

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TAŞINABİLİR HAVA SAVUNMA SİSTEMİ
KOMPOZİT FIRLATMA TÜPÜNÜN YAPISAL ENİYİLEMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Efecan YAR

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Erdem ACAR

ARALIK 2020

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Efecan YAR

eyar

ÖZET

Yüksek Lisans

TAŞINABİLİR HAVA SAVUNMA SİSTEMİ KOMPOZİT FIRLATMA TÜPÜNÜN YAPISAL ENİYİLEMESİ

Efecan YAR

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Erdem ACAR

Tarih: Aralık 2020

Savunma sanayi alanında üretilen parçalarda ağırlık kriteri her zaman büyük bir önem taşımıştır. Kompozit malzemeler ağırlık ve mekanik dayanım özellikleri açısından avantaj sağlaması sebebiyle savunma sanayisinde sıklıkla tercih edilen malzemeler arasında yer almaktadır. Bu tezde, geliştirilmekte olan ve taşınabilir hava savunma sisteminde kullanılan kompozit yapıdaki fırlatma tüpü için sonlu elemanlar modeli oluşturularak ağırlık eniyileme çalışması gerçekleştirilmiştir. Ağırlık kriterine ek kriterler de eklenerek gerçekçi bir çözüm elde edilmesi amaçlanmıştır. Tüm kriterler göz önünde bulundurularak maliyet formülasyonu oluşturulmuş ve optimum tasarıma ulaşılmıştır. Ağırlık eniyileme çalışmasında sarım kalınlıkları ve sarım açısı tasarım değişkenleri olarak belirlenmiştir. Kısıt fonksiyonu olarak Tsai-Wu hasar kriteri kullanılarak elde edilmiş olan emniyet katsayısı kullanılmıştır. Fırlatma tüpü sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş, ısıl ve yapısal yükler fırlatma tüpü üzerine uygulanmıştır. Çözüm ağı yakınsama çalışması gerçekleştirilerek sonlu elemanlar yöntemi için uygun olan eleman boyutu belirlenmiştir. Sonraki aşamada, latin hiperküp örnekleme ve merkezi kompozit tasarım yöntemleri kullanılarak deney tasarımları oluşturulmuştur. Belirtilen deney tasarımları kullanılarak farklı vekil modeller ve farklı eniyileme yöntemleri ele alınmış ve ağırlık için eniyileme çalışması

gerçekleştirilmiştir. İlgili çalışma, cam elyaf takviyeli epoksi matrisli malzeme (cam/epoksi), karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli malzeme (karbon/epoksi) ve aramid elyaf takviyeli epoksi matrisli malzeme (aramid/epoksi) için gerçekleştirilmiş olup, kullanılan malzemeler ve yöntemler arasında karşılaştırma yapılmıştır. Üç malzeme için de latin hiperküp örnekleme yöntemi ile oluşturulan deney tasarımları kullanıldığında merkezi kompozit tasarıma göre daha hafif yapılar elde edildiği görülmüştür. Vekil model yöntemleri kıyaslandığında cam/epoksi ve karbon/epoksi malzeme için karesel polinom yanıt yüzey yöntemi, aramid/epoksi malzeme için ise Kriging yöntemi ile daha iyi sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Eniyileme yöntemleri kıyaslandığında ise cam/epoksi malzeme için seçkisiz arama yönteminin, karbon/epoksi ve aramid/epoksi malzeme için ise genetik algoritma yönteminin daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ağırlık eniyileme çalışması gerçekleştirildikten sonra ağırlık kriterine ek olarak bulunabilirlik, fiyat ve üretilebilirlik kriterleri de ele alınmıştır. Bu dört kriter önem sırasına göre yüzdesel olarak değerlendirilerek kullanılan kompozit malzemeler için maliyet formülasyonu oluşturulmuştur. Sonuç olarak, karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli malzemenin fırlatma tüpü için maliyet etkin optimum tasarımı sağladığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deney tasarımı, Eniyileme, Eniyileme yöntemleri, Fırlatma Tüpü, Kompozit malzeme, Maliyet formülasyonu, Sarım açısı, Sarım kalınlığı, Sonlu elemanlar yöntemi, Vekil modeller.

ABSTRACT

Master of Science

STRUCTURAL OPTIMIZATION OF A COMPOSITE LAUNCH TUBE OF MAN PORTABLE AIR DEFENSE SYSTEM

Efecan YAR

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Science Programme

Supervisor: Prof. Dr. Erdem ACAR

Date: December 2020

The weight criterion has always been of great importance for the parts produced in the defense industry. Composite materials are among the materials that are frequently preferred in the defense industry due to their advantages in terms of weight and mechanical strength. In this thesis, a weight optimization study was carried out by creating a finite element model for the composite launch tube that is being developed and used in the man portable air defense system. It is aimed to obtain a realistic solution by adding additional criteria to the weight criterion. Cost formulation has been carried out by considering all criteria and optimum design has been achieved. In the weight optimization study, winding thicknesses and winding angle were determined as design variables. The safety factor obtained by using the Tsai-Wu damage criterion was used as the constraint function. The launch tube was modeled via finite element method and thermal and structural loads were applied on the launch tube. The suitable element size for the finite element method was determined by performing a mesh convergence study. In the next step, design of experiments were created using the latin hypercube sampling and central composite design methods. Using the specified design of

experiments, different surrogate models and different optimization methods were discussed and optimization study for weight was performed. The study was carried out for glass fiber reinforced epoxy matrix material (glass/epoxy), carbon fiber reinforced epoxy matrix material (carbon/epoxy) and aramid fiber reinforced epoxy matrix material (aramid/epoxy). A comparison was made between the materials and the methods used. Using the design of experiments created with the latin hypercube sampling method for all three materials, it was observed that lighter structures were obtained compared to the central composite design method. When the response surface methods were compared, it was observed that better results were obtained with the quadratic polynomial response surface method for glass/epoxy and carbon/epoxy material, and with the Kriging method for aramid/epoxy material. When the optimization methods were compared, it was observed that the screening method for glass/epoxy material and the genetic algorithm method for carbon/epoxy and aramid/epoxy material gave better results. After the weight optimization study was carried out, availability, price and manufacturability criteria were also discussed in addition to the weight criteria. These four criteria were evaluated as percentages in order of importance and cost analysis was performed for the composite materials used. As a result, it has been observed that the carbon fiber reinforced epoxy matrix material provides the optimum cost effective design for the launch tube.

Keywords: Design of experiment, Optimization, Optimization methods, Launch tube, Composite material, Cost analysis, Winding angle, Winding thickness, Finite element method, Surrogate model.

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Prof. Dr. Erdem ACAR'a, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve destekleriyle her zaman yanımda olan eşime, aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
KISALTMALAR.....	xii
SEMBOL LİSTESİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1 Deneysel Tasarım Yöntemleri.....	6
2.1.1 Latin hiperküp örnekleme ile deneysel tasarım	6
2.1.2 Merkezi kompozit tasarım ile deneysel tasarım	7
2.2 Vekil Model Yöntemleri.....	9
2.2.1 Polinom yanıt yüzey yöntemi.....	9
2.2.2 Kriging yöntemi	10
2.2.3 Parametrik olmayan regresyon.....	11
2.2.4 Vekil model bütünü	11
2.2.5 Yapay sinir ağı.....	12
2.3 Eniyileme Yöntemleri.....	13
2.3.1 Seçkisiz arama	13
2.3.2 Genetik algoritma	13
2.3.3 Karesel Lagrange ile doğrusal olmayan programlama	14
3. PROBLEMİN TANIMI	15
3.1 Giriş	15
3.2 Eniyileme Problemi	16
3.3 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması	17
3.3.1 Kompozit malzemenin modellenmesi	17
3.3.2 Çözüm ağı oluşturulması	18
3.3.3 Kompozit katmanların oluşturulması	19
3.3.4 Yükleme ve sınır koşulları	20
3.3.5 Kompozit model için hasar kriteri.....	25
3.4 Çözüm Ağı Yakınsama Çalışması.....	26
4. FIRLATMA TÜPÜ TASARIMI İÇİN EK KRİTERLER	29
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	31
5.1 Eniyileme Sonuçları	31
5.2 Optimum Tasarımların Maliyet Formülasyonu	36
5.3 İleriye Yönelik Çalışmalar	37
KAYNAKLAR.....	39
EKLER.....	43
ÖZGEÇMİŞ	65

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Kompozit Malzemelerin Market Değeri ve Market Hacmine Göre Yıllar İçerisindeki Değişimi [4]	1
Şekil 1.2: Iгла Taşınabilir Hava Savunma Sistemi [8].....	2
Şekil 1.3: Javelin Taşınabilir Silah Sistemi [10]	3
Şekil 1.4: Stinger Taşınabilir Hava Savunma Sistemi [11].....	3
Şekil 2.1: Latin Hiperküp Örneklemenin Oluşturulması [21]	7
Şekil 2.2: Merkezi Kompozit Tasarımın Oluşturulması [24].....	8
Şekil 2.3: Sinir Ağı Sistemi [38]	12
Şekil 3.1: Fırlatma Tüpü Katman ve Sarım Açıları	15
Şekil 3.2: Kabuk Yapı	17
Şekil 3.3: Çözüm Ağı Oluşturulmuş Yapı	18
Şekil 3.4: Sarım Yönü (0^0)	19
Şekil 3.5: Sarım Yönü (45^0)	19
Şekil 3.6: ANSYS Modelinde Kullanılan Girdiler ve Çıktılar	20
Şekil 3.7: Fırlatma Tüpü için Koordinat Ekseni [54]	20
Şekil 3.8: Fırlatma Tüpünün Sabitlendiği Bölgeler	21
Şekil 3.9: Fırlatma Tüpü Omuz Desteğinin Sağlandığı Bölüm.....	21
Şekil 3.10: Kuvvet Ölçümü Alınan Fırlatma Tüpü Bağlantı Noktaları	22
Şekil 3.11: Zamana Bağlı Olarak (a) X (b) Y (c) Z Eksenindeki Atış Yüğü	24
Şekil 3.12: Fırlatma Tüpü Üzerindeki Isılçiftlerden Alınan Sıcaklık Verisi	25
Şekil 3.13: (a) E-Cam/Epoksi (b) Karbon/Epoksi (c) Aramid/Epoksi için Çözüm Ağı Yakınsama Grafiği	28

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Latin Hiperküp Örnekleme ile Oluşturulan Deney Tasarımı [21]	7
Çizelge 2.2: Merkezi Kompozit Tasarım ile Oluşturulan Deney Tasarımı	8
Çizelge 3.1: Kompozit Malzemelerin Özellikleri [49-52]	17
Çizelge 3.3: X, Y ve Z Eksenlerinde Zamana Bağlı Olarak Verilen Yükler	23
Çizelge 3.4: Cam/Epoksi için Çözüm Ağı Yakınsama Tablosu.....	26
Çizelge 3.5: Karbon/Epoksi için Çözüm Ağı Yakınsama Tablosu	27
Çizelge 3.6: Aramid/Epoksi için Çözüm Ağı Yakınsama Tablosu	27
Çizelge 4.1: Bulunabilirlik Kriteri.....	29
Çizelge 4.2: Kompozit Malzemeler için Birim Fiyat	30
Çizelge 4.3: Üretilirlik Kriteri	30
Çizelge 5.1: Cam/Epoksi Malzeme için Vekil Modellerin Hata Metrik Değerleri	32
Çizelge 5.2: Karbon/Epoksi Malzeme için Vekil Modellerin Hata Metrik Değerleri	32
Çizelge 5.3: Aramid/Epoksi Malzeme için Vekil Modellerin Metrik Değerleri	33
Çizelge 5.4: Latin Hiperküp Örnekleme ile Elde Edilen En Hafif Yapılar	34
Çizelge 5.5: Merkezi Kompozit Tasarım ile Elde Edilen En Hafif Yapılar	35
Çizelge 5.6: Fırlatma Tüpü Kriterleri Derecelendirme Tablosu	36
Çizelge 5.7: Malzeme Maliyeti Kriteri	36
Çizelge 5.8: Ağırlık Kriteri	37
Çizelge 5.9: Malzemelerin Kriterlere Göre Toplam Puanlaması	37

KISALTMALAR

ACP	: ANSYS Composite PrepPost
Aramid/Epoksi	: Aramid Elyaf Takviyeli Epoksi Matrisli Malzeme
Cam/Epoksi	: Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Matrisli Malzeme
E.K.	: Emniyet Katsayısı
FT	: Fırlatma Tüpü
GA	: Genetik Algoritma
Karbon/Epoksi	: Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Matrisli Malzeme
MANPADS	: Man Portable Air Defense System
RMSE	: Root Mean Square Error

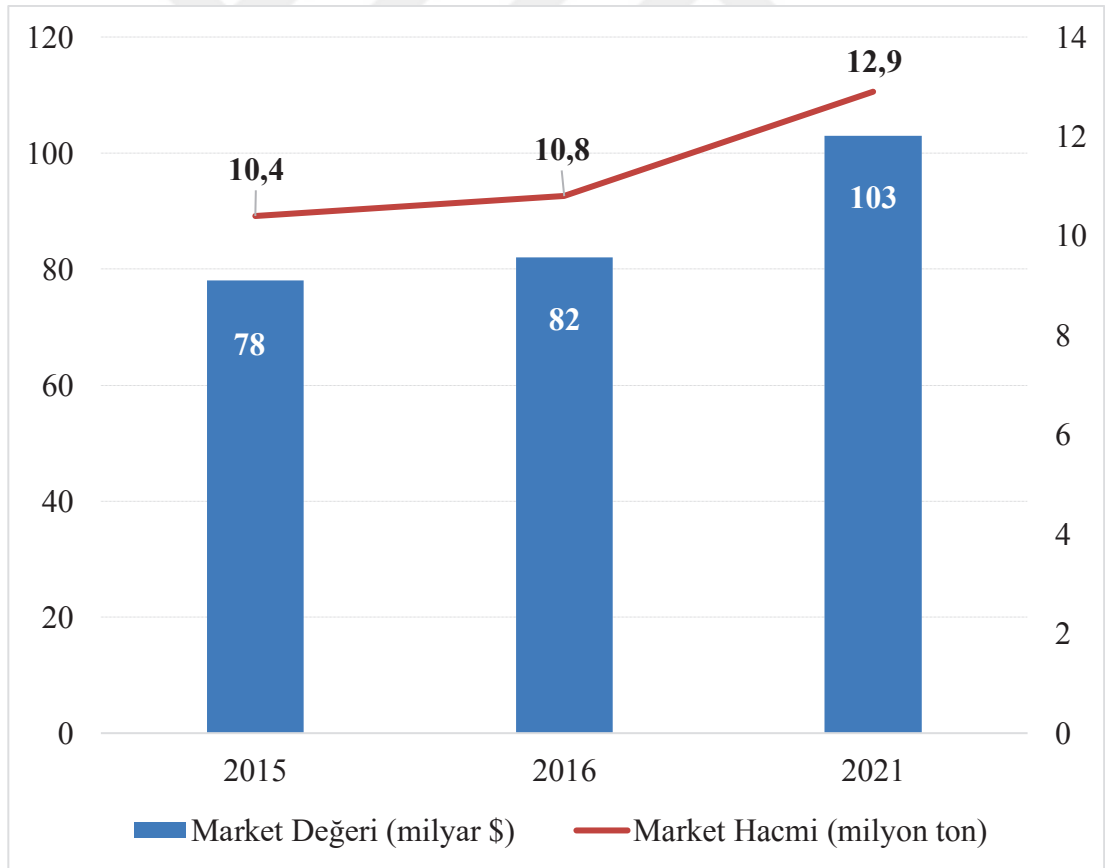
SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
c	Özgül Isı
E_1	Elyaf Yönündeki Elastisite Modülü
E_2	Elyaf Yönüne Dik Elastisite Modülü
$F_{11}, F_{22}, F_{66}, F_1, F_2, F_{12}$	Mukavemet Parametreleri
G_1	Elyaf Yönündeki Kayma Modülü
G_2	Elyaf Yönüne Dik Kayma Modülü
R^2	Belirleme Katsayısı
S	Kayma Gerilimi
t_1	0 Derece Açılar için Sarım Kalınlığı
t_2	θ Açısı için Sarım Kalınlığı
X_t	Elyaf Yönündeki Çekme Gerilimi
Y_t	Elyaf Yönüne Dik Çekme Gerilimi
X_c	Elyaf Yönündeki Basma Gerilimi
Y_c	Elyaf Yönüne Dik Basma Gerilimi
α_1	Boyuna Isıl Genleşme Katsayısı
α_2	Enine Isıl Genleşme Katsayısı
θ	Sarım Açısı
ρ	Özkütle

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler havacılık, otomotiv, spor, biyomedikal gibi birçok farklı sektörde kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin tercih edilmesinin sebebi birçok konvansiyonel malzemeye kıyasla düşük ağırlıklarda yüksek mekanik ve fiziksel dayanım özelliklerini göstermesidir [1-3]. Kompozit malzemelerin kullanımı her geçen gün daha da artmaktadır. 2015 yılında kompozit malzemeler için market hacmi tüm dünya genelinde 10,4 milyon tona, 2016 yılında ise 10,8 milyon tona ulaşmış olup; 2021 yılı için market hacminin 12,9 milyon tona ulaşması beklenmektedir (bkz. Şekil 1.1). Market hacmi ile birlikte kompozit malzemelerin market değeri de artış göstermekte olup, bu artışın devam edeceği öngörülmektedir.



Şekil 1.1: Kompozit Malzemelerin Market Değeri ve Market Hacmine Göre Yıllar İçerisindeki Değişimi [4]

Kompozit malzemelerin sıklıkla kullanıldığı sektörlerden biri de savunma sanayisidir. Savunma sanayi ürünlerinden biri olan taşınabilir hava savunma sistemi (Man Portable Air Defense System, MANPADS), omuzdan fırlatılan karadan havaya füze sistemleri olarak tanımlanmaktadır [5]. Bu sistemlerde füzeyi yataklayan, füzenin emniyetli bir şekilde taşınması ve depolanması için gerekli işlevleri yerine getiren, atış anına kadar füzeyi dış etkilerden koruyan ve atışın gerçekleşip füzenin ayrılmasıyla işlevini tamamlayan fırlatma tüpü bulunmaktadır.

Birçok taşınabilir hava savunma sisteminde fırlatma tüpü için kompozit malzeme seçilmiş olup bu seçimin sebebi sistem ağırlığını azaltmak ve korozyon dayanımını arttırmaktır [6]. Konstruktorskoye Byuro Mashynostroyeniya (KBM) firması tarafından üretilen ve Iгла Taşınabilir Hava Savunma Sistemi'nde yer alan fırlatma tüpü için cam elyaf takviyeli epoksi matrisli malzeme (cam/epoksi) kullanılmıştır [7]. İlgili görsel Şekil 1.2'de sunulmuştur.



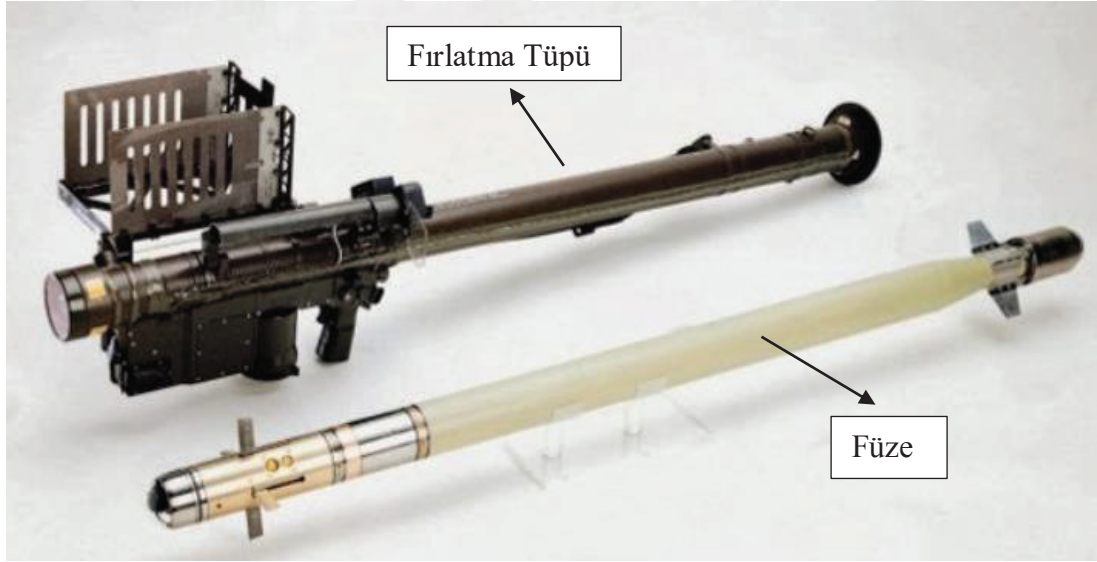
Şekil 1.2: Iгла Taşınabilir Hava Savunma Sistemi [8]

Raytheon firması tarafından üretilen Javelin Taşınabilir Tanksavar Silah Sistemi için karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli malzeme (karbon/epoksi) yapısına sahip fırlatma tüpü, Stinger Taşınabilir Hava Savunma Sistemi için ise aramid elyaf

takviyeli epoksi matrisli malzeme (aramid/epoksi) yapısına sahip fırlatma tüpü kullanılmıştır [9]. Şekil 1.3 ve Şekil 1.4'te Javelin [10] ve Stinger [11] sistemleri görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 1.3: Javelin Taşınabilir Silah Sistemi [10]



Şekil 1.4: Stinger Taşınabilir Hava Savunma Sistemi [11]

Bu tezde, halihazırda Roketsan'da geliştirilmekte olan ve taşınabilir hava savunma sisteminde kullanılan kompozit yapıdaki fırlatma tüpünün modellenmesi, tasarım değişkenlerinin belirlenerek ağırlık eniyileme çalışmasının gerçekleştirilmesi ve ek kriterler ele alınarak maliyet formülasyonu oluşturularak optimum tasarıma

ulaşılması amaçlanmıştır. Kompozit malzeme olarak; cam elyaf takviyeli epoksi matrisli malzeme, karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli malzeme ve aramid elyaf takviyeli epoksi matrisli malzeme ele alınmıştır.

İkinci bölümde literatür araştırması yapılarak tezde kullanılan deney tasarımları, vekil modeller ve eniyileme yöntemleri ele alınmıştır. nc bölümde tez kapsamındaki eniyileme problemi tanımlanmış ve fırlatma tüpü için sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Bu model, belirtilen üç kompozit malzeme için de oluşturulmuştur. Sonrasında zm ağı yakınsama çalışması ile kullanılan çözüm ağı eleman boyutu belirlenmiştir. Tezin dördüncü bölümünde optimum tasarım için ele alınan ek kriterler belirlenmiştir. Ağırlık kriteri ve bu ek kriterlerin fırlatma tüpü üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Beşinci bölümde ağırlık eniyileme çalışması sonucu elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Ek olarak, oluşturulan vekil modeller için hata metrikleri verilmiştir. Ağırlık eniyileme çalışması sonucu elde edilen minimum ağırlık için sarım açısı ve sarım kalınlık değerleri paylaşılmış ve ek kriterlerin de göz önüne alındığı maliyet formülasyonunun sonucu nihai malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında bu tez üzerine gelecekte yapılabilecek çalışmalar hakkında görüşler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Günümüzde analitik yollar ile çözümü zorlu olan ve uzun hesaplama süreleri gerektiren mühendislik problemleri ile karşılaşılacaktır. Bu mühendislik problemlerinde tek bir simülasyonun tamamlanması saatler hatta günler alabilmektedir. Böyle bir durumda; tasarım eniyileme işlemi için binlerce simülasyonun değerlendirilmesi gerektiğinden, bu simülasyonların tamamlanması neredeyse imkansız hale gelmektedir. Hesaplama maliyetini azaltarak minimum kaynakla maksimum bilgiyi elde edebilmek için simülasyon modelinin davranışını olabildiğince yakından taklit eden vekil model yöntemleri geliştirilmiştir. Vekil model ayrıca metamodel olarak da adlandırılmakta olup vekil model yöntemlerinin amacı, belirlenmiş olan tasarım değişkenleri ile bu tasarım değişkenlere bağlı yanıt değerleri arasında matematiksel bir bağlantı oluşturmaktır [12].

Vekil model oluşturmak için ilk olarak veri noktalarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu veri noktaları çeşitli algoritmalar veya deney tasarımı yöntemleri kullanılarak elde edilebilmektedir. Latin hiperküp örnekleme ve merkezi kompozit tasarım yöntemleri, deney tasarımı olarak kullanılan en popüler yöntemler arasında yer almaktadır [13].

Veri noktaları ve bunlara karşılık gelen sistem yanıtının elde edilmesi ile vekil model oluşturulmaktadır. Bu noktada farklı vekil model tabanlı yöntemler kullanılabilir. Çeşitli vekil modeller arasında Kriging ve polinom yanıt yüzey yöntemi yoğun olarak kullanılmaktadır [14]. Bunlara ek olarak parametrik olmayan regresyon, vekil model bütünü ve yapay sinir ağı da bu bölümde ele alınan vekil model yöntemleridir.

Vekil model yönteminde olduğu gibi optimum çözüm aranırken de farklı eniyileme yöntemleri kullanılabilir. Gerçekleştirilen eniyileme çalışmasında, optimize edilmiş tasarımların oluşturulması amaçlanır. Seçkisiz arama, genetik algoritma ve karesel Lagrange ile doğrusal olmayan programlama bu yöntemlerden bazılarıdır.

Bu bölüm şu şekilde organize edilmiştir: Tez kapsamında kullanılan deney tasarımı yöntemleri Bölüm 2.1’de, vekil model yöntemleri Bölüm 2.2’de, eniyileme yöntemleri ise Bölüm 2.3’te ele alınmıştır.

2.1 Deney Tasarımı Yöntemleri

Deney tasarımı, bir parametrenin veya parametre grubunun değerini kontrol eden faktörleri değerlendirmek için kontrollü testleri planlama, yürütme, analiz etme ve yorumlama ile ilgilenen bir uygulamalı istatistik dalı olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntem, istenen bir çıktı üzerindeki etkileri belirleyerek birden fazla girdi faktörünün değiştirilmesine olanak sağlamaktadır [15].

Deney tasarımı kavramı ilk olarak 1920'lerde Ronald Fisher tarafından tarım alanında araştırmalar yapması sonucu ortaya çıkmıştır. İlerleyen zamanlarda deney tasarımları biyoloji, tekstil, ilaç ve imalat gibi birçok sektörde kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde, endüstrinin birçok alanında düşük maliyetler ile yüksek kaliteli ürünler üretebilmek esas amaç haline almıştır. Bu sebeple tasarımın optimum hale getirilebilmesinde önemli rol oynayan çeşitli deney tasarımı yöntemleri geliştirilmiştir [16].

2.1.1 Latin hiperküp örnekleme ile deney tasarımı

Latin hiperküp örnekleme ilk olarak 1979 yılında McKay ve diğerleri tarafından tanımlanmıştır [17]. Bu yöntemin rastgele örnekleme yöntemine kıyasla daha doğru sonuçlar verdiği görülmüş ve Iman ve diğerleri tarafından 1981 yılında yayınlanan makalede daha da detaylandırılmıştır [18]. Sacks ve diğerleri tarafından bilgisayar deneylerindeki ilk kullanımının ardından ise yaygın olarak tercih edilen deney tasarımı yöntemlerinden biri olmuştur [19].

Latin hiperküp örnekleme yönteminde her bir değişkenin tasarım uzayı eşit olasılıktaki hücrelere ayrılır. İlk olarak, rastgele bir tasarım değişkeni kümesi belirlenir ve buna tekabül eden hücre seçilir. Buradaki tek kural, daha önce seçilmiş olan hücre lokasyonları ile seçilecek olan hücre lokasyonunun satır ve sütun değerlerinin birbiri ile çakışmamasıdır. Her tasarım değişkeni için hücreler dolana kadar süreç devam ettirilir [20].

Örnek olarak, [21] numaralı kaynakta belirtilen ve -3 ile 3 arasında değer alan x_1 ve x_2 tasarım değişkenlerine ait 12 deney için latin hiperküp örnekleme ile deney tasarımı oluşturulmuştur. Oluşturulan deney tasarımı Çizelge 2.1'de verilmiştir. Çizelge 2.1'de yer alan D_i sütunları i . tasarım değişkeninin hücre sırasını, x_i sütunları i . tasarım değişkeninin alacağı değeri göstermektedir. Veri noktalarının yayılımının

daha anlaşılır görünmesi için Şekil 2.1’de x_1 ve x_2 değişkenlerine karşılık gelen hücreler gösterilmektedir.

Çizelge 2.1: Latin Hiperküp Örnekleme ile Oluşturulan Deney Tasarımı [21]

Deney Sayısı	D_1	D_2	x_1	x_2
1	6	7	-0,27	0,73
2	12	9	3	1,364
3	9	4	1,36	-1,36
4	7	1	0,27	-3
5	1	5	-3	-0,82
6	3	12	-1,91	3
7	2	8	-2,46	0,82
8	8	10	0,82	1,91
9	5	11	-0,82	2,46
10	11	2	2,46	-2,46
11	4	3	-1,36	-1,91
12	10	6	1,91	-0,27

		x_2											
LHÖ		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
x_1	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
	7												
	8												
	9												
	10												
	11												
	12												

Şekil 2.1: Latin Hiperküp Örneklemenin Oluşturulması [21]

2.1.2 Merkezi kompozit tasarım ile deney tasarımı

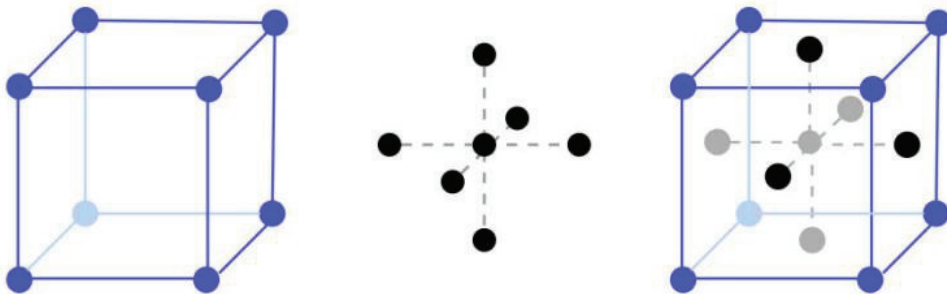
Merkezi kompozit tasarım, ilk olarak 1951 yılında Box ve Wilson tarafından tanıtılmış olup Box-Wilson deney tasarım yöntemi olarak da adlandırılmaktadır [22]. Bu yöntem tam faktöriyel deney tasarımı içeren, aksenal noktalar ile zenginleştirilmiş ve merkez noktaya sahip bir deney tasarımıdır. N değişken sayısı olmak üzere merkezi

kompozit tasarım 1 adet orta nokta, $2 \times N$ adet tasarım değişkenlerinin her ekseninde belli konumdaki aksenal noktalar ve 2^N adet tasarım değişkeni uzayının uç noktalarında bulunan faktöriyel noktaları içerir [23].

Örnek olarak, üç adet tasarım değişkeninin yer aldığı bir merkezi kompozit tasarımda 15 ($1 + 2 \times 3 + 2^3$) adet veri noktası deney tasarımına dahil edilir. -3 ile 3 arasında değer alan x_1 , x_2 , x_3 tasarım değişkenleri ile merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak deney tasarımı oluşturulmuştur. Oluşturulan deney tasarımı Çizelge 2.2’de verilmiştir. Veri noktalarının yayılımının daha anlaşılır görünmesi için Şekil 2.2’de tasarım değişkeni değerlerine karşılık gelen noktalar gösterilmektedir.

Çizelge 2.2: Merkezi Kompozit Tasarım ile Oluşturulan Deney Tasarımı

Deney Sayısı	x_1	x_2	x_3
1	0	0	0
2	-3	0	0
3	3	0	0
4	0	-3	0
5	0	3	0
6	0	0	-3
7	0	0	3
8	-2,44	-2,44	-2,44
9	2,44	-2,44	-2,44
10	-2,44	2,44	-2,44
11	2,44	2,44	-2,44
12	-2,44	-2,44	2,44
13	2,44	-2,44	2,44
14	-2,44	2,44	2,44
15	2,44	2,44	2,44



Faktöriyel Noktalar + Orta Nokta ve Aksenal Noktalar = Merkezi Kompozit Tasarım

Şekil 2.2: Merkezi Kompozit Tasarımın Oluşturulması [24]

2.2 Vekil Model Yöntemleri

Deneysel verileri yorumlamak ve analiz etmek için istatistiksel yöntemler son yıllarda sıklıkla uygulanır hale gelmiştir. Geleneksel olarak, farklı değişkenlerden birini değiştirerek diğerlerini sabit tutmak suretiyle eniyileme çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Bu geleneksel yöntem, değişken sayısının çok olduğu problemlerde zaman alıcı olmaktadır. Ayrıca, “klasik yöntem çeşitli parametreler arasındaki etkileşimleri dikkate almamakta, bu nedenle de parametrelerin optimum koşullarda gerçekleşeceğini garanti edememektedir”. Klasik optimizasyon yöntemlerinin bu dezavantajları, vekil model gibi istatistik tabanlı yöntemlerin kullanımını ile aşılabilmektedir [25].

Vekil model yöntemleri, ilgilenilen yanıtın çeşitli değişkenlerden etkilendiği bir süreci modellemek ve analiz etmek için yaygın olarak kullanılan matematiksel ve istatistiksel bir yöntemdir. Vekil model yöntemleri sayesinde basit ampirik modeller kullanılarak “sistem modellenenilmekte, sistemin cevabını etkileyen çok sayıda değişken bir arada ve eş zamanlı olarak incelenebilmekte ve prosesin işlem parametrelerindeki değişime verdiği cevap en az sayıda deneme yapılarak en iyi şekilde tanımlanabilmektedir” [25].

2.2.1 Polinom yanıt yüzey yöntemi

Polinom yanıt yüzeyler tasarım değişkenleri ile istenilen yanıt arasındaki bağıntıyı bir polinom uydurarak sağlarlar. Yanıt yüzey metodolojisi, 1951 yılında George E.P. Box ve K.B.Wilson tarafından tanıtılmıştır [25]. En sık kullanılan polinom yanıt yüzey modeli ikinci dereceden (karesel) polinomdur ve Denklem (2.1)'de ifade edilmiştir.

$$\hat{y}(x) = b_0 + \sum_{i=1}^L b_i x_i + \sum_{i=1}^L b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{L-1} \sum_{j=i+1}^L b_{ij} x_i x_j \quad (2.1)$$

Bu formülde \hat{y} tahmin edilen fonksiyon, x tasarım değişkenleri, L tasarım değişkeni sayısı ve b değerleri ise modeli oluştururken hesaplanması gereken katsayılardır [26]. Model katsayıları olan b değerlerinin hesabı Denklem (2.2)'de verilmiştir.

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (2.2)$$

Burada X tasarım değişkenlerinin matrisi (yani örneklem veri noktaları), X^T matrisin transpozu, y ise her bir örnekleme karşılık gelen yanıtları içeren sütun vektörüdür [27].

Polinomun derecesi arttıkça modelin bias hatası azalır, ancak varyansı artar. Bununla birlikte, çok yüksek dereceli polinomlar daha çok simülasyon gerektirecek olup vekil model kullanım amacının özüne aykırı olacaktır. Bu nedenle karesel polinom yanıt yüzey, en sık kullanılan yöntemlerden biridir [28].

2.2.2 Kriging yöntemi

1950'lerin başlarında Güney Afrika'da maden mühendisi olan Daniel G. Krige bilinen değerlerin bir örneğinden bir yüzey üzerindeki bilinmeyen değerlerin tahmini konusunda çalışma yayınlamıştır. Daha sonra 1970'lerde Fransız matematikçi George Matheron bu çalışmayı daha pratik hale getirerek kullanılabilir kılmış ve kullanılan yöntem sonrasında Kriging yöntemi olarak adlandırmıştır [29].

Kriging yönteminde yanıt fonksiyonu Denklem (2.3)'deki gibi iki bileşenden oluşan bir formül ile tahmin edilir.

$$y(x) = f(x) + Z(x) \quad (2.3)$$

Bu formülasyonda $f(x)$ global olarak yanıtı yakınsayan polinom eğilim fonksiyonu, $Z(x)$ ise gaussian dağılımlı, ortalaması sıfır ve σ^2 varyansına sahip olduğu varsayılan stokastik süreçtir ve sistematik sapma olarak adlandırılabilir [30]. $Z(x)$ 'in yakınsama matrisi Denklem (2.4)'de verilmiştir.

$$Cov[Z(x^i), Z(x^j)] = \sigma^2 R([r(x^i, x^j)]) \quad (2.4)$$

Burada σ^2 varyansı, R 'de N adet örnekleme noktasından oluşturulan $N \times N$ korelasyon matrisini ifade etmektedir. $r(x^i, x^j)$ iki örnekleme noktası olan x^i ve x^j arasındaki korelasyon fonksiyonudur [31]. Stokastik sapma için en sık kullanılan fonksiyonlardan biri olan Gauss korelasyon fonksiyonu Denklem (2.5)'de verilmiştir.

$$r(x^i, x^j) = \exp\left(-\sum_{k=1}^M \theta_k |x_k^i - x_k^j|^2\right) \quad (2.5)$$

Denklem (2.5)'de modeli uydurmak için kullanılan korelasyon parametreleri θ_k , tasarım değişkenlerinin sayısı ise M olarak belirtilmiştir. x_k^i ve x_k^j değerleri örneklemelerin k 'ncü bileşenleridir [32].

2.2.3 Parametrik olmayan regresyon

Parametrik olmayan regresyon gelişmiş yanıt kalitesi sağlar ve çıktıların girdilere göre doğrusal olmayan davranışları için bir metamodelleme tekniği olarak uygulanır. Parametrik olmayan regresyon, destek vektör yöntemi (ing. support vector method) tipi tekniklerin genel bir sınıfına aittir. Bunlar, veri gruplarını ayırmak için hiper düzlemleri kullanan veri sınıflandırma yöntemleridir. Regresyon yöntemi de benzer şekilde çalışır. Temel fark, hiper düzlemin, söz konusu çıktıyı temsil etmek için yeterli olduğu düşünülen girdi örnek vektörlerinin bir alt kümesini kategorize etmek için kullanılmasıdır [33].

Genel olarak, problemlerin ilk olarak ikinci dereceden bir yanıt yüzeyi ile donatılması ve parametrik olmayan regresyon bağlantısının yalnızca ikinci dereceden yanıt yüzey modelinden gelen uyum iyiliği tatmin edici olmadığıda benimsenmesi önerilmektedir. Bu, parametrik olmayan regresyon yönteminin yalnızca düşük dereceli polinomların baskın olmadığı problemler için kullanılmasını sağlar [33].

Girdi örneğini $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_m\}$ olarak belirlediğimizde her x_i 'nin N boyutlu vektör olduğu düşünelim. Amaç, Denklem (2.6)'da belirtilen denklem formunu belirlemektir.

$$Y = \langle W, X \rangle + b \quad (2.6)$$

Burada W ağırlık vektörünü temsil etmektedir. Denklem (6)'da belirtilen ifade genel parametric olmayan durumlarda Denklem (2.7)'deki gibi yazılabilir.

$$Y = \sum_{i=1}^N (A_i - A_i^*) K(\vec{X}_i, \vec{X}) + b \quad (2.7)$$

Burada $K(\dots)$ kernel fonksiyonu, A_i ve A_i^* Lagrange çarpanlarıdır. Sabit olarak ise b değeri kullanılmıştır. Ağırlık vektörü W 'nin, örnek noktalarının tümü (veya çoğu) uyumlu yüzey etrafındaki bir hata bölgesi içinde kalacak şekilde en aza indirilmesi gerektiği varsayımı ile başlanılarak Lagrange çarpanları belirlenir. Lagrange çarpanları belirlenirken oluşturulan formülasyonda Karush-Kuhn-Tucker koşullarının uygulanması ile b değeri elde edilmektedir [34].

2.2.4 Vekil model bütünü

Vekil model bütünü, farklı vekil modellerin ağırlıklı ortalamasının kullanılmasına dayalı bir yöntemdir. Bu sayede, eniyileme problemindeki her çıktı parametresine uygun yanıt yüzeyi türünü seçme, yapılandırma ve üretme sürecini

otomatikleştirir. Mevcut farklı vekil model türlerinden her çıktı için en uygun olanı seçme sürecini uygular [35-37]. Vekil model bütünü, farklı vekil modellerin ağırlıklı ortalaması kullanılarak Denklem (2.8)'deki gibi yazılabilir.

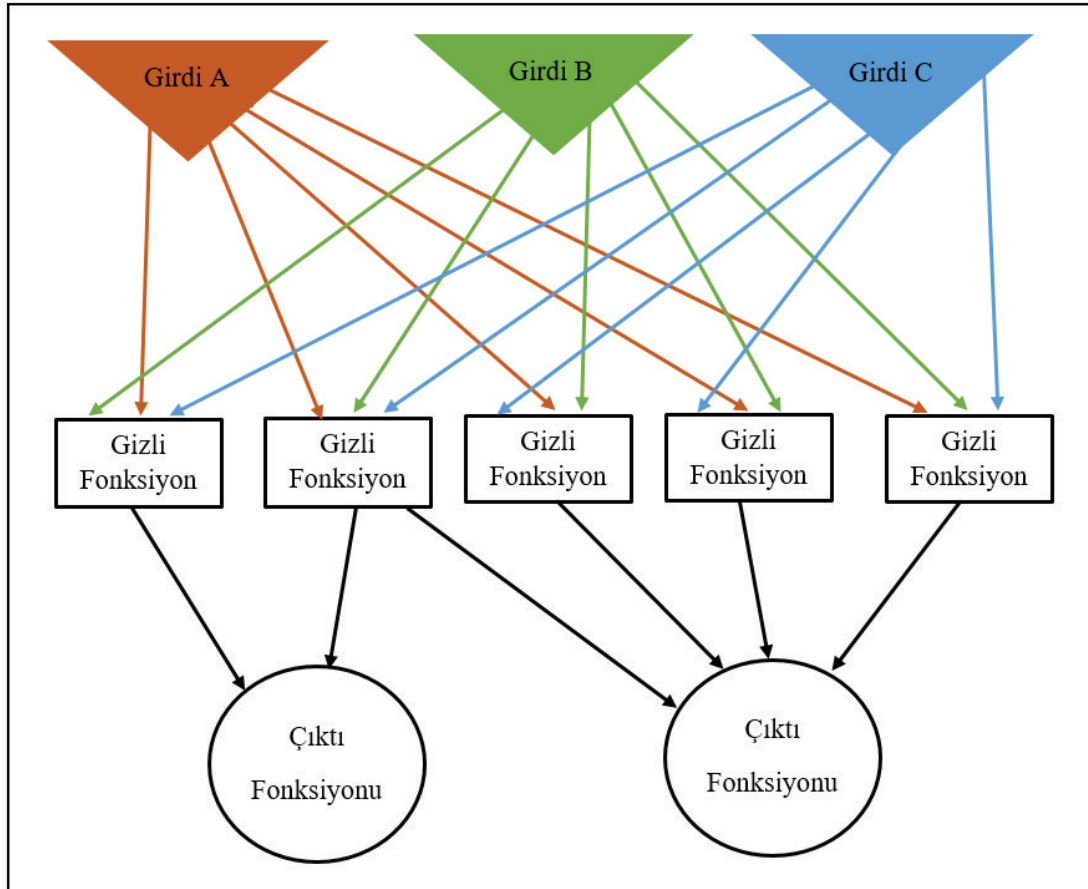
$$\hat{y}_{ens}(x) = \sum_{i=1}^{N_M} w_i \cdot \hat{y}_i(x) \quad (2.8)$$

Denklem (2.8)'de \hat{y}_{ens} , topluluğun tahmini, \hat{y}_i i'inci yanıtın tahmini, N_M kullanılan metamodel sayısı ve w_i i'inci yanıt yüzeyinin ağırlık faktörüdür [36], [37]. Ağırlık faktörleri Denklem (2.9)'da belirtilen şartları sağlamalıdır.

$$\sum_{i=1}^{N_M} w_i = 1 \text{ and } w_i \geq 0, 1 \leq i \leq N_M \quad (2.9)$$

2.2.5 Yapay sinir ağı

Yapay sinir ağı, insan beynindeki doğal sinir ağına dayanan matematiksel bir tekniktir. Bir fonksiyonun enterpolasyonunu yapmak için, çoğunlukla üç seviyeli (girdi, gizli ve çıktı) bir ağ oluşturulur ve bunlar arasındaki bağlantılar ağırlıklandırılır. Şekil 2.3'de örnek olarak oluşturulmuş sinir ağı sistemi yer almaktadır.



Şekil 2.3: Sinir Ağı Sistemi [38]

Şekil 2.3’de gösterilen her ok bir ağırlık (w) ile ilişkilidir. Girdiler x_i , gizli seviye ise $g_j(x_i)$ fonksiyonunu içersin. Bu durumda çıktı çözümü Denklem (2.10)’da verilmiştir.

$$f_k(x_i) = K(\sum w_{jk}g_j(x_i)) \quad (2.10)$$

Burada K , önceden tanımlanmış bir fonksiyon olup ağırlık fonksiyonları (w_{jk}), enterpolasyon ve bilinen değerler (tasarım noktaları) arasındaki mesafeyi en aza indiren bir algoritmadan elde edilir. Buna öğrenme (ing. learning) denir. Hata en düşük olduğunda ise hata azaltma algoritması durdurulur [38].

2.3 Eniyileme Yöntemleri

Eniyileme, bir sistemde varolan kaynakların en verimli şekilde kullanılarak en uygun çözümü elde etme sürecidir. Sayısal teknikleri içeren matematiksel eniyilemenin kökeni 2. Dünya Savaşı döneminde geliştirilen yöneylem araştırmalarına dayanır. Birçok eniyileme algoritması 1960’lı ve 1970’li yıllarda geliştirmiş ve kitaplarda ele alınmıştır. 1964 yılında Wilde, 1966 yılında Rosenborck, 1972 yılında Himmelblau, 1973 yılında Brent ve 1977 yılında Schwefel tarafından eniyileme yöntemlerine ilişkin kitaplar yayınlanmıştır [39].

2.3.1 Seçkisiz arama

Seçkisiz arama yöntemi, Hammersley algoritmasına dayanan yarı rastgele bir sayı üretici kullanan iteratif olmayan bir örnekleme yöntemidir. Bu yöntem, yeni bir örnekleme seti oluşturulmasına ve örneklemelerin amaç ve kısıtlara göre sıralanmasına olanak sağlar. Eğer yeteri kadar örnekleme yapılmışsa, optimumun yeri yeterince yakın olarak belirlenebilir [40].

2.3.2 Genetik algoritma

John Holland ve diğerleri tarafından 1970’lerde geliştirilen genetik algoritma, Charles Darwin’in doğal seçim teorisine dayanan bir biyolojik evrim modelidir [41]. Birçok nesil boyunca doğal popülasyonlar, Charles Darwin’in belirtmiş olduğu doğal seleksiyon ve en uygun olanın hayatta kalması ilkelerine göre gelişir. Bu süreç taklit edilerek genetik algoritma çözümü gerçekleştirilmektedir [42].

Genetik algoritma, genetik biliminden esinlenildiği için genetik bilimine ait terminolojiler kullanılmaktadır. Popülasyon, genetik algoritmada olası çözüm

bilgilerini ifade eden bireylerin topluluğuna verilen isimdir. Popülasyondaki her bireye kromozom denilmektedir. Kromozomlar bir veya birden fazla gen yapısının bir araya gelerek problemin çözümüne ait bilgileri oluşturan kavrama verilen isimdir [43].

Genetik algoritmada başlangıç bireylerinden oluşan ilk popülasyon üretilir. Sonraki adımda genetik algoritma içerisinde çaprazlama ve mutasyon yoluyla yeni bir popülasyon oluşturulur ve yeni popülasyondaki tasarım noktaları güncellenir. Algoritmanın istenen çözüme yakınsayıp yakınsamadığı kontrol edilir. Yakınsama gerçekleşmemiş ise durma kriterlerinin karşılanıp karşılanmadığı kontrol edilir. Durma kriterleri karşılanmadıysa, yeni bir popülasyon oluşturularak genetik algoritma tekrar çalıştırılır. Çözüme yakınsama veya durma kriterleri karşılanana kadar belirtilmiş olan süreç tekrarlanır. Bunlardan herhangi biri gerçekleştiğinde eniyileme süreci sona erer [44].

Yeni bir popülasyon oluşturmak için çaprazlama ve mutasyon olmak üzere iki ana adım kullanılmaktadır. Çaprazlama, yeni bir kromozom (yavru) üretmek için iki kromozomu (ebeveynleri) birleştirir. Çaprazlama arkasındaki fikir, yeni kromozomun, ebeveynlerin her birinden en iyi özellikleri alırsa, her iki ebeveynden de daha iyi olabileceğidir. Mutasyon, bir kromozomdaki bir veya daha fazla gen değerini başlangıç durumundan değiştirir. Bu, gen havuzuna tamamen yeni gen değerlerinin eklenmesine neden olabilir. Bu yeni gen değerleri ile genetik algoritma, daha önce mümkün olandan daha iyi bir çözüme ulaşabilir. Mutasyon, popülasyonun herhangi bir yerel optimumda takılı kalmasını önlemeye yardımcı olduğu için genetik algoritmanın önemli bir parçasıdır [44].

2.3.3 Karesel Lagrange ile doğrusal olmayan programlama

Karesel Lagrange ile doğrusal olmayan programlama, Klaus Schittkowski tarafından geliştirilen matematiksel bir optimizasyon algoritmasıdır. Lagrange fonksiyonunun karesel yaklaşımından ve kısıtların doğrusallaştırılmasından yola çıkarak, karesel programlama formüle edilir ve çözülür. Hessian yaklaşımı, modifiye edilmiş Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno formülü ile güncellenir. Amaç ve kısıtlama fonksiyonları, arama yönü boyunca önceden belirlenmiş test noktalarında hesaplanır. Genişletilmiş Lagrange fonksiyonuna göre arama gerçekleştirilir [45].

3. PROBLEMİN TANIMI

3.1 Giriş

Maliyet etkin bir fırlatma tüpü üretebilmek için tasarım değişkenleri kullanılarak maliyet fonksiyonu oluşturulması gerekmektedir. Tasarım değişkenleri, sarım kalınlıkları ve sarım açısı olarak belirlenmiş olup bu değerlerin belirlenmiş olan kriterler ile maliyet fonksiyonunun oluşturulması oldukça zordur. Bu nedenle, ele alınan her bir kompozit malzeme için ağırlık eniyileme çalışması gerçekleştirilmiş ve ağırlık, bulunabilirlik, malzeme maliyeti ve üretilebilirlik kriterlerini içeren bir maliyet formülasyonu oluşturulmuştur.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen ağırlık eniyileme çalışmasında ele alınan fırlatma tüpünün katmanları ve sarım açıları Şekil 3.1’de gösterilmiştir. [46]. $[0, \theta, 0]$ olarak ele alınan sarım açılarından θ değeri, 0 derece açılar için sarım kalınlığı olan t_1 değeri ve θ açısı için sarım kalınlığı olan t_2 değeri tasarım değişkenleri olarak kullanılacak olup, yapısal ağırlığı minimize etmek amaçlanmaktadır.



Şekil 3.1: Fırlatma Tüpü Katman ve Sarım Açılı

Kısıt fonksiyonu, Tsai-Wu kriteri kullanılarak hesaplanmış olan emniyet katsayısıdır. Bu emniyet katsayısı (E.K.), Denklem (3.1a)'daki gibi hesaplanır:

$$(F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_6^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2)(E.K.)^2 + (F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2)(E.K.) = 1 \quad (3.1a)$$

Denklem (3.1a)'da yer alan F_{11} , F_{22} , F_{66} , F_1 , F_2 ve F_{12} mukavemet parametreleri olup, Denklem (3.1b)'deki gibi hesaplanır:

$$F_{11} = \frac{1}{X_t X_c}, \quad F_{22} = \frac{1}{Y_t Y_c}, \quad F_{66} = \frac{1}{S^2}, \quad (3.1b)$$

$$F_1 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}, \quad F_2 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}, \quad F_{12} = -\frac{1}{2}\sqrt{F_{11}F_{22}}$$

Burada σ_1 değeri elyaf yönündeki gerilmeyi, σ_2 değeri elyaf yönüne dik gerilmeyi, σ_6 değeri kayma gerilmesini, X_c elyaf yönündeki basma gerilme dayanımını, X_t elyaf yönündeki çekme gerilme dayanımını, Y_c elyaf yönüne dik basma gerilme dayanımını, Y_t elyaf yönüne dik çekme gerilme dayanımını ve S değeri kayma gerilme dayanımını ifade etmektedir [47].

3.2 Eniyileme Problemi

Ele alınan optimizasyon problemi standart formda Denklem (3.2)'de verilmiştir:

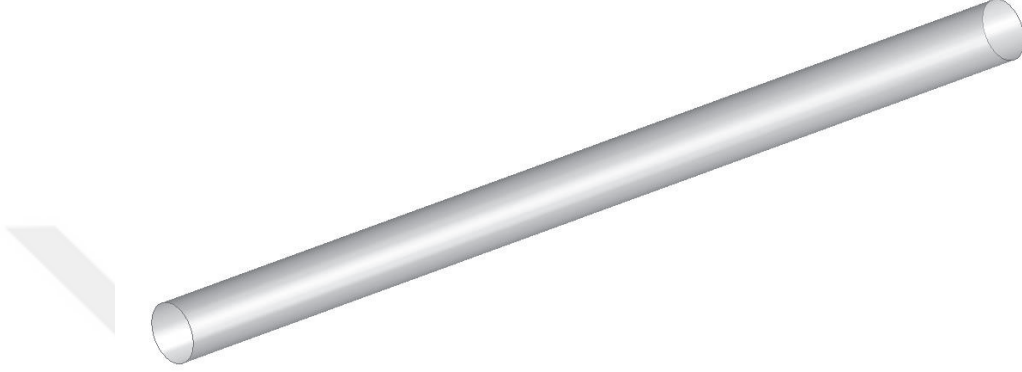
$$\begin{aligned} &\text{Bul } t_1, t_2, \theta \\ &\text{Min } f(t_1, t_2, \theta) \\ &\text{Öyle ki } 0,1 \text{ mm} \leq t_1, t_2 \leq 2 \text{ mm} \\ &0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \\ &\text{E.K.} \geq 3 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Modern kompozit yapılarda sarım kalınlığı 0,1 milimetreye kadar düşürülebilmektedir [48]. Bu sebeple, Denklem (3.2)'de yer alan t_1 ve t_2 için minimum sarım kalınlığı olarak 0,1 mm değeri kullanılmıştır. Kompozit malzemelerin yapısal davranışlarının diğer malzemelere oranla daha zor tahmin edilmesi ve üretim belirsizlikleri gibi sebeplerden dolayı yüksek emniyet katsayısı değeri kullanılmaktadır. Kompozit yapıdaki fırlatma tüpü için emniyet katsayısı 3 olarak belirlenmiştir [49].

Tezin 4. bölümünde ağırlık kriterine ek olarak başka kriterlerin de ele alınması gerektiği vurgulanmıştır. Malzeme alternatifleri için ek kriterler belirlenmiş ve değerlendirilmiştir.

3.3 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Sonlu elemanlar programı olarak ANSYS yazılımı kullanılmış olup malzeme modellenmesi, çözüm ağı oluşturulması, kompozit katmanların oluşturulması, yükleme ve sınır koşulları ve eniyileme çalışmalarının tamamı ANSYS içerisinde yer alan modüller aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. İlgili analizler için 95 milimetre çapında ve 1690 milimetre boyunda bir kabuk oluşturulmuş ve Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2: Kabuk Yapı

3.3.1 Kompozit malzemenin modellenmesi

Kompozit malzeme olarak cam elyaf takviyeli epoksi matrisli malzeme, karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli malzeme ve aramid elyaf takviyeli epoksi matrisli malzeme seçilmiştir. Malzeme özellikleri Çizelge 3.1’de sunulmuştur. Her bir malzeme Çizelge 3.1’de yer alan malzeme özelliklerine göre tanımlanarak ANSYS kütüphanesine eklenmiştir.

Çizelge 3.1: Kompozit Malzemelerin Özellikleri [49-52]

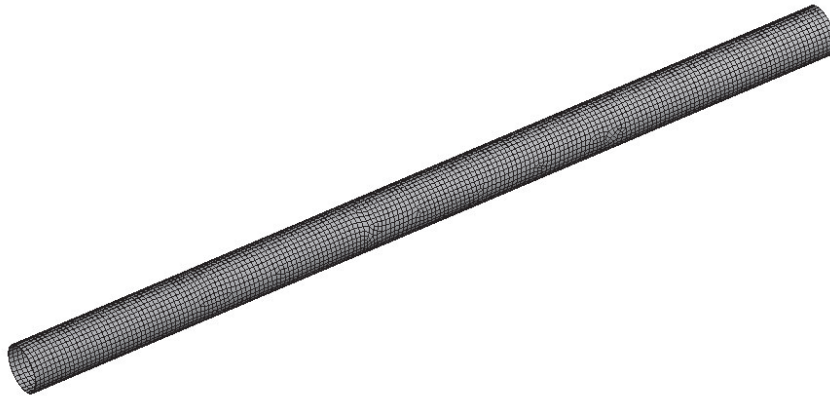
Malzeme Özellikleri	Gösterim	Birim	Cam/Epoksi	Karbon/Epoksi	Aramid/Epoksi
Elyaf Yönündeki Elastisite Modülü	E_1	MPa	41000	127700	83000
Elyaf Yönüne Dik Elastisite Modülü	E_2	MPa	10400	7400	7000
Poisson Oranı	ν	-	0,28	0,33	0,41
Elyaf Yönündeki Kayma Modülü	G_1	MPa	4300	6900	2100
Elyaf Yönüne Dik Kayma Modülü	G_2	MPa	3500	4300	1860

Çizelge 3.1: Kompozit Malzemelerin Özellikleri [49-52] (devam)

Malzeme Özellikleri	Gösterim	Birim	Cam/Epoksi	Karbon/Epoksi	Aramid/Epoksi
Elyaf Yönündeki Çekme Gerilimi	X_t	MPa	1140	1717	1377
Elyaf Yönüne Dik Çekme Gerilimi	Y_t	MPa	39	30	18
Elyaf Yönündeki Basma Gerilimi	X_c	MPa	620	1200	235
Elyaf Yönüne Dik Basma Gerilimi	Y_c	MPa	128	216	53
Kayma Gerilimi	S	MPa	89	33	27
Özkütle	ρ	g/cm ³	1,9	1,6	1,4
Özgül Isı	c	J/kg.K	800	1000	1420
Boyuna Isıl Genleşme Katsayısı	α_1	10 ⁻⁶ /°C	7	-0,9	-2
Enine Isıl Genleşme Katsayısı	α_2	10 ⁻⁶ /°C	26	27	60

3.3.2 Çözüm ağı oluşturulması

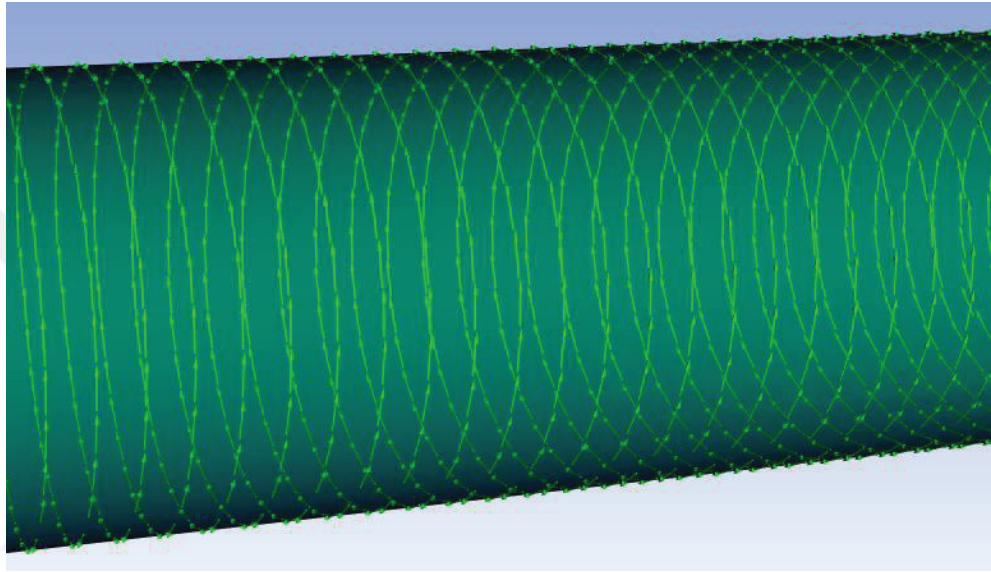
Oluşturulan geometri için 9 mm eleman boyutunda çözüm ağı oluşturulmuştur. Oluşturulan çözüm ağı Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Eleman tipi hakkında bilgiler ve eleman boyutunun belirlenmesi için gerçekleştirilen çalışma “3.4 Çözüm Ağı Yakınsama Çalışması” bölümünde yer almaktadır.



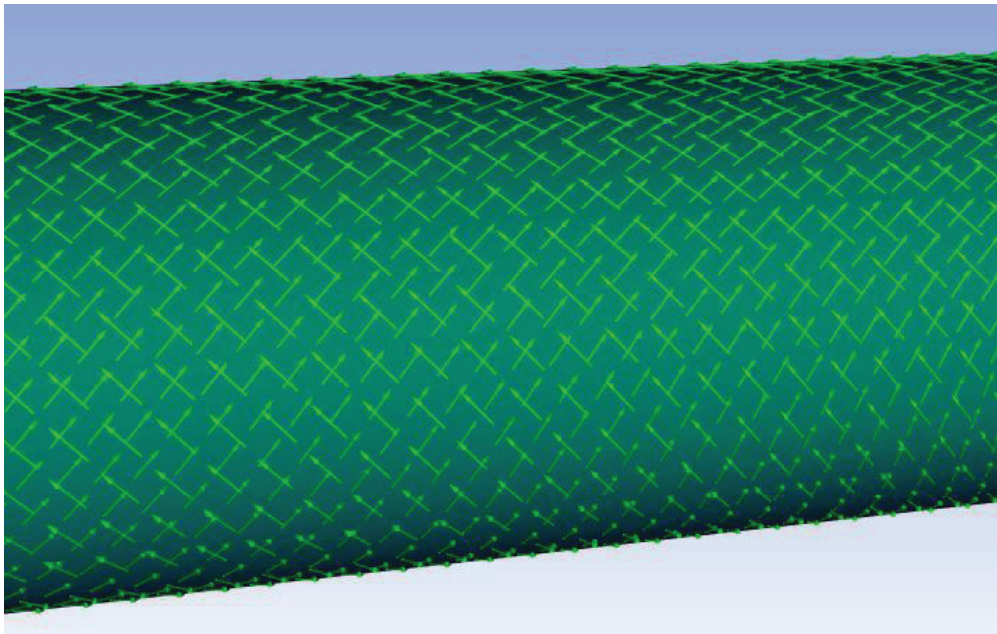
Şekil 3.3: Çözüm Ağı Oluşturulmuş Yapı

3.3.3 Kompozit katmanların oluşturulması

Geometri tanımlanıp çözüm ağı oluşturulduktan sonra ANSYS Composite PrepPost (ACP) modülü kullanılarak kompozit katmanlar oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen çalışmada 3 katman oluşturulmuş olup bu katmanların açısı sırasıyla $[0, \theta, 0]$ olarak belirlenmiştir. 0 derece açıları sabit kalıp θ açısı parametre olarak kullanılmıştır. θ açısı değişken olup başlangıç değeri olarak 45° alınmıştır. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de sarım yönleri görsel olarak paylaşılmıştır.



Şekil 3.4: Sarım Yönü (0°)



Şekil 3.5: Sarım Yönü (45°)

Sarım açısı 0 derece olan ve iki kez kullanılan sarımlar için t_1 sarım kalınlığı, θ için ise t_2 sarım kalınlığı parametre olarak kullanılmıştır. Başlangıç olarak bu değerler 0.3 mm olarak alınmıştır. Kompozit modelin katmanları oluşturulduktan sonra sarım açısı ve sarım kalınlıkları girdi olarak, ağırlık ve emniyet katsayısı ise çıktı olarak parametrize edilmiştir (bkz. Şekil 3.6).



Şekil 3.6: ANSYS Modelinde Kullanılan Girdiler ve Çıktılar

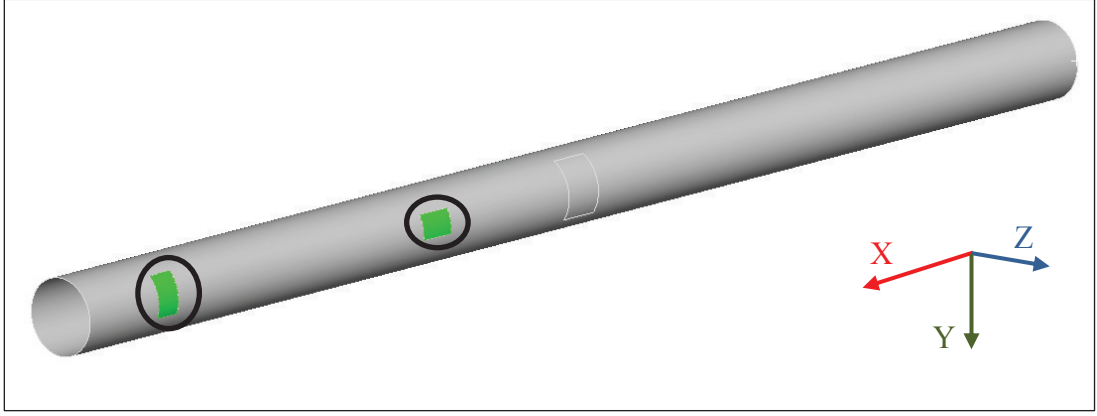
3.3.4 Yükleme ve sınır koşulları

Koordinat eksenini olarak X eksenini fırlatma tüpünün ön bölümünü, yani füzenin çıkış doğrultusunu, Y eksenini yanal doğrultuyu, Z eksenini ise yerçekimi yönünü göstermekte olup yükleme ve sınır koşulları bu koordinat eksenini doğrultusunda verilmiştir. Şekil 3.7’de kullanılan koordinat eksenini görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 3.7: Fırlatma Tüpü için Koordinat Eksenini [54]

Şekil 3.7’de personelin eliyle tutmuş olduğu tetik tertibatı bütününe kundak adı verilmektedir. Gerçekleştirilen analizde kundak ile fırlatma tüpünün bağlantısının sağlandığı yerler rijit (deforme olmayan) bölge olarak kabul edilmiştir. Şekil 3.8’de daire içerisine alınmış olan yerler X, Y ve Z ekseninde yerdeğiştirmenin sıfır olduğu bölgelerdir. Bu bölgeler füzenin ateşlenmesini sağlayan kundak arayüzlerini temsil etmekte olup rijit bölge kabul edildiği için atış anında deformasyona uğramaz. Bu nedenle Şekil 3.8’de belirtilmiş olan yerler, fırlatma tüpünün sabitlendiği bölgeler olarak kabul edilmiştir.

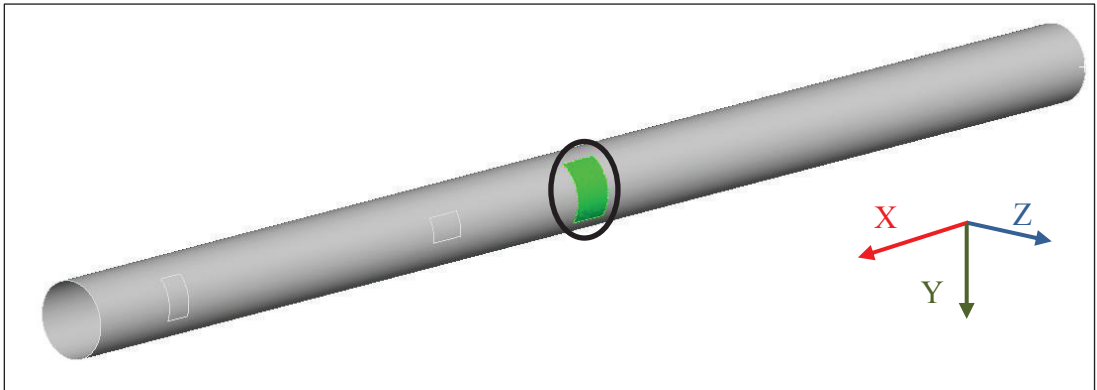


Şekil 3.8: Fırlatma Tüpünün Sabitlendiği Bölgeler

Şekil 3.9’de fırlatma tüpünün omuz desteği pim destek (ing. pin support) olarak modellenmiştir. Taşınabilir hava savunma sistemini kullanan personelin kundağı sabit tutması gerektiğinden fırlatma tüpünün kendi eksenini etrafında (X eksenini) dönme hareketini gerçekleştirmesi mümkün değildir. Bundan dolayı, omuz desteği bölgesinde X eksenini etrafındaki dönme hareketi gerçekleşmemektedir.

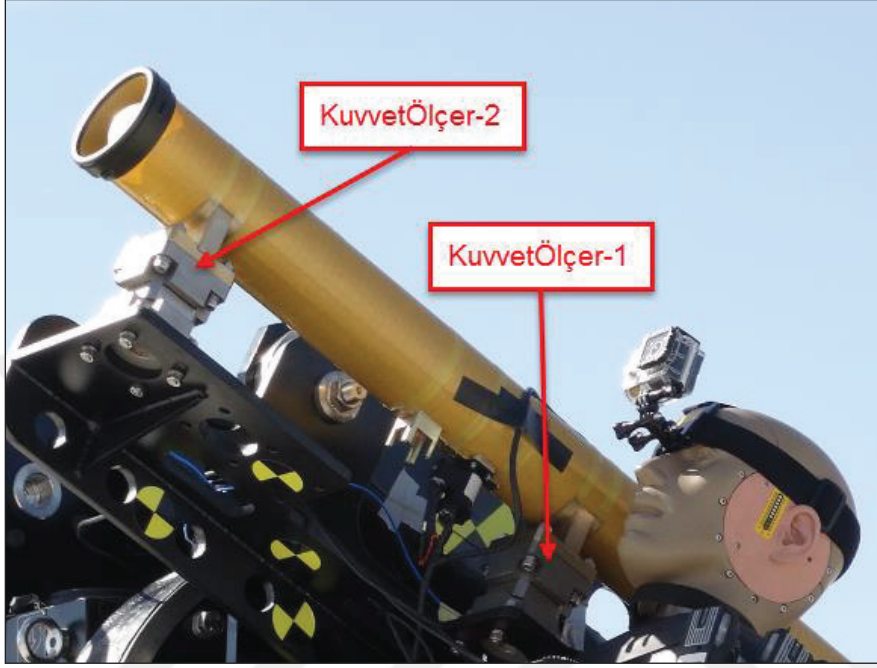
Kundak üzerinde monoküler dürbün yapı yer almakta olup hedef aranırken personel gözünü bu monoküler dürbüne yaklaştırmaktadır. Sistemin omuz desteği bölgesinde Z eksenini etrafında dönme hareketi serbest bırakılırsa personelin monoküler dürbünden bakması zorlaşır. Bu sebeple kafanın çevrilmeden tüm vücudun hareket ettirilmesi daha uygundur. Bundan dolayı, omuz desteği bölgesinde Z eksenini etrafındaki dönme hareketi gerçekleşmemektedir.

Omuz desteği bölgesinde Y eksenini etrafındaki dönme hareketi fırlatma tüpünün aşağı ve yukarı yönde oynatılabileceği anlamına gelmektedir ve bu harekete izin verilmektedir. Bundan dolayı, Y eksenini etrafındaki dönme hareketi serbest bırakılmış olup, diğer eksenler için sıfır değeri alınmıştır.



Şekil 3.9: Fırlatma Tüpü Omuz Desteğinin Sağlandığı Bölüm

Fırlatma tüpünün  ekil 3.8’de belirtilmiş olan sabit bölgelerine iki adet 3 eksenli kuvvet l er yerleŐtirilerek kuvvet ölümü alınmıştır. Kuvvet l er olarak PCB markanın 261A03 model numarasına sahip cihazı kullanılmıştır [55]. Şekil 3.10’da kuvvet l erlerin fırlatma tüpüne yerleŐimini gösterilmiştir.



Şekil 3.10: Kuvvet  l m  Alınan Fırlatma Tüpü Bağlantı Noktaları

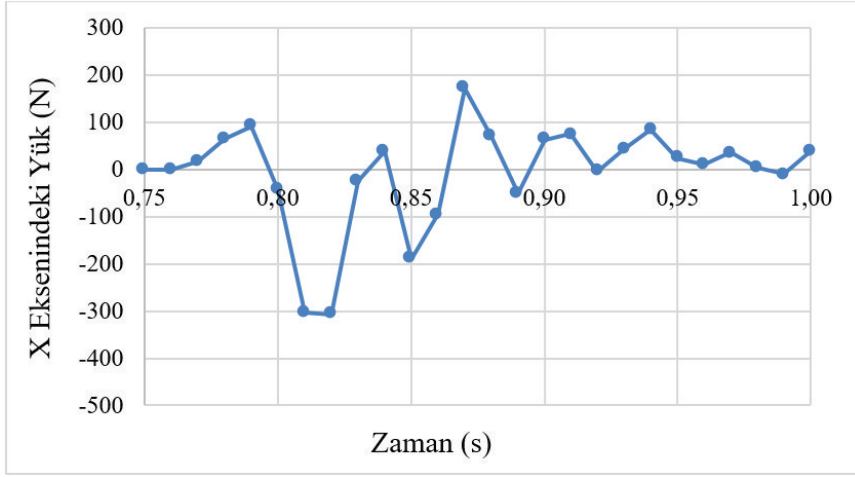
Kuvvet l erlerin X eksenleri atış yönü, Y eksenleri fırlatma tüpüne arkadan bakıldığında sağ taraf, Z eksenleri de aşağı y n olacak Şekilde ayarlanmıŐtır. Böylece kuvvet l erler için seçilmiş olan koordinat eksenleri, fırlatma tüpü analizinde kullanılan koordinat eksen takımı ile aynı olmuştur.

Yüklemenin maksimum olduğu 0,75 ile 1,00 saniye aralığı analizlerde kullanılmış olup kuvvet l er verilerinden alınan yüklerin ortalaması alınarak fırlatma tüpüne yansıtılmıŐtır. Çizelge 3.2’de zamana bağlı olarak X, Y ve Z eksenlerinde fırlatma tüpüne gelen yükler verilmiştir. Çizelge 3.2’deki veriler grafiksel olarak  ekil 3.11’de verilmiştir.

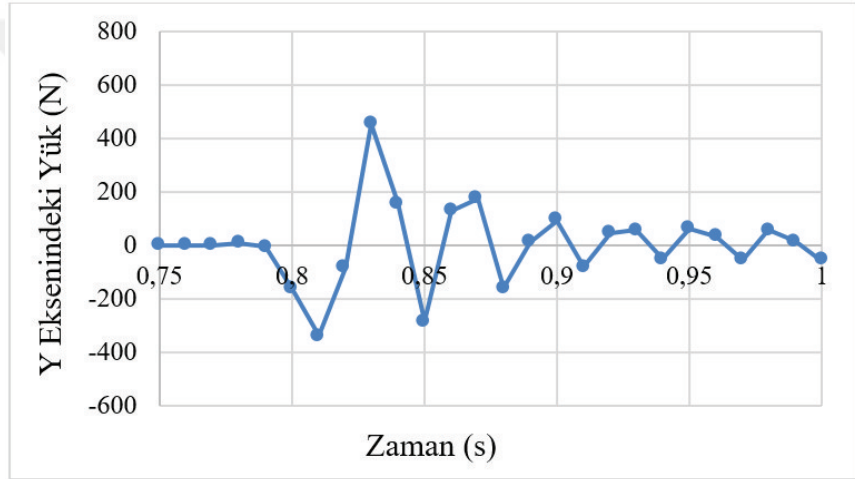
Isıl yük analizi gerçekleŐtirebilmek için fırlatma tüpünün  n, orta ve arka bölümüne ısılı ftlar yerleŐtirilip füze ateŐlenerek test faaliyeti gerçekleştirilmiş ve sıcaklık ölümü alınmıştır. Ölüm sonuçları grafiksel olarak  ekil 3.12’de gösterilmiştir. Isılı ftlardan elde edilen ısıl yükler ANSYS programında fırlatma tüpüne yansıtılmıŐtır.

Çizelge 3.2: X, Y ve Z Eksenlerinde Zamana Bağlı Olarak Verilen Yükler

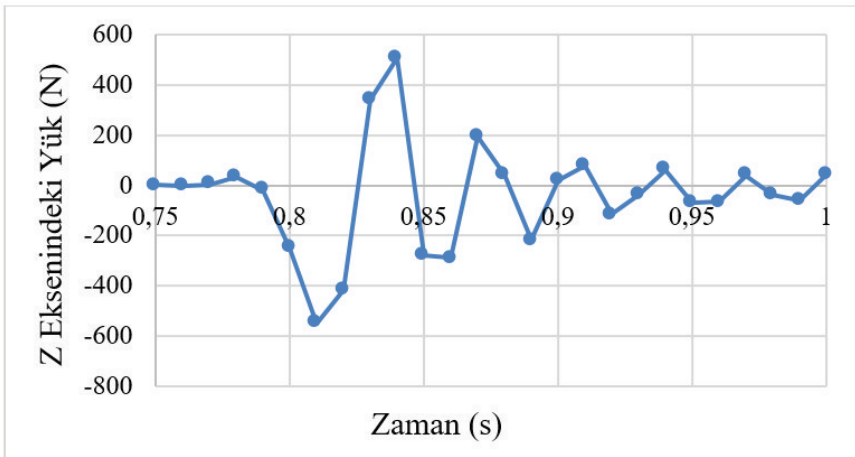
Saniye	X Eksenindeki Yük (N)	Y Eksenindeki Yük (N)	Z Eksenindeki Yük (N)
0,75	0	0,1	0,9
0,76	0,6	-0,1	-0,2
0,77	17,9	-1,9	4,2
0,78	65,8	7,3	32,6
0,79	91,8	-4,5	-18,9
0,8	-44,1	-162,1	-250,5
0,81	-302,4	-339,1	-550,8
0,82	-306,8	-84,6	-416,7
0,83	-23,5	455,0	339,9
0,84	40,2	156,7	506,8
0,85	-189,8	-285,5	-280,8
0,86	-94,5	127,2	-289,6
0,87	173,1	176,0	193,3
0,88	70,4	-159,9	41,3
0,89	-50,6	12,6	-216,6
0,9	63,8	93,4	18,6
0,91	75,9	-78,3	79,6
0,92	-4,3	46,0	-116,3
0,93	44,6	56,9	-38,0
0,94	84,9	-52,2	61,5
0,95	24,2	64,0	-69,4
0,96	10,5	32,1	-64,3
0,97	36,6	-55,5	39,6
0,98	5,2	57,1	-36,3
0,99	-8,9	15,1	-61,1
1	39,0	-57,4	43,7



(a)

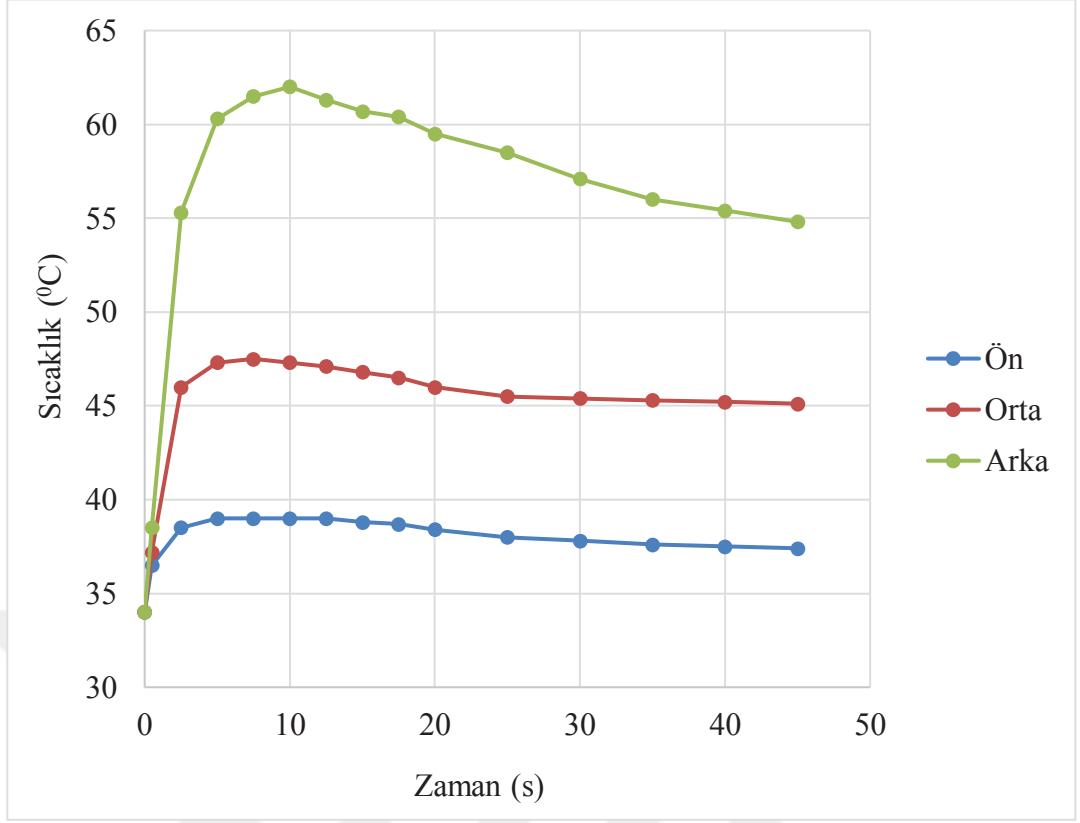


(b)



(c)

Şekil 3.11: Zamana Bağlı Olarak (a) X (b) Y (c) Z Eksenindeki Atış Yüğü



Şekil 3.12: Fırlatma Tüpü Üzerindeki Isılçiftlerden Alınan Sıcaklık Verisi

Şekil 3.12 incelendiğinde fırlatma tüpündeki sıcaklık değerinin arka tarafta yüksek çıktığı, ön bölümde ise sıcaklığın daha az arttığı görülmektedir. Bu durumun sebebi, fırlatma tüpü içerisinde yer alan füze itkiyi sağlayan motorun arka bölümde yer almasından kaynaklanmaktadır.

3.3.5 Kompozit model için hasar kriteri

Kompozit yapılar için birçok hasar kriteri teorisi bulunmaktadır. Bunlardan bazıları maksimum gerilim, Hoffman, Tsai-Hill ve Tsai-Wu hasar kriterleridir. Kompozit hidrojen depolama tankı için yapılan çalışmada Tsai-Wu hasar kriterinin diğer hasar kriterlerine oranla gerçek değerle daha çok örtüştüğü gözlemlenmiştir [56]. Tsai-Wu hasar kriteri analiz çalışmalarında sıklıkla kullanılmakta olup çoğu kompozit malzeme için gerçek sonuca yakın değerler vermektedir [57]. Fırlatma tüpü eniyileme çalışmasında da Tsai-Wu hasar kriteri ele alınmış ve emniyet katsayısı hesaplanmıştır. Tsai-Wu hasar kriteri formülasyonu Denklem (14)'de verilmiştir.

$$F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_6^2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 \geq 1 \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)'de ifade edilen değerler, Denklem (3.1a) ve Denklem (3.1b)'de açıklanmıştır. Bu değerler kompozit malzemeler için Çizelge 3.1'de tanımlanmıştır. Tsai-Wu formülasyonunda yer alan 1 ya da 1'den büyük olma durumunun gerçekleşmesi, kompozit malzemedeki hasar oluşacağını göstermektedir.

3.4 Çözüm Ağı Yakınsama Çalışması

Seçilmiş olan üç kompozit malzeme için çözüm ağı yakınsama çalışması gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizde kullanılan fırlatma tüpü, shell181 elemanı ile çözüm ağı yaratılarak tanımlanmıştır. Shell181, her düğümde altı serbestlik derecesine sahip dört düğümlü bir eleman olarak tanımlanmaktadır (X, Y ve Z yönlerinde ötelemler ve X, Y ve Z eksenleri etrafındaki dönme hareketi) [58].

Eleman boyutu 27 mm'den 8 mm'ye kadar düşürülerek yer değiştirme miktarları incelenmiştir. Eleman sayısına bağlı olarak yer değiştirme miktarı incelendiğinde 6265 adet eleman (9 mm eleman boyutu) kullanılarak yer değiştirmedeki fark oranının tüm malzemeler için yaklaşık olarak binde 2 veya altında olduğu görülmüştür. Bu sebeple 9 mm eleman boyutu kullanılmış olup Çizelge 3.3, Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'de sırasıyla cam/epoksi, karbon/epoksi ve aramid/epoksi malzeme için çözüm ağı yakınsama tabloları verilmiştir.

Çizelge 3.3: Cam/Epoksi için Çözüm Ağı Yakınsama Tablosu

Eleman Boyutu (mm)	Eleman Sayısı	Yer Değiştirme Miktarı (mm)	Yer Değiştirme Yüzdesele Fark Oranı
27	856	15,48	3,14
21	1215	15,68	1,85
15	2277	15,85	0,70
11	4214	15,92	0,29
10	5085	15,94	0,18
9	6265	15,96	0,06
8	7958	15,97	-

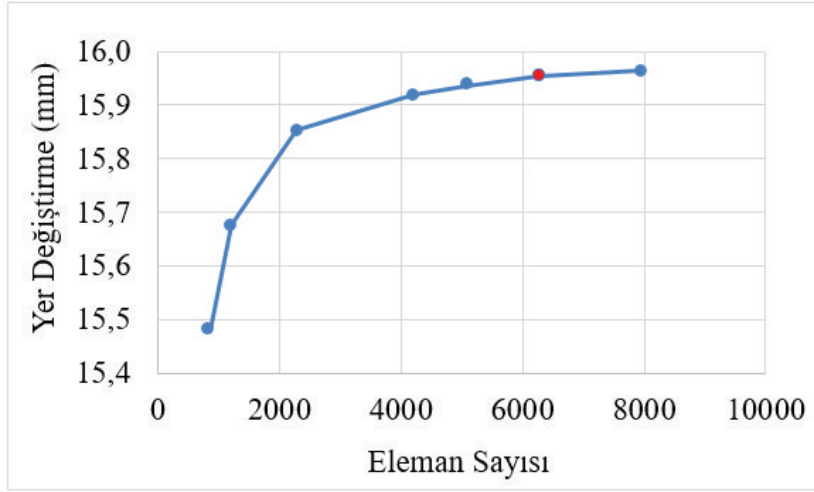
Çizelge 3.4: Karbon/Epoksi için Çözüm Ağı Yakınsama Tablosu

Eleman Boyutu (mm)	Eleman Sayısı	Yer Değişirme Miktarı (mm)	Yer Değişirme Yüzesel Fark Oranı
27	856	12,55	7,39
21	1215	12,66	6,46
15	2277	13,04	3,36
11	4214	13,34	1,04
10	5085	13,39	0,70
9	6265	13,45	0,23
8	7958	13,48	-

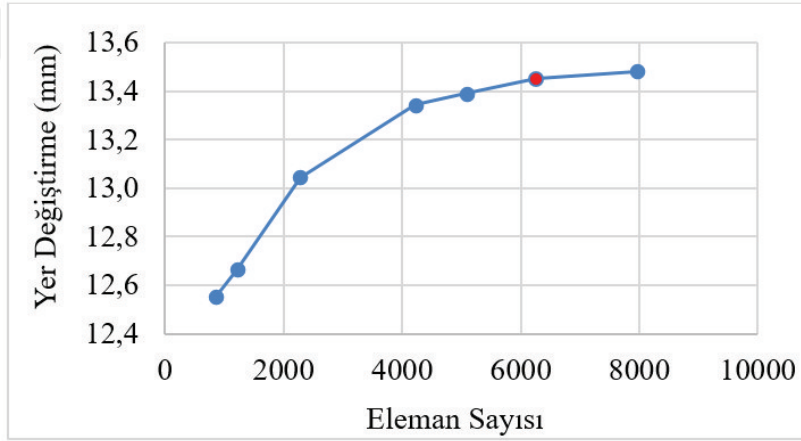
Çizelge 3.5: Aramid/Epoksi için Çözüm Ağı Yakınsama Tablosu

Eleman Boyutu (mm)	Eleman Sayısı	Yer Değişirme Miktarı (mm)	Yer Değişirme Yüzesel Fark Oranı
27	856	36,92	7,25
21	1215	37,43	5,78
15	2277	38,39	3,15
11	4214	39,24	0,92
10	5085	39,37	0,58
9	6265	39,53	0,18
8	7958	39,60	-

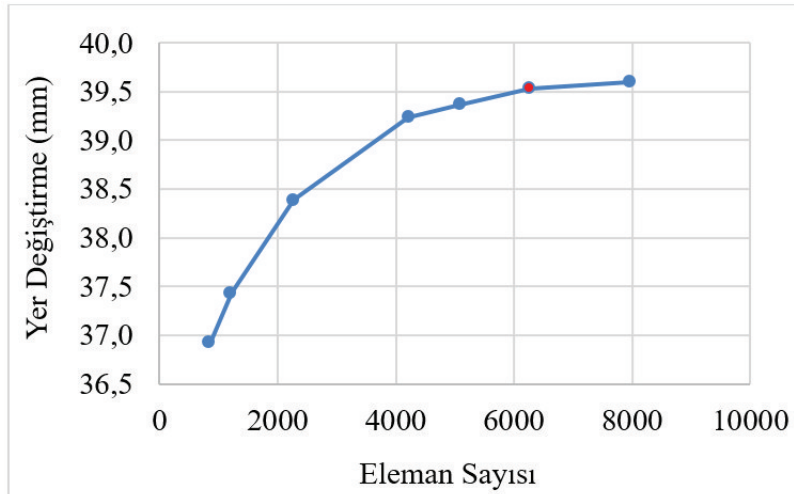
Çizelge 3.3, Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5’de verilen tabloların grafikleştirilmiş hali Şekil 3.13’te verilmiş olup 9 mm eleman boyutu kırmızı nokta ile ifade edilmiştir. Şekil 3.13’te eleman sayısı arttıkça yer değiştirmenin yakınsadığı değer grafiksel olarak görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.13: (a) E-Cam/Epoksi (b) Karbon/Epoksi (c) Aramid/Epoksi için Çözüm Ağı Yakınsama Grafiği

4. FIRLATMA TÜPÜ TASARIMI İÇİN EK KRİTERLER

Gerçekleştirilen çalışmada sonlu elemanlar modeli oluşturularak ağırlığın belirli şartlar altında minimize edilmesi hedeflenmiştir. Bu durum, tezin 3. bölümünde aktarılmıştır. Ağırlık; malzeme seçimini ve kullanım kolaylığını etkileyen önemli bir kriter olsa da, fırlatma tüpü tasarımında ek kriterlerin etkisi de göz önüne alınmalıdır. Fırlatma tüpü için bulunabilirlik, malzeme maliyeti ve üretilebilirlik ek kriterler olarak belirlenmiştir. Bu ek kriterlerin belirlenmesi ve alternatif malzemeler açısından karşılaştırılmasında kompozit malzeme üreticisi olan İzoreel firmasının görüşleri alınmış ve ek araştırmalar gerçekleştirilmiştir.

Fırlatma tüpü için kullanılacak olan malzemenin bulunabilirliği önem taşımaktadır. Cam/epoksi malzeme endüstride sıklıkla kullanılmaktadır. Bu sebeple, malzemenin temini kolaydır ve tedarikçi sayısı fazladır [59]. Karbon elyaf üretimi DowAksa firması tarafından Türkiye içerisinde gerçekleştirildiği için karbon/epoksi malzemenin temini anlamında önemli bir avantaj sağlamaktadır [60]. Bununla birlikte, karbon/epoksi malzemenin alternatif tedarikçi sayısı ise cam/epoksi malzemeye göre daha azdır [59]. Aramid/epoksi malzemenin ise diğer alternatif malzemelere göre bulunabilirliği daha zordur [61]. Bu kapsamda, Çizelge 4.1’de bulunabilirlik kriteri için puanlama tablosu sunulmuştur. Puanlama, mevcut koşullar ve İzoreel firmasının tecrübesine dayanarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.1: Bulunabilirlik Kriteri

Alternatifler	Karşılaştırma	Puan
Cam/Epoksi	- Cam elyaf temin kolaylığı nedeniyle yüksek puan (5) - Alternatif üreticilerin bulunabilmesi nedeniyle yüksek puan (5)	10
Karbon/Epoksi	- Yurtiçi üretimi nedeniyle temin kolaylığı açısından yüksek puan (5) - Karbon elyafın alternatif bulunabilirliği sebebiyle orta puan (3)	8
Aramid/Epoksi	- Aramid elyafın temininin zor olması sebebiyle orta puan (3) - Aramid elyafın alternatif bulunabilirliği sebebiyle orta puan (3)	6

Malzeme maliyeti, ele alınması gereken faktörlerden biri olup fırlatma tüpü tasarımı için bir kriter olarak belirlenmiştir. Birim maliyet fiyatları değerlendirildiğinde cam/epoksi malzeme ucuzluğu ile ön plana çıkmaktadır.

Karbon/epoksi ve aramid/epoksi malzemeler ise daha yüksek maliyetleri sebebiyle dezavantaja sahiptir. Fırlatma tüpü için farklı malzemelerin kullanılması, ağırlık eniyileme sonucuna bağlı olarak farklı ağırlıklarda fırlatma tüpleri elde edilmesine yol açmaktadır. Bu sebeple, kullanılan malzemenin ağırlığı ile birim maliyet çarpılarak elde edilecek olan sonuç önem arz etmektedir. Bundan dolayı, malzeme maliyeti için puanlama tablosu ağırlık eniyileme çalışması sonucunda belirlenecektir. Çizelge 4.2’de malzeme maliyeti kriteri için birim fiyat değerleri sunulmuştur.

Çizelge 4.2: Kompozit Malzemeler için Birim Fiyat

Alternatifler	Birim Fiyat (€/kg) [62]
Cam/Epoksi	20
Karbon/Epoksi	30
Aramid/Epoksi	50

Fırlatma tüpü tasarımı için ele alınan bir diğer kriter ise retilibilirliktir. Fırlatma tüpü, silindirik yapısı sayesinde elyaf sargı prosesi açısından tüm malzemeler için yüksek retilibilirlik göstermektedir. Ancak, fırlatma tüpü üzerinde kesme veya talaşlı imalat işlemi (delik delme vb.) gerçekleştirilmek istendiğinde aramid/elyaf retilibilirlik açısından sıkıntı yaratmaktadır. Bu durum cam/elyaf ve karbon/elyaf için geçerli olmayıp kesme ve talaşlı imalat işlemi açısından yüksek retilibilirliğe sahiptirler [61]. Bu kapsamda, izelge 4.3’de retilibilirlik kriteri için puanlama tablosu sunulmuştur. Puanlama, mevcut koşullar ve İzoreel firmasının tecrübesine dayanarak gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.3 incelendiğinde aramid/epoksi malzemenin daha düşük puan aldığı görülmektedir. Bu durumun sebebi, aramid/epoksi malzeme üzerinde talaşlı imalat prosesi gerçekleştirilmek istendiğinde içerisindeki elyafların dağılarak talaşlı imalat yöntemine izin vermemesinden kaynaklanmaktadır. Aramid/epoksi malzemede kesimin düzgün gerçekleştirilebilmesi için lazer kesim gibi farklı yöntemler kullanılması gerekmektedir.

Çizelge 4.3: retilibilirlik Kriteri

Alternatifler	Karşılaştırma	Puan
Cam/Epoksi	Cam elyafın kullanılması nedeniyle yüksek retilibilirlik	10
Karbon/Epoksi	Karbon elyafın FT alt sistemi için kullanılmasında herhangi bir zorluk mevcut değildir, bu sebeple yüksek retilibilirlik	10
Aramid/Epoksi	Aramid elyafın kullanılması elyaf sargı prosesi için yüksek; kesme ve talaşlı imalat açısından düşük retilibilirlik	7

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Taşınabilir hava savunma füze sisteminde kullanılan fırlatma tüpü için ağırlık eniyileme çalışması gerçekleştirilmiş ve üç malzeme için de minimum ağırlık değeri ve bu değeri sağlayan sarım kalınlığı ve sarım açısı değerleri bulunmuştur. Ağırlık eniyileme çalışmasının sonuçları bölüm 5.1’de verilmiştir. Tezin 4. bölümünde yer alan ek kriterlerden faydalanılarak bölüm 5.2’de optimum tasarım için maliyet formülasyonu oluşturulmuştur. Maliyet formülasyonunun sonuca etkisi değerlendirilmiş ve optimum tasarım belirlenmiştir. Bölüm 5.3’te ise ileriye dönük gerçekleştirilebilecek çalışmalar sunulmuştur.

5.1 Eniyileme Sonuçları

Fırlatma tüpü için sonlu elemanlar modeli ANSYS yazılımı kullanılarak oluşturulmuş ve tezin 3. bölümünde ele alınmıştır. Model oluşturulduktan sonra ANSYS yazılımı içerisinde yer alan *Design Exploration* modülü kullanılarak eniyileme problemi oluşturulmuştur. Oluşturulan problemin çözümünde farklı deney tasarımları, vekil modeller ve eniyileme yöntemleri kullanılmıştır.

Latin hiperküp örnekleme ve merkezi kompozit tasarım kullanılarak deney tasarımları oluşturulmuştur. İlgili deney tasarımları Ek 1, Ek 2 ve Ek 3’te verilmiştir.

Vekil modeller oluşturulurken kullanılan örnekleme noktalarına ek olarak 10 adet test noktası oluşturulmuştur. Test noktaları rastgele seçilmiş olup Ek 4’de paylaşılmıştır. Bu test noktaları vekil modellerin doğruluğunu değerlendirmek için kullanılmış ve test noktalarında vekil modellerin karekök ortalama hata değerleri hesaplanmıştır.

Karekök ortalama hatası (Root Mean Square Error, RMSE) tahmin edilen değerler ile gözlemlenen değerler arasındaki uzaklığın bulunmasını sağlayan bir istatistiksel yöntemdir. Genel olarak değer sifıra ne kadar yakınsa yanıt yüzeyinin kalitesi o kadar iyi olur. Karekök ortalama hatası matematiksel olarak Denklem (5.1)’de verilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5.1)$$

Denklem (5.1)'de N örnekleme noktalarının sayısı, y_i ifadesi i 'inci örnekleme noktasında çıktı parametrisinin değeri ve \hat{y}_i ifadesi i 'inci örnekleme noktasındaki regresyon modelinin değerini vermektedir [63]. Hesaplanan değerler Çizelge 5.1, Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.1: Cam/Epoksi Malzeme için Vekil Modellerin Hata Metrik Değerleri

Vekil Model Yöntemi	Hata Metriği	Cam/Epoksi (Latin Hiperküp Örnekleme)		Cam/Epoksi (Merkezi Kompozit Tasarım)	
		E.K.	Ağırlık	E.K.	Ağırlık
Karesel Polinom Yanıt Yüzey	RMSE	1,57	$1,14 \times 10^{-9}$	0,37	$7,03 \times 10^{-10}$
Kriging	RMSE	1,53	$9,07 \times 10^{-10}$	0,73	$6,24 \times 10^{-10}$
Parametrik Olmayan Regresyon	RMSE	1,47	$4,95 \times 10^{-4}$	0,78	$2,56 \times 10^{-4}$
Vekil Model Bütünü	RMSE	1,78	$1,14 \times 10^{-9}$	0,71	$7,03 \times 10^{-10}$
Yapay Sinir Ağı	RMSE	2,18	$1,22 \times 10^{-6}$	1,08	$1,17 \times 10^{-4}$

Çizelge 5.2: Karbon/Epoksi Malzeme için Vekil Modellerin Hata Metrik Değerleri

Vekil Model Yöntemi	Hata Metriği	Karbon/Epoksi (Latin Hiperküp Örnekleme)		Karbon/Epoksi (Merkezi Kompozit Tasarım)	
		E.K.	Ağırlık	E.K.	Ağırlık
Karesel Polinom Yanıt Yüzey	RMSE	0,78	$7,87 \times 10^{-10}$	0,23	$6,02 \times 10^{-10}$
Kriging	RMSE	0,65	$5,18 \times 10^{-10}$	1,09	$4,93 \times 10^{-10}$
Parametrik Olmayan Regresyon	RMSE	1,75	$4,01 \times 10^{-4}$	1,47	$2,17 \times 10^{-4}$
Vekil Model Bütünü	RMSE	0,75	$7,87 \times 10^{-10}$	0,28	$6,02 \times 10^{-10}$
Yapay Sinir Ağı	RMSE	0,55	$2,38 \times 10^{-6}$	0,37	$2,30 \times 10^{-6}$

Çizelge 5.3: Aramid/Epoksi Malzeme için Vekil Modellerin Metrik Değerleri

Vekil Model Yöntemi	Hata Metriği	Aramid/Epoksi (Latin Hiperküp Örnekleme)		Aramid/Epoksi (Merkezi Kompozit Tasarım)	
		E.K.	Ağırlık	E.K.	Ağırlık
Karesel Polinom Yanıt Yüzey	RMSE	1,09	$7,74 \times 10^{-10}$	0,13	$2,68 \times 10^{-10}$
Kriging	RMSE	0,89	$9,65 \times 10^{-10}$	5,53E-01	$4,70 \times 10^{-10}$
Parametrik Olmayan Regresyon	RMSE	1,33	$5,75 \times 10^{-4}$	0,51	$2,05 \times 10^{-4}$
Vekil Model Bütünü	RMSE	0,54	$7,74 \times 10^{-10}$	0,41	$5,01 \times 10^{-10}$
Yapay Sinir Ağı	RMSE	1,59	$2,04 \times 10^{-6}$	0,44	$3,01 \times 10^{-6}$

Çizelge 5.1, Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3 incelendiğinde yanıt yüzey, Kriging yönteminde örnekleme noktasından doğrudan geçtiği için belirleme katsayısı değeri her zaman 1 olmuştur. Diğer vekil model yöntemleri incelendiğinde belirleme katsayısının 1 veya 1'e yakın değerler olduğu gözlemlenmiştir. Vekil modeller için karekök ortalama hata değerleri incelendiğinde vekil modellerin sifıra yakın olduğu görülmektedir. Bu sebeple, herhangi bir vekil model çalışmadan çıkarılmamış ve tüm vekil modeller için eniyileme çalışması gerçekleştirilmiştir.

Malzemeler için farklı deney tasarımları, vekil modeller ve eniyileme yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar Ek 5, Ek 6 ve Ek 7'de paylaşılmıştır ("*" ile belirtilmiş olan noktalar, doğrulanmış aday noktalarını ifade etmektedir). Paylaşılan sonuçlardan yararlanılarak her bir vekil model yöntemi için fırlatma tüpünün ağırlığını minimize eden eniyileme yöntemi seçilmiştir. Seçilen eniyileme yöntemi sonucu elde edilen sarım açısı, sarım kalınlıkları, ağırlık ve emniyet katsayısı (E.K.) değerleri paylaşılmıştır. Latin hiperküp örnekleme kullanılarak ulaşılan en hafif yapılar Çizelge 5.4'de, merkezi kompozit tasarım kullanılarak ulaşılan en hafif yapılar ise Çizelge 5.8'de verilmiştir. Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.8 incelendiğinde latin hiperküp örnekleme ile oluşturulan yapıların, merkezi kompozit tasarım ile oluşturulan yapılara göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Vekil model yöntemleri kıyaslandığında karesel polinom yanıt yüzey ve Kriging yönteminin en hafif fırlatma tüpü yapısına ulaşmak için uygun yöntemler olduğu gözlemlenmiştir. Eniyileme yöntemleri incelendiğinde ise genetik algoritmanın ağırlık eniyileme probleminin çözümünde daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.4: Latin Hiperküp Örnekleme ile Elde Edilen En Hafif Yapılar

Cam/Epoksi Malzeme için Latin Hiperküp Örnekleme Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar					
Vekil Model Yöntemi	Karesel Polinom Yanıt Yüzey	Kriging	Parametrik Olmayan Regresyon	Vekil Model Bütünü	Yapay Sinir Ağı
Eniyileme Yöntemi	Seçkisiz Arama	GA	GA	Seçkisiz Arama	GA
θ (derece)	79,8	84,5	70,3	69,4	64,3
t_1 (mm)	0,32	0,30	0,22	0,20	0,45
t_2 (mm)	0,63	0,68	0,86	0,94	0,71
Ağırlık (g)	1244	1272	1300	1318	1580
E.K.	3,05	3,36	3,03	3,05	3,35
Karbon/Epoksi Malzeme için Latin Hiperküp Örnekleme Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar					
Vekil Model Yöntemi	Karesel Polinom Yanıt Yüzey	Kriging	Parametrik Olmayan Regresyon	Vekil Model Bütünü	Yapay Sinir Ağı
Eniyileme Yöntemi	GA	Seçkisiz Arama	GA	GA	GA
θ (derece)	87,8	85,5	84,8	85,6	83,8
t_1 (mm)	0,23	0,16	0,30	0,21	0,16
t_2 (mm)	0,36	0,52	0,31	0,42	0,55
Ağırlık (g)	668	679	728	679	700
E.K.	3,10	3,01	3,07	3,08	3
Aramid/Epoksi Malzeme için Latin Hiperküp Örnekleme Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar					
Vekil Model Yöntemi	Karesel Polinom Yanıt Yüzey	Kriging	Parametrik Olmayan Regresyon	Vekil Model Bütünü	Yapay Sinir Ağı
Eniyileme Yöntemi	Seçkisiz Arama	GA	GA	GA	Seçkisiz Arama
θ (derece)	89,4	81,7	80,8	82,3	81,9
t_1 (mm)	0,45	0,31	0,32	0,42	0,28
t_2 (mm)	0,49	0,68	0,70	0,50	0,76
Ağırlık (g)	969	915	928	945	921
E.K.	3,01	3,03	3,05	3,08	3,04

Çizelge 5.5: Merkezi Kompozit Tasarım ile Elde Edilen En Hafif Yapılar

Cam/Epoksi Malzeme için Merkezi Kompozit Tasarım Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar					
Vekil Model Yöntemi	Karesel Polinom Yanıt Yüzey	Kriging	Parametrik Olmayan Regresyon	Vekil Model Bütünü	Yapay Sinir Ağı
Eniyileme Yöntemi	GA	GA	GA	GA	Seçkisiz Arama
θ (derece)	87,4	70,7	70,6	78,3	76,8
t_1 (mm)	0,26	0,22	0,21	0,34	0,30
t_2 (mm)	0,76	0,92	0,89	0,62	0,70
Ağırlık (g)	1253	1337	1293	1274	1283
E.K.	3,08	3,20	3,02	3,08	3,17
Karbon/Epoksi Malzeme için Merkezi Kompozit Tasarım Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar					
Vekil Model Yöntemi	Karesel Polinom Yanıt Yüzey	Kriging	Parametrik Olmayan Regresyon	Vekil Model Bütünü	Yapay Sinir Ağı
Eniyileme Yöntemi	GA	GA	Seçkisiz Arama	Seçkisiz Arama	GA
θ (derece)	86,2	85,7	82,9	86,4	88,1
t_1 (mm)	0,16	0,37	0,25	0,20	0,30
t_2 (mm)	0,52	0,21	0,44	0,45	0,25
Ağırlık (g)	675	759	751	676	677
E.K.	3	3,04	3,06	3,08	3,03
Aramid/Epoksi Malzeme için Merkezi Kompozit Tasarım Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar					
Vekil Model Yöntemi	Karesel Polinom Yanıt Yüzey	Kriging	Parametrik Olmayan Regresyon	Vekil Model Bütünü	Yapay Sinir Ağı
Eniyileme Yöntemi	GA	GA	GA	Seçkisiz Arama	Seçkisiz Arama
θ (derece)	87,8	83,7	83,7	88,9	84
t_1 (mm)	0,27	0,22	0,21	0,33	0,21
t_2 (mm)	0,81	0,9	0,93	0,72	0,91
Ağırlık (g)	941	935	952	965	938
E.K.	3,01	3,02	3,07	3,05	3,02

5.2 Optimum Tasarımların Maliyet Formülasyonu

Kriterler, maliyet etkin bir fırlatma tüpü ortaya çıkarabilmek için uygulanmasına rağmen her bir kriter aynı önem derecesine sahip değildir. Çizelge 5.6'da ele alınan kriterlerin önemine göre yüzdesel olarak derecelendirme sunulmuştur. Yüzdesel derecelendirme, İzoreel firmasının görüşleri ve mevcut koşullar göz önüne alınarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.6: Fırlatma Tüpü Kriterleri Derecelendirme Tablosu

Kriterler	Yüzdesel Derecelendirme (%)
Ağırlık	45
Bulunabilirlik	25
Malzeme Maliyeti	15
Üretilebilirlik	15
TOPLAM	100

Sonlu elemanlar modeli oluşturularak ağırlık eniyileme çalışması gerçekleştirilmiştir ve cam/epoksi malzeme kullanılan fırlatma tüpü için 1244 gr, karbon/epoksi malzeme kullanılan fırlatma tüpü için 668 gr ve aramid/epoksi malzeme kullanılan fırlatma tüpü için 915 gr değerleri elde edilmiştir.

Malzeme maliyeti kriteri için birim fiyat ile elde edilen ağırlık sonuçları çarpılmış ve elde edilen sonuçlar alternatif malzemeler için 10 üzerinden puanlanmıştır. Çizelge 5.7'da malzeme maliyeti kriteri için puanlama tablosu sunulmuştur. Çizelge 5.7 incelendiğinde birim maliyet olarak cam/epoksi malzemenin daha ucuz olduğu, ancak karbon/epoksi fırlatma tüpünün daha hafif bir yapıda olması sebebiyle avantaja sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.7: Malzeme Maliyeti Kriteri

Alternatifler	Ağırlık (kg)	Birim Fiyat (€/kg) [62]	Malzeme Maliyeti (€)	Puan
Cam/Epoksi	1,244	20	24,88	8,1
Karbon/Epoksi	0,668	30	20,04	10
Aramid/Epoksi	0,915	50	45,75	4,4

Ağırlık eniyileme çalışması sonucunda elde edilen ağırlık sonuçları karşılaştırılmış ve 10 üzerinden puanlanmıştır. Ağırlık kriteri için puanlama tablosu Çizelge 5.8'de sunulmuştur.

Çizelge 5.8: Ağırlık Kriteri

Alternatifler	Karşılaştırma	Puan
Cam/Epoksi	Analiz sonucu yüksek ağırlık	5,4
Karbon/Epoksi	Analiz sonucu en düşük ağırlık	10
Aramid/Epoksi	Analiz sonucu nispeten düşük ağırlık	7,3

Çizelge 4.1, Çizelge 4.3, Çizelge 5.7 ve Çizelge 5.8’de bulunabilirlik üretilebilirlik, malzeme maliyeti ve ağırlık kriterleri için 10 üzerinden puanlama gerçekleştirilmiştir. Böylece, her bir malzemenin kriterler bazında olumlu ve olumsuz yanları açığa çıkarılmıştır. Ek olarak, Çizelge 5.6’dan da yararlanılarak malzemelerin kriterlere göre toplam puanlaması hesaplanmış ve Çizelge 5.9’da sunulmuştur.

Çizelge 5.9: Malzemelerin Kriterlere Göre Toplam Puanlaması

Alternatif Malzeme	Ağırlık	Bulunabilirlik	Malzeme Maliyeti	Üretilebilirlik	Ağırlıklı Toplam Puan
Cam/Epoksi	$0,45 \times 5,4 = 2,43$	$0,25 \times 10 = 2,5$	$0,15 \times 8,1 = 1,22$	$0,15 \times 10 = 1,5$	7,65
Karbon/Epoksi	$0,45 \times 10 = 4,5$	$0,25 \times 8 = 2$	$0,15 \times 10 = 1,5$	$0,15 \times 10 = 1,5$	9,50
Aramid/Epoksi	$0,45 \times 7,3 = 3,29$	$0,25 \times 6 = 1,5$	$0,15 \times 4,4 = 0,66$	$0,15 \times 7 = 1,05$	6,50

Çizelge 5.9 incelendiğinde en yüksek değeri 9,5 puan ile karbon/epoksi malzemenin aldığı görülmektedir. Bu sebeple, gerçekleştirilen kriter analizi sonucuna göre karbon/epoksi malzemenin kullanılması ile fırlatma tüpü için optimum tasarım sağlanmaktadır. Karbon/epoksi fırlatma tüpü için t_1 değeri 0,23 mm, t_2 değeri 0,36 mm ve θ için 87,8 derecedir. Bu değerler kullanılarak elde edilen fırlatma tüpünün ağırlığı 668 gramdır.

5.3 İleriye Yönelik Çalışmalar

Bu çalışmada, taşınabilir hava savunma füze sisteminde kullanılan fırlatma tüpü için farklı deney tasarımları, vekil modeller ve eniyileme yöntemleri kullanılarak ağırlık eniyilemesi gerçekleştirilmiş ve ek kriterler de göz önüne alınarak malzeme seçimi, sarım açısı ve sarım kalınlığı değerleri belirlenmiştir. Bu çalışma, cam ve

karbon elyaf karışımı gibi hibrit bir malzeme ile fırlatma tüpü analizlerinin gerçekleştirilmesi ile genişletilebilir.

Gerçekleştirilen çalışmada incelenen kompozit malzemeler için 3 katman oluşturulmuştur. Ağırlık eniyileme çalışması, katman sayısı sabit tutularak gerçekleştirilmiştir. Katman sayısı azaltılıp artırılarak çalışmaya eklenip katman sayısının etkisi değerlendirilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] "Global Composite Materials Market Size, Trends | Industry Report, 2025", *Grandviewresearch.com*, 2020. [Online]. Available: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/composite-materials-market>. [Accessed: 12- Jan- 2020].
- [2] **D. Rajak, D. Pagar, R. Kumar and C. Pruncu**, "Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials", *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 6354-6374, 2019. Available: 10.1016/j.jmrt.2019.09.068.
- [3] **A. Sharma, R. Bhandari, A. Aherwar and R. Rimašauskienė**, "Matrix materials used in composites: A comprehensive study", *Materials Today: Proceedings*, vol. 21, pp. 1559-1562, 2019. Available: 10.1016/j.matpr.2019.11.086.
- [4] "A Review of the Global Composites Market and Turkish Composites Market", *Reinforcer.com*. [Online]. Available: <https://www.reinforcer.com/en/category/detail/A-Review-of-the-Global-Composites-Market-and-Turkish-Composites-Market/61/350/0>. [Accessed: 12- Jan- 2020].
- [5] "MANPADS at a Glance | Arms Control Association", *Armscontrol.org*, 2013. [Online]. Available: <https://www.armscontrol.org/factsheets/manpads>. [Accessed: 12- Jan- 2020].
- [6] "Missile Launch Tubes for military applications", *General Dynamics Ordnance and Tactical Systems*. [Online]. Available: <https://www.gd-ots.com/missiles-and-rockets/missile-components/launch-tubes/>. [Accessed: 12- Jan- 2020].
- [7] "SA-16 Gimlet 9K310 Igla-1 MANPADS man-portable missile data | Russia Russian army light heavy weapons UK | Russia Russian army military equipment vehicles UK", *Armyrecognition.com*. [Online]. Available: https://www.armyrecognition.com/russia_russian_army_light_heavy_weapons_uk/sa-16_gimlet_9k310_igla-1_man-portable_missile_technical_data_sheet_specifications_pictures.html. [Accessed: 31- Mar- 2020].
- [8] "9K338 Igla-S Man-Portable Air Defence System", *Kbm.ru*. [Online]. Available: <https://www.kbm.ru/en/production/pzrk/361.print>. [Accessed: 31- Mar- 2020].
- [9] "Composite Rocket and Missile Launch Tubes "Gd-ots.com. [Online]. Available: <https://www.gd-ots.com/wp-content/uploads/2017/11/Composite-Rocket-and-Missile-Launch-Tubes.pdf>. [Accessed: 31- Mar- 2020].
- [10] "Anti Tank Missile FGM 148 Javelin 3d model - CGStudio", *Cgstudio.com*. [Online]. Available: <https://www.cgstudio.com/3d-model/anti-tank-missile-fgm-148-javelin-562757>. [Accessed: 31- Mar- 2020].
- [11] "FIM-92 Stinger Man-Portable Air Defense Missile System | Military-Today.com", *Military-today.com*. [Online]. Available: <http://www.military-today.com/missiles/stinger.htm>. [Accessed: 12- Jan- 2020].
- [12] **F. Viana, C. Gogu and R. Haftka**, "Making the Most Out of Surrogate Models: Tricks of the Trade", *Volume 1: 36th Design Automation Conference, Parts A and B*, 2010. Available: 10.1115/detc2010-28813.

- [13] **R. Barton**, "Metamodels for simulation input-output relations", *Proceedings of the 24th conference on Winter simulation - WSC '92*, 1992. Available: 10.1145/167293.167352.
- [14] **G. Wang**, "Adaptive Response Surface Method Using Inherited Latin Hypercube Design Points", *Journal of Mechanical Design*, vol. 125, no. 2, pp. 210-220, 2003. Available: 10.1115/1.1561044.
- [15] "What Is Design of Experiments (DOE)? | ASQ", *Asq.org*. [Online]. Available: <https://asq.org/quality-resources/design-of-experiments>. [Accessed:]
- [16] **D. Montgomery, L. Custer and D. McCarville**, *Design and analysis of experiments*. New York: Wiley, 2009.
- [17] **M. D. Mckay, R. J. Beckman, and W. J. Conover**, "A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code", *Technometrics*, vol. 42, no. 1, pp. 55–61, 2000. Available: 10.2307/1271432.
- [18] **R. L. Iman, J. C. Helton, and J. E. Campbell**, "An Approach to Sensitivity Analysis of Computer Models: Part I—Introduction, Input Variable Selection and Preliminary Variable Assessment", *Journal of Quality Technology*, vol. 13, no. 3, pp. 174–183, Jul. 1981. Available: 10.1080/00224065.1981.11978748.
- [19] **J. Sacks, W. J. Welch, T. J. Mitchell, and H. P. Wynn**, "Design and Analysis of Computer Experiments", *Statistical Science*, vol. 4, no. 4, pp. 409–423, 1989. Available: <https://www.jstor.org/stable/2245858>.
- [20] **Y. A. Yücesan**, "Uçak Gövdesi Kiriş Yapılarında Kullanılan Hafifletme Deliklerinin Şekil Eniyilemesi", 2018. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.11851/2200>
- [21] **M. Balaban**, "Regresyon ve Kriging Meta-Modelleri için Kullanılan Deney Tasarımı Yöntemleri", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 7, no. 3, pp. 1444–1455, 2019. Available: 10.29130/dubited.528940.
- [22] **M. P. Iwundu**, "The Effects of Addition of n_c Center Points on the Optimality of Box-Benhken and Box-Wilson Second-Order Designs", *Int. J. Probab. Stat.*, vol. 6, no. 2, pp. 20–32, 2017. Available: 10.5923/j.ijps.20170602.02.
- [23] "ANSYS Documentation - DOE Types". [Online]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v194/dx_opt_tut/tutr_dx_DOE_types.html.
- [24] **R. Perrone, F. P. Wieland, J. Liu, B. G. Lawson, D. M. Nicol**, "Guidelines for Designing Simulation Experiments", *Proc. 2006 Winter Simul. Conf.*, pp. 47–57, 2006. Available: 10.1109/WSC.2006.323037
- [25] **D. B. Gürel**, "Cevap Yüzeyi Yöntemi Kullanılarak Stevia Özü İçeren Düşük Kalorili Böğürtlen Reçeli Formülasyonunun Belirlenmesi", 2016. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.11776/1222>.
- [26] **R. H. Myers and D. Montgomery**, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. Toronto: Wiley, 1995.
- [27] **A. Bozan**, "Optimization of Laser Welding Seam Geometry Using Response Surface Methodology (RSM)", 2012. Available: <http://hdl.handle.net/11527/4512>.
- [28] **M. Chih**, "A more accurate second-order polynomial metamodel using a pseudo-random number assignment strategy", *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 64, no. 2, pp. 198–207, 2013. Available: 10.1057/jors.2012.34.

- [29] **N. Cressie**, "The origins of kriging", *Math. Geol.*, vol. 22, no. 3, pp. 239–252, 1990. Available: 10.1007/BF00889887.
- [30] **B. Utku**, "Vekil Modeller Kullanılarak Etkin Tolerans Analizi", 2014. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.11851/986>.
- [31] **D. Bekar**, "Çift Fazlı Çeliklerde Şekil Verme Operasyonları Sonucunda Oluşan Geri Yaylanmanın Gürbüz Optimizasyonu", 2011. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.11851/291>.
- [32] "ANSYS Documentation - Kriging Algorithms". [Online]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v192/wb_dx/dxTheoKriging.html.
- [33] "ANSYS Documentation - Non Parametric Regression". [Online]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v192/wb_dx/dxUsingNonParaReg.html.
- [34] "ANSYS Documentation - Non Parametric Regression Theory". [Online]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v192/wb_dx/dxTheoNonParaReg.html.
- [35] "ANSYS Documentation - Genetic Aggregation". [Online]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v192/wb_dx/dxTheoGeneticAgg.html.
- [36] **E. Acar and M. Rais-Rohani**, "Ensemble of metamodels with optimized weight factors", *Structural Multidisciplinary Optimization*, vol. 37, no. 3, pp. 279–294, 2009. Available: 10.1007/s00158-008-0230-y.
- [37] **E. Acar**, "Various approaches for constructing an ensemble of metamodels using local measures", *Structural Multidisciplinary Optimization*, vol. 42, no. 6, pp. 879–896, 2010. Available: 10.1007/s00158-010-0520-z.
- [38] "ANSYS Documentation - Neural Network" [Online]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v192/wb_dx/dxUsingNeuralNetwork.html?q=neural%20network
- [39] **E. Wright and R. Bellman**, "Mathematical Optimization Techniques", *The Mathematical Gazette*, vol. 49, no. 369, p. 333, 1965. Available: 10.2307/3612902.
- [40] "ANSYS Documentation - Screening". [Online]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v192/wb_dx/dxBEMtemp9.html
- [41] **X.-S. Yang**, *Nature-Inspired Optimization Algorithms*. Elsevier, 2014.
- [42] **D. Beasley, D. R. Bull, and R. R. Martin**, "An overview of genetic algorithms : Part 1, fundamentals", *University Computing.*, vol. 2, no. 15, pp. 1–16, 1993. Available: <http://mat.uab.cat/~alseda/MasterOpt/Beasley93GA1.pdf>.
- [43] **B. Güracar**, "Genetik Algoritmalar". [Online]. Available: http://kergun.baun.edu.tr/20172018Guz/YZ_Sunumlar/Genetik_Algoritmalar_Busra_Guracar.pdf.
- [44] "ANSYS Documentation - Genetic Algorithm". [Online]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v192/wb_dx/dxBEMtemp11.html.
- [45] **K. Schittkowski**, "Nonlinear Programming Software," pp. 1–38, 2015.
- [46] "ERYX Lançeri", *Bariselektrik.com.tr*. [Online]. Available: <http://www.bariselektrik.com.tr/projeler>. [Accessed: 21- Dec- 2020].

- [47] "Composites Pin Board - Failure Indices and Strength Ratios | Helius Composite | Autodesk Knowledge Network", *Knowledge.autodesk.com*. [Online]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/support/helius-composite/learn-explore/caas/simplecontent/content/composites-pin-board-failure-indices-and-strength-ratios.html>. [Accessed: 16- Feb- 2020].
- [48] **V. Vasiliev and E. Morozov**, "Mechanics of a unidirectional ply", *Advanced Mechanics of Composite Materials*, pp. 53-124, 2013. Available: 10.1016/b978-0-08-098231-1.00003-0.
- [49] **R. Van Wagenen**, "A Guide to Structural Factors for Advanced Composites Used on Spacecraft", 1989. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19920011566>
- [50] **I. O. Daniel**, *Engineering Mechanics of Composite Materials*. Oxford University Press, 2006.
- [51] "E-Glass Fiber, Generic", *Matweb.com*. [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=d9c18047c49147a2a7c0b0bb1743e812>. [Accessed: 27- May- 2020].
- [52] "Overview of materials for PCTA", *Matweb.com*. [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=39e40851fc164b6c9bda29d798bf3726&ckck=1>. [Accessed: 27- May- 2020].
- [53] "DuPont™ Kevlar® 49 Aramid Fiber", *Matweb.com*. [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=77b5205f0dcc43bb8cbe6fee7d36cbb5>. [Accessed: 27- May- 2020].
- [54] "Bahrain – Missile Defense Advocacy Alliance", *Missiledefenseadvocacy.org*. [Online]. Available: https://missiledefenseadvocacy.org/intl_cooperation/bahrain.
- [55] "PCB Model 261A03", *Pcb.com*. [Online]. Available: <https://www.pcb.com/products?m=261A03>. [Accessed: 29- Mar- 2020].
- [56] **P. Xu, J. Y. Zheng, and P. F. Liu**, "Finite element analysis of burst pressure of composite hydrogen storage vessels", *Mater. Des.*, vol. 30, no. 7, pp. 2295–2301, 2009. Available: 10.1016/j.matdes.2009.03.006.
- [57] **H. Y. Yeh, H. C. Murphy, and H. L. Yeh**, "An investigation of failure criterion for new orthotropic ceramic matrix composite materials", *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 28, no. 4, pp. 441–459, 2009. Available: 10.1177/0731684407085429.
- [58] "ANSYS Documentation - SHELL181". [Online]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v194/ans_elem/Hlp_E_SHELL181.html
- [59] "The fiber", *Compositesworld.com*. [Online]. Available: <https://www.compositesworld.com/articles/the-fiber>. [Accessed: 18- Oct- 2020].
- [60] "DowAksa", *Akkok.com.tr*. [Online]. Available: <http://www.akkok.com.tr/Sektorler/Kimya/Pages/DowAksa.aspx>.
- [61] "Fırlatma Tüpü Kavramsal Tasarım Raporu", İzoreel (Hizmete Özel).
- [62] **E. Tempelman, H. Sherclif and N. Eyben**, *Manufacturing and Design: Understanding the Principles of How Things are Made*. Elsevier Science & Technology, 2014.
- [63] "ANSYS Documentation - Quality Metrics for Response Surfaces". [Online]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v192/wb_dx/dx_gofcriteria.html

EKLER

Ek 1: Cam/epoksi malzeme kullanılarak oluşturulan deney tasarımları

Çizelge Ek 1.1: Latin hiperküp örnekleme kullanılarak elde edilen sonuçlar

Latin Hiperküp Örnekleme (Cam/Epoksi)	Sarım Açısı (°)	0° Sarım Açılı Katmanlar için Sarım Kalınlığı (mm)	Parametrik Sarım Açılı Katman için Sarım Kalınlığı (mm)	Ağırlık (kg)	Emniyet Katsayısı (minimum)
1	1,67	1,05	1,61	3,66	5,57
2	5,00	0,56	0,14	1,23	1,41
3	8,33	1,26	1,54	4,00	5,46
4	11,67	0,21	1,40	1,79	2,36
5	15,00	1,96	0,35	4,21	5,44
6	18,33	0,98	1,05	2,96	4,52
7	21,67	0,77	1,75	3,24	5,29
8	25,00	1,33	1,96	4,56	5,68
9	28,33	1,47	1,47	4,35	5,80
10	31,67	0,28	1,19	1,72	2,48
11	35,00	1,75	0,49	3,93	5,85
12	38,33	0,70	0,56	1,92	2,91
13	41,67	1,82	0,70	4,28	6,06
14	45,00	0,63	0,21	1,44	1,94
15	48,33	1,61	0,42	3,59	6,33
16	51,67	0,84	0,84	2,48	4,84
17	55,00	0,91	1,89	3,66	8,55
18	58,33	1,12	1,26	3,45	8,37
19	61,67	0,14	0,28	0,54	0,56
20	65,00	1,19	1,82	4,14	9,20
21	68,33	1,54	1,33	4,35	8,43
22	71,67	0,42	0,63	1,44	3,28

Çizelge Ek 1.1: Latin hiperküp örnekleme kullanılarak elde edilen sonuçlar (devam)

Latin Hiperküp Örnekleme (Cam/Epoksi)	Sarım Açısı (°)	0° Sarım Açılı Katmanlar için Sarım Kalınlığı (mm)	Parametrik Sarım Açılı Katman için Sarım Kalınlığı (mm)	Ağırlık (kg)	Emniyet Katsayısı (minimum)
23	75,00	1,40	0,91	3,66	8,36
24	78,33	1,89	0,77	4,49	7,33
25	81,67	1,68	1,12	4,42	8,24
26	85,00	0,35	0,98	1,65	5,31
27	88,33	0,49	1,68	2,62	11,79

Çizelge Ek 1.2: Merkezi kompozit tasarım kullanılarak elde edilen sonuçlar

Merkezi Kompozit Tasarım (Cam/Epoksi)	Sarım Açısı (°)	0° Sarım Açılı Katmanlar için Sarım Kalınlığı (mm)	Parametrik Sarım Açılı Katman için Sarım Kalınlığı (mm)	Ağırlık (kg)	Emniyet Katsayısı (minimum)
1	0,00	1,05	1,05	3,10	4,53
2	8,41	0,28	0,28	0,82	0,78
3	8,41	1,82	0,28	3,86	5,52
4	8,41	0,28	1,82	2,34	3,30
5	8,41	1,82	1,82	5,39	5,17
6	45,00	1,05	1,05	3,10	6,00
7	45,00	0,10	1,05	1,23	1,68
8	45,00	2,00	1,05	4,97	6,19
9	45,00	1,05	0,10	2,17	3,08
10	45,00	1,05	2,00	4,04	7,25
11	81,59	0,28	0,28	0,82	1,36
12	81,59	1,82	0,28	3,86	6,38
13	81,59	0,28	1,82	2,34	7,84
14	81,59	1,82	1,82	5,39	8,96
15	90,00	1,05	1,05	3,10	9,15

Ek 2: Karbon/epoksi malzeme kullanılarak oluşturulan deney tasarımları

Çizelge Ek 2.1: Latin hiperküp örnekleme kullanılarak elde edilen sonuçlar

Latin Hiperküp Örnekleme (Karbon/Epoksi)	Sarım Açısı (°)	0° Sarım Açılı Katmanlar için Sarım Kalınlığı (mm)	Parametrik Sarım Açılı Katman için Sarım Kalınlığı (mm)	Ağırlık (kg)	Emniyet Katsayısı (minimum)
1	1,67	0,28	1,40	1,56	2,14
2	5,00	1,40	0,35	2,52	3,68
3	8,33	1,19	0,77	2,52	3,73
4	11,67	0,98	1,89	3,08	4,86
5	15,00	0,63	1,61	2,30	3,50
6	18,33	1,68	1,96	4,27	7,34
7	21,67	0,14	0,21	0,38	0,44
8	25,00	0,21	1,05	1,17	1,70
9	28,33	0,56	0,91	1,62	2,59
10	31,67	1,75	0,56	3,25	5,22
11	35,00	0,84	1,19	2,30	4,03
12	38,33	1,89	1,26	4,04	7,37
13	41,67	1,05	0,49	2,07	3,55
14	45,00	1,61	0,14	2,69	4,13
15	48,33	1,26	1,33	3,08	6,48
16	51,67	1,82	1,47	4,10	9,24
17	55,00	1,54	0,28	2,69	5,13
18	58,33	1,96	0,63	3,65	8,33
19	61,67	0,91	1,68	2,80	7,67
20	65,00	1,47	0,70	2,91	7,85
21	68,33	1,33	1,54	3,36	10,47
22	71,67	0,42	1,12	1,56	5,13
23	75,00	1,12	1,82	3,25	12,27

Çizelge Ek 2.1: Latin hiperküp örnekleme kullanılarak elde edilen sonuçlar (devam)

Latin Hiperküp Örnekleme (Cam/Epoksi)	Sarım Açısı (°)	0° Sarım Açılı Katmanlar için Sarım Kalınlığı (mm)	Parametrik Sarım Açılı Katman için Sarım Kalınlığı (mm)	Ağırlık (kg)	Emniyet Katsayısı (minimum)
24	78,33	0,49	0,84	1,45	5,53
25	81,67	0,70	0,98	1,90	8,14
26	85,00	0,77	1,75	2,63	13,73
27	88,33	0,35	0,42	0,89	4,26

Çizelge Ek 2.2: Merkezi kompozit tasarım kullanılarak elde edilen sonuçlar

Merkezi Kompozit Tasarım (Karbon/Epoksi)	Sarım Açısı (°)	0° Sarım Açılı Katmanlar için Sarım Kalınlığı (mm)	Parametrik Sarım Açılı Katman için Sarım Kalınlığı (mm)	Ağırlık (kg)	Emniyet Katsayısı (minimum)
1	0,00	1,05	1,05	2,52	3,66
2	8,41	0,28	0,28	0,67	0,83
3	8,41	1,82	0,28	3,14	4,78
4	8,41	0,28	1,82	1,90	2,73
5	8,41	1,82	1,82	4,37	7,45
6	45,00	1,05	1,05	2,52	4,90
7	45,00	0,10	1,05	1,00	1,69
8	45,00	2,00	1,05	4,04	7,79
9	45,00	1,05	0,10	1,76	2,61
10	45,00	1,05	2,00	3,28	6,86
11	81,59	0,28	0,28	0,67	2,41
12	81,59	1,82	0,28	3,14	9,79
13	81,59	0,28	1,82	1,90	9,20
14	81,59	1,82	1,82	4,37	19,67
15	90,00	1,05	1,05	2,52	13,44

Ek 3: Aramid/epoksi malzeme kullanılarak oluşturulan deney tasarımları

Çizelge Ek 3.1: Latin hiperküp örnekleme kullanılarak elde edilen sonuçlar

Latin Hiperküp Örnekleme (Aramid/Epoksi)	Sarım Açısı (°)	0° Sarım Açılı Katmanlar için Sarım Kalınlığı (mm)	Parametrik Sarım Açılı Katman için Sarım Kalınlığı (mm)	Ağırlık (kg)	Emniyet Katsayısı (minimum)
1	1,67	0,28	1,40	1,37	0,98
2	5,00	1,40	0,35	2,21	0,95
3	8,33	1,19	0,77	2,21	0,95
4	11,67	0,98	1,89	2,70	0,90
5	15,00	0,63	1,61	2,01	0,96
6	18,33	1,68	1,96	3,73	0,87
7	21,67	0,14	0,21	0,33	0,17
8	25,00	0,21	1,05	1,02	0,76
9	28,33	0,56	0,91	1,42	0,93
10	31,67	1,75	0,56	2,85	0,90
11	35,00	0,84	1,19	2,01	0,93
12	38,33	1,89	1,26	3,54	0,90
13	41,67	1,05	0,49	1,81	0,95
14	45,00	1,61	0,14	2,35	0,95
15	48,33	1,26	1,33	2,70	1,03
16	51,67	1,82	1,47	3,58	1,08
17	55,00	1,54	0,28	2,35	1,03
18	58,33	1,96	0,63	3,19	1,13
19	61,67	0,91	1,68	2,45	1,59
20	65,00	1,47	0,70	2,55	1,43
21	68,33	1,33	1,54	2,94	2,15
22	71,67	0,42	1,12	1,37	2,38
23	75,00	1,12	1,82	2,85	3,91

Çizelge Ek 3.1: Latin hiperküp örnekleme kullanılarak elde edilen sonuçlar (devam)

Latin Hiperküp Örnekleme (Cam/Epoksi)	Sarım Açısı (°)	0° Sarım Açılı Katmanlar için Sarım Kalınlığı (mm)	Parametrik Sarım Açılı Katman için Sarım Kalınlığı (mm)	Ağırlık (kg)	Emniyet Katsayısı (minimum)
24	78,33	0,49	0,84	1,27	3,61
25	81,67	0,70	0,98	1,66	4,30
26	85,00	0,77	1,75	2,30	5,31
27	88,33	0,35	0,42	0,78	2,41

Çizelge Ek 3.2: Merkezi kompozit tasarım kullanılarak elde edilen sonuçlar

Merkezi Kompozit Tasarım (Aramid/Epoksi)	Sarım Açısı (°)	0° Sarım Açılı Katmanlar için Sarım Kalınlığı (mm)	Parametrik Sarım Açılı Katman için Sarım Kalınlığı (mm)	Ağırlık (kg)	Emniyet Katsayısı (minimum)
1	0,00	1,05	1,05	2,21	0,95
2	8,41	0,28	0,28	0,58	0,37
3	8,41	1,82	0,28	2,75	0,91
4	8,41	0,28	1,82	1,66	0,97
5	8,41	1,82	1,82	3,83	0,83
6	45,00	1,05	1,05	2,21	0,98
7	45,00	0,10	1,05	0,88	0,65
8	45,00	2,00	1,05	3,54	0,94
9	45,00	1,05	0,10	1,54	0,97
10	45,00	1,05	2,00	2,87	1,03
11	81,59	0,28	0,28	0,58	1,18
12	81,59	1,82	0,28	2,75	1,61
13	81,59	0,28	1,82	1,66	4,94
14	81,59	1,82	1,82	3,83	4,46
15	90,00	1,05	1,05	2,21	4,83

EK 4: Vekil modellerin doğruluğunu hesaplamak için kullanılan test noktaları

Çizelge Ek 4.1: Cam/epoksi malzeme için kullanılan test noktaları

Cam/Epoksi			
Test Noktası	t ₁ (mm)	t ₂ (mm)	θ (°)
1	0,11	0,12	86,09
2	1,06	0,10	1,75
3	0,15	1,97	65,94
4	1,42	1,06	1,14
5	1,99	0,32	50,85
6	1,98	1,31	25,76
7	1,99	0,69	88,23
8	0,16	1,15	51,64
9	0,90	1,93	1,17
10	1,77	1,96	41,40

Çizelge Ek 4.2: Karbon/epoksi malzeme için kullanılan test noktaları

Karbon/Epoksi			
Test Noktası	t ₁ (mm)	t ₂ (mm)	θ (°)
1	1,95	0,63	0,48
2	1,97	1,88	0,30
3	0,14	1,45	29,45
4	0,69	0,38	89,36
5	0,18	0,10	20,34
6	1,71	1,99	60,06
7	1,08	1,90	88,83
8	0,87	0,18	48,61
9	1,02	1,15	89,30
10	0,28	0,75	39,62

Çizelge Ek 4.3: Aramid/epoksi malzeme için kullanılan test noktaları

Aramid/Epoksi			
Test Noktası	t ₁ (mm)	t ₂ (mm)	θ (°)
1	1,99	1,99	89,33
2	0,11	2,00	47,35
3	1,98	1,14	89,31
4	1,95	0,12	89,49
5	1,94	1,03	0,92
6	1,15	0,13	86,76
7	0,35	0,12	55,69
8	0,73	0,12	2,87
9	0,11	1,98	81,21
10	1,45	1,46	1,27

EK 5: Cam/epoksi malzeme kullanılarak elde edilen ağırlık eniyileme sonuçları

Çizelge Ek 5.1:Karesel polinom yanıt yüzey yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar

Karesel Polinom Yanıt Yüzey Yöntemi (Latin Hiperküp Örneklem)							Karesel Polinom Yanıt Yüzey Yöntemi (Merkezi Kompozit Tasarım)						
Cam/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*	Cam/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*
Seçkisiz Arama							Seçkisiz Arama						
θ	69		69,4		79,8		θ	59,6		71,5		64,6	
t_1	0,38		0,21		0,32		t_1	0,23		0,16		0,18	
t_2	0,71		0,94		0,63		t_2	1,16		1,15		1,23	
Ağırlık (g)	1455	1455	1339	1339	1244	1244	Ağırlık (g)	1600	1600	1455	1455	1561	1561
Emniyet Katsayısı	3,09	3,29	3,06	3,13	3,05	3,05	Emniyet Katsayısı	3,07	3,37	3,2	2,96	3,18	3,47
Genetik Algoritma							Genetik Algoritma						
θ	70,7		67,2		67,2		θ	87,3		85,1		87,4	
t_1	0,48		0,47		0,47		t_1	0,26		0,47		0,26	
t_2	0,53		0,58		0,66		t_2	0,76		0,49		0,76	
Ağırlık (g)	1484	1484	1505	1505	1565	1565	Ağırlık (g)	1268	1268	1425	1425	1253	1253
Emniyet Katsayısı	3,13	3,19	3,03	3,15	3,25	3,41	Emniyet Katsayısı	3,12	3,49	3,03	3,36	3,41	3,08
Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama							Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama						
θ	45		90		90		θ	45		90		80,8	
t_1	1,05		0,27		0,1		t_1	1,05		0,1		0,43	
t_2	1,05		0,75		0,76		t_2	1,05		0,93		0,95	
Ağırlık (g)	3103	3103	1279	1279	944	944	Ağırlık (g)	3103	3103	1112	1112	1779	1779
Emniyet Katsayısı	6,02	5,99	4,05	3,53	3	1,09	Emniyet Katsayısı	5,78	5,99	3	1,38	4,63	5,53

Çizelge Ek 5.2: Kriging yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar

Kriging (Latin Hiperküp Örnekleme)							Kriging (Merkezi Kompozit Tasarım)						
Cam/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*	Cam/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*
Seçkisiz Arama							Seçkisiz Arama						
θ	63,47		73,5		73,6		θ	69		69		77,9	
t_1	0,2		0,21		0,24		t_1	0,35		0,37		0,28	
t_2	1,04		0,94		0,94		t_2	0,71		0,71		0,67	
Ağırlık (g)	1415	1415	1335	1335	1391	1391	Ağırlık (g)	1382	1382	1428	1428	1213	1213
Emniyet Katsayısı	3,13	3,01	3,42	3,24	3,53	3,6	Emniyet Katsayısı	3,24	3,09	3,37	3,22	3,21	2,94
Genetik Algoritma							Genetik Algoritma						
θ	84,5		74		72,7		θ	67,3		67		70,7	
t_1	0,3		0,3		0,29		t_1	0,24		0,21		0,22	
t_2	0,68		0,72		0,79		t_2	0,92		0,93		0,92	
Ağırlık (g)	1272	1272	1314	1314	1352	1352	Ağırlık (g)	1387	1387	1336	1336	1337	1337
Emniyet Katsayısı	3,93	3,36	3,14	3,17	3,13	3,29	Emniyet Katsayısı	3,42	3,16	3,26	2,96	3,48	3,2
Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama							Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama						
θ	45		90		90		θ	45		90		81,6	
t_1	1,05		0,1		0,1		t_1	1,05		0,1		0,18	
t_2	1,05		0,51		0,52		t_2	1,05		0,68		0,76	
Ağırlık (g)	3103	3103	699	699	712	712	Ağırlık (g)	3103	3103	868	868	1110	1110
Emniyet Katsayısı	6,26	5,99	3	0,73	3,04	0,75	Emniyet Katsayısı	5,99	5,99	3	0,98	3,3	2,2

Çizelge Ek 5.3: Parametrik olmayan regresyon yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar

Parametrik Olmayan Regresyon (Latin Hiperküp Örnekleme)							Parametrik Olmayan Regresyon (Merkezi Kompozit Tasarım)						
Cam/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*	Cam/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*
Seçkisiz Arama							Seçkisiz Arama						
θ	84,6		69		57,1		θ	53,7		87,4		74,9	
t_1	0,38		0,38		0,5		t_1	0,28		0,4		0,31	
t_2	0,49		0,71		0,74		t_2	1,1		0,55		0,8	
Ağırlık (g)	1431	1234	1403	1455	1664	1724	Ağırlık (g)	1378	1641	1138	1330	1110	1401
Emniyet Katsayısı	3,18	2,84	3,18	3,29	3,23	3,33	Emniyet Katsayısı	3,16	3,11	3,28	3,28	3,32	3,59
Genetik Algoritma							Genetik Algoritma						
θ	70,3		66,9		73,9		θ	70,6		70,1		68,9	
t_1	0,22		0,58		0,25		t_1	0,21		0,22		0,21	
t_2	0,86		0,38		0,86		t_2	0,89		0,89		0,91	
Ağırlık (g)	1358	1300	1508	1520	1385	1327	Ağırlık (g)	1106	1293	1110	1305	1116	1302
Emniyet Katsayısı	3,33	3,03	3,02	2,81	3,56	3,33	Emniyet Katsayısı	3,06	3,02	3,06	3,04	3,02	2,96
Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama							Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama						
θ	45		86,3		75,6		θ	45		78,5		74,4	
t_1	1,05		0,53		0,16		t_1	1,05		0,31		0,3	
t_2	1,05		0,44		0,81		t_2	1,05		0,69		0,77	
Ağırlık (g)	3174	3103	1696	1489	1262	1105	Ağırlık (g)	3103	3103	1027	1296	1047	1338
Emniyet Katsayısı	6	5,99	3,89	3,36	3	2,01	Emniyet Katsayısı	5,92	5,99	3	3,27	3,04	3,31

Çizelge Ek 5.4: Vekil model bütünü yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar

Vekil Model Bütünü (Latin Hiperküp Örneklem)							Vekil Model Bütünü (Merkezi Kompozit Tasarım)						
Cam/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*	Cam/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*
Seçkisiz Arama							Seçkisiz Arama						
θ	64,6		63,5		69,4		θ	70,4		70,4		56,7	
t_1	0,34		0,2		0,2		t_1	0,26		0,25		0,15	
t_2	0,85		1,04		0,94		t_2	0,89		0,89		1,23	
Ağırlık (g)	1510	1510	1425	1425	1318	1318	Ağırlık (g)	1395	1395	1366	1366	1503	1503
Emniyet Katsayısı	3,16	3,32	3,12	3,05	3,1	3,05	Emniyet Katsayısı	3,32	3,38	3,23	3,27	3,21	2,83
Genetik Algoritma							Genetik Algoritma						
θ	20,8		64,5		82,6		θ	70,4		78,3		71,5	
t_1	0,47		0,58		0,77		t_1	0,22		0,34		0,23	
t_2	1,23		0,67		0,28		t_2	0,94		0,62		0,87	
Ağırlık (g)	2136	2136	1792	1792	1794	1794	Ağırlık (g)	1356	1356	1274	1274	1323	1323
Emniyet Katsayısı	3,24	3,08	3,71	3,84	3,56	3,01	Emniyet Katsayısı	3,28	3,26	3,04	3,08	3,15	3,18
Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama							Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama						
θ	45		90		90		θ	45		90		90	
t_1	1,05		0,1		0,1		t_1	1,05		0,1		0,1	
t_2	1,05		0,54		0,46		t_2	1,05		0,72		0,85	
Ağırlık (g)	3103	3103	725	725	645	645	Ağırlık (g)	3103	3103	3	1,03	3,61	1,25
Emniyet Katsayısı	6,07	5,99	3,19	0,76	3	0,66	Emniyet Katsayısı	5,99	5,99	9065	9065	1035	1035

Çizelge Ek 5.5: Yapay sinir ağı yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar

Yapay Sinir Ağı (Latin Hiperküp Örnekleme)							Yapay Sinir Ağı (Merkezi Kompozit Tasarım)						
Cam/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*	Cam/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*
Seçkisiz Arama							Seçkisiz Arama						
θ	44,1		43,8		43,5		θ	76,8		74,8		70,4	
t_1	0,88		0,81		0,76		t_1	0,3		0,26		0,26	
t_2	0,42		0,42		0,41		t_2	0,7		0,8		0,89	
Ağırlık (g)	2146	2146	2011	2011	1897	1897	Ağırlık (g)	1385	1283	1380	1289	1460	1395
Emniyet Katsayısı	3,45	3,38	3,24	3,12	3,07	2,89	Emniyet Katsayısı	3,09	3,17	3,09	3,2	3,14	3,38
Genetik Algoritma							Genetik Algoritma						
θ	64,3		64,1		64,5		θ	73,5		71,1		74	
t_1	0,45		0,53		0,58		t_1	0,25		0,24		0,24	
t_2	0,71		0,66		0,67		t_2	0,82		0,87		0,88	
Ağırlık (g)	1580	1580	1686	1686	1792	1792	Ağırlık (g)	1386	1301	1403	1331	1423	1342
Emniyet Katsayısı	4,27	3,35	4,32	3,54	4,5	3,84	Emniyet Katsayısı	3,05	3,19	3,01	3,18	3,26	3,41
Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama							Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama						
θ	45		69,3		90		θ	45		90		90	
t_1	1,05		0,1		0,1		t_1	1,05		0,1		0,31	
t_2	1,05		0,52		0,1		t_2	1,05		0,6		1,47	
Ağırlık (g)	3174	3103	708	1489	299	299	Ağırlık (g)	3105	3103	1016	786	2124	2062
Emniyet Katsayısı	5,97	5,99	3,11	0,8	3	0,27	Emniyet Katsayısı	5,99	5,99	3	0,85	8,03	7,3

EK 6: Karbon/epoksi malzeme kullanılarak elde edilen ağırlık eniyileme sonuçları

Çizelge Ek 6.1: Karesel polinom yanıt yüzey yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar

Karesel Polinom Yanıt Yüzey Yöntemi (Latin Hiperküp Örnekleme)							Karesel Polinom Yanıt Yüzey Yöntemi (Merkezi Kompozit Tasarım)						
Karbon/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*	Karbon/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*
Seçkisiz Arama							Seçkisiz Arama						
θ	88,6		88,2		84,9		θ	87		78,7		69,9	
t_1	0,27		0,19		0,26		t_1	0,31		0,2		0,16	
t_2	0,32		0,41		0,42		t_2	0,24		0,67		1,02	
Ağırlık (g)	695	695	633	633	755	755	Ağırlık (g)	691	691	862	862	1080	1080
Emniyet Katsayısı	3,16	3,2	3,17	2,88	3,08	3,33	Emniyet Katsayısı	3,17	3,03	3,13	3,15	3,06	3,07
Genetik Algoritma							Genetik Algoritma						
θ	86		85,6		87,8		θ	82,7		86,2		84	
t_1	0,18		0,18		0,23		t_1	0,24		0,16		0,19	
t_2	0,47		0,48		0,36		t_2	0,45		0,52		0,52	
Ağırlık (g)	669	669	671	671	668	668	Ağırlık (g)	749	749	675	675	711	711
Emniyet Katsayısı	3,13	3,01	3,08	3,01	3,07	3,1	Emniyet Katsayısı	3,04	3,05	3,51	3	3,22	3,06
Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama							Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama						
θ	45		84,2		90		θ	45		90		88,2	
t_1	1,05		0,1		0,1		t_1	1,05		0,1		0,1	
t_2	1,05		0,64		0,41		t_2	1,05		0,32		0,82	
Ağırlık (g)	2520	2520	675	675	492	492	Ağırlık (g)	2520	2520	417	417	812	812
Emniyet Katsayısı	5	4,9	3,4	2,74	3	1,99	Emniyet Katsayısı	4,71	4,9	3	1,6	4,97	3,37

Çizelge Ek 6.2: Kriging yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar

Kriging (Latin Hiperküp Örnekleme)							Kriging (Merkezi Kompozit Tasarım)						
Karbon/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*	Karbon/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*
Seçkisiz Arama							Seçkisiz Arama						
θ	85,5		87		80,1		θ	78,7		75,3		74,2	
t_1	0,16		0,31		0,22		t_1	0,2		0,32		0,21	
t_2	0,52		0,24		0,61		t_2	0,67		0,52		0,77	
Ağırlık (g)	679	679	691	691	848	848	Ağırlık (g)	862	862	932	932	951	951
Emniyet Katsayısı	3,29	3,01	3,17	3,03	3,21	3,25	Emniyet Katsayısı	3,84	3,15	3,26	3,03	3,61	3,03
Genetik Algoritma							Genetik Algoritma						
θ	77,4		80,3		86		θ	85,7		84,4		79,9	
t_1	0,13		0,19		0,48		t_1	0,37		0,32		0,3	
t_2	0,84		0,6		0,15		t_2	0,21		0,26		0,42	
Ağırlık (g)	882	882	789	789	892	892	Ağırlık (g)	759	759	714	714	822	822
Emniyet Katsayısı	3,35	3,03	3,01	3	3	2,99	Emniyet Katsayısı	3,44	3,04	3,01	2,87	3,25	3,02
Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama							Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama						
θ	45		90		90		θ	45		90		90	
t_1	1,05		0,1		0,1		t_1	1,05		0,1		0,1	
t_2	1,05		0,39		0,43		t_2	1,05		0,23		0,26	
Ağırlık (g)	2520	2520	474	474	505	505	Ağırlık (g)	2520	2520	342	342	369	369
Emniyet Katsayısı	4,89	4,9	3	1,89	3,25	2,06	Emniyet Katsayısı	4,9	4,9	3	1,19	3,15	1,35

Çizelge Ek 6.3: Parametrik olmayan regresyon yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar

Parametrik Olmayan Regresyon (Latin Hiperküp Örnekleme)							Parametrik Olmayan Regresyon (Merkezi Kompozit Tasarım)						
Karbon/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*	Karbon/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*
Seçkisiz Arama							Seçkisiz Arama						
θ	58,1		57,3		62		θ	77,2		82,9		84,5	
t_1	0,7		0,64		0,66		t_1	0,3		0,25		0,34	
t_2	0,51		0,55		0,42		t_2	0,56		0,44		0,34	
Ağırlık (g)	1404	1523	1355	1472	1266	1394	Ağırlık (g)	725	922	723	751	774	819
Emniyet Katsayısı	3,38	3,3	3,18	3,16	3,35	3,22	Emniyet Katsayısı	3,21	3,21	3,11	3,06	3,23	3,45
Genetik Algoritma							Genetik Algoritma						
θ	82,1		84,8		84,8		θ	76		76		75,9	
t_1	0,25		0,3		0,32		t_1	0,24		0,23		0,37	
t_2	0,4		0,31		0,3		t_2	0,66		0,69		0,49	
Ağırlık (g)	832	723	836	728	842	749	Ağırlık (g)	754	920	765	916	727	983
Emniyet Katsayısı	3,59	2,83	3,86	3,07	3,9	3,14	Emniyet Katsayısı	3,4	3,09	3,47	3,07	3,04	3,27
Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama							Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama						
θ	45		82,5		75,3		θ	45		78,1		90	
t_1	1,05		0,18		0,18		t_1	1,05		0,23		0,3	
t_2	1,05		0,27		0,22		t_2	1,05		0,54		0,76	
Ağırlık (g)	2495	2520	787	496	749	457	Ağırlık (g)	2520	2520	694	803	1037	1096
Emniyet Katsayısı	5,14	4,9	3,48	1,75	3	1,18	Emniyet Katsayısı	4,89	4,9	3	2,79	5,66	5,63

Çizelge Ek 6.4: Vekil model bütünü yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar

Vekil Model Bütünü (Latin Hiperküp Örnekleme)							Vekil Model Bütünü (Merkezi Kompozit Tasarım)						
Karbon/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*	Karbon/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*
Seçkisiz Arama							Seçkisiz Arama						
θ	77,2		68,2		78,3		θ	86,4		78,7		82,9	
t_1	0,3		0,31		0,4		t_1	0,2		0,2		0,25	
t_2	0,56		0,75		0,29		t_2	0,45		0,67		0,44	
Ağırlık (g)	922	922	1096	1096	871	871	Ağırlık (g)	676	676	862	862	751	751
Emniyet Katsayısı	3,38	3,21	3,13	3,03	3,34	2,93	Emniyet Katsayısı	3,73	3,08	3,49	3,15	3,27	3,06
Genetik Algoritma							Genetik Algoritma						
θ	85,6		86,1		83,9		θ	80,1		73,5		85,2	
t_1	0,21		0,23		0,21		t_1	0,31		0,24		0,42	
t_2	0,42		0,42		0,47		t_2	0,43		0,69		0,19	
Ağırlık (g)	679	679	701	701	710	710	Ağırlık (g)	845	845	942	942	825	825
Emniyet Katsayısı	3,37	3,08	3,5	3,25	3,29	3,03	Emniyet Katsayısı	3,09	3,13	3,02	2,93	3,24	3,15
Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama							Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama						
θ	45		90		90		θ	45		90		85,7	
t_1	1,05		0,24		0,21		t_1	1,05		0,1		0,1	
t_2	1,05		0,1		0,1		t_2	1,05		0,28		0,74	
Ağırlık (g)	2520	2520	469	469	416	416	Ağırlık (g)	2520	2520	381	381	750	750
Emniyet Katsayısı	5,18	4,9	3,17	1,43	3	1,23	Emniyet Katsayısı	4,77	4,9	3	1,41	4,6	3,12

Çizelge Ek 6.5: Yapay sinir ağı yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar

Yapay Sinir Ağı (Latin Hiperküp Örnekleme)							Yapay Sinir Ağı (Merkezi Kompozit Tasarım)						
Karbon/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*	Karbon/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*
Seçkisiz Arama							Seçkisiz Arama						
θ	74,2		60,1		63,4		θ	78,8		76,2		81,7	
t_1	0,21		0,31		0,2		t_1	0,27		0,37		0,2	
t_2	0,77		1,05		1,13		t_2	0,59		0,5		0,53	
Ağırlık (g)	952	951	1343	1343	1231	1231	Ağırlık (g)	913	913	998	999	738	739
Emniyet Katsayısı	3,1	3,03	3,11	3,15	3,15	3,04	Emniyet Katsayısı	3,32	3,37	3,02	3,37	3,14	2,92
Genetik Algoritma							Genetik Algoritma						
θ	79,6		83,8		84,4		θ	88,1		83,3		84,6	
t_1	0,13		0,16		0,2		t_1	0,3		0,21		0,12	
t_2	0,7		0,55		0,45		t_2	0,25		0,53		0,67	
Ağırlık (g)	820	818	703	700	691	689	Ağırlık (g)	678	677	753	754	723	723
Emniyet Katsayısı	3,4	3,01	3,44	3	3,38	2,98	Emniyet Katsayısı	3,58	3,03	3,48	3,18	3,97	3,06
Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama							Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama						
θ	45		84,9		90		θ	45		90		89	
t_1	1,05		0,1		0,1		t_1	1,05		0,1		0,1	
t_2	1,05		0,62		0,24		t_2	1,05		0,26		0,73	
Ağırlık (g)	2520	2520	661	658	361	354	Ağırlık (g)	2520	2520	374	370	750	750
Emniyet Katsayısı	4,75	4,9	3,57	2,67	3	1,26	Emniyet Katsayısı	4,77	4,9	3	1,35	5,32	3,24

EK 7: Aramid/epoksi malzeme kullanılarak elde edilen ağırlık eniyileme sonuçları

Çizelge Ek 7.1: Karesel polinom yanıt yüzey yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar

Karesel Polinom Yanıt Yüzey Yöntemi (Latin Hiperküp Örnekleme)							Karesel Polinom Yanıt Yüzey Yöntemi (Merkezi Kompozit Tasarım)						
Aramid/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*	Aramid/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*
Seçkisiz Arama							Seçkisiz Arama						
θ	75,9		89,4		80,4		θ	88,9		85,7		89,7	
t_1	0,17		0,45		0,26		t_1	0,33		0,3		0,4	
t_2	1,14		0,49		0,89		t_2	0,72		0,9		0,67	
Ağırlık (g)	1043	1043	969	969	992	992	Ağırlık (g)	965	965	1055	1055	1022	1022
Emniyet Katsayısı	3,22	2,86	3,65	3,01	3,74	3,3	Emniyet Katsayısı	3,44	3,05	3,4	3,42	3,49	3,19
Genetik Algoritma							Genetik Algoritma						
θ	79		72,3		85,5		θ	87,8		85,1		84,8	
t_1	0,32		0,31		0,31		t_1	0,27		0,26		0,26	
t_2	0,78		0,67		0,79		t_2	0,81		0,82		0,84	
Ağırlık (g)	997	997	891	891	991	991	Ağırlık (g)	941	941	941	941	950	950
Emniyet Katsayısı	3,15	3,13	3,01	2,85	3,62	3,22	Emniyet Katsayısı	3,46	3,01	3,02	3,06	3,03	3,09
Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama							Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama						
θ	90		75,5		79,8		θ	90		83,8		90	
t_1	0,1		0,1		0,1		t_1	0,1		0,1		0,1	
t_2	0,44		1,04		1,27		t_2	0,62		1,18		2	
Ağırlık (g)	451	451	871	871	1030	1030	Ağırlık (g)	574	574	969	969	1540	1540
Emniyet Katsayısı	3	0,85	3,08	1,32	4,07	1,87	Emniyet Katsayısı	3	1,06	3,92	1,85	8,66	3,29

Çizelge Ek 7.2: Kriging yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar

Kriging (Latin Hiperküp Örnekleme)							Kriging (Merkezi Kompozit Tasarım)						
Aramid/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*	Aramid/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*
Seçkisiz Arama							Seçkisiz Arama						
θ	84,2		81,6		88,9		θ	88,9		89,7		85,8	
t_1	0,33		0,28		0,33		t_1	0,33		0,4		0,32	
t_2	0,72		0,76		0,72		t_2	0,72		0,67		0,82	
Ağırlık (g)	965	965	921	921	965	965	Ağırlık (g)	965	965	1022	1022	1031	1031
Emniyet Katsayısı	3,34	3,16	3,25	3,04	3,69	3,06	Emniyet Katsayısı	3,44	3,05	3,49	3,19	3,2	3,34
Genetik Algoritma							Genetik Algoritma						
θ	74,9		80,2		81,7		θ	83,7		82,1		83,3	
t_1	0,2		0,32		0,31		t_1	0,22		0,23		0,24	
t_2	1,27		0,74		0,68		t_2	0,9		0,92		0,9	
Ağırlık (g)	1169	1169	963	963	915	915	Ağırlık (g)	935	935	961	961	970	970
Emniyet Katsayısı	3,25	3,15	3,12	3,16	3	3,03	Emniyet Katsayısı	3,12	3,02	3,01	3,14	3,09	3,17
Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama							Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama						
θ	89,1		80		80		θ	90		83,8		90	
t_1	0,1		0,1		1,5		t_1	0,1		0,1		0,1	
t_2	0,1		0,7		1,5		t_2	0,62		1,18		2	
Ağırlık (g)	207	207	620	620	311	311	Ağırlık (g)	574	574	969	969	1540	1540
Emniyet Katsayısı	3,92	0,36	6,13	1,96	9,47	11,5	Emniyet Katsayısı	3	1,06	3,92	1,85	8,66	3,29

Çizelge Ek 7.3: Parametrik olmayan regresyon yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar

Parametrik Olmayan Regresyon (Latin Hiperküp Örnekleme)							Parametrik Olmayan Regresyon (Merkezi Kompozit Tasarım)						
Aramid/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*	Aramid/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*
Seçkisiz Arama							Seçkisiz Arama						
θ	89,3		84,2		85,3		θ	77,5		81,4		84	
t_1	0,44		0,33		0,42		t_1	0,2		0,23		0,15	
t_2	0,54		0,72		0,63		t_2	1,06		1,03		1,07	
Ağırlık (g)	964	1000	1008	965	993	1024	Ağırlık (g)	986	1022	1004	1049	1038	957
Emniyet Katsayısı	3,23	3,11	3,27	3,16	3,37	3,3	Emniyet Katsayısı	3,02	3,07	3,24	3,45	3,38	2,92
Genetik Algoritma							Genetik Algoritma						
θ	80		80,8		84,8		θ	75,9		83,7		85,1	
t_1	0,35		0,32		0,31		t_1	0,27		0,21		0,29	
t_2	0,71		0,7		0,7		t_2	1,06		0,93		0,89	
Ağırlık (g)	993	987	960	928	983	930	Ağırlık (g)	1000	1108	930	952	936	1023
Emniyet Katsayısı	3,14	3,2	3,04	3,05	3,21	3,03	Emniyet Katsayısı	3	3,16	3,01	3,07	3,06	3,33
Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama							Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama						
θ	85,1		76,2		80,8		θ	86,5		59,9		90	
t_1	0,32		0,59		0,68		t_1	0,26		0,1		1,1	
t_2	0,36		0,2		0,1		t_2	0,86		2		2	
Ağırlık (g)	742	683	894	945	1002	1012	Ağırlık (g)	917	966	1664	1540	2852	2927
Emniyet Katsayısı	3	2,92	3,08	2,63	3,26	2,28	Emniyet Katsayısı	3	3,11	3,18	1,57	5,19	5,93

Çizelge Ek 7.4: Vekil model bütün yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar

Vekil Model Bütünü (Latin Hiperküp Örnekleme)							Vekil Model Bütünü (Merkezi Kompozit Tasarım)						
Aramid/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*	Aramid/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*
Seçkisiz Arama							Seçkisiz Arama						
θ	88,9		85,5		89,7		θ	88,9		86,9		88,9	
t_1	0,33		0,44		0,4		t_1	0,33		0,33		0,34	
t_2	0,72		0,54		0,67		t_2	0,72		0,72		0,65	
Ağırlık (g)	965	965	1000	1000	1022	1022	Ağırlık (g)	965	965	965	965	933	933
Emniyet Katsayısı	3,31	3,06	3,18	3,2	3,36	3,19	Emniyet Katsayısı	3,36	3,05	3,28	3,1	3,05	2,94
Genetik Algoritma							Genetik Algoritma						
θ	83,9		82,3		82,8		θ	80,2		80,3		77,3	
t_1	0,44		0,42		0,38		t_1	0,33		0,35		0,35	
t_2	0,55		0,5		0,7		t_2	0,73		0,73		0,81	
Ağırlık (g)	1008	1008	945	945	1023	1023	Ağırlık (g)	970	970	995	995	1051	1051
Emniyet Katsayısı	3,22	3,26	3,02	3,08	3,44	3,38	Emniyet Katsayısı	3,01	3,19	3,02	3,33	3,14	3,1
Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama							Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama						
θ	90		90		80		θ	90		90		90	
t_1	0,1		0,1		1,5		t_1	0,1		0,1		1,1	
t_2	0,54		0,54		1,5		t_2	0,66		1,14		2	
Ağırlık (g)	511	511	511	511	311	311	Ağırlık (g)	599	599	939	939	2940	2940
Emniyet Katsayısı	3	1,58	3,01	1,58	8,71	11,55	Emniyet Katsayısı	3	1,1	4,79	1,75	4,96	5,92

Çizelge Ek 7.5: Yapay sinir ağı yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar

Yapay Sinir Ağı (Latin Hiperküp Örnekleme)							Yapay Sinir Ağı (Merkezi Kompozit Tasarım)						
Aramid/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*	Aramid/Epoksi	Aday Nokta 1	Aday Nokta 1*	Aday Nokta 2	Aday Nokta 2*	Aday Nokta 3	Aday Nokta 3*
Seçkisiz Arama							Seçkisiz Arama						
θ	80,2		81,9		80,4		θ	78,2		84		84	
t_1	0,24		0,28		0,19		t_1	0,16		0,15		0,21	
t_2	0,87		0,76		0,89		t_2	1,26		1,07		0,91	
Ağırlık (g)	953	953	921	921	888	888	Ağırlık (g)	1103	1103	956	957	937	938
Emniyet Katsayısı	3,19	3,15	3,31	3,04	3,16	2,82	Emniyet Katsayısı	3,09	3,16	3,35	2,93	3,01	3,02
Genetik Algoritma							Genetik Algoritma						
θ	82,5		83,4		82,9		θ	81,5		80,1		88,3	
t_1	0,62		0,68		0,35		t_1	0,18		0,19		0,32	
t_2	0,36		0,29		0,77		t_2	1,1		1,13		0,67	
Ağırlık (g)	1112	1112	1157	1157	1029	1029	Ağırlık (g)	1019	1020	1062	1062	914	915
Emniyet Katsayısı	3,17	3,1	3,32	2,81	3,68	3,4	Emniyet Katsayısı	3,12	3,25	3,05	3,43	3,02	2,91
Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama							Karesel Lagrange ile Doğrusal Olmayan Programlama						
θ	80		80		80		θ	90		90		90	
t_1	0,1		0,1		1,5		t_1	0,1		0,1		0,1	
t_2	0,1		0,7		1,5		t_2	0,61		0,69		0,7	
Ağırlık (g)	215	207	621	620	311	311	Ağırlık (g)	570	570	621	621	660	660
Emniyet Katsayısı	8,82	0,32	10,24	1,95	9,55	11,55	Emniyet Katsayısı	3	1,05	3,16	1,13	3,28	1,2

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Efecan Yar
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 12.10.1992, Ankara
E-posta : efecanyar92@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, Bilkent Üniversitesi, Makine Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2020, TOBB ETÜ, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2017-2020	Roketsan	Mekanik Tasarım Mühendisi
2016-2017	Roketsan	Aday Mühendis

YABANCI DİL:

İngilizce (YDS 91,25/100)

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

Uluslararası Konferans Yayınları

- E. Yar, E. Acar, Weight Optimization of a Composite Launch Tube of Man Portable Air Defense System, 3th International Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology, Turkey, 24-26 June 2020.