T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOMPOZİT BLADE (BIÇAK) ANTEN'İN SONLU ELAMANLAR YÖNTEMİYLE MUKAVEMET OPTİMİZASYONU

HAKAN ŞERİF KESKİN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2021

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOMPOZİT BLADE (BIÇAK) ANTEN'İN SONLU ELAMANLAR YÖNTEMİYLE MUKAVEMET OPTİMİZASYONU

HAKAN ŞERİF KESKİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. AHMET SİNAN ÖKTEM

GEBZE
2021

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

STRENGTH OPTIMIZATION OF COMPOSITE ANTENNA BY USING FINITE ELEMENT METHOD

HAKAN SERIF KESKIN

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. AHMET SINAN OKTEM

GEBZE
2021

GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	**YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU**

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 17/06/2021 tarih ve 2021/27 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 30/06/2021 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Hakan Şerif Keskin'in tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) : Doç.Dr. Ahmet Sinan ÖKTEM

ÜYE : Prof.Dr. Mehmet Ali ARSLAN

ÜYE : Dr.Öğretim Üyesi Aykut SAFA

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
…./../…. tarih ve …./… sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmada hâlihazırda uçaklarda kullanılan kompozit yapıdan oluşan bıçak antenin mukavemet değerlerinin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Uçakta bulunan bir anten için en kritik yüklemeler, anten üzerine gelen yanal yüklerdir. Bu yükler kalkış, sürüklenme ve iniş anlarında rüzgâr tarafından anten üzerine etki etmektedir. Rüzgâr tarafından oluşturulan bu yükler antenin bağlı olduğu yere yakın yerlere etki ederek o bölgelerde gerilim ve moment değerleri üretmektedir.

Yapı üzerinde oluşan bu gerilme bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanmıştır. Rüzgâr yükleri akışkanlar mekaniği hesaplarıyla elde edilmiştir. Bu yükler, statik hesaplamaları yapabilmek için akışkan – yapı etkileşim yöntemi kullanılarak statik hesapların yapıldığı sonlu elemanlar ortamına aktarılmıştır. Bu ortamda akışkan tarafında elde edilen yükler ve uçak üzerine gelen yerçekimi kuvvetleri ile statik hesaplama yapılarak gerilmeler elde edilmiştir.

Elde edilen gerilmelerin, kompozit yapılar üzerindeki etkilerini inceleyebilmek adına, bu sonuçlar çalışmada kullanılmış olan yazılımın içinde kompozit yapılar için oluşturulmuş özel sonlu elemanlar ortamına aktarılmıştır. Buradaki sonuçlar daha sonra uygun bir tasarıma giden yolda yapılacak olan optimizasyon çalışmalarında kullanılmıştır.

Mevcut yapının yükseklik, derinlik ve en gibi genel geometrik kısıtlarını değiştirmeden kompozit yapıyı oluşturan laminasyon açıları ve sırası değiştirilerek optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışmasını gerçekleştirirken, katman kalınlığı, katman yönlenmesi ve fiber malzemesi değişkenlerinin kullanılmasının yanında MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) ve bu yöntemin alt disiplini olan NSGA (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm) kullanılmıştır. Optimizasyon sonuçları cevap yüzey oluşturularak görselleştirilmiştir.

Yapılan bu çalışmalar ile mevcut yapıyı oluşturan parametrelerin sonuçları üzerindeki direkt etkisi gözlemlenebilmiştir. Çalışmalar sonucunda hangi parametrelerin hangi aralıkta yapıya direkt etki ettiği gözlemlenerek en uygun tasarım seçilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit Malzemeler, Optimizasyon, Yapı-Akışkan Etkileşimi, Sonlu Elmanlar Yöntemi.

SUMMARY

In this study, it is aimed to improve the strength values of the Blade Antenna, which is composed of composite structure currently used in airplanes, by using the finite element method. The most critical loads for the blade antenna in an aircraft are the lateral loads on the antenna. These loads act on the antenna by the wind during take-off, drift and landing moments. These loads created by the wind affect the places close to where the antenna is connected, producing stress and moment values in those regions.

The finite element method has been used to obtain this stress on the structure in computer environment. Wind loads are calculated in the fluid environment. These loads are transferred to finite element environment where static calculations are made by using fluid-structure interaction method in order to execute static calculations. In this environment, the loads obtained on the fluid side and the gravitational forces on the plane were static calculations and the stresses were obtained.

In order to investigate the effects of the obtained stresses on composite structures, these results were transferred to the special finite element environment created for composite structures. The results here have been used in the optimization studies to be carried out on the way to a convenient design.

Without changing the general geometric constraints of the existing structure such as height, depth and width, the components that make up the composite structure were changed at certain intervals and optimization work was carried out. While performing the optimization study, besides using layer thickness, layer orientation and fiber material variables, MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) and NSGA (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm), which is the sub-discipline of this method, were used. Optimization results were visualized by creating the response surface.

With these studies, it was possible to observe the direct effect of the parameters that make up the existing structure on the results. As a result of the studies, the most suitable design was selected by observing which parameters directly affect the structure in which range.

Keywords: Composite Material, Optimization, Fluid-Structure Interaction, Finite Elements Method.

TEŞEKKÜR

Her şeyden önce, bu çalışmanın ortaya çıkmasında ders aşamasından tezin yazımının bitimine kadar bana vermiş olduğu cesaret, bilgi ve tecrübeleri için saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Ahmet Sinan Öktem'e en samimi teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca eğitim-öğretim hayatım boyunca bana sürekli yapıcı desteklerinden dolayı kendi aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLOLAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	1
2. KOMPOZİT MALZEME	3
3. AKIŞKAN-YAPI ETKİLEŞİMİ	7
4. OPTİMİZASYON	11
4.1. Optimizasyon Türleri	11
4.2. MOGA	12
4.2.1. NSGA	13
5. BIÇAK (KANAT) ANTEN	14
6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	15
6.1. Koordinat Sistemi	17
6.2. Malzeme Özellikleri	17
6.3. Parametreler ve Seviyeleri	20
6.4. Ağ Ayarları	21
6.5. Kompozit Modelleme	23
6.6. Yük Durumları	24
6.7. Optimizasyon Amacı	25
6.8. Sınır Şartları	25
6.9. Hasar Kriteri	26
7. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	28
7.1. Cevap Yüzey Sonuçları	28
7.1.1. Katman Kalınlığı – Katman Açısı Sonuçları	28

7.1.2. Malzeme – Katman Açısı Sonuçları 34
7.1.3. Malzeme – Katman Katman Kalınlığı Sonuçları 39
7.2. Optimizasyon Sonuçları 40
8. SONUÇLAR 45
9. ÖNERİLER VE GELECEK ÇALIŞMALAR 48

KAYNAKÇA 49
ÖZGEÇMİŞ 52
EKLER 53

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Kısaltmalar	**Açıklamalar**
σ_1	: Fiber yönü gerilme
σ_2	: Fiber yönüne dik yöndeki gerilme
τ_{12}	: Kayma gerilmesi
$(\sigma_1^T)_{ult}$	: Fiber yönündeki çekme gerilmesinin maksimum noktası
ϕ^{fs}	: Etkileşim yüzey vektörü
ϕ_i^f	: Akış tarafının basınç ve iç hız vektörü
ϕ_i^s	: Katı taraftaki basınç vektörünün zamana bağlı türevini ve iç hız vektörü
d^s	: Katı taraftaki yer değiştirme vektörü
d_c^{fs}	: Etkileşim yüzeyi yer değiştirme vektörü
d_i^s	: Katı taraf yer değiştirme vektörü
P^f	: Akış taraf basıncı
V_i^f	: Akış tarafı iç hız vektörü
V_i^s	: Katı taraf iç hız vektörü
P^{s^*}	: Katı taraftaki basınç vektörünün zamana bağlı türevi
U_c^{fs}	: Etkileşim yüzeyi yer değiştirme vektörü
U_i^s	: Katı taraf yer değiştirme vektörü
Q^{fs}	: Etkileşim sistemi atalet kuvvet vektörü
M^{fs}	: Katı ve akışkan için oluşturulan kütle matrisi
ϕ^{fs^*}	: Etkileşim yüzey vektörünün zamana bağlı türevi
C^f	: Viskozite, taşınım ve ıraksamadan oluşan akış matrisi
N	: Çözüm uzayı
P_0	: Başlangıç popülasyonu
Q_0	: Yavru popülasyonu
P_t	: T iterasyonundaki popülasyon
Q_t	: T iterasyonundaki yavru popülasyonu
R_t	: T iterasyonundaki başlangıç ve yavru popülasyon birleşimi

ε_x	: X yönü gerinim
ε_y	: Y yönü gerinim
γ_{xy}	: XZ düzlem gerinim
σ_x	: X yönü gerilme
σ_y	: X yönü gerilme
E_x	: X yönü elastiklik modülü
E_y	: Y yönü elastiklik modülü
G	: Kayma modülü
G_{xy}	: XZ düzlem kayma modülü
v_{xy}	: XY düzlem Poisson oranı
v_{yx}	: YX düzlem Poisson oranı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No:		Sayfa
2.1:	Laminat Oluşum Akışı (Kaw, 2006).	4
2.2:	Kompozit Malzeme Eksen Takımı (Gay ve diğerleri, 2002).	5
3.1:	Akışkan – Yapı Etkileşim Adım.	8
3.2:	Direkt Yüzey Etkileşim (Zhang ve Song, 2016).	8
3.3:	Çoklu Nokta Yüzey Etkileşimi (Zhang ve Song, 2016).	9
4.1:	Elitizm Akış Şeması.	13
5.1:	Bıçak Anten.	14
6.1:	İkinci Dereceden Kabuk Eleman (ANSYS, 2019).	16
6.2:	Koordinat Sistemi.	17
6.3:	MTM46 162 GSM Polar Özellik.	18
6.4:	Epoxy Carbon Woven Polar Özellikleri.	19
6.5:	Merkezcil Kompozit Tasarım (Develve, 2020).	21
6.6:	Bıçak Anten Ağ Yapısı.	22
6.7:	Akış Hacim Ağ Yapısı.	22
6.8:	Sonlu-Elemanlar Yakınsama Analizi.	23
6.9:	Kompozit Modelleme Ağacı.	24
6.10:	Bıçak Anten Kuvvet Yönü.	24
6.11:	Kuvvet Uygulama Yüzeyi.	25
6.12:	Anten Sabitleme Delikleri.	26
7.1:	Katman Kalınlığı ve 1. Katman Açısı Kompozit Hata Sonucu.	29
7.2:	Katman Kalınlığı ve 1. Katman Açısı Maksimum Gerilme Sonucu.	29
7.3:	Katman Kalınlığı ve 2. Katman Açısı Kompozit Hata Sonucu.	30
7.4:	Katman Kalınlığı ve 2. Katman Açısı Maksimum Gerilme Sonucu.	30
7.5:	Katman Kalınlığı ve 3. Katman Açısı Kompozit Hata Sonucu.	31
7.6:	Katman Kalınlığı ve 3. Katman Açısı Maksimum Gerilme Sonucu.	32
7.7:	Katman Kalınlığı ve 4. Katman Açısı Kompozit Hata Sonucu.	33
7.8:	Katman Kalınlığı ve 4. Katman Açısı Maksimum Gerilme Sonucu.	33
7.9:	Malzeme ve 1. Katman Açısı Kompozit Hata Sonucu.	34
7:10:	Malzeme ve 1. Katman Açısı Maksimum Gerilme Sonucu.	35

7.11: Malzeme ve 2. Katman Açısı Kompozit Hata Sonucu. 36
7.12: Malzeme ve 2. Katman Açısı Maksimum Gerilme Sonucu. 36
7.13: Malzeme ve 3. Katman Açısı Kompozit Hata Sonucu. 37
7.14: Malzeme ve 3. Katman Açısı Maksimum Gerilme Sonucu. 37
7.15: Malzeme ve 4. Katman Açısı Kompozit Hata Sonucu. 38
7.16: Malzeme ve 4. Katman Açısı Maksimum Gerilme Sonucu. 38
7.17: Malzeme ve Katman Kalınlığı Kompozit Hata Sonucu. 39
7.18: Malzeme ve Katman Kalınlığı Maksimum Gerilme Sonucu. 40
7.19: Katman 1 Amaç-Fayda İlişkisi. 41
7.20: Katman 2 Amaç-Fayda İlişkisi. 41
7.21: Katman 3 Amaç-Fayda İlişkisi. 42
7.22: Katman 4 Amaç-Fayda İlişkisi. 43
7.23: Katman Kalınlığı Amaç-Fayda İlişkisi. 43
8.1: Önerilen Tasarım Kompozit Hata Oranı (IRF). 46
8.2: Önerilen Tasarım Maksimum Gerilme. 46
8.3: Önerilen Tasarım Maksimum Gerilme. 47

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No:		**Sayfa**
6.1:	MTM46 162 GSM Malzeme Özellikleri.	17
6.2:	Epoxy Carbon Woven Malzeme Özellikleri.	18
6.3:	Parametreler ve Seviyeleri.	20
8.1:	Önerilen Tasarım Karşılaştırma.	46

1. GİRİŞ

Kompozit malzemelerin ekonomik önemi artık iyi bilinmektedir. Gelecekte bu önemin artacağına dair her yerde güçlü göstergeler bulunmaktadır. Kompozit malzemeler hâlihazırda havacılık endüstrisinde yerleşik bir konuma sahiptir. Otomotiv endüstrisinde ise birçok bileşenin ağırlıkların azaltılmasında kullanılmaktadırlar ve inşaat altyapılarının destek takviyelerinde kompozit malzemeler kullanılmaktadır (Gay, Hoa ve Tsai, 2002).

Gelişen teknoloji ve üretim yöntemleri ile birlikte bu sektörlerde kullanılan parçaların enerji tüketimi ve ağırlıkları ön plana çıkmaktadır. Tasarımlarda kullanılan geleneksel metal parçaların yerine zamanla yüksek mukavemet ve düşük ağırlıkları dolayısıyla kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Bu özelliklerinde dolayı kompozit malzemeler yüksek ticari rekabetin olduğu havacılık sektöründe uçakların hem dış yapısında hem içyapılarında kullanılmaktadır. Ayrıca kompozit malzemeden oluşan bileşenlerin özel şartlara göre performanslarının, yoğunluklarının ve ağırlıklarının ayarlanabilir olması kompozit malzemelerin havacılık, otomotiv ve denizcilik sektöründe kullanımını arttırmaktadır.

En uygun tasarımları elde etmek için mühendisler, kompozit malzemelerin tasarımdan sonra bilgisayar ortamında performanslarını görmek istemektedir. Bu amaç ile sonlu elemanlar yöntemini aktif bir şekilde kullanmaktadırlar. Yapılmış olan tasarımın en iyi performansı gerçekleştirmesi arzu edilirken bir yandan ucuz ve üretilebilir olması en önemli esastır.

Kompozit malzemelerin optimizasyon çalışmalarında, yapıyı oluşturan parametreler, yapının üzerine gelen kuvvetler ya da genel kısıtlama (tasarım için belirlenen şartların sınırları) gibi detaylar kullanılmaktadır. Arzu edilen tasarıma giden yolda, bilgisayar ortamında belirlenen şartlar altında tasarıma yön vermesi ve bir tasarımın önerilmesi sebebinden dolayı optimizasyon yönteminin yadsınamaz bir yaklaşım olduğu gerçekleşen çalışmalarda görülmektedir.

1.1. Tezin Amacı

Uçaklarda birçok bileşen kullanılmaktadır. Bu bileşenlerden bir tanesi de haberleşmeyi sağlayan elektronik bileşen içeren bıçak antenlerdir. Bu antenler,

uçakların kalkış, sürüklenme ve iniş anında çeşitli kuvvetlere maruz kalmaktadır. Bu kuvvetlerden en zorlayıcı olanı anten üzerinde kayma gerilmesine sebep olan yanal kuvvetlerdir. Uçakların kalkış anında, bu antenlerin yanal kuvvetlere dayanamayarak kırıldığı gözlemlenmiştir. Bu antenlerin bu kuvvetlere dayanabilmesi için bilgisayar ortamında nümerik hesaplamalar yapılmıştır.

Bu tezin ana amacı ise kalkış anında antenin maruz kaldığı kuvvetleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak kompozit anteni oluşturan, katman malzemesi, katman kalınlığı ve katman açı yönlenme parametrelerini değiştirerek en uygun tasarım parametrelerini elde etmektir.

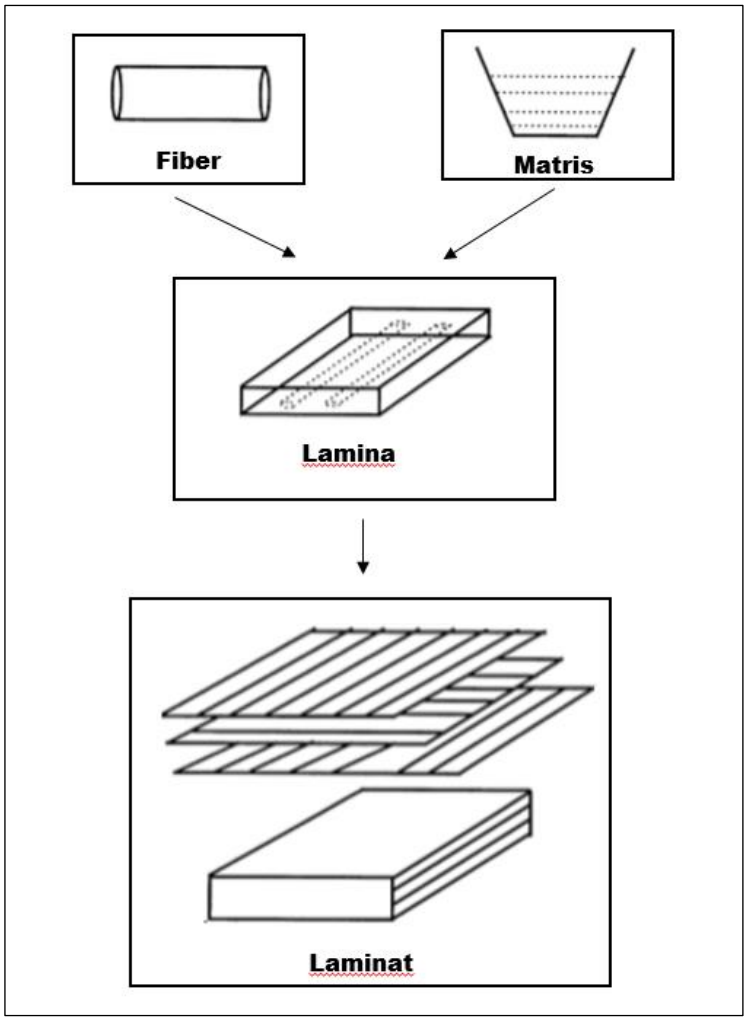
2. KOMPOZİT MALZEME

Kompozit malzemeler çalışma ortamına yönelik makroskopik düzeyde birbiri içerisinde çözünmeyen iki farklı malzemenin bir araya getirilmesi ile oluşturulmaktadır. Kullanım amacına göre farklılık gösterse de kompozit malzemeler ana olarak takviye fazı ve matris fazı olmak üzere iki ana yapıdan meydana gelmektedir.

Fiber ve matristen oluşan tek bir yapıya lamina, bu laminaların farklı sayılarda ve yönlerde dizilip ve birbiri ile yapıştırılması sonucunda oluşan yapıya da laminat denmektedir. Laminatlar, laminaların gerek kalınlığından, gerek gösterdiği mukavemet değerlerinin çalışma koşulları altında gerekli dayanımı göstermediği durumlarda, dayanım özelliklerin arttırılması amacı ile tasarlanmaktadır

Geleneksel malzemelere göre, kompozit malzemelerin üretilme yöntemleri zor olmasına rağmen sağladığı avantajlar göz önünde bulundurulduğunda mühendislik gereksinimleri açısından kullanılması mantıklı olmaktadır. Örnek vermek gerekirse, saniyelerin önemli olduğu formula yarışlarında yarışan araçların kompozit gövde yapısının aynı dayanım değerlerine sahip geleneksel malzemelerden (alüminyum vb.) üretilmiş olanına göre daha hafif olması güç/ağırlık oranlarında olağanüstü avantajlar sağlamaktadır.

Havacılıkta kompozit yapıların dayanımları daha önemli olduğu için yapıyı güçlendirmek amacı ile karbon fiber ve kevlar gibi malzemeler kullanılmaktadır. Uçakların kanat yapılarında, haberleşme antenlerin yapısında, uzay araçların gövde yapısında bu tür kompozit malzemelere rastlanılmaktadır (Brown, 1980). Kompozit malzemelerin tanımlanması Şekil 2.1’ de gösterilmiştir (Kaw, 2006).



Şekil 2.1: Laminat Oluşum Akışı (Kaw, 2006).

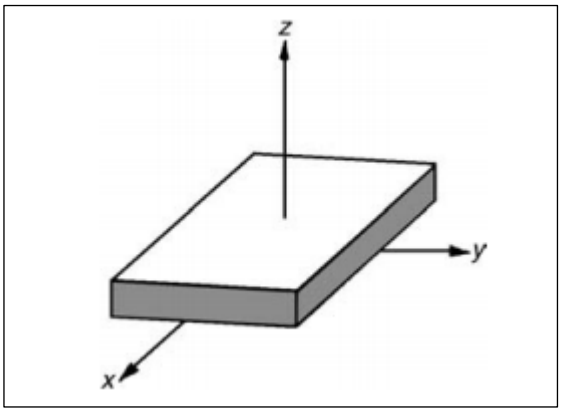
Kompozit malzemeler kendi içerisinde barındırdığı takviye geometrisi ya da matris türüne göre sınıflandırılır (Kaw, 2006).

- Parçacık içeren kompozitler, kendi içlerinde çeşitli maddelerden (alaşım ve seramik gibi) parçacık bulundurur. Bu parçacıklar kompozit içerisinde genellikle eşit bir şekilde dağıldığı için kompozit özellikleri her yönde aynıdır (izotropik malzeme).
- Pul kompozitler, kendi içerisinde parçacıklara göre daha düz takviyelerden oluşmaktadır.
- Fiber kompozitler, matris içerisinde sürekli veya süreksiz fiberlerden oluşmaktadır. Bu fiberler matris içerisinde eşit dağılmadığı için kompozit özellikleri her yönde aynı değildir (anizotropik malzeme).

İki boyutlu izotropik malzemelerin gerilme- gerinim ilişkisinin matris formu (2.1) içinde açıklanmıştır (Gay ve diğerleri, 2002).

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-v}{E} & 0 \\ \frac{-v}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \tag{2.1}$$

Burada ε_x , ε_y ve γ_{xy} kompozit malzemelerde x, y ve xz düzlemlerindeki gerinimleri temsil etmektedir. Kompozit yapı üzerinde eksen takımı yerleştirilmesi Şekil 2.2' de gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Kompozit Malzeme Eksen Takımı (Gay ve diğerleri, 2002).

Bu denklemler içerisinde 3 elastik sabit bulunmaktadır. Bu sabitlerin arasındaki ilişki denklem (2.2) içerisinde gösterilmiştir.

$$G = \frac{E}{2(1+v)} \tag{2.2}$$

Denklem (2.2), izotropik malzemelerin bağımsız 2 elastiklik sabitinden etkilendiğini göstermektedir.

İki boyutlu anizotropik malzemelerin gerilme- gerinim ilişkisinin matris formu (2.3) içinde açıklanmıştır (Gay ve diğerleri, 2002).

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & \frac{-v_{yx}}{E_y} & 0 \\ \frac{-v_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \tag{2.3}$$

Denklem (2.3), ortotropik malzemelerin bağımsız 4 elastiklik sabitinden etkilendiğini göstermektedir (Gay ve diğerleri, 2002).

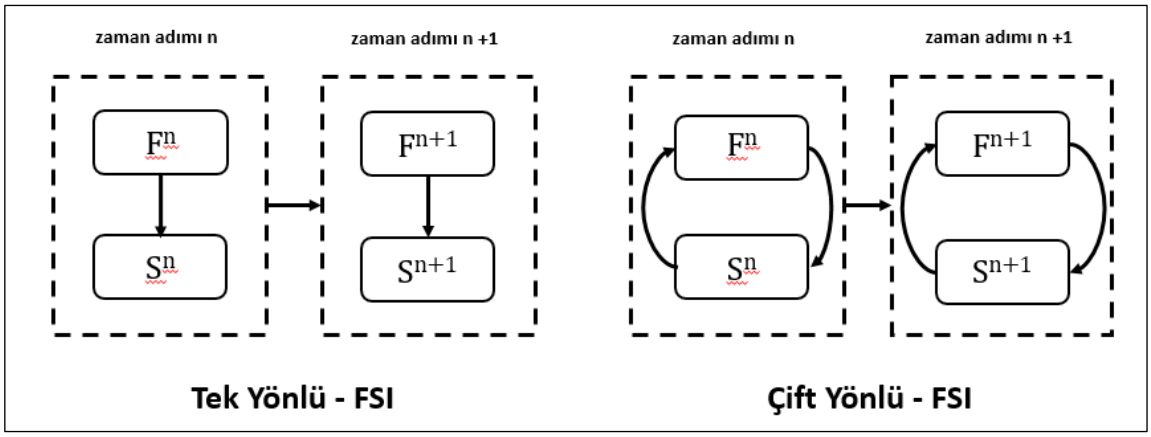
$$v_{xy} = v_{yx} \frac{E_x}{E_y} \text{ (Maxwell-Betty)} \tag{2.4}$$

Denklem (2.4) içerisinde 5. elastiklik sabitinin diğer sabitlerden çıkarılabildiği gösterilmiştir.

3. AKIŞKAN-YAPI ETKİLEŞİMİ

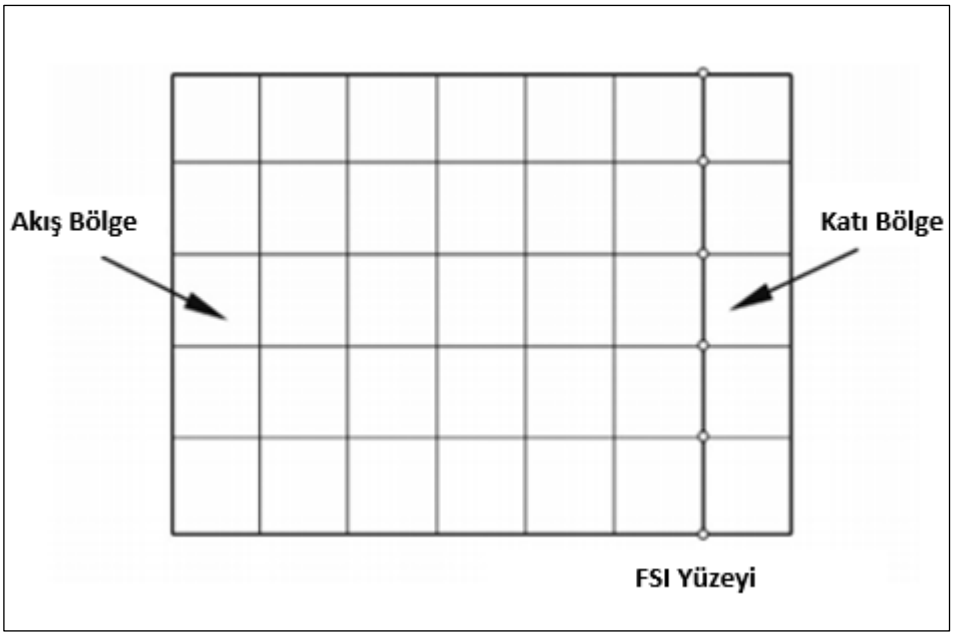
Bir hava aracı kendi uçuşu esnasında kalkış, sürüklenme ve iniş olarak adlandırılan hava kuvvetlerine maruz kalmaktadır (Bibin, Selvaraj ve Sanju, 2012). Bu kuvvetler uçağın yüzeylerinde oluşan olağan olmayan basınç dağılımlarından kaynaklanmaktadır ve uçağın yapısında gerilme ve deformasyon oluşumuna sebebiyet vermektedir (Brown, 1980). Bu koşullar altında, hava aracının önemli yapısal elemanların üzerinde oluşan kuvvetleri, titreşimleri vb. anlayabilmek ve hesaplayabilmek çok önemlidir (Costa ve Rina, 2018). Bu nedenle, hava taşıtı tasarımı için uçuş koşulları altında gerçek basınç kuvvetleri uygulanarak yapılan statik ve dayanım analizi, uçağın kendi dayanımını ve yapı üzerinde oluşan deformasyonlar doğrulanabilir (Mazhar, Khan, Chaudhry ve Ahsan, 2013). Bu yükleri uygulamak için sayısal analizlerde akışkan-yapı etkileşimi (FSI) kullanılmaktadır (Schmucker, Flemming ve Coulson, 2010). Bu yöntem basınç yüklerinin yapısal sonuçlarını incelemek için kullanılmaktadır.

FSI yöntemi içerisinde ‘bir yönlü’ ve ‘iki yönlü’ olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır. Bir yönlü FSI yapının zamandan bağımsız yapılan analizlerde kullanılmasıdır. Yapılan analizlerde yapısal tarafa aktarılan kuvvetler sonucunda oluşan deformasyonlar ve gerilmeler bir sonraki zaman adımında akışı etkilememektedir (Menter, Yakubov, Sharkey ve Kuntz, 2006). İki yönlü FSI zamana bağlı ve sürekli haberleşmenin gerektirdiği analizlerde kullanılmaktadır. Bu analizlerde bir CFD fiziğinden yapısal fiziğine aktarılan kuvvetler sonucunda, bir sonraki zaman adımında CFD sonuçlarını etkilemektedir. Bu sebeple ‘iki-yönlü’ FSI analizlerinde fizikler arası zamana bağlı haberleşme vardır. Bu akış Şekil 3.1’ de görülebilir

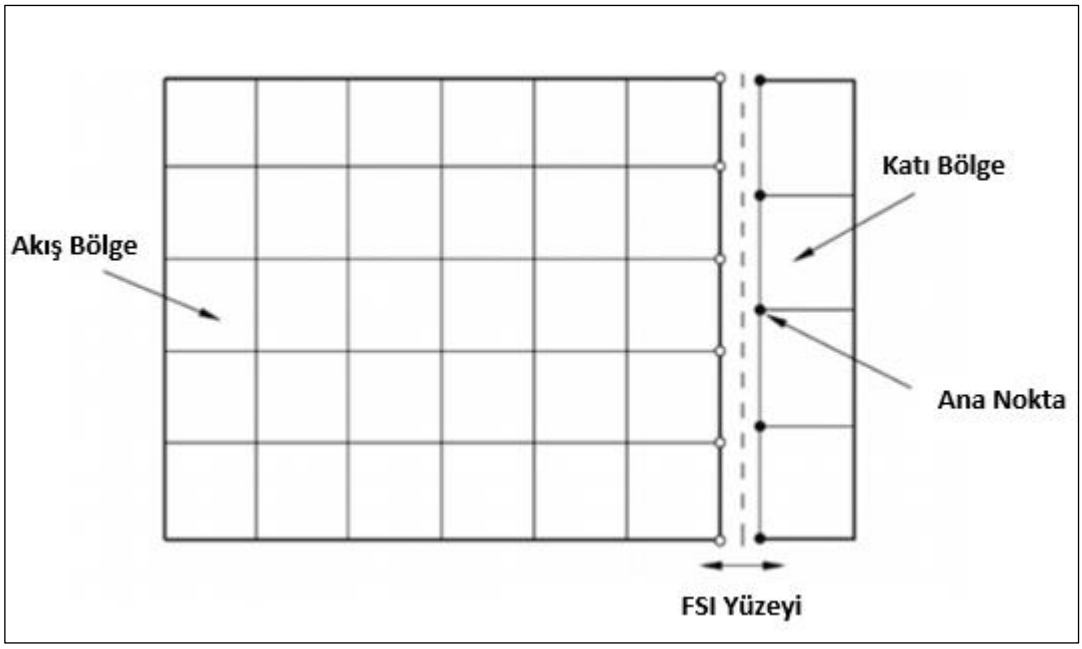


Şekil 3.1: Akışkan – Yapı Etkileşim Adım.

Bu etkileşim yukarıdaki bölümlerde bahsedildiği üzere hem akış hem katı bölümlerden oluşmaktadır. Hem akış tarafında hem katı tarafta bulunan ağ yapılarının birbiri ile etkileşimini açıklayan birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerin görselleştirilmiş olduğu şekiller Şekil 3.2 ve Şekil 3.3 içerisinde görülebilir.



Şekil 3.2: Direkt Yüzey Etkileşim (Zhang ve Song, 2016)



Şekil 3.3: Çoklu Nokta Yüzey Etkileşimi (Zhang ve Song, 2016).

Şekil görülen yöntem direkt yüzey etkileşimi olarak tanıtılmıştır. Bu yöntem içerisinde akış tarafında bulunan ağ noktalarının katı taraftaki ağ noktalarının birebir örtüşmesinden oluşmaktadır. Bu yöntemin en önemli avantajı akış tarafından alınan bilgilerin katı tarafa aktarılırken yüksek doğruluk sağlamasıdır. Fakat ağ örülme konusunda harcanan zaman ve hesaplama konusunda harcanan zaman dezavantaj olarak görülmektedir.

Şekil üzerinde görülen çoklu nokta yüzey etkileşimi, akış tarafında bulunan noktalar ile katı noktalar ile birebir örtüşmemektedir. Bu yöntem direkt yüzey etkileşim yöntemine göre bilgi aktarımında göreceli daha az doğruluk sağlamasına rağmen ağ örülme anında harcanan zaman ve hesaplama konusunda harcanan zaman açısından avantajlıdır.

Bu yöntemin kendi içerisindeki hesaplamalarda aşağıdaki akış-yapı etkileşim formülleri kullanılmaktadır. Burada yöntem katı, akış ve etkileşim yüzeyi olarak üçe bölünebilir (Zhang ve Hisada, 2001).

$$\Phi^{fs} = \begin{pmatrix} \Phi_i^f \\ \Phi_c^{fs} \\ \Phi_i^s \end{pmatrix}, d^s = \begin{pmatrix} d_c^{fs} \\ d_i^s \end{pmatrix} \tag{3.1}$$

$$\phi_i^f = \begin{pmatrix} P^f \\ V_i^f \end{pmatrix} \tag{3.2}$$

Burada, ϕ_i^f akış tarafının basınç ve iç hız vektörünü temsil etmektedir.

$$\phi_i^s = \begin{pmatrix} V_i^s \\ P^{s^*} \end{pmatrix}, \tag{3.3}$$

Yukarıda gösterilmiş olan ϕ_i^s , katı taraftaki basınç vektörünün zamana bağlı türevini ve iç hız vektörünü temsil etmektedir.

$d_c^{fs} = \left(U_c^{fs}\right)$ etkileşim yüzey yer değiştirme vektörü ve $d_i^s = \begin{pmatrix} U_i^s \\ P^s \end{pmatrix}$ ise katı tarafının yer değiştirme ve basınç vektörlerini temsil etmektedir.

$$Q^{fs} = F^{fs} \tag{3.4}$$

Yukarıda Q^{fs} olarak gösterilen ifade etkileşim sisteminin atalet kuvvetlerini temsil etmektedir.

$$Q^{fs} = M^{fs}\phi^{fs^*} + C^f\phi^{fs} + Q^s(d^s) \tag{3.5}$$

Denklem (3.4) içerisinde bulunan F^{fs} dış kuvvetleri temsil etmektedir. Yukarıdaki denklemde (3.5) bahsedilen M^{fs} ise katı ve akışkan için oluşturulan kütle matrisidir. C^f ise viskozite, taşınım ve ıraksamadan oluşan akış matrisidir.

4. OPTİMİZASYON

Tarihin başlangıcından beri insanlar kendi ihtiyaçları doğrultusunda aletler icat etmişlerdir. Bu icatların zaman içerisinde değişen istekler doğrultusunda değişme zarureti doğmuştur. Mühendislik alanında tasarımı yapılan bir parçanın çalışma koşulları altında en iyi performansı göstermesi arzu edilmektedir. Kavram tasarımı yapılan bir parçanın, kendi tasarımcısının edindiği tecrübeleri göz önünde bulundurarak tasarlaması bazı koşullarda istenilen performansı göstermemesine sebebiyet vermektedir. Mühendisler bu durumun önüne geçebilmek adına farklı yüklere maruz kalan tasarlanmış parçanın, performans açısından uygunluğunu yakalamak istemişlerdir.

Dolayısıyla arzu edilen tasarıma ulaşmak için, mühendislik araçlarından biri olan optimizasyon yöntemi kullanılmaktadır. Kendi tasarımlarında bulunan uzunluk, derinlik, katman sayısı, katman sırası vb. parametrelere farklı seviyelerde değerler atarak veya belirli değer aralığı tanımlayarak parametrelerin kendi arasındaki ilişkileri ortaya koyarak en uygun tasarıma ulaşmayı amaçlamaktadırlar (Iqbal, 2013).

4.1. Optimizasyon Türleri

Doğa, dünyanın başlangıcından beri kendi optimizasyonunu en uygun ortama uyum sağlamak için uygulamaktadır. Zaman içerisinde dünya içerisinde yaşamını sürdüren tek hücreli canlıdan bizim gibi en karmaşık canlıya kadar tüm canlılar yaşadığı ortama uyum sağlamaktadır. Bu uygunluğu en optimum seviyesine getirmek için bir sonraki nesilde kendi öğrendiklerini, modifikasyonları ve diğer değişimleri kalıtsal yöntemler ile aktarmaktadır. Burada canlılar kalıtsal aktarım türünü kullanarak kendi optimizasyonu uygulamaktadır.

Farklı amaçlara yönelik birçok optimizasyon yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemlerin kendi içerisinde kendisine özel yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerin farklılıklarını belirleyen çeşitlilik mekanizmaları bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) başlığı altında bulunan NSGA (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm) yönteminin detaylı incelenmesi devam eden bölümlerde detaylı bir şekilde anlatılacaktır (Konak, Coit ve Smith, 2006).

4.2. MOGA

Çok amaçlı gen algoritmasının, birçok amacın bulunduğu karmaşık problemlerde uygulanması çözüm hızı ve doğruluk açısından fayda sağlamaktadır. Bu yöntemin temelini gen algoritması oluşturmaktadır (Schaffer, 1985).

Gen algoritma (GA) terminolojisinde, kromozom olarak adlandırılan çözüm vektörü bulunmaktadır. Bu kromozomlar gen olarak adlandırılan ayrık birimlerden oluşmaktadır. Her gen, kromozomların bir veya daha fazla özelliğini kontrol etmektedir. Bir kromozom çözüm uzayında benzersiz bir çözüme denk gelmektedir. Bu yöntem, çözüm uzayı ile kromozomlar arasında bir eşleşme mekanizması gerektirmektedir. Aslında, GA problemin kodlanması üzerine çalışmaktadır. Bu problemin kendisi değildir (Goldberg, 1989).

GA, popülasyon olarak adlandırılan kromozom koleksiyonu ile çalışmaktadır. Bu popülasyon rastgele başlatılır. Çözüm evrilmesinde, popülasyon en uygun çözümleri içermektedir ve en sonunda istenilen çözüme ulaşılır. Yani, bir çözüm en baskın çözüm olur (Goldberg, 1989). GA, var olan bir çözümden yeni bir çözüm üretmek için mutasyon ve çaprazlama olarak adlandırılan iki operatör kullanır. Çaprazlama, ebeveyn olarak adlandırılan iki farklı kromozomun birleştirilerek yavru olarak adlandırılan yeni bir kromozom oluşturur. Bu operasyonu gerçekleştirirken ebeveynlerin istenilen şartlara en uygun genlerini kullanmaktadır. Bu yöntem ile popülasyon içerisinde iterasyon sürecinde uygun kromozomların görülmesi beklenmektedir. Mutasyon operatörü, kromozomları oluşturan genlerin özelliklerinde küçük değişiklikler yaparak uygun kromozoma ulaşmaya amaçlamaktır. Bu operasyon sonucunda ilk durumdaki kromozom ile çok farklı olmamaktadır (Konak ve diğerleri, 2006).

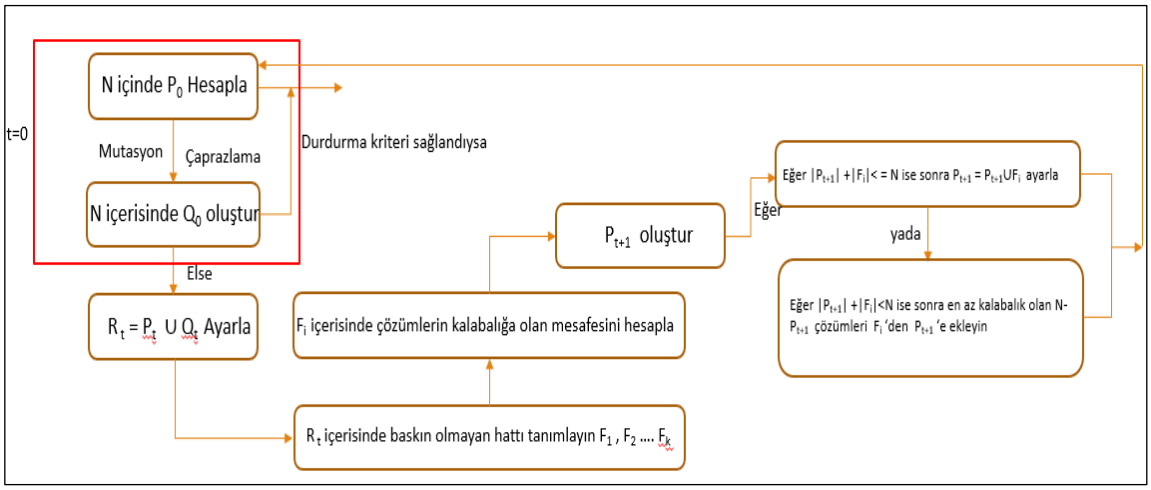
Çok amaçlı gen algoritması ise çok amaçlı problemlerde, çözüm uzayı içerisinde farklı bölgeleri eş zamanlı tarayarak en uygun çözüme gitmektedir. Bu çözümün en büyük avantajı kullanıcının önem derecesi atmasına gerek duymamasıdır (Konak ve diğerleri, 2006; Rouhi, Ghayoor, Hoa ve Hojjati, 2015).

Literatürde MOGA yaklaşımının gelişimi ile ilgili yayınlamış çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Coello, 2000; Coello Coello, 1999a, 1999b; Fonseca ve Fleming, 1998; Jensen, 2003; Xiujuan ve Zhongke, 2004).

4.3. NSGA

Baskın olmayan sıralı gen algoritması (NSGA), MOGA yönteminin özelleştirilmiş halidir. NSGA optimizasyon içerisinde Elitizm yaklaşımını kullanmaktadır. Elitizm, çözüm uzayı içerisinde arama yaparken, şimdiye kadar bulunan en iyi çözümün bir sonraki nesle aktarılmasıdır (Zitzler ve Thiele, 1999). Bu çözüm her iterasyon sonucunda en iyi çözümlerin birikmesini de sağlamaktadır. İki farklı Elitizm yaklaşımı vardır. Bunlardan birisi popülasyon içerisinde en iyi çözümleri sürdürmek, diğeri ise bulunan çözümleri ayrı bir alanda biriktirip bunları popülasyona tekrardan tanıtmaktır (Konak ve Smith, 2002, 2004).

Bu çalışmada popülasyon içerisinde en iyi çözümleri sürdürmek stratejisi kullanılmıştır. Bu yöntemin akış şeması Şekil 4.1' de gösterilmiştir.



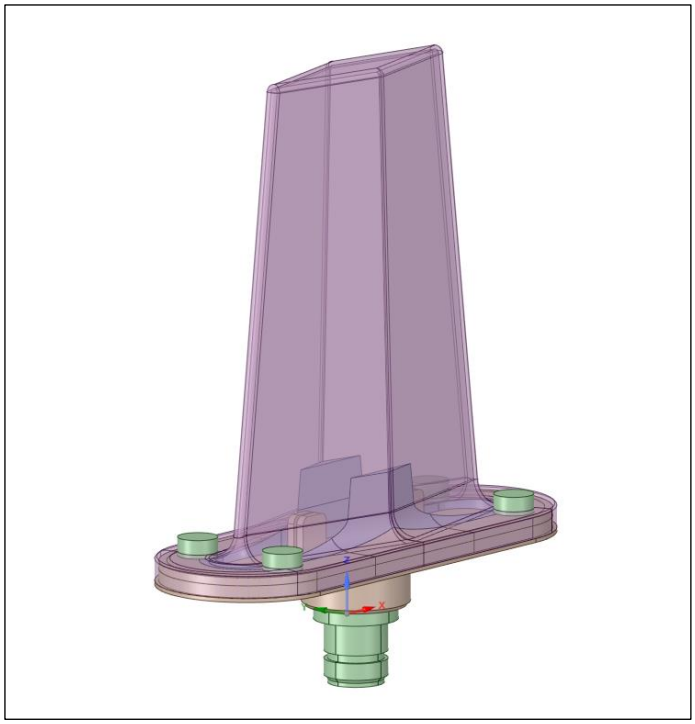
Şekil 4.1: Elitizm Akış Şeması.

5. BIÇAK (KANAT) ANTEN

Uçaklarda hâlihazırda kullanılan birçok yapı ağırlık avantajından dolayı kompozit malzemeden tasarlanmaktadır. Uçak kanatlarından antenlere kadar birçok yapıda bu malzemeler kullanılmaktadır. Bu yapıların da mukavemet değerlerinin uçağın dayanımı açısından önemli bir yeri bulunmamaktadır.

Kompozit yapılarda istenilen mukavemet değerlerine ulaşmak, geleneksel malzemelere göre daha kolaydır. Katman dizilimi, katman yönlenmesi ve malzeme seçimi gibi kendi doğasından kaynaklı bu esneklik bu durumu sağlamaktadır.

Bıçak antenler uçaklarda elektriksel komponentleri içerisinde barındıran gövde üzerinden bulunan yapılardır. Bu parçalar, uçağın tüm uçuşu boyunca kritik yüklere maruz kalmaktadır. Bu yüklere dayanabilecek bir yapı oluşturmak kritik önem arz etmektedir. Bıçak antenin tüm bileşenleri Şekil 5.1' de gösterilmiştir.



Şekil 5.1: Bıçak Anten.

6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), konut, ulaşım, iletişim gibi çeşitli alanlarda gelişmiş mühendislik sistemlerinin modellenmesi ve simülasyonunda vazgeçilmez bir teknoloji haline geldi. Gelişmiş bir mühendislik sistemi oluştururken, mühendisler ve tasarımcılar karmaşık bir modelleme, simülasyon, görselleştirme, analiz, tasarım, prototip oluşturma, test ve son olarak fabrikasyon sürecinden geçer. Çoğu zaman, nihai ürün veya sistemin fabrikasyonundan önce çok fazla iş yapılır. Bu, bitmiş ürünün işlenebilirliğinin yanı sıra üretim sürecinde maliyet etkinliğini sağlamak içindir.

Genellikle doğası gereği yinelemelidir, yani bazı prosedürlerin, inşa edilecek sistem için en düşük maliyetle optimum performans elde etmek için mevcut aşamada elde edilen sonuçlara dayalı olarak tekrarlandığı anlamına gelir. Bu nedenle, hızlı ve etkili bir şekilde modelleme ve simülasyonla ilgili teknikler giderek daha önemli bir rol oynar ve SEY, bir sistemin veya ürünün herhangi bir büyük geliştirilmesinde çok standart bir araç haline gelir (Liu ve Quek, 2013).

Sonlu elemanlar yöntemi analizi yapılacak yapının eleman olarak adlandırılan küçük parçalara ayrılmasıdır. Bu parçalar düğüm noktası olarak adlandırılan noktalar ile bağlanmaktadır. Yöntem termal, akışkan ve gerilme analizleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Weck ve Kim, 2004). Bu yöntem için kullanılan temel denklemin matris formu denklem (6.1)' de paylaşılmıştır.

$$[K]\{U\} = [F] \tag{6.1}$$

Denklem (6.1) içerisinde belirtilen 'K' bilinen katılık matrisi, 'U' bilinmeyen değerler, 'F' ise bilinen yük vektörüdür.

(Nilsson, 2015) ve arkadaşları kontrol valfi şok sönümlemesi çalışmasında akış boyunca kontrol kapaklarında akış kaynaklı oluşan gerilmeleri ve deformasyonları incelemişlerdir. Bu inceleme esnasında hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak kontrol valfinin içerisinden geçen doğrusal akış modellenmiştir. Valfin açılıp kapanmasını modellemek için iki-yönlü FSI kullanılmıştır. Valf açıldığında ve kapandığında oluşan akımlar zaman adımları ile birlikte yapısal analiz ile haberleşerek kuvvetleri aktarmaktadır. Bu kuvvetler sonucu oluşan gerilmeleri incelemişlerdir.

(Jhung, 2013) ve çalışma arkadaşları nükleer reaktörlerde reaktörü soğutmaya yarayan borulardan ana borunun sıcak su akışı sonucunda boru çeperinde akış kaynaklı gerilmelerin sebep olduğu ısı kaynaklı yorulmayı incelemişlerdir

(Ouadoud, Mouchtachi ve Boutammachte, 2011) ve çalışma arkadaşları rulman yataklarında çalışma süresince yağlamada kullanılan yağın yapıya etkisini incelemişlerdir.

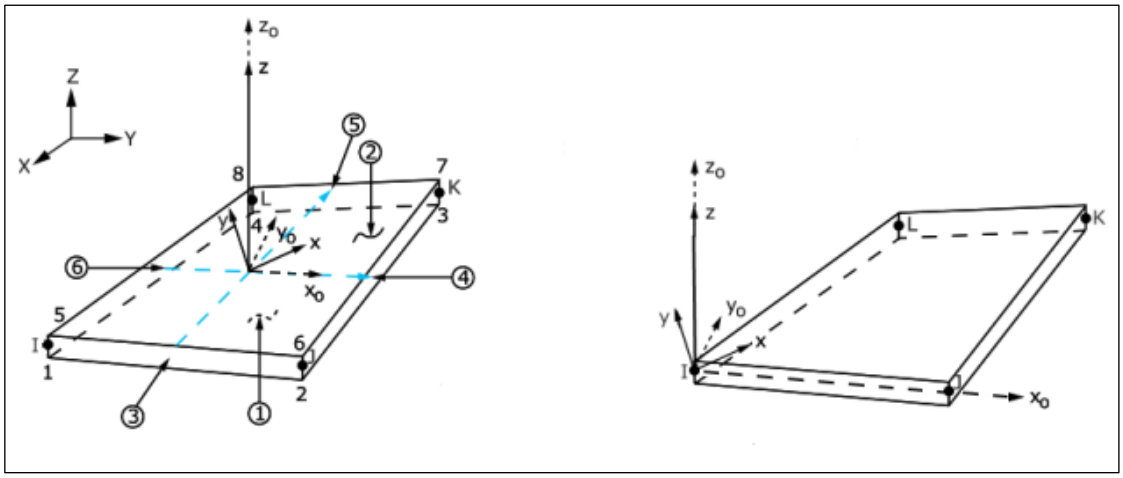
(Dursun, 2006) çalışmasında cıvata bağlantılı kompozit yapılarda cıvata bağlantı deliklerin etrafında oluşan gerilmeleri ve bu gerilmelerin yapıya etkilerini incelemişlerdir.

Bu yöntem bir önceki modelde gösterilmiş olan bıçak anten yapısı sonlu elemanlara ayrılmıştır. Bu modelin yapısı ilerleyen bölümlerde detaylı bir şekilde bahsedilecektir.

Bu çalışma içerisinde, sonlu elemanlar hesaplamasında Ansys 2020 R1, Ansys Mechanical, ACP Pre-processor yazılımları ve bu yazılımların modülleri kullanılmıştır.

Bu çalışma içerisinde kullanılan 2. dereceden kabuk elemanlar kullanılmıştır. Eleman dört düğüme sahip olup ve değişken kalınlığa müsaade edebilmektedir. Her düğüm altı adet serbestlik derecesine sahiptir. Bu elemanlar Ansys programında 'SHELL181' olarak tanımlanmaktadır.

Eleman formülasyonu, logaritmik gerinim ve gerçek stres ölçümlerine dayanmaktadır. Bu elemanın kinematiği, membran gerinimlerine izin vermektedir (ANSYS, 2020). Bu eleman tipi Şekil 6.1' de gösterilmiştir.



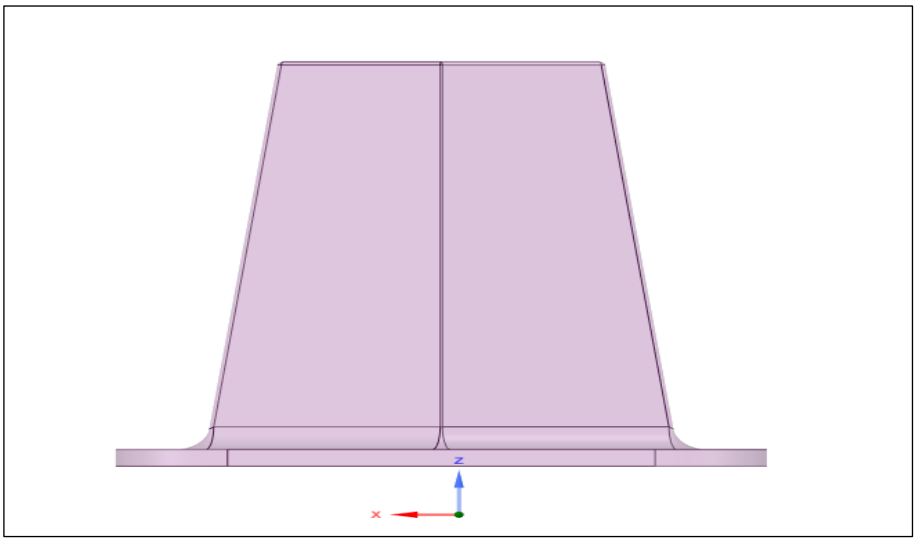
Şekil 6.1: İkinci Dereceden Kabuk Eleman (ANSYS, 2019).

6.1. Koordinat Sistemi

Havacılıkta kullanılan koordinat sistemi aşağıda tanımlanmıştır (MathWorks, 2021).

- X – Ekseni: İlerleme Ekseni
- Y – Ekseni: Yanal Eksen
- Z – Ekseni: Dikey Eksen

Bıçak anten yapısının koordinat sistemi Şekil 6.2' de gösterilmiştir.



Şekil 6.2: Koordinat Sistemi.

6.2. Malzeme Özellikleri

Analiz çalışmaları boyunca Ansys yazılımının kendi kütüphanesinde bulunan MTM46 162 GSM ve Epoxy Carbon Woven malzemeleri kullanılmıştır. Bu malzemelere ait özellikler Tablo 6.1 ve Tablo 6.2' de gösterilmiştir.

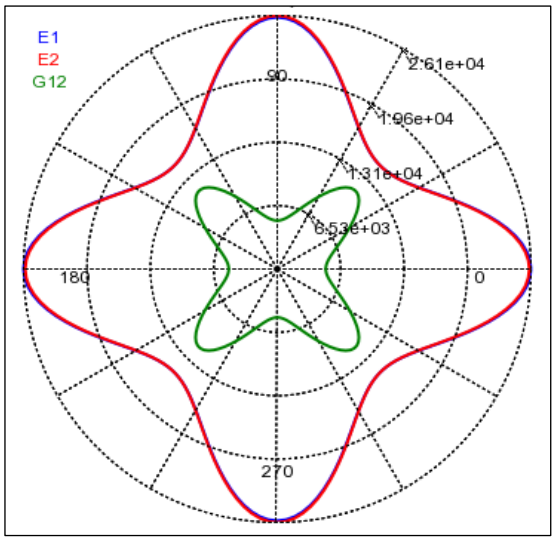
Tablo 6.1: MTM46 162 GSM Malzeme Özellikleri.

Özellik	Değer	Birim
Yoğunluk	$1{,}8 \times 10^{-9}$	$ton.mm^{-3}$
X Yönü Elastiklik Modulü	26290	MPa

Tablo 6.1: MTM46 162 GSM Malzeme Özellikleri ‘Devam’.

Y Yönü Elastiklik Modulü	25780	MPa
Z Yönü Elastiklik Modulü	25780	MPa
Poisson Oranı XY	0,14	-
Poisson Oranı YZ	0,1	-
Poisson Oranı XZ	0,1	-
Kayma Modulü XY	1993	MPa
Kayma Modulü YZ	4774	MPa
Kayma Modulü XZ	4782	MPa
X Yönü Çekme Gerilme Limiti	286	MPa
Y Yönü Çekme Gerilme Limiti	295	MPa
Z Yönü Çekme Gerilme Limiti	1	MPa
X Yönü Basma Gerilme Limiti	-286	MPa
Y Yönü Basma Gerilme Limiti	-295	MPa
Z Yönü Basma Gerilme Limiti	-1	MPa
XY Yönü Kayma Gerilme Limiti	54	MPa
YZ Yönü Kayma Gerilme Limiti	1	MPa
XZ Yönü Kayma Gerilme Limiti	1	MPa

MTM46 162 GSM malzemesinin x(E1),y(E2) ve xy(G12) yönlerindeki katılık dağılım özellikleri Şekil 6.3’ te gösterilmiştir.



Şekil 6.3: MTM46 162 GSM Polar Özellik.

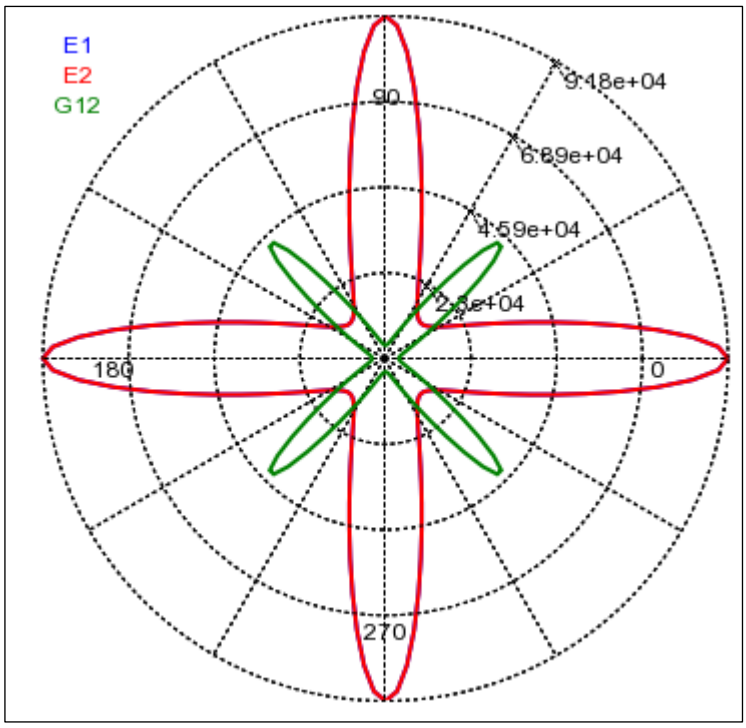
Tablo 6.2: Epoxy Carbon Woven Malzeme Özellikleri.

Özellik	Değer	Birim
Yoğunluk	$1{,}48 \times 10^{-9}$	ton.mm^-3

Tablo 6.2: Epoxy Carbon Woven Malzeme Özellikleri ‘Devam’.

X Yönü Elastiklik Modulü	91820	MPa
Y Yönü Elastiklik Modulü	91820	MPa
Z Yönü Elastiklik Modulü	9000	MPa
Poisson Oranı XY	0,05	-
Poisson Oranı YZ	0,3	-
Poisson Oranı XZ	0,3	-
Kayma Modulü XY	3600	MPa
Kayma Modulü YZ	3000	MPa
Kayma Modulü XZ	3000	MPa
X Yönü Çekme Gerilme Limiti	829	MPa
Y Yönü Çekme Gerilme Limiti	829	MPa
Z Yönü Çekme Gerilme Limiti	50	MPa
X Yönü Basma Gerilme Limiti	-439	MPa
Y Yönü Basma Gerilme Limiti	-439	MPa
Z Yönü Basma Gerilme Limiti	-140	MPa
XY Yönü Kayma Gerilme Limiti	120	MPa
YZ Yönü Kayma Gerilme Limiti	50	MPa
XZ Yönü Kayma Gerilme Limiti	50	MPa

Epoxy Carbon Woven malzemesinin x(E1),y(E2) ve xy(G12) yönlerindeki katılık dağılım özellikleri Şekil 6.4’ te gösterilmiştir.



Şekil 6.4: Epoxy Carbon Woven Polar Özellikleri.

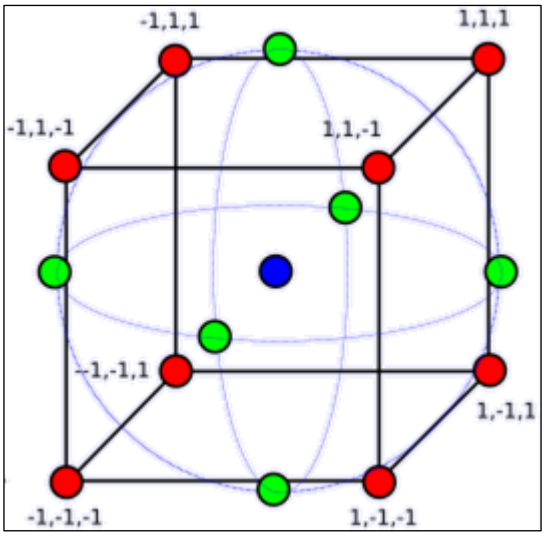
6.3. Parametreler ve Seviyeleri

En uygun tasarıma ulaşmak için kullanılacak birçok parametre ve bu parametrelerin seviyelerinin oluşturulmasında birçok yöntem bulunmaktadır. Bu çalışma içerisinde merkezcil kompozit tasarım tercih edilmiştir. Bu yönteme göre parametreleri belirlenmiş olan en alt ve en üst noktaları temel alınarak bir küp oluşturulur. Bu küp içerisinde kalan bölge taranır ve bu bölge içerisinde kalan seviyeler hesaplamaya katılır. Bu çalışmada kullanılan parametreler ve onların en alt ve en üst sınırları aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 6.3: Parametreler ve Seviyeleri.

Parametreler	Alt Sınır	Üst Sınır
Kalınlık	0.13 mm	0.25 mm
Malzeme	E.Karbon	MTM46
Katman 1 Açı	0°	90°
Katman 2 Açı	0°	90°
Katman 3 Açı	0°	90°
Katman 4 Açı	0°	90°

Merkezcil kompozit tasarım küp yapısı Şekil 6.5' te gösterilmiştir. Bu şekilde '-1' alt sınırı ve '1' üst sınırı temsil etmektedir. Ayrıca bu şekil 3 parametreli bir problemin seviyesini temsil etmektedir.



Şekil 6.5: Merkezcil Kompozit Tasarım (Develve, 2020).

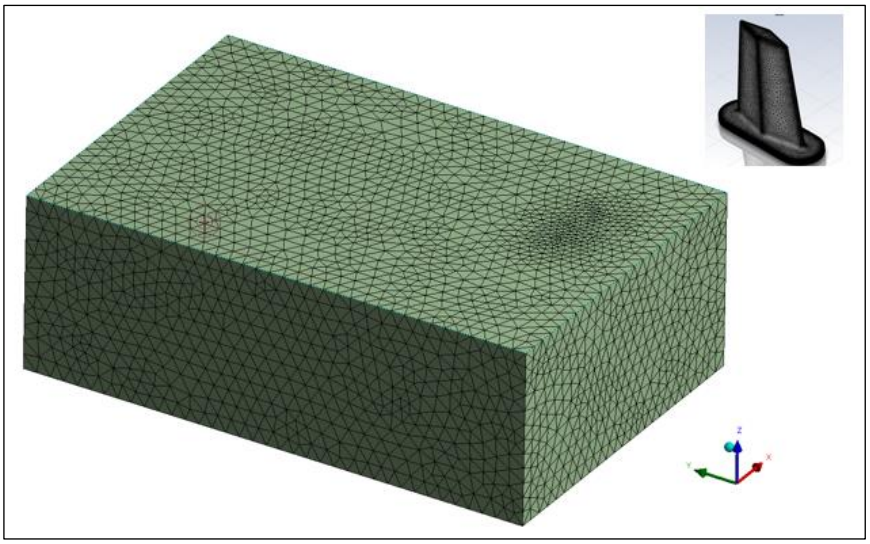
6.4. Ağ Ayarları

Bıçak antenin ağ model yapısında 2. dereceden 1 mm kabuk elemanlar kullanılmıştır.

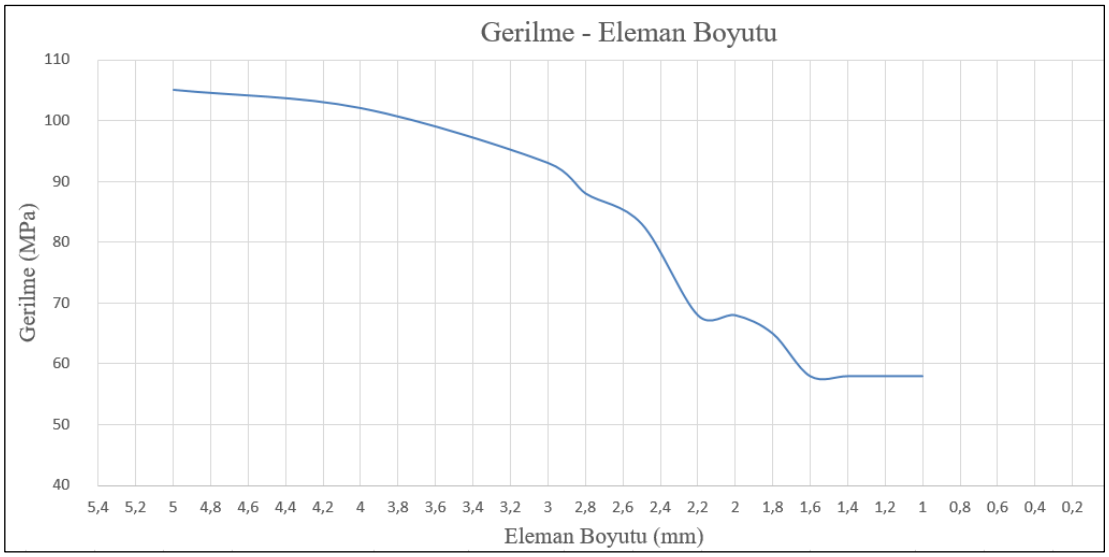
Şekil 6.8' de yapı üzerinde kullanılmış olan eleman boyutları ile gerilme ilişkisi gösterilmektedir. Bu modelde 29656 eleman ve 54826 nokta kullanılmıştır. Bu ağ modele ait görseller Şekil 6.6' da gösterilmiştir.

Akış analizleri için oluşturulmuş hacimde 1.dereceden 12 mm, üçgen, 3D elemanlar kullanılmıştır. Katı ağ yapısı ile bilgi transferinin maksimum seviyede doğruluğu sağlaması için antenin duvarların yakınından başlayarak 1:12 oranında artan bir şekilde eleman boyutu artacak şekilde bir oran kullanılmıştır. Bu hacim 56462 eleman 66226 nokta kullanılmıştır. Bu ağ modele ait görseller Şekil 6.7' de gösterilmiştir.

Şekil 6.6: Bıçak Anten Ağ Yapısı.



Şekil 6.7: Akış Hacim Ağ Yapısı.



Şekil 6.8: Sonlu-Elemanlar Yakınsama Analizi.

Şekil 6.8 modelde kullanılan eleman boyutuna göre gerilme değişimini açıklamaktadır. Burada gerilme değişiminin en fazla olduğu bölge göz önünde bulundurularak eleman boyutu kademeli olarak düşürülmüştür. Gerilmelerin artık değişmediği eleman sayısına göre analizler gerçekleştirilmiştir.

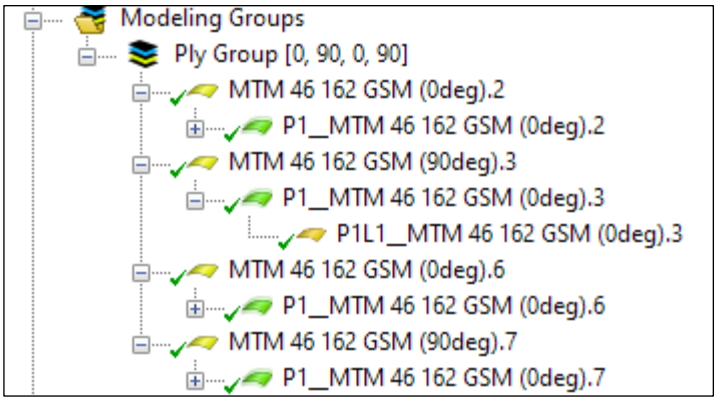
6.5. Kompozit Modelleme

Bıçak anten yapısı başlangıç olarak MTM 46 GSM malzeme ile birlikte 4 katmanlı bir kompozit olarak modellenmiştir. Bu modelin katman kalınlığı ise 0.15 mm olarak tanımlanmıştır. Bu modelleme yönteminde, programın kompozit yapısının katılık ve ağırlık matrislerini düzgün hesaplayabilmesi adına 4 katmanın 2 tanesini katman yüzey normalinin tersine kalan diğer 2 tanesi katman yüzeyinin normali yönünde konumlandırılmıştır.

Üretim yöntemi ise şekil zorluğundan kaynaklı el yatırma olarak tasarlanmıştır. Optimizasyon çalışması boyunca katman açıları, malzemesi ve kalınlığı önceki bölümlerde bahsedilmiş olan yöntemleri temel alınarak program tarafından değiştirilmiştir. Bu modelleme yöntemine katman açıları ve onlara ait görsel Şekil 6.9' da gösterilmiştir (ANSYS, 2020).

- 1. Katman açısı 0°
- 2.Katman açısı 45°

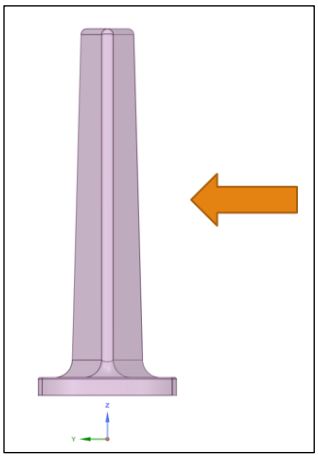
- 3. Katman açısı 90°
- 4. Katman açısı 90°



Şekil 6.9: Kompozit Modelleme Ağacı.

6.6. Yük Durumları

Uçak yapılarına uçuş süreci boyunca çeşitli yükler etki etmektedir. Bu yükler altındaki en kritik olanları uçakların pistten kalktığı andan sürüklenme anına kadar olan kalkış tırmanması boyunca oluşan yüklerdir. Bu süreç boyunca bıçak antenlerin üzerine yanal eksende, ivmelenme kuvveti ile birlikte gelen rüzgâr kuvvetleri yapı için tehlikeli olmaktadır. Bu rüzgâr kuvvetleri 3 m/sn ile 8 m/sn arasında değişmektedir. Bu kuvvetler Şekil 6.10' da gösterilmiştir.



Şekil 6.10: Bıçak Anten Kuvvet Yönü.

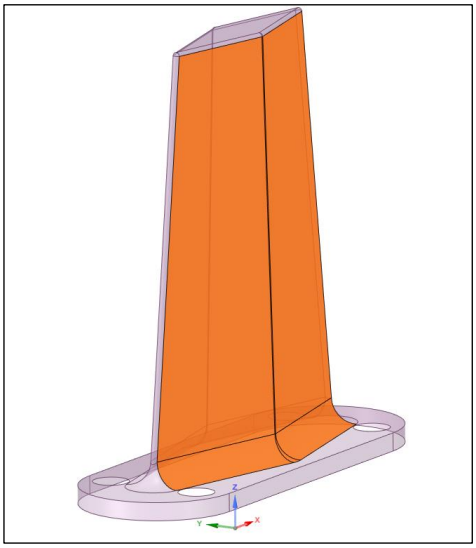
6.7. Optimizasyon Amacı

Çalışma içerisinde tasarımcının kendi amaçlarına göre optimizasyon sonucunda farklı parametrelere sahip tasarımlar önerilir. Bu çalışma içerisinde kompozit hata oranı (IRF) değeri için 0,3 ve 0,5 değerleri arasında sonuçları vermesini ve bu değerler için gerilmenin minimum olması istenmiştir (Brown, 1980).

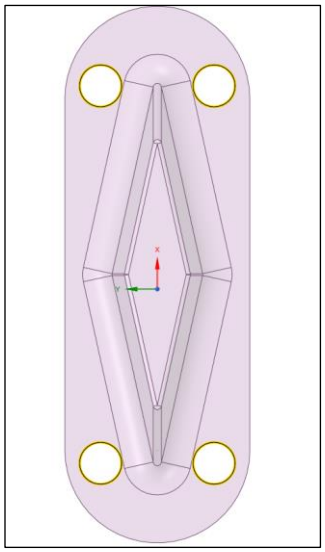
Bu IRF değerleri tasarımcının 3 kat güvenlik faktörünü tercih ettiğini göstermektedir.

6.8. Sınır Şartları

Bıçak anten analizlerinde gerçek durumları uygulayabilmek adına yapı üzerinde bulunan 4 delikten tüm serbestlik derecelerinde tam ankastre sınır şartı UX=UY=UZ=0 ve ROTX=ROTY=ROTZ=0 uygulanmıştır (Şekil 6.12).Yük olarak ise Şekil 6.11' de gösterilen yüzey üzerinden 8 m/sn hızında doğrusal rüzgâr kuvveti uygulanmıştır.



Şekil 6.11: Kuvvet Uygulama Yüzeyi.



Şekil 6.12: Anten Sabitleme Delikleri.

6.9. Hasar Kriteri

Kompozit malzemelerin dayanım hesaplamalarını gerçekleştirmek için bu zamana kadar birçok yöntem geliştirilmiştir. Tsai ve Wu'nun geliştirmiş olduğu Tsai-Wu hasar kriteri bunlardan biridir (Groenwold ve Haftka, 2006).

Bu yöntem (6.2) denkleminde aşağıda verilmiştir.

$$H_1\sigma_1 + H_2\sigma_2 + H_6\,\tau_{12} + H_{11}\sigma_1^2 + H_{22}\sigma_2^2 + H_{66}\tau_{12}^2 + 2H_{12}\sigma_1\sigma_2 < 1 \tag{6.2}$$

Burada,

$$H_1 = \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_1^C)_{ult}} \tag{6.3}$$

$$H_{11} = \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult}(\sigma_1^C)_{ult}}, \tag{6.4}$$

$$H_2 = \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_2^C)_{ult}} \tag{6.5}$$

$$H_{22} = \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult}(\sigma_2^C)_{ult}} \tag{6.6}$$

$$H_6 = 0, \tag{6.7}$$

$$H_{66} = \frac{1}{(\tau_{12})_{ult}^2}, \tag{6.8}$$

$$H_{12} = \sqrt[\frac{-1}{2}]{\frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult}(\sigma_1^C)_{ult}(\sigma_2^T)_{ult}(\sigma_2^C)_{ult}}} \tag{6.9}$$

(6.2) numaralı denklemin 1 değerinden küçük olduğu durumlarda kompozitin hasar almadan çalışacağı görülmektedir.

7. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Optimizasyon sonucunda en iyi sonuca ulaşmak için kullanılan parametrelerin farklı kümelerinden oluşmuş 54 farklı analiz yapılmıştır. Bu analizler çözüm evreninin sınırlarını belirlemekte kullanılmıştır. Bu çalışma içerisinde elde edilen sonuçlar devam eden bölümlerde gösterilmektedir.

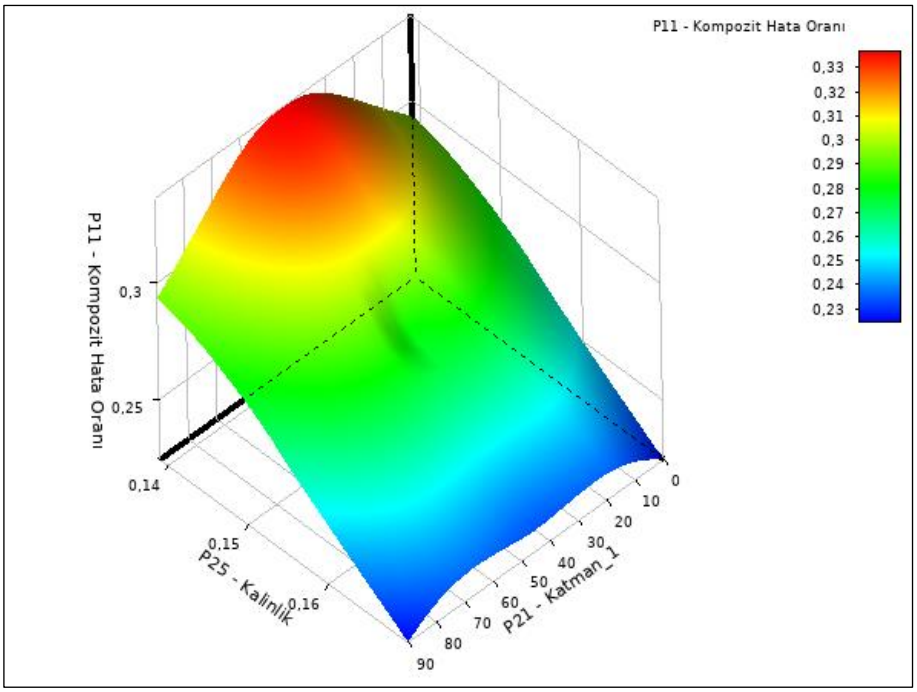
7.1. Cevap Yüzey Sonuçları

Kritik yükler altında bıçak antenin parametreler arasındaki ilişkinin kompozit hata oranına (IRF) ve maksimum gerilime etkisi bu bölüm içerisindeki görsellerde gösterilmiştir.

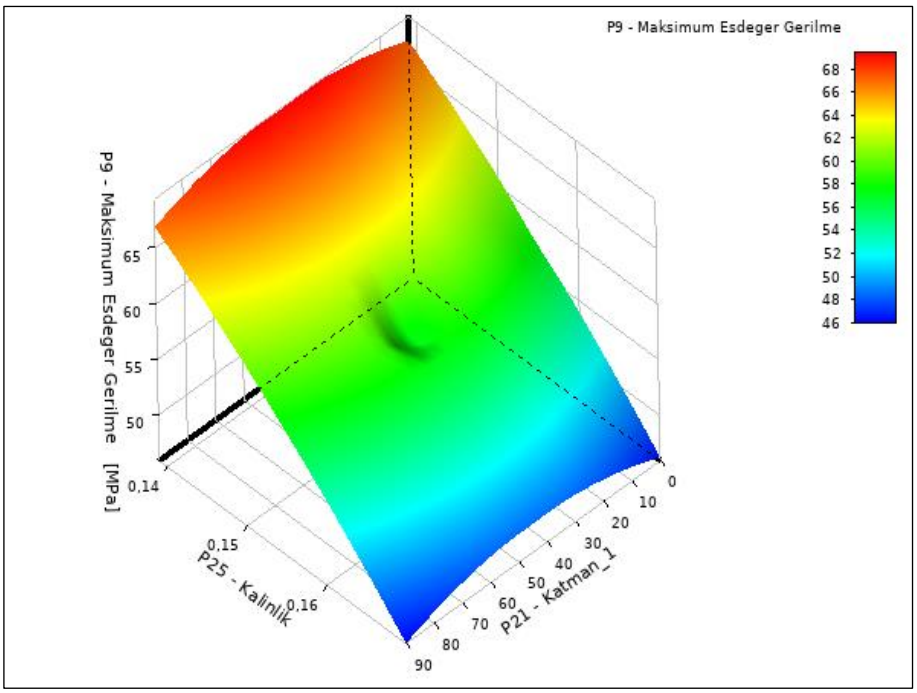
7.1.1. Katman Kalınlığı – Katman Açısı Sonuçları

Bu bölüm içerisinde katman kalınlığı – katman açısı ilişkisinin sonuçlara olan etkisi görülmektedir.

Katman kalınlığının ve 1. katman açısının sonuçlara etkisi Şekil 7.1 ve Şekil 7.2 içerisinde gösterilmiştir.



Şekil 7.1: Katman Kalınlığı ve 1. Katman Açısı Kompozit Hata Sonucu.

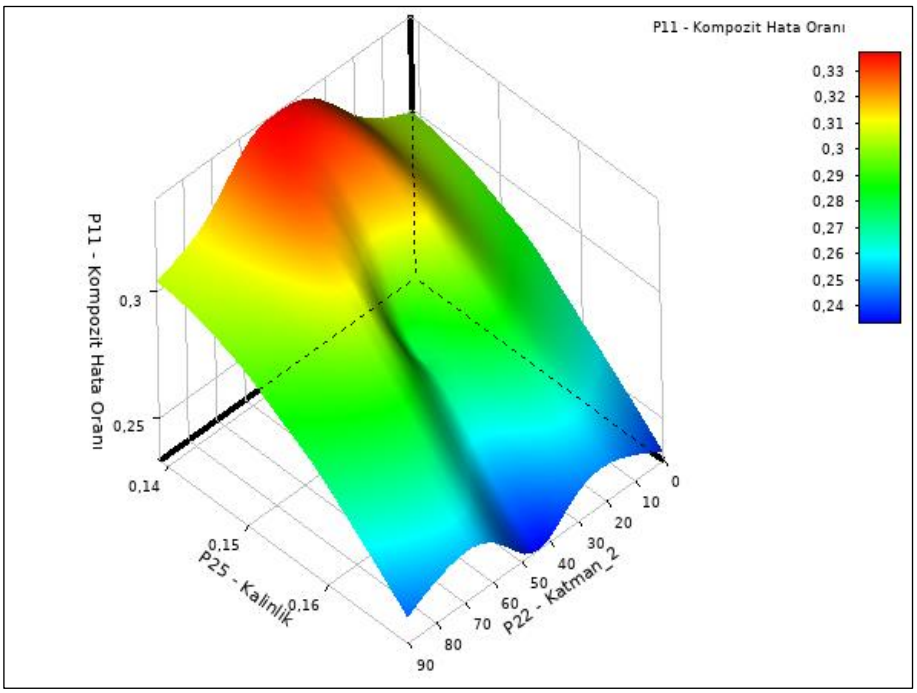


Şekil 7.2: Katman Kalınlığı ve 1. Katman Açısı Maksimum Gerilme Sonucu.

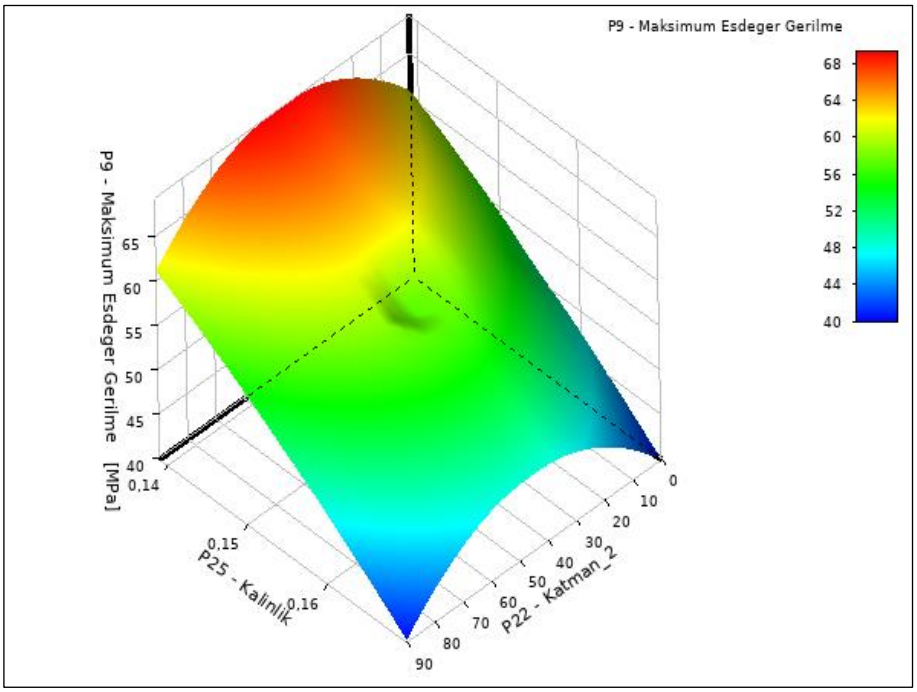
Katman 1 analiz sonuçları incelendiği zaman, kalınlık arttıkça sonuç ekseninde değerler azalmasına rağmen katman yönlenme açısı değişimine bu değerler tepki vermemektedir. Bu göstergeler katman kalınlığının katman yönlenme açısına göre

kompozit hata oranına (IRF) ve maksimum gerilme sonuçlarına daha çok etki ettiğini göstermektedir.

Katman kalınlığının ve 2. katman açısının sonuçlara etkisi Şekil 7.3 ve Şekil 7.4' te gösterilmiştir.



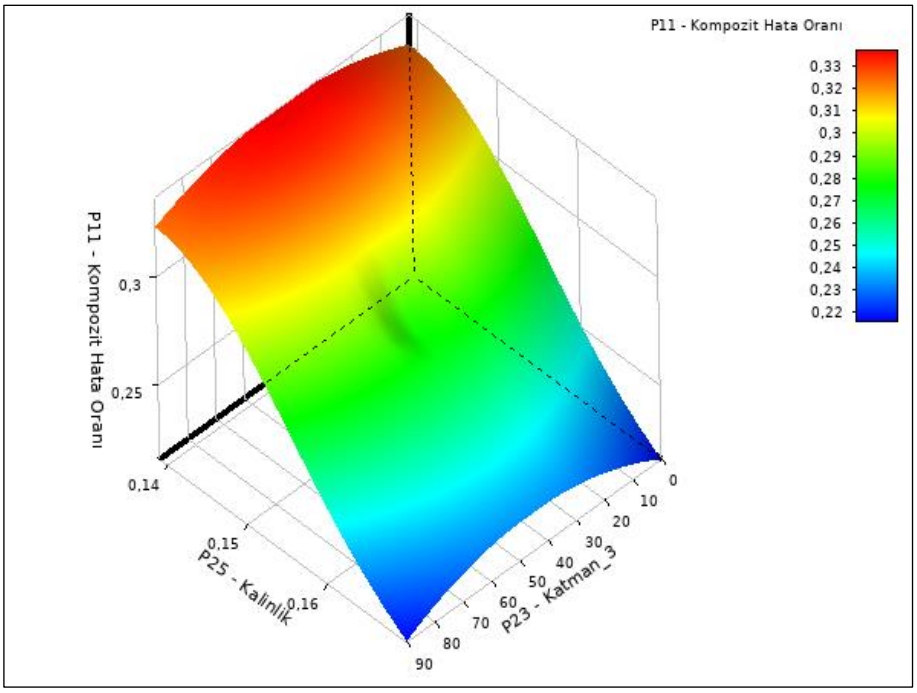
Şekil 7.3: Katman Kalınlığı ve 2. Katman Açısı Kompozit Hata Sonucu.



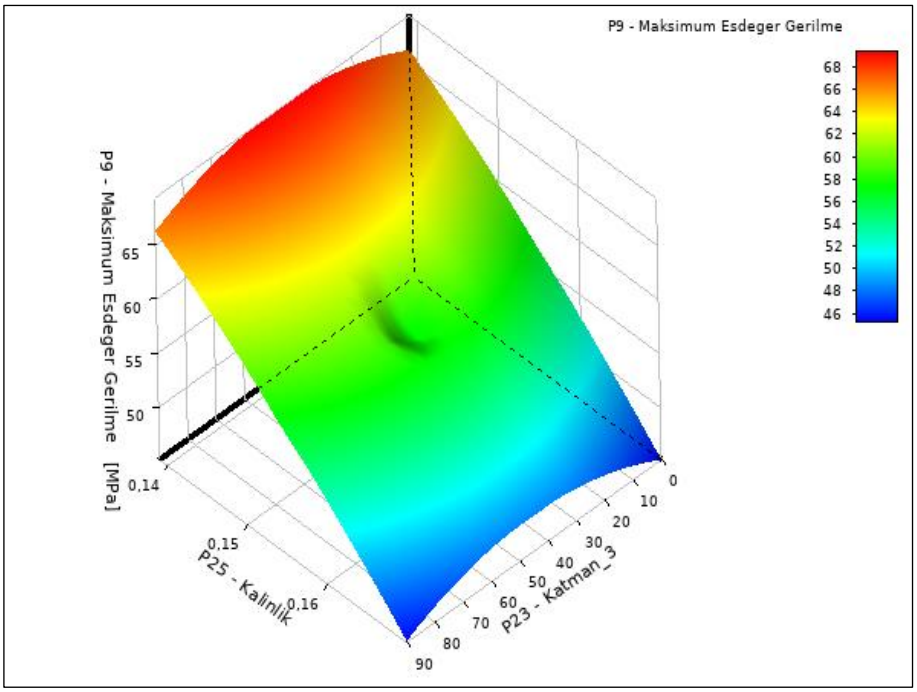
Şekil 7.4: Katman Kalınlığı ve 2. Katman Açısı Maksimum Gerilme Sonucu.

Katman 2 analiz sonuçları incelendiği zaman, kalınlık arttıkça sonuç ekseninde değerler azalmaktadır. Katman yönlenme açısı 40° ila 50° açılarına yaklaştıkça kompozit hata oranı (IRF) azalmaktadır. Bu göstergeler katman kalınlığının katman yönlenme açısına göre kompozit hata oranına (IRF) ve maksimum gerilme sonuçlarına daha çok etki etmesine rağmen 40° ila 50° açısı seçilmesi optimizasyon sonucuna göre önerilmektedir.

Katman kalınlığının ve 3. katman açısının sonuçlara etkisi Şekil 7.5 ve Şekil 7.6 içinde gösterilmiştir.



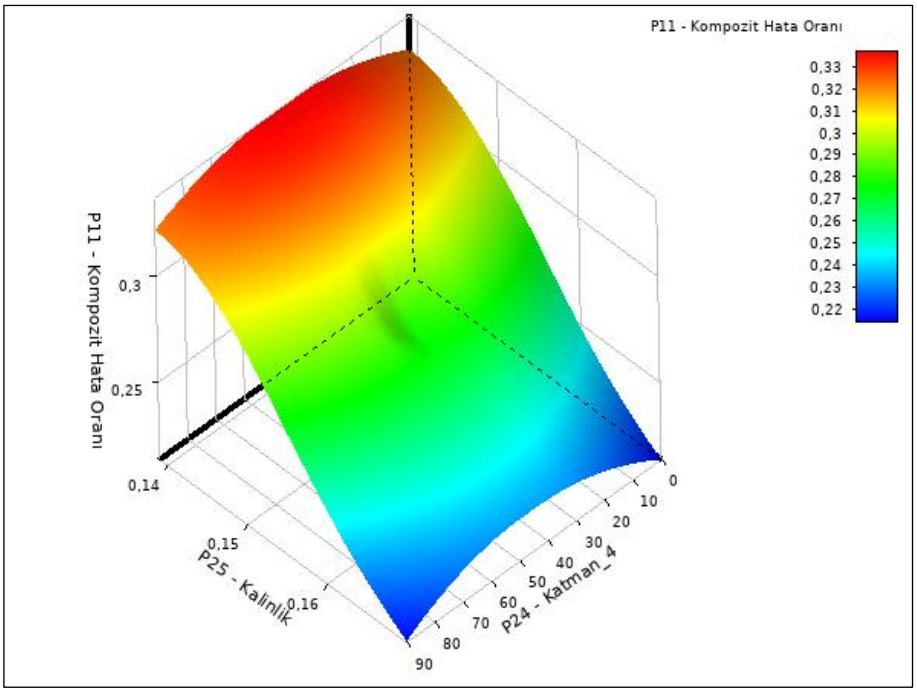
Şekil 7.5: Katman Kalınlığı ve 3. Katman Açısı Kompozit Hata Sonucu.



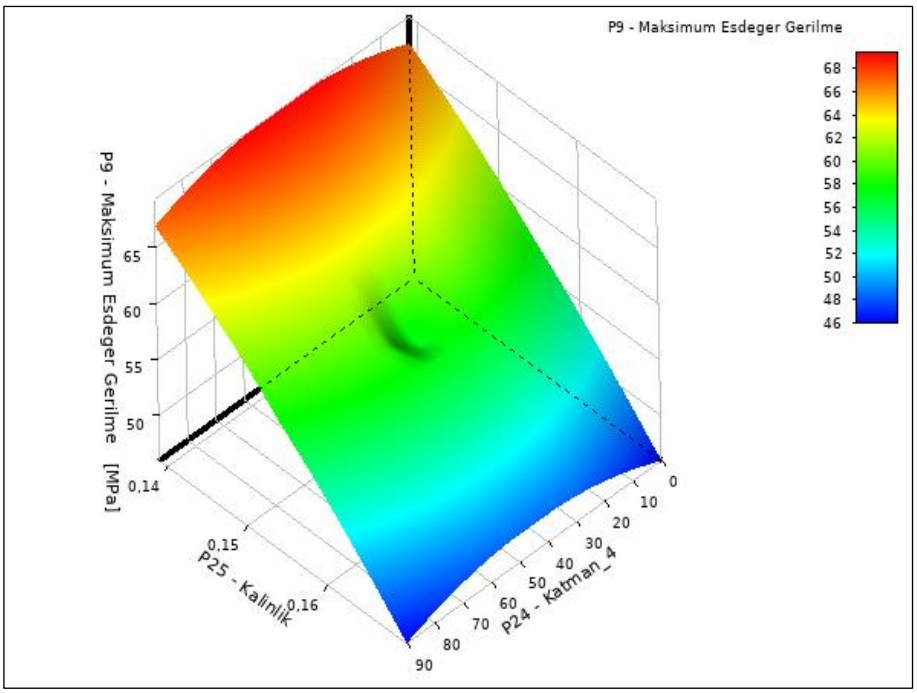
Şekil 7.6: Katman Kalınlığı ve 3. Katman Açısı Maksimum Gerilme Sonucu.

Katman 3 analiz sonuçları incelendiği zaman, kalınlık arttıkça sonuç ekseninde değerler azalmasına rağmen katman yönlenme açısı değişimine bu değerler tepki vermemektedir. Bu göstergeler katman kalınlığının katman yönlenme açısına göre kompozit hata oranına (IRF) ve maksimum gerilme sonuçlarına daha çok etki ettiğini göstermektedir.

Katman kalınlığının ve 4. katman açısının sonuçlara etkisi Şekil 7.7 ve Şekil 7.8 içerisinde gösterilmiştir.



Şekil 7.7: Katman Kalınlığı ve 4. Katman Açısı Kompozit Hata Sonucu.



Şekil 7.8: Katman Kalınlığı ve 4. Katman Açısı Maksimum Gerilme Sonucu.

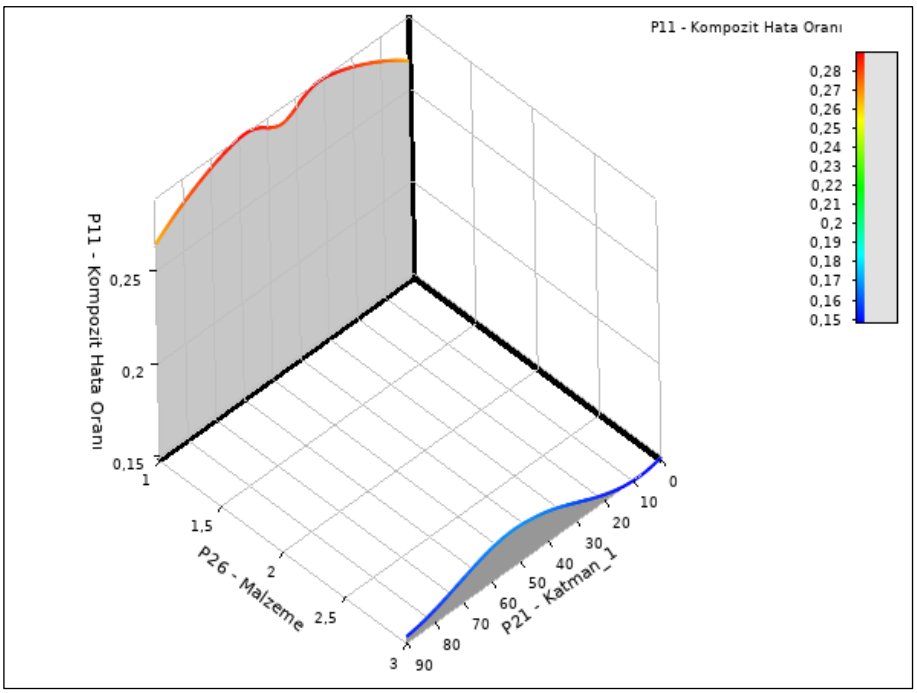
Katman 4 analiz sonuçları incelendiği zaman, kalınlık arttıkça sonuç ekseninde değerler azalmasına rağmen katman yönlenme açısı değişimine bu değerler tepki vermemektedir. Bu göstergeler katman 1, 2 ve 3 ile aynı olarak katman kalınlığının

katman yönlenme açısına göre kompozit hata oranına (IRF) ve maksimum gerilme sonuçlarına daha çok etki ettiğini göstermektedir.

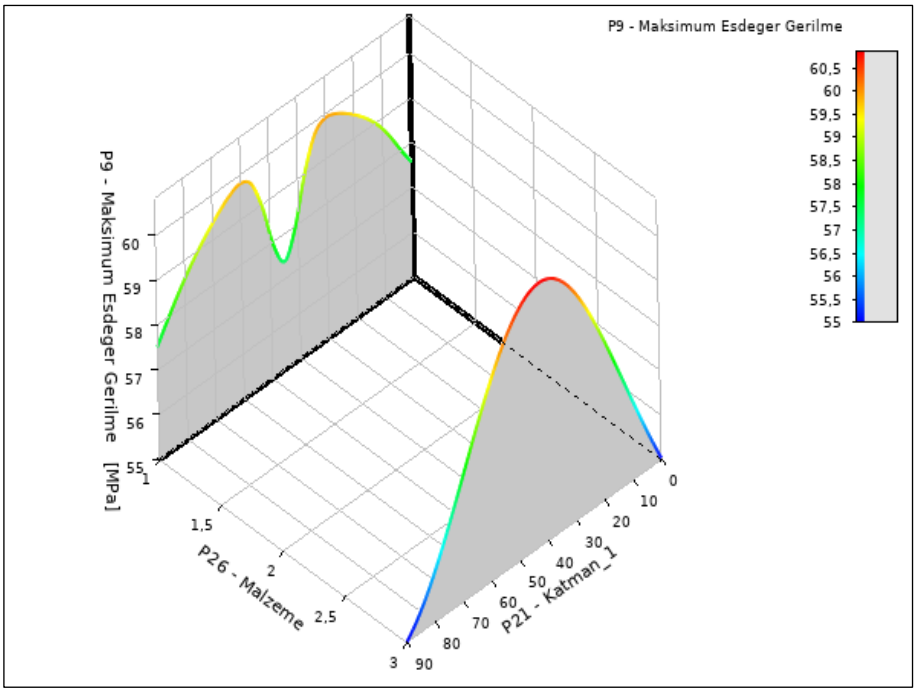
7.1.2. Malzeme – Katman Açısı Sonuçları

Bu bölüm içerisinde malzeme – katman açısı ilişkisinin sonuçlara olan etkisi görülmektedir.

Malzemelerin ve 1. katman açısının sonuçlara etkisi Şekil 7.9 ve Şekil 7.10 içerisinde gösterilmiştir.



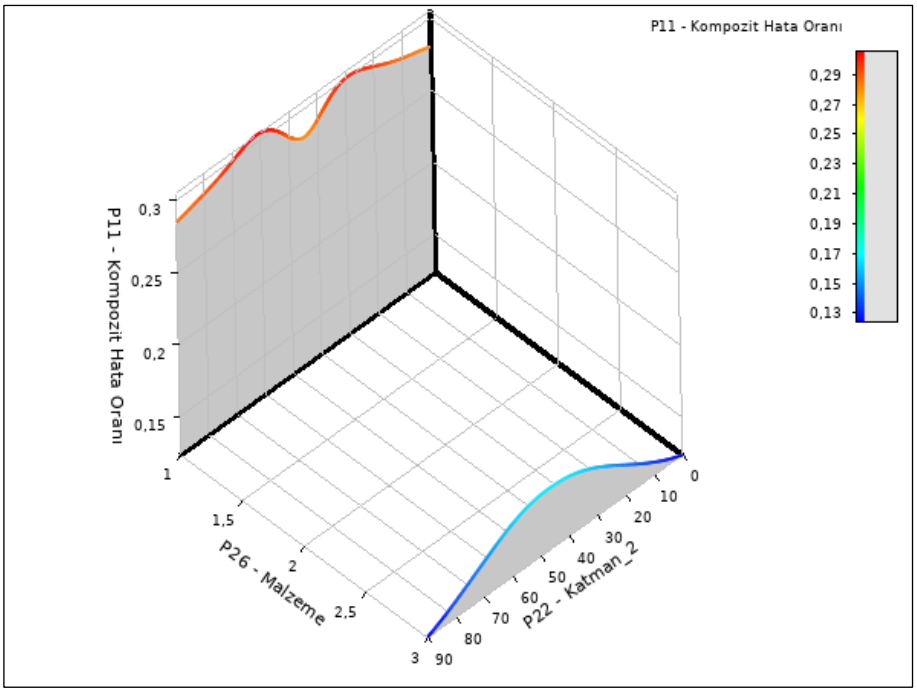
Şekil 7.9: Malzeme ve 1. Katman Açısı Kompozit Hata Sonucu.



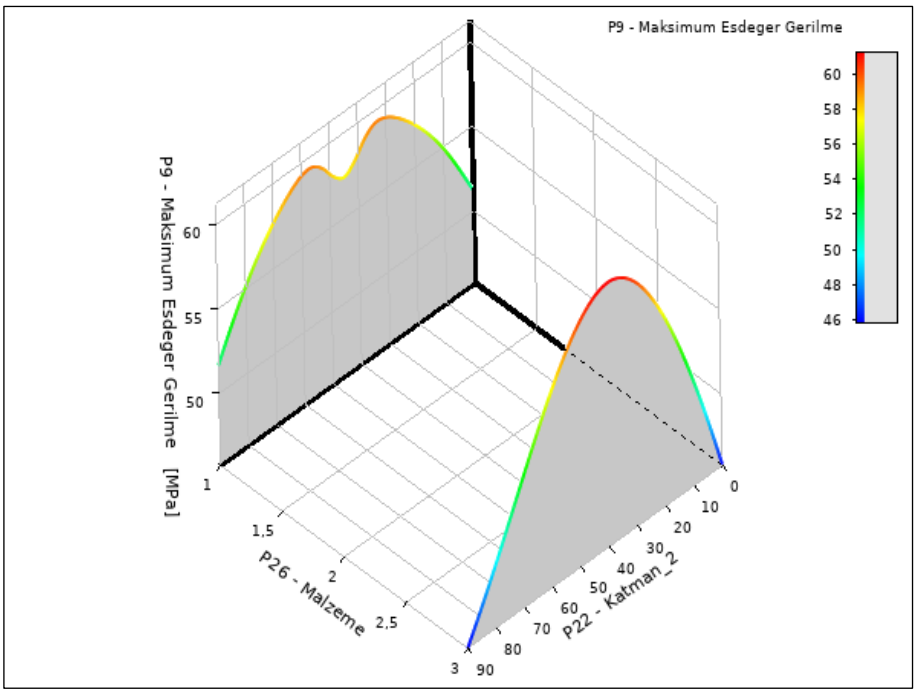
Şekil 7.10: Malzeme ve 1. Katman Açısı Maksimum Gerilme Sonucu.

Katman 1 analiz sonuçları incelendiği zaman, malzeme seçiminde 1 numaralı malzeme (MTM46 162 GSM) seçildiği takdirde 40° ile 50° katman yönlenme açılarında gerilme değerleri azalmaktadır. Üç numaralı malzeme (Epoxy Carbon Woven) seçildiğinde ise 0°-10° ve 70°-90° katman yönlenme açılarında gerilme değerleri azalmaktadır. Kompozit hata oranına göre incelendiği zaman malzeme 3' ün avantajlı olduğu görülmektedir.

Malzemelerin ve 2. katman açısının sonuçlara etkisi Şekil 7.11 ve Şekil 7.12 içerisinde gösterilmiştir.



Şekil 7.11: Malzeme ve 2. Katman Açısı Kompozit Hata Sonucu.

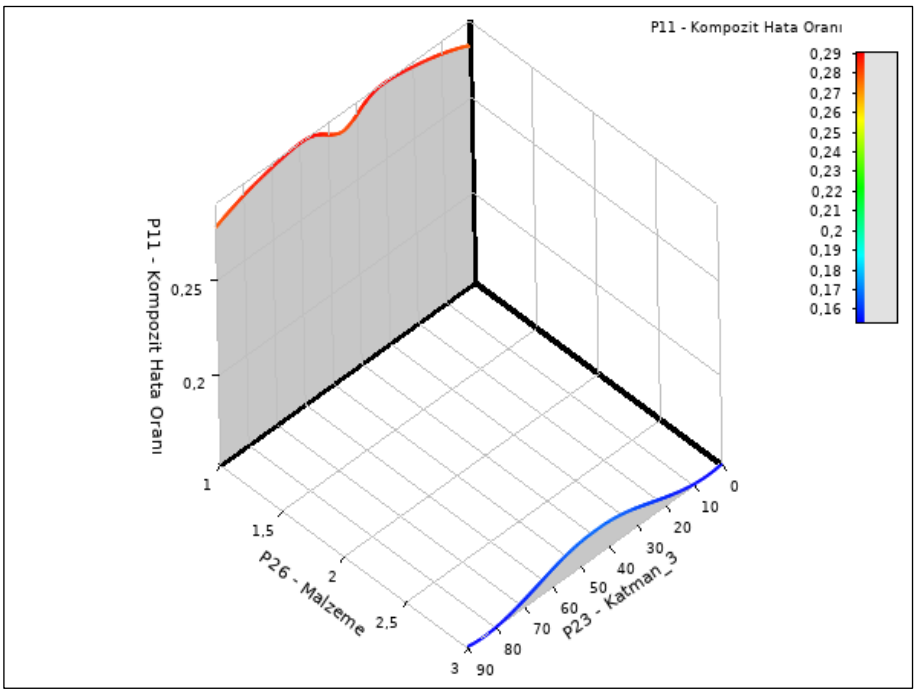


Şekil 7.12: Malzeme ve 2. Katman Açısı Maksimum Gerilme Sonucu.

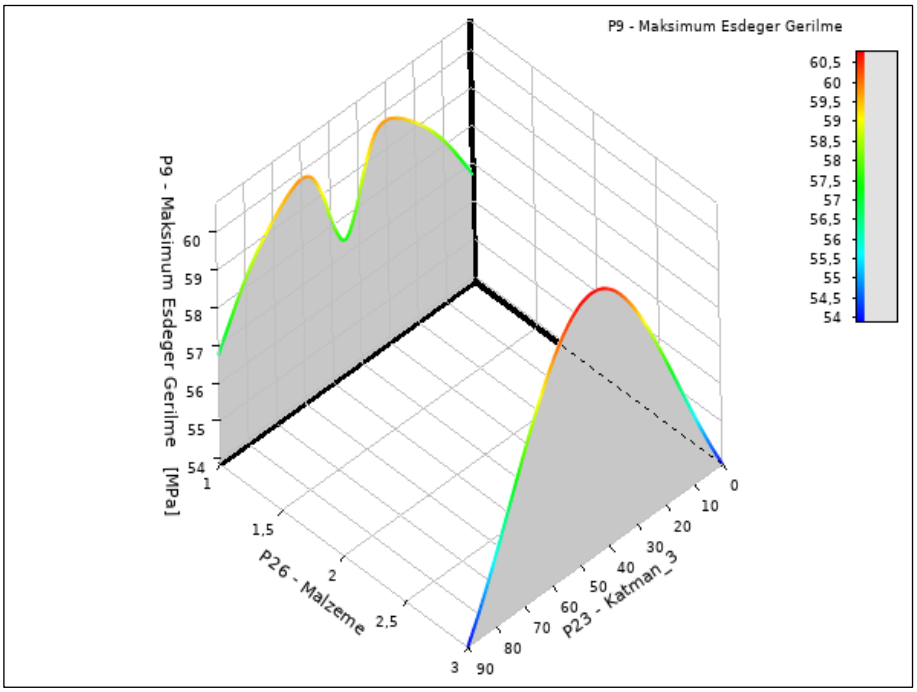
Katman 2 analiz sonuçları incelendiği zaman, malzeme seçiminde 1 numaralı malzeme (MTM46 162 GSM) seçildiği takdirde 40° ile 50° katman yönlenme açılarında gerilme değerleri azalmaktadır. Üç numaralı malzeme (Epoxy Carbon Woven) seçildiğinde ise 0°-10° ve 70°-90° katman yönlenme açılarında gerilme

değerleri azalmaktadır. Kompozit hata oranına (IRF) göre incelendiği zaman malzeme 3' ün avantajlı olduğu görülmektedir.

Malzemelerin ve 3. katman açısının sonuçlara etkisi Şekil 7.13 ve Şekil 7.14 içerisinde gösterilmiştir.



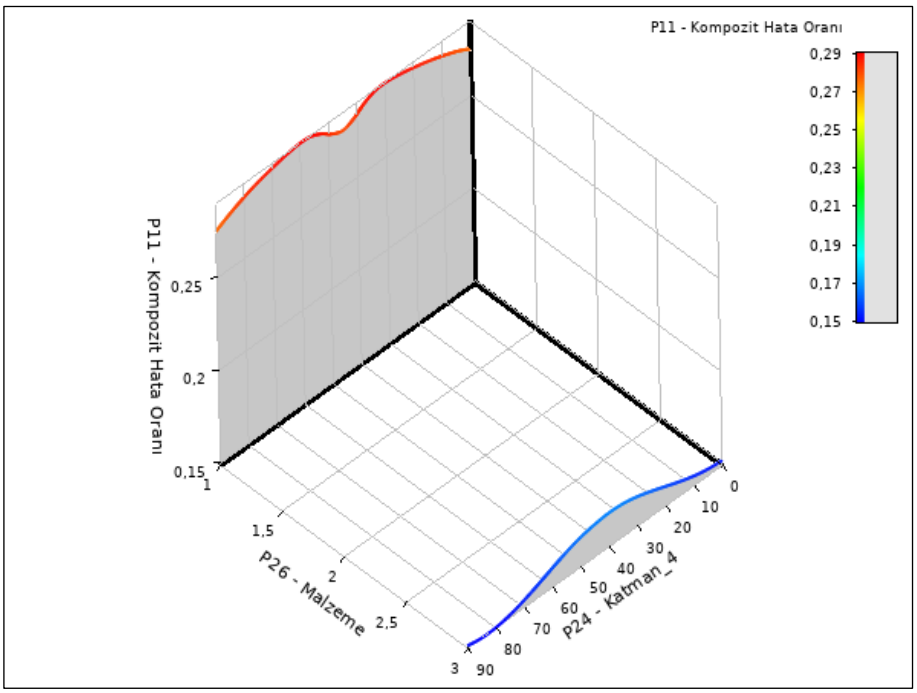
Şekil 7.13: Malzeme ve 3. Katman Açısı Kompozit Hata Sonucu.



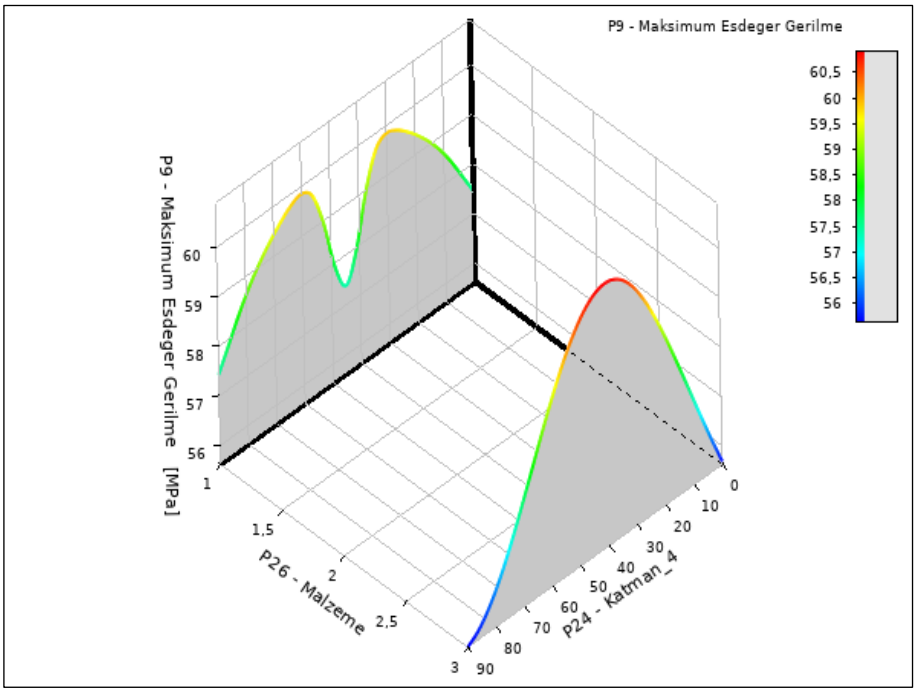
Şekil 7.14: Malzeme ve 3. Katman Açısı Maksimum Gerilme Sonucu.

Katman 3 incelendiği zaman bir önceki katman davranışları ile aynı davranışı sergilemektedir.

Malzemelerin ve 4. katman açısının sonuçlara etkisi Şekil 7.15 ve Şekil 7.16 içerisinde gösterilmiştir.



Şekil 7.15: Malzeme ve 4. Katman Açısı Kompozit Hata Sonucu.



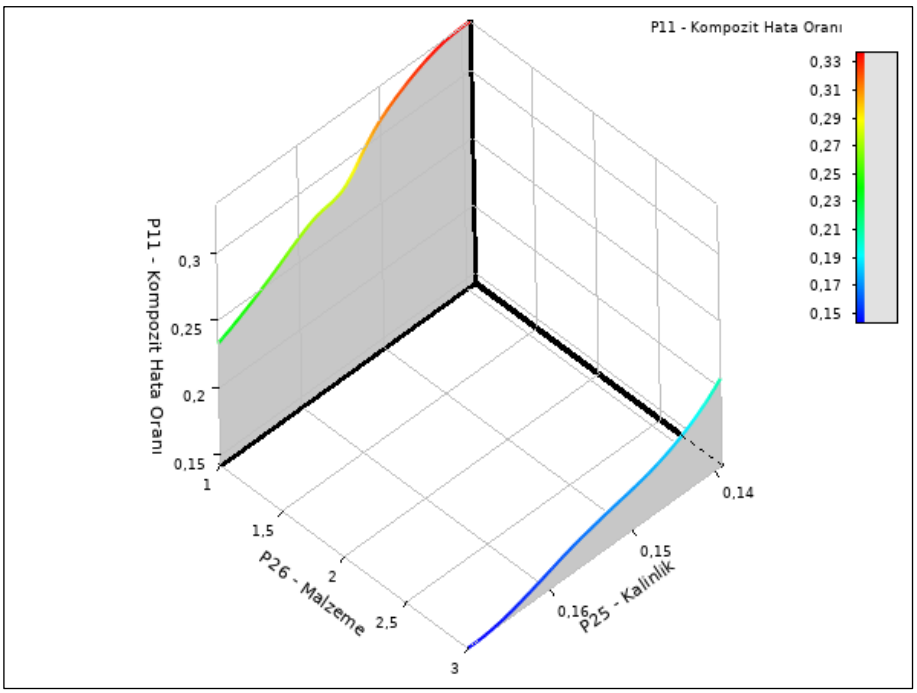
Şekil 7.16: Malzeme ve 4. Katman Açısı Maksimum Gerilme Sonucu.

Katman 3 incelendiği zaman bir önceki katman davranışları ile aynı davranışı sergilemektedir.

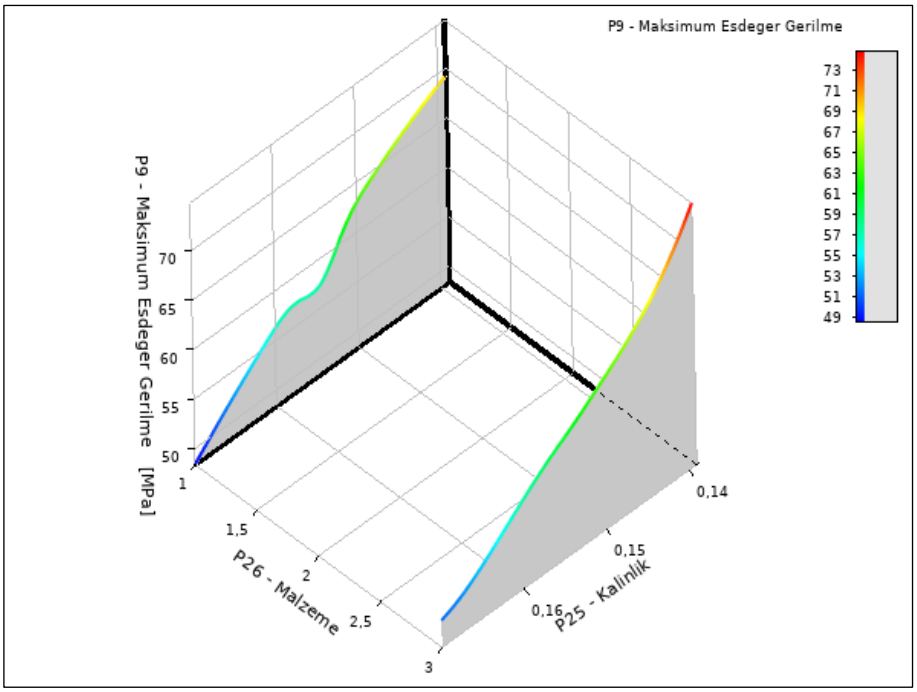
7.1.3. Malzeme – Katman Kalınlığı Sonuçları

Bu bölüm içerisinde malzeme – katman açısı ilişkisinin sonuçlara olan etkisi görülmektedir.

Malzemelerin ve 4. katman açısının sonuçlara etkisi Şekil 7.17 ve Şekil 7.18 içerisinde gösterilmiştir.



Şekil 7.17: Malzeme ve Katman Kalınlığı Kompozit Hata Sonucu.



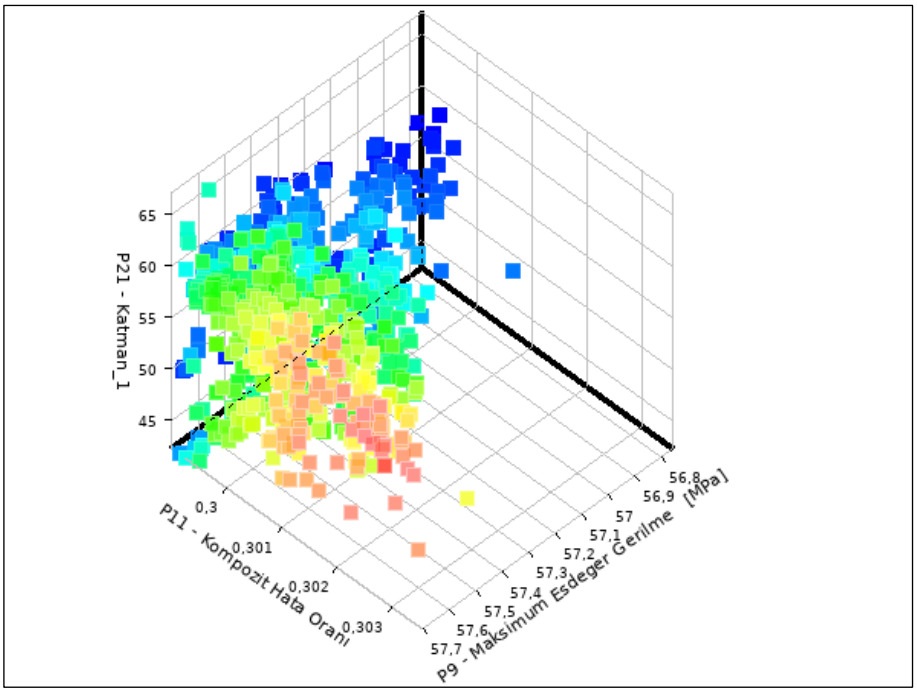
Şekil 7.18: Malzeme ve Katman Kalınlığı Maksimum Gerilme Sonucu.

Katman kalınlığı ve malzeme ilişkisi incelendiği zaman, malzeme 1'in seçildiği durumda katman kalınlığı arttıkça hem gerilme hem kompozit hata oranı (IRF) değerleri azalmaktadır. Malzeme 3'ün seçildiği durumda katman kalınlığı arttıkça hem gerilme hem kompozit hata oranı (IRF) hata değerleri azalmaktadır.

7.2. Optimizasyon Sonuçları

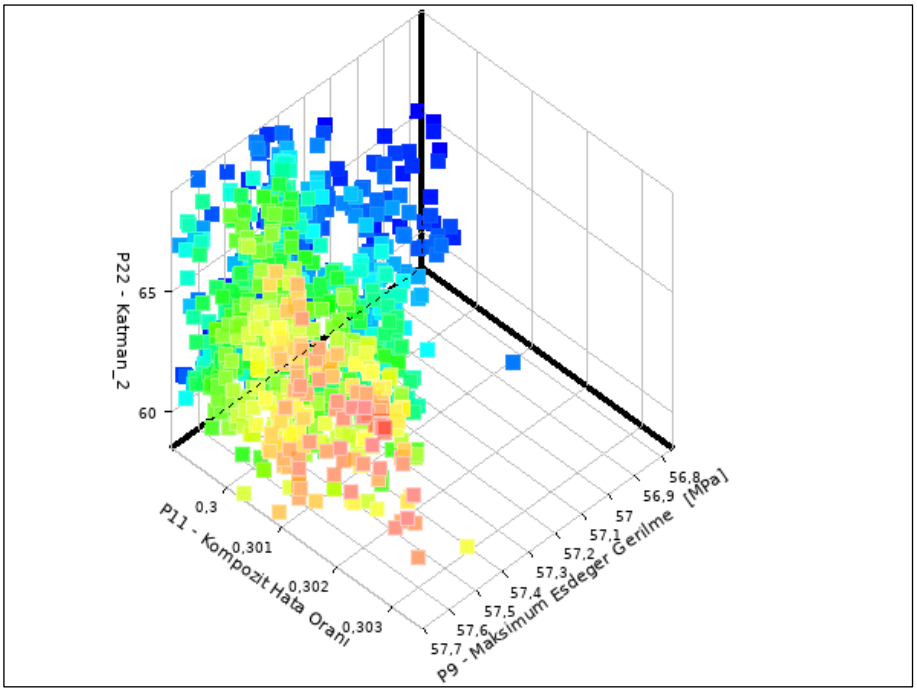
Her parametrenin çözüme etkisi belli oranda olmaktadır. Bu parametreler arasındaki ikili ilişkiler parametrelerin sonuç üzerindeki birlikte toplam değerlerini göstermektedir. Optimizasyon çalışması, bu özgül değerlerin istenilen sonuç üzerinde önceden belirlenmiş olan kısıtlar tarafından belirlenen çözüm alanı içerisinde amaç-fayda oranını gözeterek en uygun parametreleri sunmaktadır.

Tüm parametrelerin kompozit hata oranı ve maksimum gerilme sonuçları için amaç fayda oranı için önerilen uygun tasarım noktaları devam eden görsellerde gösterilmiştir.



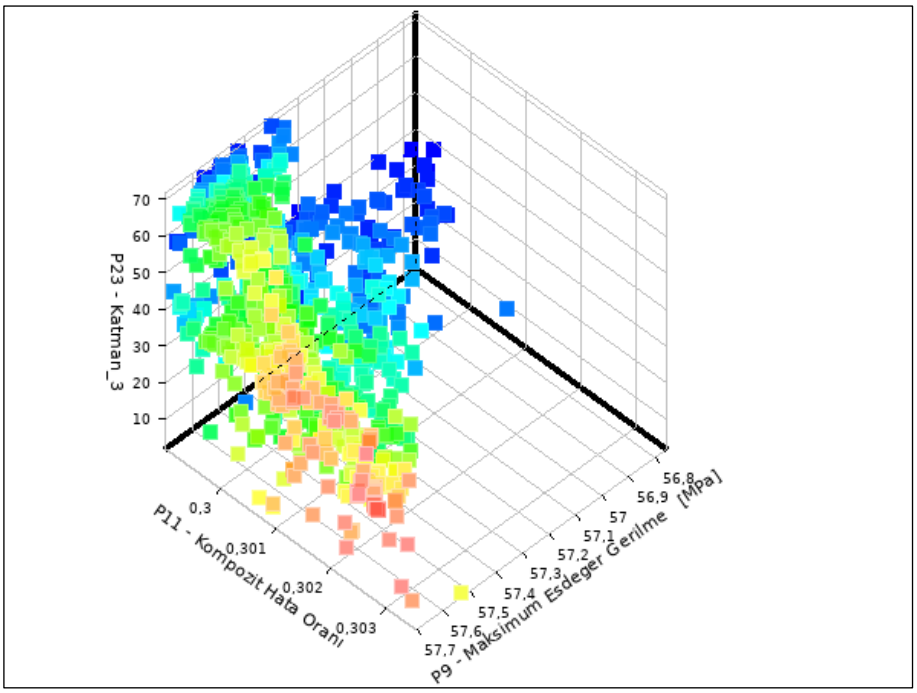
Şekil 7.19: Katman 1 Amaç-Fayda İlişkisi.

Katman 1 açısının amaç-fayda ilişkisi incelendiği zaman uygun olan tasarım noktalar (mavi nokta) 50° - 60° açıları arasında toplanmıştır.



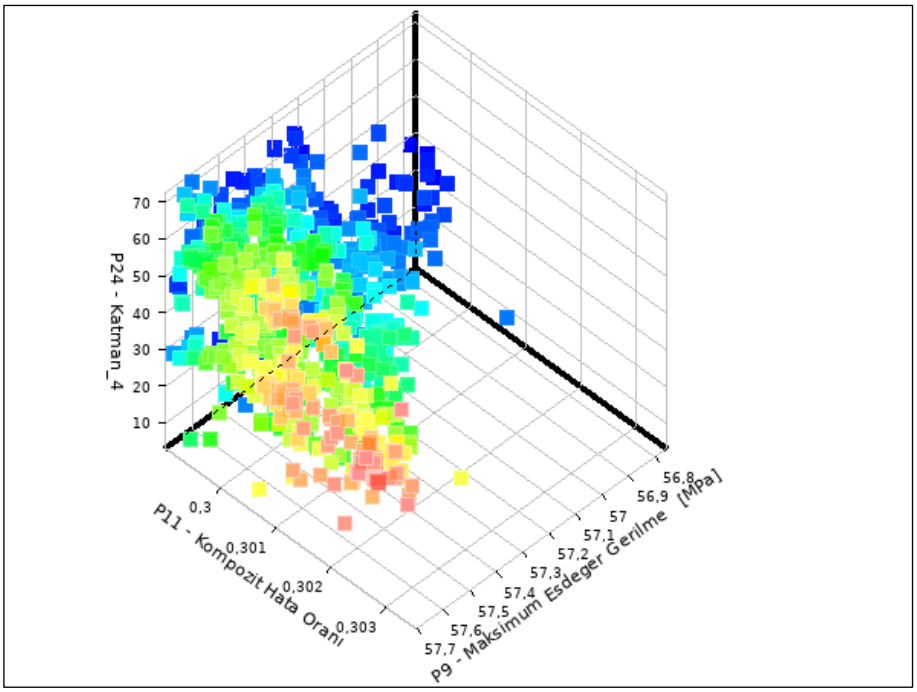
Şekil 7.20: Katman 2 Amaç-Fayda İlişkisi.

Katman 1 açısının amaç-fayda ilişkisi incelendiği zaman uygun olan tasarım noktalar (mavi nokta) 50° - 60° açıları arasında toplanmıştır.



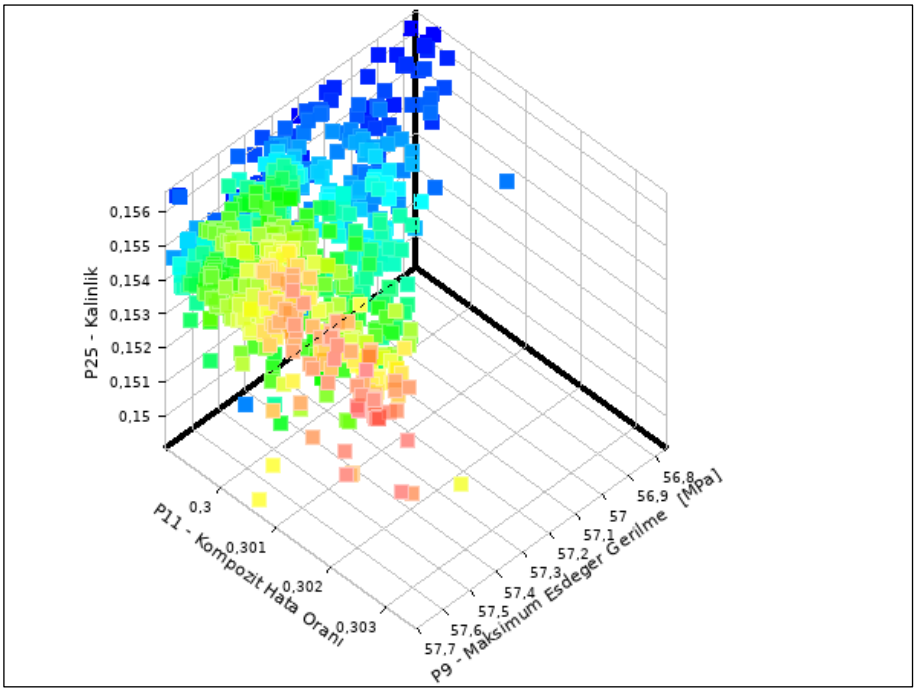
Şekil 7.21: Katman 3 Amaç-Fayda İlişkisi.

Katman 3 açısının amaç-fayda ilişkisi incelendiği zaman uygun olan tasarım noktalar (mavi nokta) 30° - 40° açıları arasında toplanmıştır.



Şekil 7.22: Katman 4 Amaç-Fayda İlişkisi.

Katman 4 açısının amaç-fayda ilişkisi incelendiği zaman uygun olan tasarım noktalar (mavi nokta) 30° - 40° açıları arasında toplanmıştır.



Şekil 7.23: Katman Kalınlığı Amaç-Fayda İlişkisi.

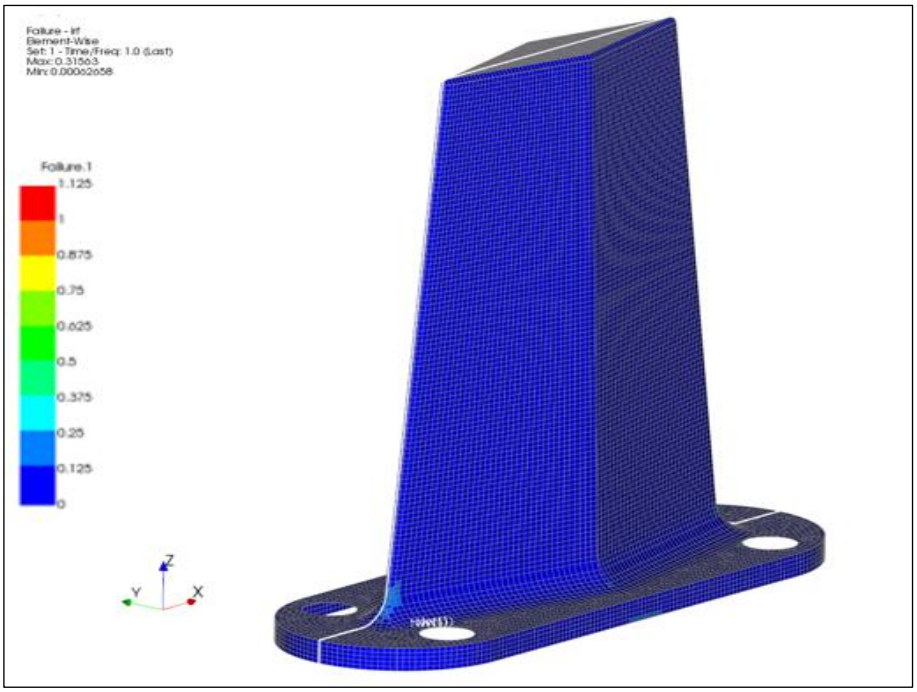
Katman kalınlığının amaç-fayda ilişkisi incelendiği zaman uygun olan tasarım noktalar (mavi nokta) 0.15 mm değerinde toplanmıştır.

8. SONUÇLAR

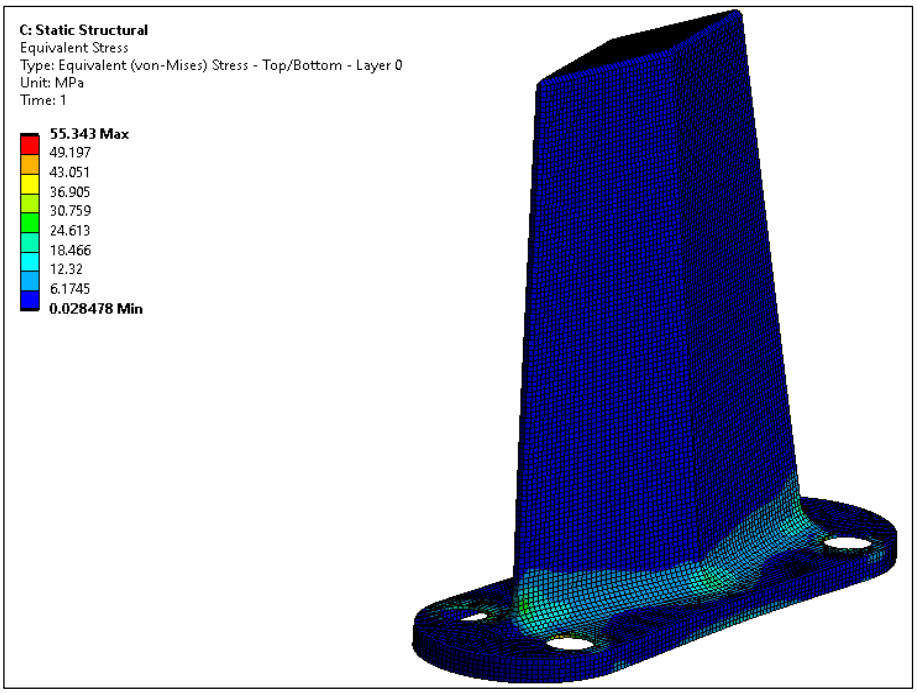
Bu çalışma içerisinde bir bıçak anteni oluşturan parametrelerin çeşitli kuvvetler altında sonucu nasıl etkilediği ve optimizasyon metodunun, istenilen tasarım kriterlerine ulaşmaktaki rolü karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Tüm bu çalışmalar sonucunda optimizasyon çalışması 3 adet öneri sunmuştur. Bu öneriler altında en uygun olanların katman dizilimleri sırası ile [58/64/38/31], [57/65/32/38] ve [56/61/24/35] açılarından oluşmaktadır.
- Önerilen 3 tasarım parametreleri için kompozit hata değerleri (IRF) genel olarak 0.31 değeridir. Maksimum gerilme durumları için değerler sırasıyla 55.4 MPa, 55.5 MPa ve 62 MPa' dır.
- Optimizasyon çalışması tüm önerilerde MTM46 GSM malzemesini önermektedir.
- Katman kalınlık seçimlerini 3 adet tasarım için sırası ile 0.154, 0.153 ve 0.151 mm'dir. Optimizasyon çalışması göstermiştir ki 0.15 katman kalınlığı bıçak (kanat) anten yapısı için en uygun katman kalınlığı değeridir.
- 4 katman yapısının, bu yapı için belirtilmiş olan kuvvetler altında gerilme ve kompozit hata oranları açısından en uygun şekilde dayandığı gözlemlenmektedir.
- Malzeme seçiminin aynı olduğu, örneğin tüm modelde sadece bir malzeme seçili ise katman kalınlığının diğer parametre olan katman yönlenme açısına göre daha baskın bir şekilde sonuçlara etki ettiği gözlemlenmiştir.
- Malzeme özelliklerinin sonuçlar açısından en etken parametre olduğu gözlemlenmiştir.
- Bu çalışma içerisinde amaç-fayda oranına göre tercih edilen kompozit parametreleri katman kalınlığı için 0.15 mm, katman dizilimi için [58/64/38/31] açıları ve malzeme için MTM46 GSM' dir.

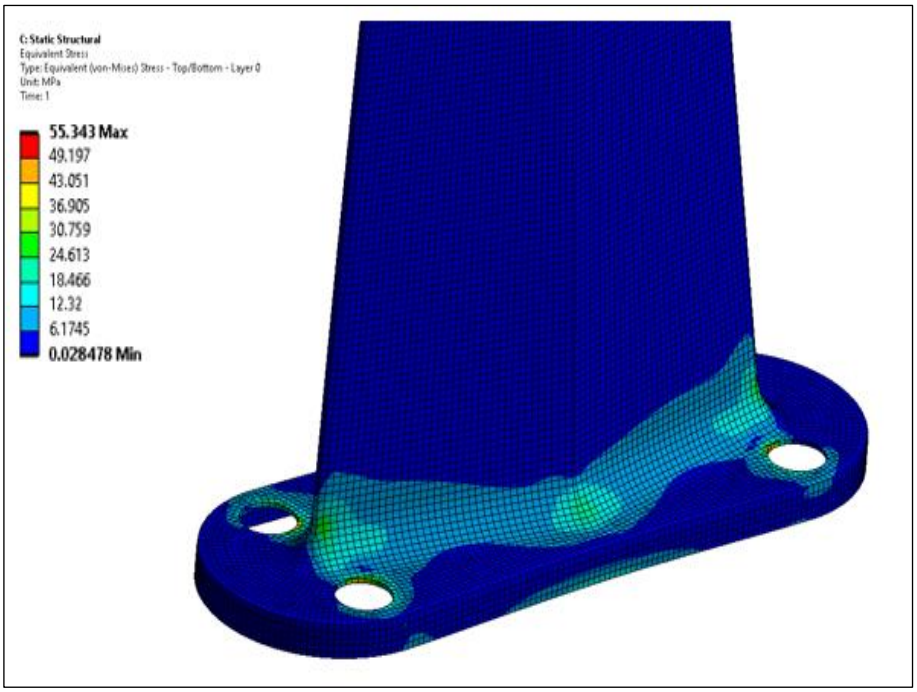
Bu önerilen aday tasarım için sonuç görselleri Şekil 8.1, Şekil 8.2 ve Şekil 8.3 içerisinde görülmektedir.



Şekil 8.1: Önerilen Tasarım Kompozit Hata Oranı (IRF).



Şekil 8.2: Önerilen Tasarım Maksimum Gerilme.



Şekil 8.3: Önerilen Tasarım Maksimum Gerilme.

Önerilen tasarımların karşılaştırılmalı değerleri Tablo 8.1 içinde paylaşılmıştır.

Tablo 8.1: Önerilen Tasarım Karşılaştırma.

	Öneri 1	**Öneri 2**	**Öneri 3**
Malzeme	MTM 46 GSM	MTM 46 GSM	MTM 46 GSM
Katman Kalınlığı	0,154 mm	0,153 mm	0,151 mm
Katman 1 Açısı	58°	57°	56°
Katman 2 Açısı	64°	65°	61°
Katman 3 Açısı	38°	32°	24°
Katman 4 Açısı	31°	38°	35°
Toplam Kalınlık	0,616 mm	0,612 mm	0,604 mm
Toplam Ağırlık	0,243 kg	0,239 kg	0,235 kg
Maksimum Gerilme	55,4 MPa	55,5 MPa	62 MPa
Kompozit Hata Oranı	0,31	0,3	0,32

9. ÖNERİLER VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışma içerisinde bu yapıda bulunan üç farklı ana parametre kullanılmıştır. Bu parametrelere ek olarak katman sayısı eklenmelidir. Daha detaylı çalışmalar için malzeme değerlerinin (elastiklik modülü, çekme dayanımı vb.) kendisini de parametre olarak eklenebilir.

Daha uygun bir tasarıma ulaşmak için gelecek çalışmalarda, bıçak antenin sadece iniş değil, sürüklenme anındaki davranışları da incelenmelidir. Ayrıca bu çalışma içerisinde hava akışı doğrusal bir akış olarak kabul edildiğinden, gelecek çalışmalar içerisinde türbülanslı akışta araştırılmalıdır.

KAYNAKÇA

ANSYS, (2019), http//.www.mm.bme.hu (Erişim Tarihi: 12/11/2020).

ANSYS, (2020), https://www.academia.edu/ (Erişim Tarihi: 11/02/2020)

Bibin, C., Selvaraj, M. J. ve Sanju, S., (2012), Flutter analysing over an aircraft wing during cruise speed, Procedia Engineering, 38, 1950–1961.

Brown, R. B., (1980), Compass Cope Airframe Design History, Journal of Aircraft, 17(12), 867–874.

Coello, C. A. C., (2000), An Updated Survey of GA-Based Multiobjective Optimization Techniques, ACM Computing Surveys, 32(2), 109–143.

Coello Coello C. A., (1999), An updated survey of evolutionary multiobjective optimization techniques: state of the art and future trends, Proceedings of the 1999 congress on evolutionary computation, Mexico, 83-85, 6-9 Temmuz 1999

Coello Coello C. A., (1999b), A Comprehensive Survey of Evolutionary-Based Multiobjective Optimization Techniques, Knowledge and Information Systems, 1(3), 269–308.

Costa, E. ve Rina, S. A., (2018), FSI optimization of industrial airplanes : the P180 Avanti EVO study FSI optimization of industrial airplanes : the P180 Avanti EVO study, (October).

Develve, (2020), (https://develve.net/Central%20Composite%20design.html) (Erişim Tarihi: 13/09/2020).

Dursun, T., (2006), Civata Bağlantili Tabakali Kompozit Levhalarda Hasar Analizi.Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi

Fonseca, C. M. ve Fleming, P. J., (1998), Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms - Part I: A unified formulation. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A:Systems and Humans., 28(1), 26–37.

Gay, D., Hoa, S. V. ve Tsai, S. W., (2002), Composite materials: Design and applications. Composite Materials: Design and Applications, 4. Baskı, CRC Press

Goldberg, D. E., (1989), Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Addison-Wesley, 3. Baskı, Addison-Wesley Publishing Company

Groenwold, A. A. ve Haftka, R. T., (2006), Optimization with non-homogeneous failure criteria like Tsai-Wu for composite laminates, Structural and Multidisciplinary Optimization, 32(3), 183–190.

Iqbal, K., (2013), Fundamental Engineering Optimization Methods, Journal of Chemical Information and Modeling, 53(9), 8.

Jensen, M. T., (2003), Reducing the Run-Time Complexity of Multiobjective EAs: The NSGA-II and Other Algorithms, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 7(5), 503–515.

Jhung, M. J., (2013), Assessment of thermal fatigue in mixing tee by FSI analysis, Nuclear Engineering and Technology, 45(1), 99–106.

Kaw, A. K., (2006), Mechanics of Composite Materials (Second Edi.). Taylor&Francis GroupLLC, 2. Baskı, Taylor&Francis Group

Konak, A., Coit, D. W. ve Smith, A. E., (2006), Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial, Reliability Engineering and System Safety, 91(9), 992–1007.

Konak, A. ve Smith, A. E., (2004), Capacitated network design considering survivability: An evolutionary approach. Engineering Optimization, 36(2), 189–205.

Liu, G. R. ve Quek, S. S., (2013), The Finite Element Method: A Practical Course: Second Edition, The Finite Element Method: A Practical Course: 2.Baskı, Butterworth-Heinemann

MathWorks, (2021), (https://es.mathworks.com/help/aeroblks/about-aerospace-coordinate-systems.html) (Erişim Tarihi: 17/06/2020).

Mazhar, F., Khan, A. M., Chaudhry, I. A. ve Ahsan, M., (2013), On using neural networks in UAV structural design for CFD data fitting and classification, Aerospace Science and Technology, 30(1), 210–225.

Menter, F., Yakubov, S., Sharkey, P. ve Kuntz, M., (2006), Overview of fluid-structure coupling in ANSYS-CFX. Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE, 2006, 1–7.

Nilsson, T., (2015), 2-way FSI simulations on a shock absorber check valve, 76, 21-23

Ouadoud, A., Mouchtachi, A. ve Boutammachte, N., (2011), Numerical simulation CFD , FSI of a hydrodynamic journal bearing. Journal of Advanced Research in Mechanical Engineering, 2, 33–38.

Rouhi, M., Ghayoor, H., Hoa, S. V. ve Hojjati, M., (2015), Multi-objective design optimization of variable stiffness composite cylinders. Composites Part B: Engineering, 69, 249–255.

Schaffer, J. D., (1985), Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. Proceedings of the first international conference on genetic algorithms and their applications,Pittsburgh,24-26 Temmuz 1985

Schmucker, H., Flemming, F. ve Coulson, S., (2010), Two-Way Coupled Fluid Structure Interaction Simulation of a Propeller Turbine. International Journal of Fluid Machinery and Systems, 3(4), 342–351.

Weck,O.ve Kim,I.Y., (2004), (http://web.mit.edu/16.810/www/16.810_L4_CAE.pdf) (Erişim Tarihi: (24/07/2020).

Xiujuan, L. ve Zhongke, S., (2004), Overview of multi-objective optimization methods. Journal of Systems Engineering and Electronics, 15(2), 142–146.

Zhang, Q. ve Hisada, T., (2001), Analysis of fluid-structure interaction problems with structural buckling and large domain changes by ALE finite element method. Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, A Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part A, 67(654), 195–202.

Zhang, Q. ve Song, C., (2016), Multiphysics Modeling, 1.Baskı, Tsinghua University Press Limited

Zitzler, E. ve Thiele, L., (1999), Multiobjective Evolutionary Algorithms : A Comparative Case Study. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 3(4), 257–271.

ÖZGEÇMİŞ

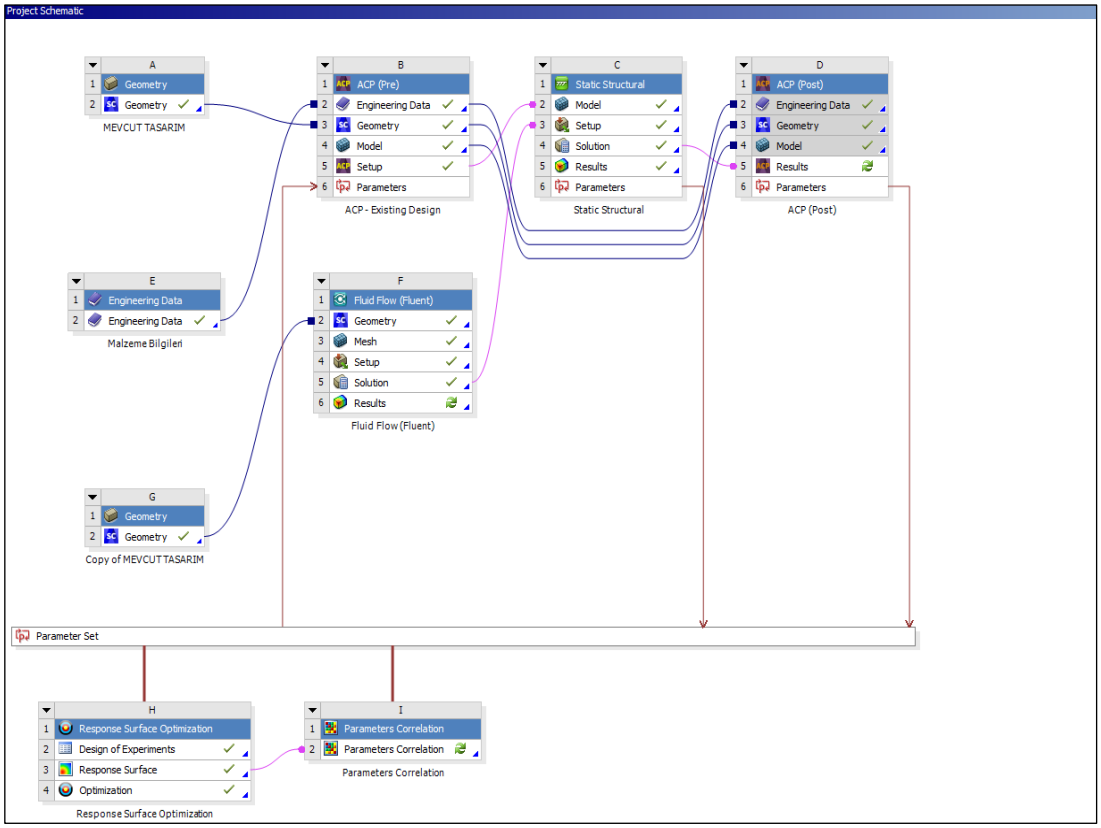
Hakan Şerif Keskin lisans derecesini Manisa ilinde bulunan Celal Bayar Üniversitesinde 2017 yılında elde etmiştir. Gebze Teknik Üniversitesi fen bilimleri enstitüsü makine mühendisliği anabilim dalında 2018 yılında yüksek lisansa başlamıştır. Hali hazırda Kocaeli/İzmit ilçesinde bulunan AssanHanil firmasında 2020 yılından beri uzman analiz mühendisi olarak çalışmaktadır.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Keskin H.Ş. ve Öktem A.S., (2021).,"Kompozit Antenin Yapı-Akışkan Yöntemi Kullanılarak Mukavamet Optimizasyonu", 1th International Engineering and Architecture Congress, İstanbul, 16-17 Ocak.

Ek B: Açıklamalar



Şekil B1.1: Ansys Workbench Akışkan-Yapı Şeması.