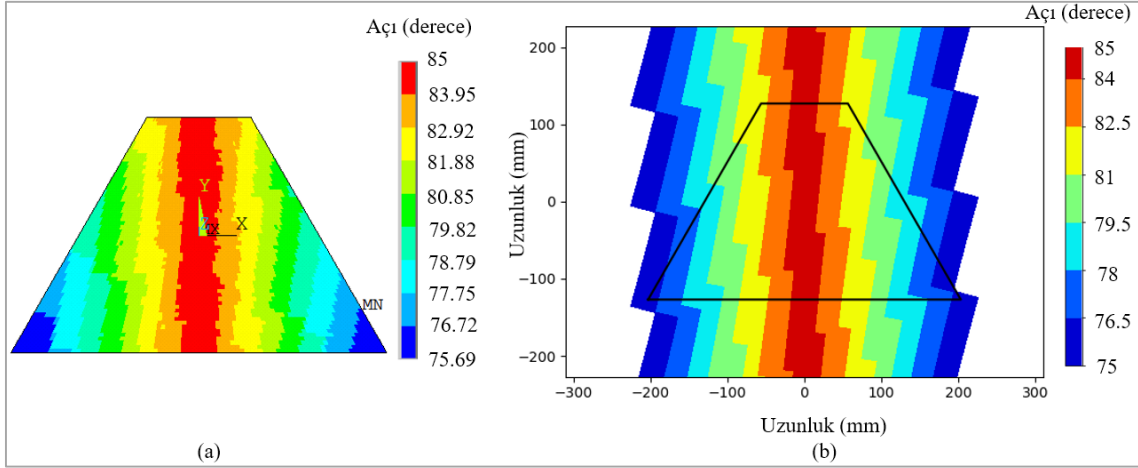
(b)

Şekil 7.8. DKK plakanın ikinci iyileştirme döngüsünde (a) birinci frekans değeri için yanıt yüzeyi grafiği (b) ikinci frekans değeri için yanıt yüzeyi grafiği

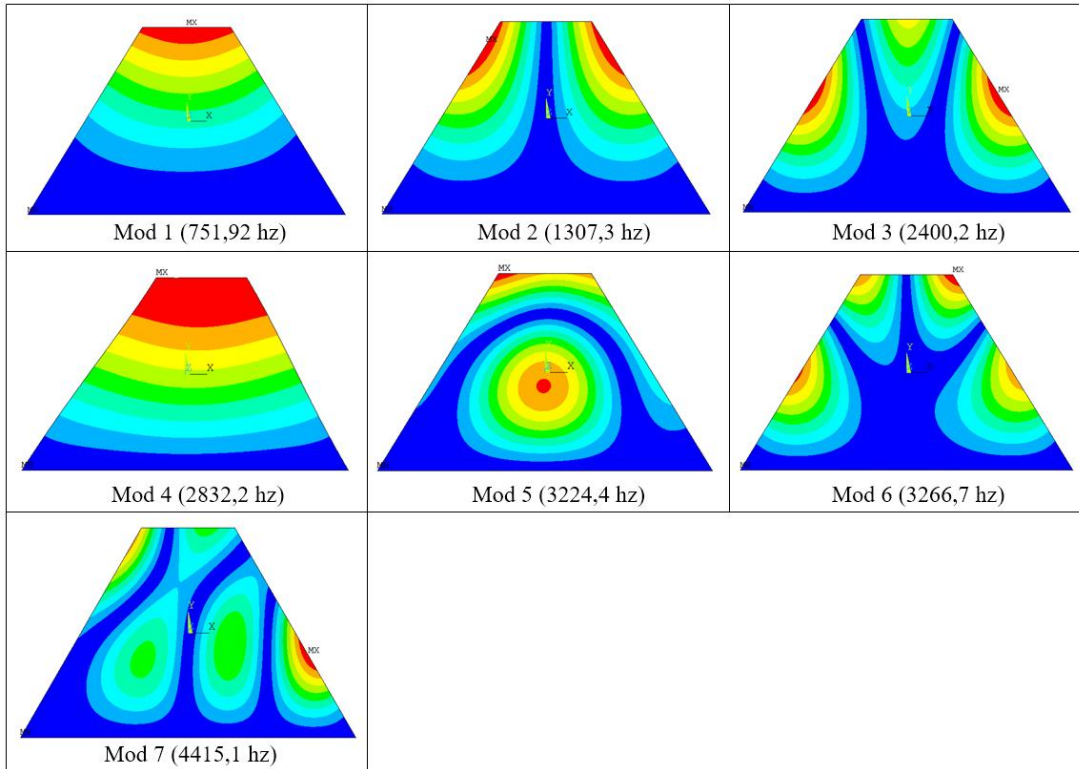
DKK plakanın modal analiz iyileştirmesi sonucu elde ettiğimiz 1.mod frekans değerini maksimum yapan $[\pm 85/75]_{4s}$ serilimi için ilk yedi mod şekilleri Şekil 7.11 ile aşağıda paylaşılmıştır. Mod şekilleri incelendiğinde 1.mod şeklinin bükülme modu olduğu görülmüştür. Bu sebeple, 1.mod frekans değeri, serim açısı 85 dereceye yaklaştıkça artmakta, 0 dereceye yaklaştıkça azalmaktadır. Çünkü, serim açısı 85 dereceye yaklaştıkça 1. mod için fiberler çekme yükü altına girecek ve daha fazla yük taşıyabileceklerdir. Fiber serim açısının 0 dereceye yaklaşma durumunda ise 1. moddan gelen yükü fiberler yerine matris taşıyacaktır ve yük taşıma kapasitesi bu mod değeri için düşük olacaktır. (Bkz.) Çizelge 7.2'yi incelendiğimizde T_0 orta nokta açısının sabit iken T_1 giriş açısının yükselmesi ve T_1 açısı sabit iken T_0 açısının yükselmesi durumlarında 1.mod frekans değerlerinin nasıl değiştiğini ve yaptığımız yorumun doğruluğunu ispatlayabiliriz. Plakanın $[\pm 75/50]_{4s}$ ve $[\pm 60/50]_{4s}$ serim açılarını ele aldığımızda T_1 sabit T_0 60 dereceden 75 dereceye yükseldiğinde 1.mod frekans değeri 589,73 Hz'den 686,57 Hz'e yükselmiştir. T_0 açısının sabit olması durumunda ise $[\pm 25/45]_{4s}$ ve $[\pm 25/30]_{4s}$ serim açıları incelendiğinde T_1 açısının 30 dereceden 45 dereceye yükselmesi durumunda 1.mod frekans değeri 282,45 Hz'den 329,27 Hz'e yükselmiştir. İncelediğimiz (Bkz.) Çizelge 7.2 ve (Bkz.) Şekil 7.7 (a), T_0 ve T_1 açılarının yüksek olduğu durumlarda 1. mod şekli bükülme için daha iyi sonuç verdiğini göstermektedir.



Şekil 7.9. DKK plakanın modal analiz iyileştirme çalışmasında 1.mod frekans değerini maksimum yapan $[\pm 85/75]_{4s}$ serimine ait (a) Python kodu ile serimin kanat geometrisi üzerinde gösterimi (b) Python kodu ile alınan kanat üzerindeki fiber açısı değerlerini veren analize girdi olan noktalar



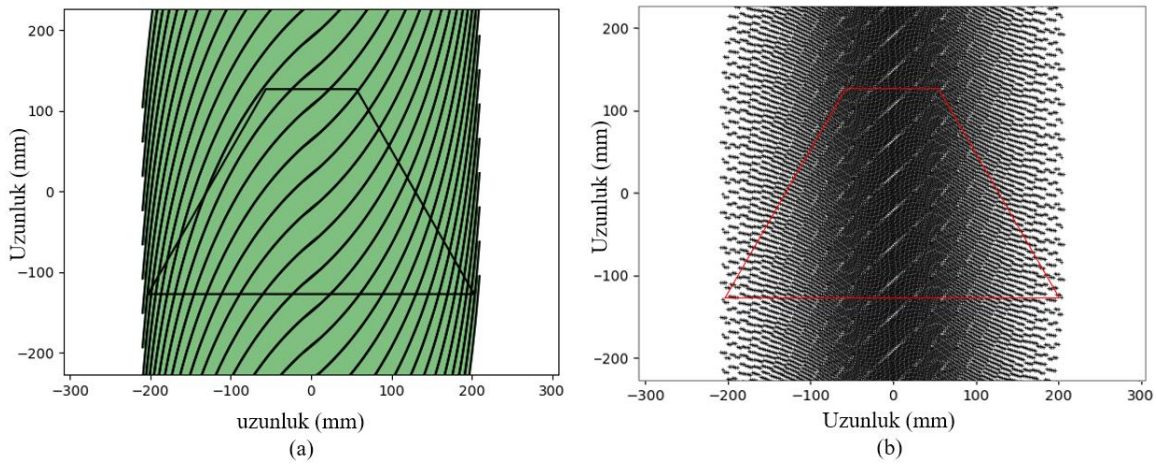
Şekil 7.10. DKK plakanın modal analiz iyileştirme çalışmasında 1.mod frekans değerini maksimum yapan $[\pm 85/75]_{4s}$ serimine ait (a) APDL programı ile analizi yapılan plakanın açı dizilimi (b) açıların Python kodu ile plaka üzerine çizdirilmesi



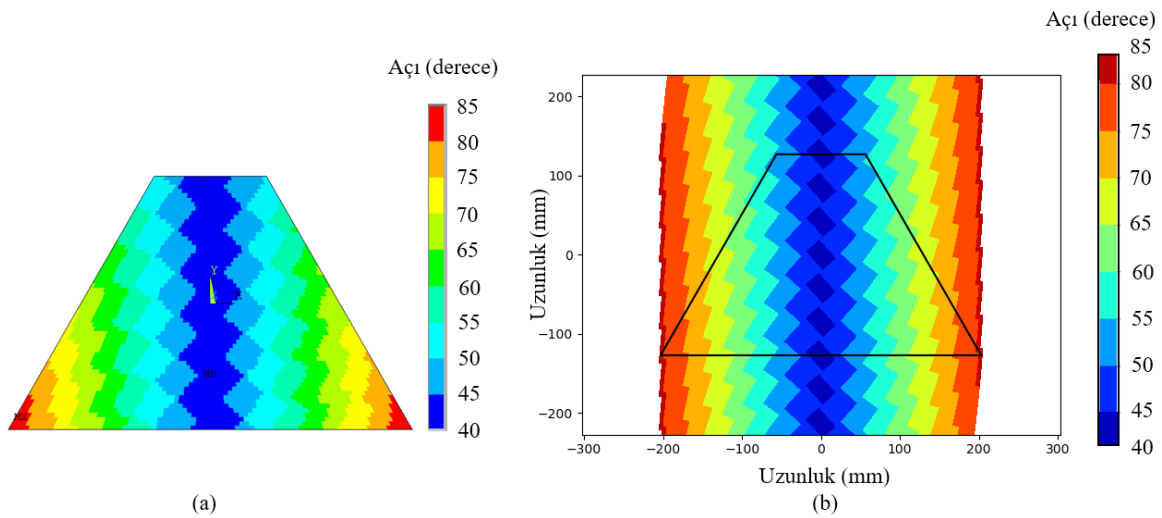
Şekil 7.11. DKK plakanın en yüksek 1. mod frekansını veren $[\pm 85/75]_{4s}$ serim açısı ile modal analiz sonucu elde edilen mod şekilleri

DKK plakanın 2.mod frekans değerini maksimum yapan serim açısı ise $[\pm 40/85]_{4s}$ olarak elde edilmiştir. Çünkü, plakanın 2.mod şekli burulma modudur. Bu sebeple, T_0 açısının 40 dereceye yaklaştığı durumlarda plakanın merkezinde burulma modu için yüksek bir katılık sağlamakta, plakanın uç noktalarındaki T_1 açısı ise yüksek açı değerlerinde burulmadan kaynaklı oluşan çekme yükünü karşılamaktadır. Yaptığımız bu yorumun doğruluğunu (Bkz.)

Çizelge 7.2'yi inceleyerek daha kolay anlayabiliriz. $[\pm 75|50]_{4s}$ ve $[\pm 60|50]_{4s}$ serimlerine sahip plakaların 2.mod frekans değerlerine bakıldığında sırasıyla 1428,6 hz ve 1593,7 hz elde edilmiştir. Bu iki serim için giriş açısı T_1 50 derecede sabit iken plakanın orta nokta açısı T_0 , 75 dereceden 60 dereceye düştüğünde 2.mod frekans değeri yükselmiştir. T_1 açısının 2.mod frekans değeri üzerindeki etkisini incelemek için $[\pm 25|45]_{4s}$ ve $[\pm 25|30]_{4s}$ serilimlerinden elde edilen sonuçları karşılaştırdığımızda, T_0 açısının sabit olması durumunda T_1 giriş açısının 30 dereceden 45 dereceye yükselmesi ile 2.mod frekans değeri 1358,8 hz'den 1433,5 hz'e yükselmiştir.



Şekil 7.12. DKK plakanın modal analiz iyileştirme çalışmasında 2.mod frekans değerini maksimum yapan $[\pm 40|85]_{4s}$ serimine ait (a) Python kodu ile serimin kanat geometrisi üzerinde gösterimi (b) Python kodu ile alınan kanat üzerindeki fiber açı değerlerini veren analize girdi olan noktalar



Şekil 7.13. DKK plakanın modal analiz iyileştirme çalışmasında 1.mod frekans değerini maksimum yapan $[\pm 40|85]_{4s}$ serimine ait (a) APDL programı ile analizi yapılan plakanın açı dizilimi (b) açıların Python kodu ile plaka üzerine çizdirilmesi

7.4. Sabit Katılık Değerine Sahip Plakaların Modal Analiz İyileştirme Çalışması Bulguları

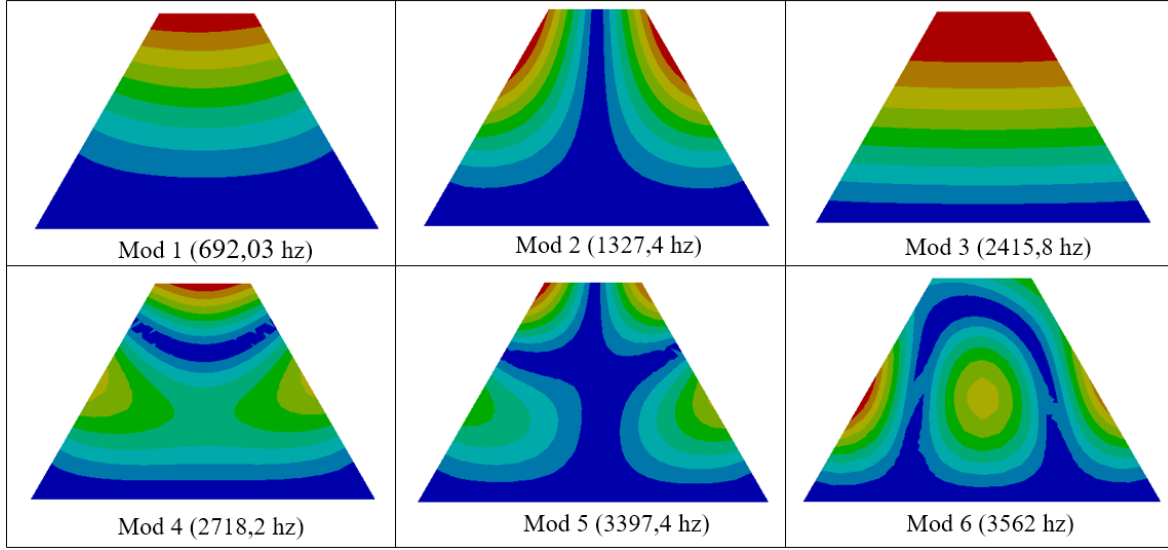
SKK ve DKK plakaların iyileştirme çalışmalarındaki ana hedef, fiber serim açısının plaka üzerinde değişken yapılmasının sonuçları nasıl etkilediğini gözlemlemektir. SKK plakalar önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi sabit serim açısına sahip kompozit plakalardır. Sabit serim açısına sahip olmaları sebebiyle plakanın her bölgesinde katılık değeri aynı olmaktadır.

SKK plaka için en iyi 1.mod frekans değerlerini veren fiber serimi ve diğer açılar değerlerinde frekansların nasıl değiştiğinin görülebilmesi için farklı açılardaki girdilerin sonuçları Çizelge 7.4 ile verilmiştir.

Çizelge 7.4. SKK plaka için modal analiz iyileştirme sonucu 1. ve 2.mod frekans değerleri

Serim Açısı	1. Mod Frekans Değeri (hz)	2. Mod Frekans Değeri (hz)
[85 0 -85 90] _{4s}	692,03	1318,2
[83 0 -83 90] _{4s}	688,96	1328,1
[80 0 -80 90] _{4s}	682,46	1347,3
[70 0 -70 90] _{4s}	645,07	1426
[45 0 -45 90] _{4s}	482,65	1470,2
[15 0 -15 90] _{4s}	379,52	1102

Yapılan iyileştirme sonucunda [85|0|-85|90]_{4s} seriminin en yüksek 1. mod frekans değerini verdiği görülmüştür. Bulunan sonuç DKK plaka için alınan iyileştirme sonucu ile karşılaştırıldığında, $[\pm 85|75]_{4s}$ serimine sahip değişken katılıklı kanat yapısının (751,92 hz), [85|0|-85|90]_{4s} serimine sahip sabit katılıklı kanat yapısından (692,03 hz), 1. mod frekans değeri için 8,65% daha iyi sonuç vermektedir. SKK plakanın [85|0|-85|90]_{4s} serim açısı ile bulunan mod şekilleri Şekil 7.14'te verilmiştir.



Şekil 7.14. SKK plakanın $[85|0|-85|90]_4$ s serim açısı ile modal analiz sonucu elde edilen mod şekilleri

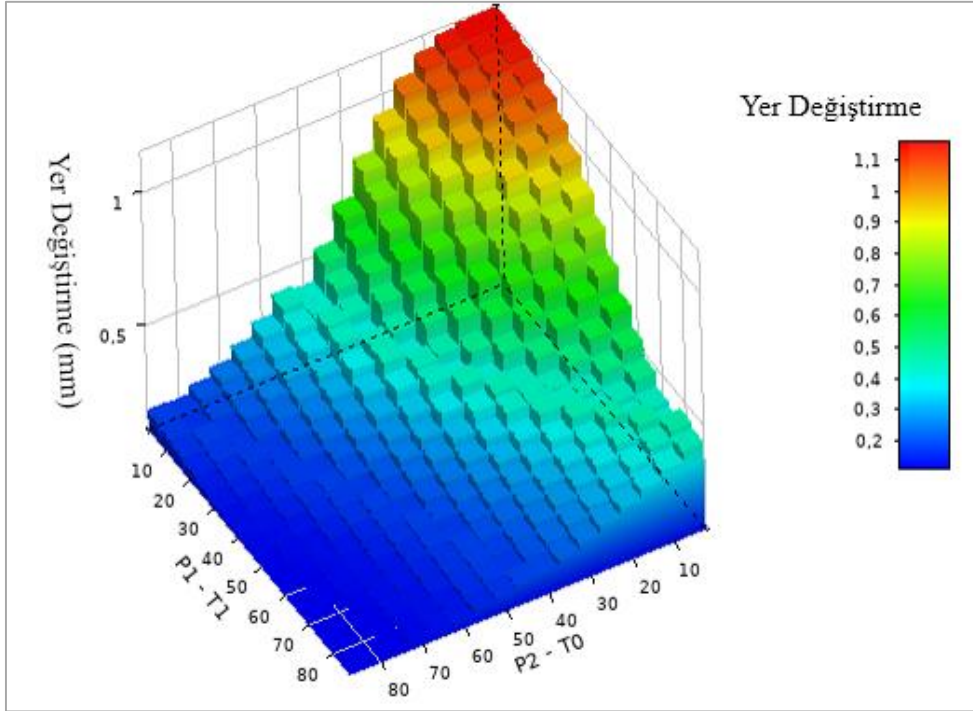
Bu çalışma göstermektedir ki, katmanlı kompozit yapıların değişken serim açısı ile serilerek oluşturulması tasarım uzayının genişlemesine olanak sağlamaktadır.

7.5. Değişken Katınlıklı Kompozit Plakaların Patlama Yüğü Altında Geçici Dinamik Analiz İyileştirme Çalışması Bulguları

DKK plakanın dinamik analiz iyileştirme çalışmasında, geometri (Bkz. Şekil 6.13), malzeme özellikleri (Bkz. Çizelge 6.6) [31], sınır koşulları (Bkz. Şekil 6.14) ile model oluşturulmuş ve belirlenen noktalardaki (Bkz. Şekil 6.16 ve Şekil 6.17) yer değiştirme bulguları bu başlık altında incelenecektir.

Birinci iyileştirme çalışması bulguları

(Bkz. Çizelge 6.9) ile verilen açı değerleri için 289 farklı Deney Tasarımı girdisi oluşturulmuş ve her bir girdi için dinamik çözüm alınmıştır. Çözüm sonucunda plakanın üst kenarının orta noktasının (Bkz. Şekil 6.16) yer değiştirme değerleri için yanıt yüzeyi grafiği Şekil 7.15 ile verilmiştir.



Şekil 7.15. DKK plakanın birinci geçici dinamik analiz iyileştirme çalışmasında yer değiştirme değeri için yanıt yüzeyi grafiği

Grafik incelendiğinde minimum yer değiştirme değerinin, eğrisel fiber serim açısı girdileri T_0 ve T_1 'in 85-60 derece aralığı için elde edildiği görülmektedir. Ayrıca yer değiştirme değerinin elde edilen iyileştirme sonuçları Çizelge 7.5 ile verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde en düşük yer değiştirme değeri $[\pm 85/70]_{4s}$ serim açısı ile elde edilmiştir.

Çizelge 7.5. DKK plakanın birinci geçici dinamik analiz iyileştirme çalışmasından alınan yer değiştirme değerleri

Serim Açısı	Yer Değiştirme (mm)
$[\pm 85/70]_{4s}$	0,10558
$[\pm 85/65]_{4s}$	0,10589
$[\pm 85/75]_{4s}$	0,10631
$[\pm 85/60]_{4s}$	0,10663
$[\pm 85/80]_{4s}$	0,10733
$[\pm 75/50]_{4s}$	0,12792
$[\pm 60/50]_{4s}$	0,18436
$[\pm 40/85]_{4s}$	0,19419
$[\pm 25/45]_{4s}$	0,49635
$[\pm 25/30]_{4s}$	0,73571

İkinci iyileştirme çalışması bulguları

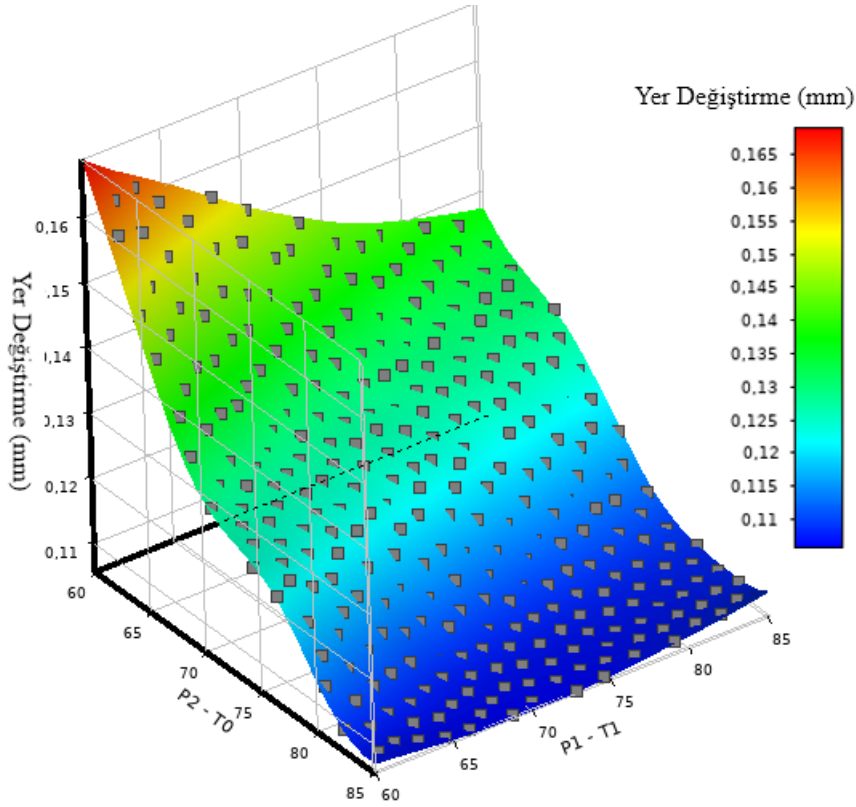
Değişken katılığa sahip katmanlı kompozit plakanın ikinci iyileştirme sonuçları incelendiğinde birinci iyileştirme çalışmasında bulunan değere çok yakın açı değerleri elde edilmiş ve Çizelge 7.6 ile verilmiştir. Plaka üzerindeki yer değiştirme değerleri alınan 1 ve 2 numaralı noktalar (Bkz. Şekil 6.17) ile verilmiştir.

Çizelge 7.6. DKK plakanın ikinci geçici dinamik analiz iyileştirme çalışmasından alınan yer değiştirme değerleri

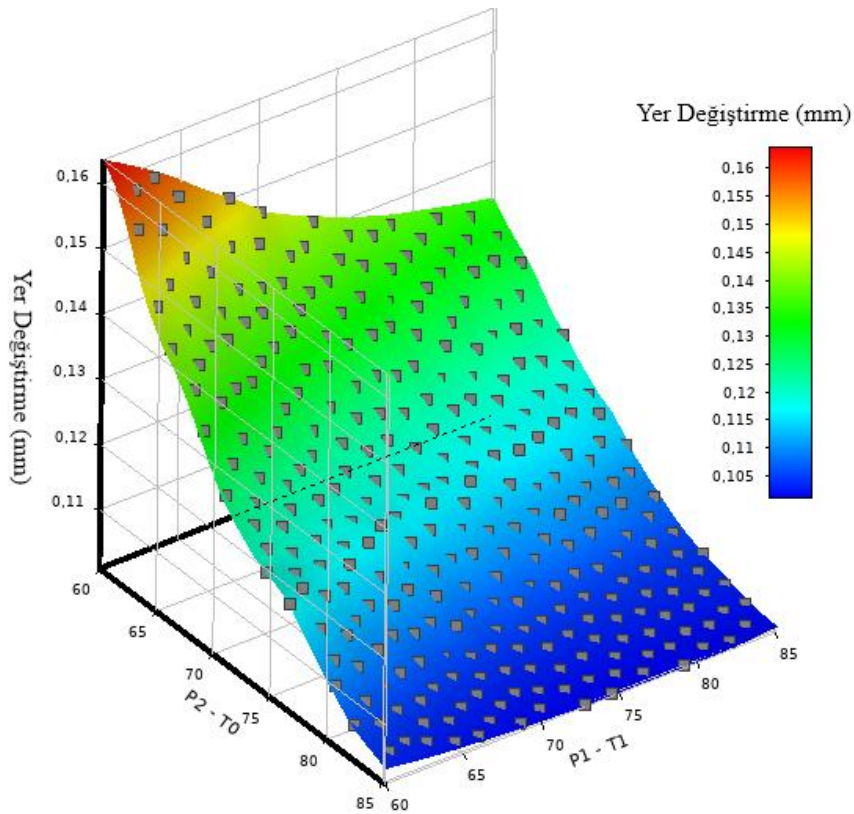
Serim Açısı	1 Numaralı Noktanın Yer Değiştirmesi (mm)	2 Numaralı Noktanın Yer Değiştirmesi (mm)
$[\pm 84,906 68,946]_{4s}$	0,10565	0,10158
$[\pm 84,486 70,458]_{4s}$	0,10577	0,10167
$[\pm 84,822 66,258]_{4s}$	0,10586	0,10206
$[\pm 85,137 76,913]_{4s}$	0,10668	0,10098
$[\pm 84,759 75,791]_{4s}$	0,10646	0,10118
$[\pm 84,633 80,585]_{4s}$	0,10743	0,10123

İkinci iyileştirme analiz sonuçları incelendiğinde, plakanın üst kenarının orta noktası (Bkz. Şekil 6.17, 1 numaralı nokta) için patlama yükü altında $[\pm 84,906|68,946]_{4s}$ fiber serimi en düşük yer değiştirme değerini vermiştir. Tüm sonuçlar için 2 numaralı nokta 1 numaralı noktadan daha düşük yer değiştirmeye sahiptir. Farklı serimler için 2 numaralı noktanın en düşük yer değiştirmesi ise $[\pm 85,137|76,913]_{4s}$ serimi ile elde edilmiştir.

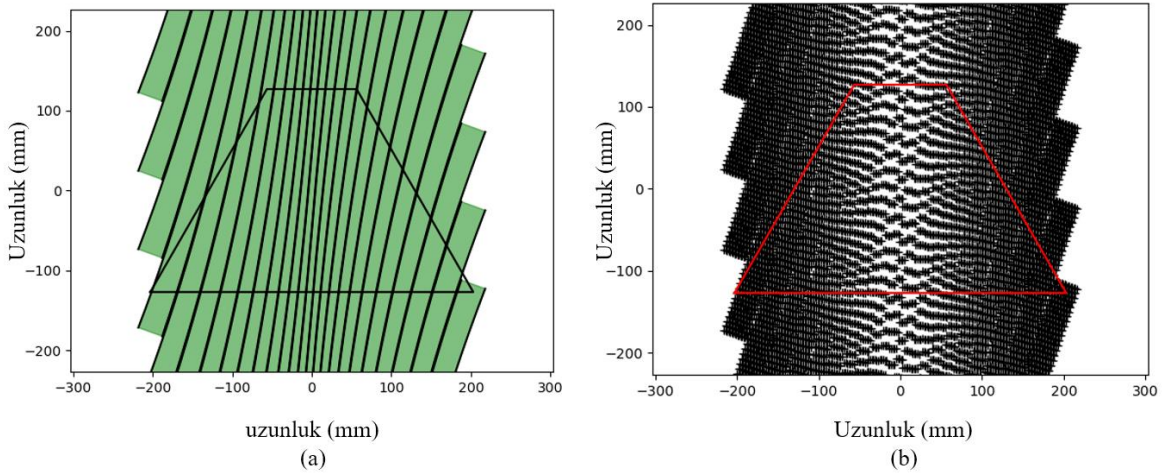
İyileştirme çalışması sonucu plaka üzerindeki 1 ve 2 numaralı noktaların yer değiştirme değerleri için yanıt yüzeyi grafiği sırasıyla Şekil 7.16 ve Şekil 7.17 ile verilmiştir. Ayrıca Şekil 7.19 ile yer değiştirme değerini minimum yapan serim için Ansys modeli ve Python kodundan alınan plaka üzerindeki fiber açı değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Python kodundan elde edilen açı değerleri analiz modeline doğru bir şekilde eşlenebildiği Şekil 7.19 ile görülmektedir.



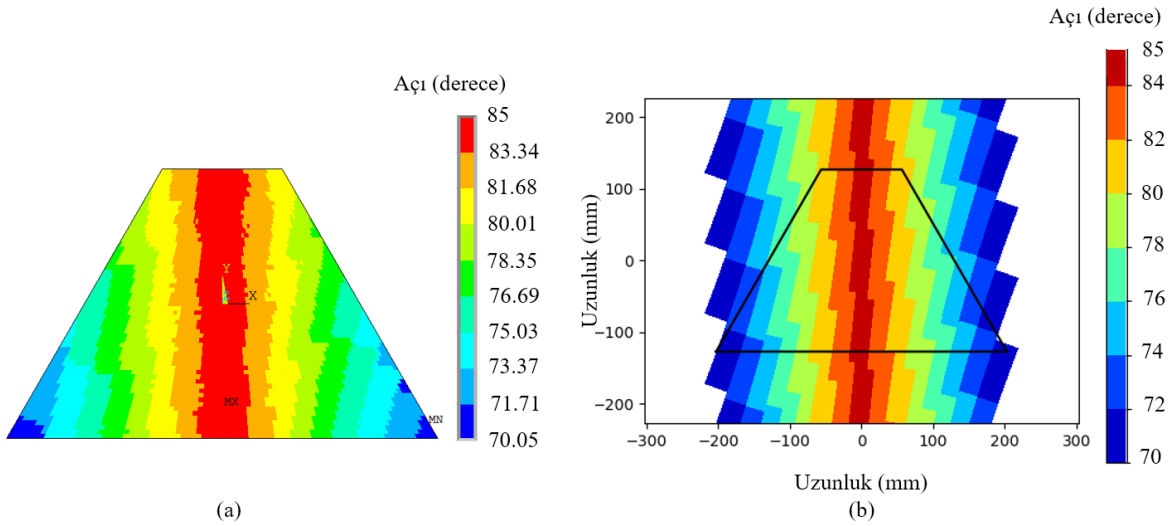
Şekil 7.16. DKK plakanın ikinci geçici dinamik analiz iyileştirme çalışmasında 1. noktanın yer değiştirme değeri için yanıt yüzeyi grafiği



Şekil 7.17. DKK plakanın ikinci geçici dinamik analiz iyileştirme çalışmasında 2. noktanın yer değiştirme değeri için yanıt yüzeyi grafiği



Şekil 7.18. DKK plakanın patlama yükü altında geçici dinamik analizi sonucu 1 numaralı noktanın yer değiştirme değerini minimum yapan $[\pm 85/70]_{4s}$ serimine ait (a) Python kodu ile serimin kanat geometrisi üzerinde gösterimi (b) Python kodu ile alınan kanat üzerindeki fiber açI değerlerini veren analize girdi olan noktalar



Şekil 7.19. DKK plakanın patlama yükü altında geçici dinamik analizi sonucu yer değıştirme değeri minimum yapan $[\pm 85/70]_{4s}$ serimine ait (a) APDL programı ile analizi yapılan plakanın açI dizilimi (b) açIların Python kodu ile plaka üzerine çizdirilmesi

7.6. Sabit Katıllıklı Kompozit Plakaların Patlama Yüğü Altında Geçici Dinamik Analiz İyileştirme Çalışması Bulguları

DKK plakanın iyileştirme çalışmasındaki model ile eş bir model SKK plaka için kurulmuştur (Bkz. Şekil 6.13, Şekil 6.14 ve Çizelge 6.6). Modelin patlama yükü altında geçici dinamik analiz iyileştirme çalışması yapılmış ve plakanın 1 ve 2 numaralı noktalarının (Bkz. Şekil 6.17) yer değıştirme bulguları Çizelge 7.7 ile paylaşılmıştır.

Çizelge 7.7. SKK plakanın geçici dinamik analiz iyileştirme çalışmasından alınan yer değiştirme değerleri

Serim Açısı	1 Numaralı Noktanın Yer Değiştirmesi (mm)	2 Numaralı Noktanın Yer Değiştirmesi (mm)
[85 0 -85 90] _{4s}	0,12919	0,12844
[50 0 -50 90] _{4s}	0,22319	0,22566
[45 0 -45 90] _{4s}	0,25797	0,26027

Sonuçlar incelendiğinde, 1 ve 2 numaralı noktaların en düşük yer değiştirme değeri [85|0|-85|90]_{4s} serim açısı ile elde edilmiştir. Bunun sebebi ise plakanın sadece alt kenarından ankastre mesnet olarak sınır koşulu verilmesi diğer kenarların serbest bırakılmasıdır. Plakada bu sınır koşulu altında en fazla yük taşıma kapasitesi fiber serim açısının 90 dereceye yaklaşması ile olmaktadır. Çünkü, böyle bir sınır koşulu ve yük altında fiberler 90 derece serilim durumunda çekme yükü altına girmekte ve maksimum yük taşıma kapasitesini elde etmektedir.

SKK ve DKK plakaların patlama yükü altındaki dinamik analiz sonuçları yorumlanacak olursa; DKK plaka [$\pm 84,906|68,946$]_{4s} serimi ile plaka üzerindeki 1. ve 2. noktalar için SKK plakanın [85|0|-85|90]_{4s} serim açısıyla elde edilen en düşük yer değiştirme değerinden her iki noktada da iyi sonuç vermektedir.

Çizelge 7.8. DKK ve SKK plakaların patlama yükü altında en düşük yer değiştirme değerlerini veren serim açıları

Serim Açısı	1 Numaralı Noktanın Yer Değiştirmesi (mm)	2 Numaralı Noktanın Yer Değiştirmesi (mm)
[$\pm 84,906 68,946$] _{4s}	0,10565	0,10158
[85 0 -85 90] _{4s}	0,12919	0,12844

Plakanın 1 numaralı noktası için DKK plakada SKK plakaya göre 22,3% daha düşük bir yer değiştirme sonucu vermektedir. Plakanın 2 numaralı noktası için ise DKK plaka, SKK plakaya göre 26,4% daha düşük bir sonuç vermiştir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında Değişken ve Sabit Katırlıklı Kompozit Plakaların modal analiz, patlama yükü altında dinamik geçici analizi ve iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Değişken ve sabit katılığa sahip plakaların sonlu eleman analiz programı kullanılarak modal analizi yapılmış ve literatürdeki yer alan çalışma ile doğrulanmıştır. Bu çalışmanın devamında, modal frekans değeri iyileştirme çalışmaları yürütülerek, değişken ve sabit katılıktaki plakaların modal frekansları iyileştirilerek karşılaştırılmıştır. Değişken ve sabit katılığa sahip plakaların sonlu eleman analiz programı kullanılarak patlama yükü altındaki geçici dinamik analizleri yapılmış ve literatürdeki farklı çalışmalar ile doğrulanmıştır. Bu çalışmaya ek olarak, değişken ve sabit katırlıklı kompozit plakalar için, geçici dinamik analizinde plakanın belirli bir noktasının yer değiştirme değerinin iyileştirme çalışması yürütülmüş ve bulgular karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile değişken katılığa sahip kompozitlerin, yüksek katılık ve mukavemet göstermeleri sebebiyle tasarım süreçlerinde parça ağırlığının azaltılabileceği ve sabit katılığa sahip kompozitlere göre daha büyük yükler altında çalışma performansı gösterebildiği görülmüştür. Ayrıca tasarım sürecinde parçanın modal frekans değerlerinin fiber serim açısına bağlı olarak değiştirilebilme kabiliyeti elde edilmiştir. Tüm bu çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar özet halinde aşağıda sırasıyla verilmiştir.

- DKK plakaların modal analiz doğrulama çalışmasında Antunes ve diğerlerinin [12] elde ettikleri mod frekans değerleri ile mevcut çalışmamızdaki sonuçlar arasındaki farkın çok az olduğu görülmüştür. Bu çalışma ile DKK Plaka modellemesi ve sonlu elemanlar analizinin doğru olduğu sonucuna varılmıştır.
- DKK plakalar ile SKK plakalar üzerinde kanat geometrisi kullanılarak yapılan farklı modal analiz iyileştirme çalışması ile; değişken fiber serim açısı ile modellenen DKK plakaların, sabit fiber serim açısına sahip SKK plakalara göre 1. mod frekans değerinde yükselme görülmüştür. Bu sonuç ile DKK plakalar ile yapının modal frekans değerlerinin fiber serim açısına bağlı olarak değiştirilebildiği ve yükseltilebildiği görülmüştür.
- Değişken katırlıklı kompozit kanat geometrisinde 1. mod frekans değerini maksimum yapan fiber serim açısı girişte $T_0=85$ orta noktada $T_1=75$ ($[\pm 85/75]_{4s}$) serilimi için elde edilmiştir. Çünkü, kanat geometrisine alt kenarından ankastre mesnet ile sınır koşulu uygulanmış diğer üç kenarı serbest bırakılmıştır ve plakanın 1. modu bükülme modu olarak elde edilmiştir. Böylece, bu mod için plakanın ortasındaki fiber serim açısı dik açığa

yaklaştıkça fiberler 1.mod için çekme yükü altına girerek daha yüksek bir yük taşıma kapasitesi sağlamıştır.

- Değişken katırlıklı kompozit kanat geometrisinde 2. mod frekans değerini maksimum yapan fiber serim açısı girişte $T_0=40$ orta noktada $T_1=85$ ($[\pm 40/85]_{4s}$) serilimi için elde edilmiştir. Çünkü, alt kenarı ankastre mesnetli kanat geometrisinin 2. modu burkulma modudur ve kanadın orta bölgesindeki fiber serim açısı $T_0=40$ dereceye üst yan kenarlarındaki açı ise $T_1=85$ dereceye yaklaştığı durumlarda fiberler çekme yükü altına girerek daha fazla yük taşımaktadır.
- Kompozit plakaların patlama yükü altında geçici dinamik analiz çalışmaları farklı modeller kurularak yapılmış ve literatürdeki farklı çalışmalar ile doğrulanmıştır. Plakanın orta noktasının zamana bağlı yer değiştirme grafiklerinde, mevcut çalışma ve literatürdeki çalışmalar arasında çok yakın değerler elde edilmiştir.
- DKK plakalar ile SKK plakalar ile kanat geometrisi üzerinde yapılan geçici dinamik analiz iyileştirme çalışması ile; değişken fiber serim açısı ile modellenen DKK plakaların, sabit serim açısı ile modellenen SKK plakalara göre plakanın tepe orta noktasında ve köşe noktasında daha düşük yer değiştirme değeri elde edilmiştir.
- Sonuçlar incelendiğinde değişken katılığa sahip katmanlı kompozit plakaların eşdeğer patlama yüklerinde sabit katılığa sahip kompozit plakalara göre yüksek katılık ve mukavemete sahip olduğu ve plakanın belirli bir noktasının yer değiştirme değerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir.
- Değişken katırlıklı kompozit kanat plakanın patlama yükü altındaki dinamik analizinde, kanatın üst orta noktası ve üst köşe noktasının yer değiştirme değerleri incelendiğinde, üst orta nokta üst köşe noktaya göre daha yüksek yer değiştirme değeri vermiştir.
- Değişken katılığa sahip kompozit kanat geometrisinin alt kenarından ankastre mesnetli modelinin patlama yükü altındaki geçici dinamik analizinde, kanadın üst orta noktasının minimum yer değiştirme değeri $[\pm 85/70]_{4s}$ fiber serimi ile elde edilmiştir. Çünkü, patlamada oluşan basınç yükü kanata çarptığında, kanat önce geriye sonra negatif basınç ile öne hareket etmekte ve bu yer değiştirmede fiberler $[\pm 85/70]_{4s}$ serilimi ile çekme yükü altına girerek fiberlerin daha fazla yük taşımasını sağlanmış ve kanatın katılığı artırılmıştır.

Mevcut çalışma ile elde edilen bilgiler doğrultusunda sonraki çalışmalara kılavuzluk edebilecek öneriler aşağıda verilmiştir.

Çalışmada test alt yapısının ve otomatik fiber serim robotları ile değişken katılıklı plakaların üretiminin yüksek maliyetli olması sebebiyle modal ve patlama yükü altında testler gerçekleştirilememiştir. Bu çalışmanın testlerle de doğrulaması yapılarak, gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilir. Böylece, bu çalışma ile değişken katılığa sahip kompozit yapıların, uçak kanatları, turbofan ile yolcu uçağı motorlarının fan kanatçıkları ve dış kabuklarında ve diğer askeri alanlarda kullanımı artırılabilir. Bu çalışmadaki geometriden farklı olarak, değişken katılığa sahip iç bükey, dış bükey veya silindirik yapıların modal ve patlama yükü altındaki dinamik davranışı incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Hyerl M.W., Charette R.F. (1991). The use of curvilinear fiber format in composite structure design. *Submarine Structures Division David Taylor Research Center*, 29(6), 1101-5.
2. Hyer M.W., Lee H.H. (1991). The use of curvilinear fiber format to improve buckling resistance of composite plates with central circular holes. *Composite Structure*, 18(3), 239-261.
3. Langley P.T, Gürdal Z, Batra R, Jones R. (1999). *Finite Element Modeling of Tow-Placed Variable-Stiffness Composite Laminates*. Doktora Tezi, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 1-127.
4. Duvaut G., Terrel G., Lene F., Verijenko V. E., (2000), Optimization of fiber reinforced composites, *Composite Structure*, 48, 83-89.
5. Tatting B.F., Gürdal Z. (2003). *Automated Finite Element Analysis of Elastically-Tailored Plates*. The NASA/CR 2002-211919, Virginia, 1-3.
6. Wu C-P., Lee C-Y. (2001), Differential quadrature solution for the free vibration analysis of laminated conical shells with variable stiffness. *Composite Structure*, 93, 3040-3047.
7. Abdalla M.M., Setoodeh S., Gürdal Z. (2007). Design of variable stiffness composite panels for maximum fundamental frequency using lamination parameters. *Composite Structure*, 81(2), 283–91.
8. Akhavan H., Ribeiro P. (2011). Natural modes of vibration of variable stiffness composite laminates with curvilinear fibers, *Composite Structure*, 93(11), 3040–7.
9. Houmat A. (2018). Three-dimensional free vibration analysis of variable stiffness laminated composite rectangular plates, *Composite Structure*, 194, 398–412.
10. Viglietti A., Zappino E., Carrera E. (2019). Free vibration analysis of variable angle-tow composite wing structures. *Aerosp Sci Technol*, 92, 114–25.
11. Zhao W., Kapania R.K. (2019). Prestressed vibration of stiffened variable-angle tow laminated plates. *AIAA Journal*, 57, 2575-2593.
12. Antunes A.M., Ribeiro P., Dias Rodrigues J., Akhavan H. (2020). Modal analysis of a Variable Stiffness Composite Laminated plate with diverse boundary conditions: Experiments and modelling. *Composite Structure*, 239, 111974.
13. Reddy J. N. (1983). Dynamic (transient) analysis of layered anisotropic composite material plates, *Int J Numer Meth Eng*, 19, 237-255.

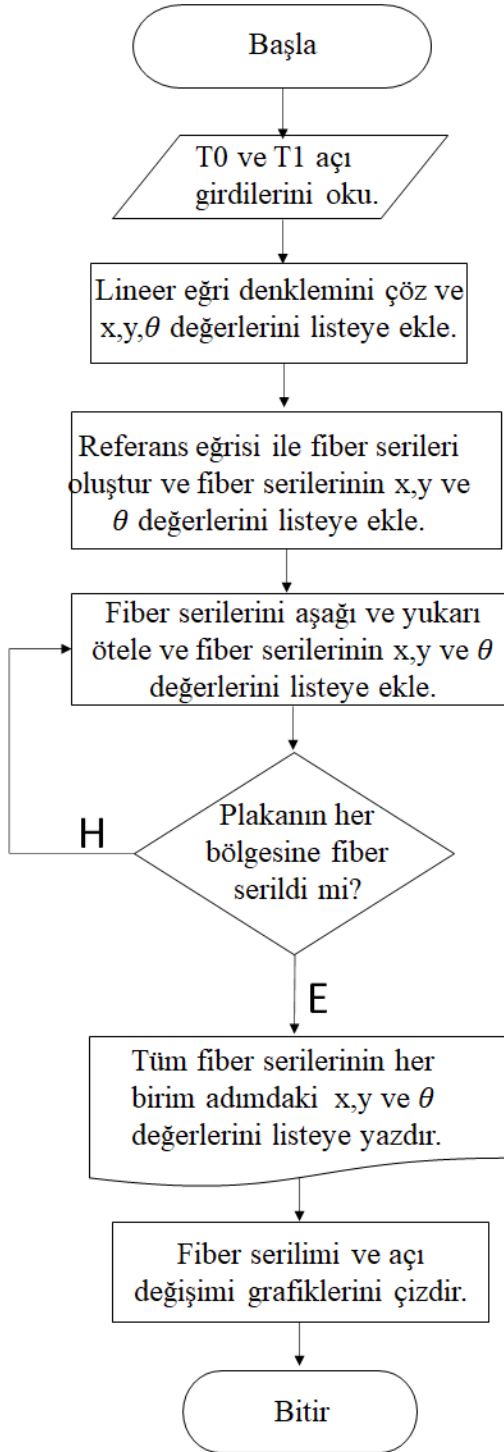
14. And M., Kant T. (1988). Dynamics of laminated composite plates with a higher order theory and finite element discretization, *Journal of Sound and Vibration*, 126(3), 463-475.
15. Türkmen H.S. ve Mecitoğlu Z. (1999). Dynamic response of a stiffened laminated composite plate subjected to blast load, *Journal of Sound and Vibration*, 221(3), 371-389.
16. Wang Y.Y., Lam K.Y., Liu G.R., 2001, A strip element method for the transient analysis of symmetric laminated plates, *International Journal of Solids and Structures*, 38, 241-259.
17. Wei J., Dharani L.R. (2006). Response of laminated architectural glazing subjected to blast loading. *Internal Journal Impact Engineering*, 32, 2032-47.
18. Nayak A.K, Sheno R.A, Moy S.S.J., (2004). Transient response of composite sandwich plates. *Composite Structure*, 64, 249-67.
19. Simmons M.C., Schleyer G.K. (2006). Pulse pressure loading of aircraft structural panels. *Thin-Walled Struct*, 44, 496-506.
20. Kazanci Z., Mecitoğlu Z. (2008). Nonlinear dynamic behavior of simply supported laminated composite plates subjected to blast load. *J Sound Vibration*, 317, 883-97.
21. Dolce F, Meo M, Wright A, French M.(2013). *Structural Response of Laminated Composite Plates to Blast Load*. Farnborough International Exhibition and Conference Center, Farnborough, 180-188.
22. Arora H., Hooper P.A., Dear J.P. (2011), Dynamic response of full-scale sandwich composite structures subject to air-blast loading. *Compos Part A Applied Science and Manufacturing*, 42(11), 1651-62.
23. Vo T.P., Guan Z.W., Cantwell W.J., Schleyer G.K. (2013). Modelling of the low-impulse blast behaviour of fibre-metal laminates based on different aluminium alloys. *Composite Part B Engineering*, 44(1), 141-51.
24. Li X., Zhang P., Wang Z., Wu G., Zhao L. (2014). Dynamic behavior of aluminum honeycomb sandwich panels under air blast: Experiment and numerical analysis. *Composite Structures*, 108(1), 1001-8.
25. Baştürk S., Süssler S., Uyanık H., Türkmen HS., Lopresto V., Genna S. et al. (19-24th July 2015). 20th, *Experimental and Numerical Analysis of A Laminated Basalt Composite Plate Subjected to Blast Load*. International Conference on Composite Materials, Copenhagen.
26. Heydarpour Y., Aghdam MM. (2016). A hybrid bézier based multi-step method and differential quadrature for 3D transient response of variable stiffness composite Plates. *Composite Structure*, 154, 344-59.

27. Kerber A., Gargano A., Pingkarawat K., Mouritz AP. (2017). Explosive blast damage resistance of three-dimensional textile composites. *Compos Part A Applied Science and Manufacturing*, 100, 170–82.
28. Nelson S.M., O'Toole B.J. (2018). Computational analysis of blast loaded composite cylinders. *Internal Journal Impact Engineering*, 119, 26–39.
29. Viglietti A., Zappino E., Carrera E. (2019). Analysis of variable angle tow composites structures using variable kinematic models. *Composites Part B*, 171, 272-283.
30. Nia A.B., Xin L., Yahya M.Y., Ayob A., Nejad A.F., Koloor S., et al. (2020). Failure of glass fibre-reinforced polypropylene metal laminate subjected to close-range explosion. *Polymers (Basel)*;12, 2139.
31. Coskun O., Turkmen H.S. (2022). Multi-objective optimization of variable stiffness laminated plates modeled using Bézier curves. *Composite Structure*, 279, 114814.
32. Almeida J.H.S., Bittrich L., Nomura T., Spickenheuer A. (2019), Cross-section optimization of topologically-optimized variable-axial anisotropic composite structures. *Composite Structure*, 225, 111150.
33. Kandil K.S., Nemir M.T., Ellobody E.A., Shahin R.I. (2014). Implicit and explicit analysis of the response of blast loaded reinforced concrete slabs. *World Journal of Engineering and Technology*, 02, 211–21.
34. Mishra V. (2017). *A methodology to predict the stiffness properties and buckling load of manufacturable variable stiffness panels*. Doktora Tezi, Delft University of Technology, Netherlands, 1-12.
35. Gürdal Z, Tatting B.F, Wu C.K., 2008, Variable stiffness composite panels: Effects of stiffness variation on the in-plane and buckling response. *Compos Part A Applied Science and Manufacturing*, 39, 911–22.
36. Olmedo R.A., (1992). *Compression and Buckling of Composite Panels with Curvilinear Fibers*. Doktora Tezi, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 1-23.
37. Abdella A., Abdella S. (2012). *Characterization and optimization of dispersed composite laminates for damage resistant aeronautical structure*. Doktora Tezi, Universitat de Girona, Spain.
38. Measom R., Sewell K. (1996). *Fiber placement low-cost production for complex composite structures*. In American Helicopter Society 52nd Annual Forum, Washington DC, 4–6.
39. Lopes F. (2009). *Damage and Failure of Non-Conventional Composite Laminates*. Doktora Tezi, TU Delft, Netherlands, 1-19.

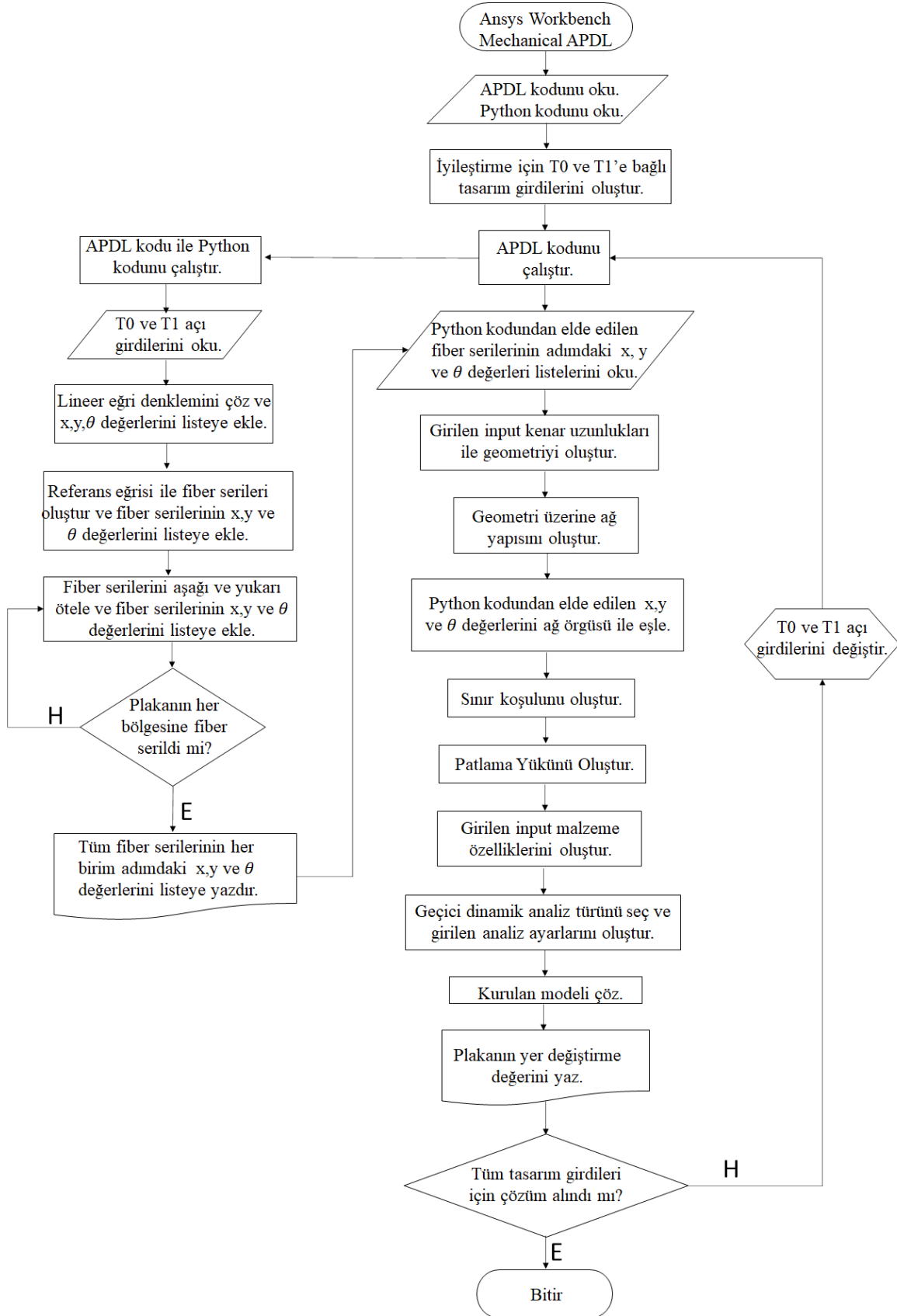
40. Bullock F. (1990), *Automated prepreg tow-placement for composite structures*. 35th International SAMPE Symposium, Japan, 35, 734-43.
41. Bullock F. (1990), *Fabrication of complex composite structures using advanced fiber placement technology*. 35th International SAMPE Symposium, Japan, 35, 710-720.
42. Evans D. O., (2001). *Fiber placement*. Technical report, Cincinnati Machine, 109-163.
43. Reddy J. N. (2003). *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells Theory and Analysis*. (2. Baskı), Newyork: CRC Press, 109-163.
44. Rajendran R., Lee J. M. (2009). Blast loaded plates. *Marine Structure*, 22, 99–127.
45. Gilbert F. Kinney, Kenneth J. Graham., (1985). *Explosive Shocks In Air*. (2. Baskı), California: Macmillan Company, 88-105.
46. Türkmen HS. (1997). *Katmanlı Kompozit Plakaların Anlık Basınç Yüğüne Dinamik Cevabı*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-64.

EKLER

EK- 1. Python kodu ile fiber serimi oluşturma algoritması

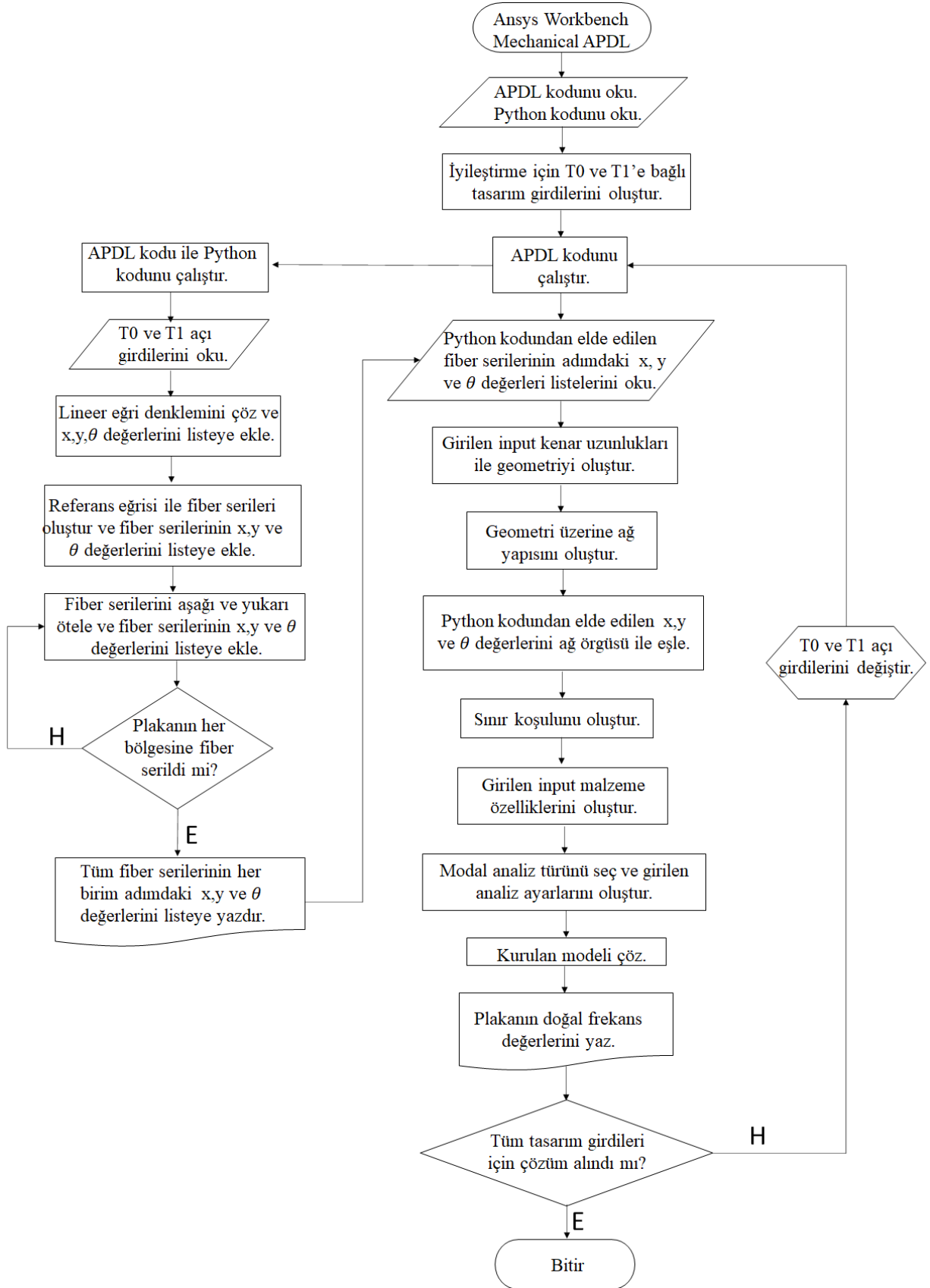
şekil 1.1. Plaka üzerine fiber serilimi oluşturan ve fiber serilerinin her birim noktadaki x, y, θ değerlerini veren Python kodu algoritması

EK- 2. Değişken katırlıklı kompozit plakanın dinamik analiz iyileştirme algoritması



Şekil 1.2. Değişken katırlıklı kompozit plakanın fiber serim açılarının patlama yükü altındaki dinamik analiz sonucu yer değiştirme değerine göre iyileştirme algoritması

EK- 3. Değişken katırlıklı kompozit plakanın modal analiz iyileştirme algoritması



Şekil 1.3. Değişken katırlıklı kompozit plakanın fiber serim açılarının modal analiz sonucu doğal frekans değerlerine göre iyileştirme algoritması

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : VARDAR, Eray
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 31.01.1995, Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 05393048704
 e-mail : eryvrdr@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2018
Lisans	Anadolu Üniversitesi/İşletme Fakültesi	2019
Lise	Sokullu Mehmet Paşa Lisesi	2013

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	TRMotor Güç Sistemleri	Mekanik Tasarım Müh.
2018-2018	Türk Havacılık ve Uzay Sanayii	Yapısal Analiz Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. E.Vardar, T.Karaçay,(2022, 20-21 Ağustos). *Değişken Katınlıklı Katmanlı Kompozit Plakların Patlama Yükü Altında Dinamik Davranışının Modellenmesi, Analizi ve Optimizasyonu*. 14th International Scientific Research Congress, Ankara, 82.

Hobiler

Snowboard ve kayak yapmak, bisiklete binmek, dalış yapmak.



GAZİ GELECEKTİR..