



**DRONE VE İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN ÇOKLU ATEŞLEME
SİSTEMİ TASARIMI, PROTOTİPİ VE ÜRETİMİ**

Alper Hasan KOCATAŞ

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2022

ETİK BEYAN

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

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

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

Alper Hasan KOCATAŞ

07/12/2022

DRONE VE İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN ÇOKLU ATEŞLEME SİSTEMİ TASARIMI, PROTOTİPI VE ÜRETİMİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Alper Hasan KOCATAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2022

ÖZET

Tez çalışmasında, özel kuvvetler ve askeri taktik kullanıma uygun bir mikro insansız hava aracı (İHA) kavramsal tasarımı tamamlanmıştır. Hafiflik, uygulanabilirlik ve akıllı tasarım dâhil olmak üzere silah tasarımının birçok yönü ele alınmıştır. Çalışma kavramsal tasarımlardan elde edilen hesaplamalarla güdümsüz mühimmatların maksimum oranda başarılı atış yapmasına odaklanmıştır. Bu teoriyi kanıtlamak amacı ile yazılım, analiz ve en iyileştirmelerden yararlanılmıştır. Ek olarak, bağımsız silah ve kamera sistemlerini bir lazer mesafe okuyucusunun verilerine dayanarak çalıştıran bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Namlu sisteminin kamera sisteminin baktığı yöne otonom olarak yönelebildiği görülmüştür. Lazer mesafe okuyucu ve kamera modülünün namlu üzerinde olmaması, farklı gövde tasarımlarına sahip uçaklarda veya ağırlık merkezinin kaydırılması gerektiğinde ve kamerada titreşim istenmediğinde silah sisteminin kullanımını kolaylaştırmaktadır. Elde edilen matematiksel modelleme ile ihtiyaç duyulan tork değerine göre motor seçimi kolaylaşmaktadır. Tez çalışmasında ayrıca, silah sistemi içerisindeki namlunun ağırlık optimizasyonu da yapılmıştır. Ağırlık azaltma için çentik faktörü ve topolojik boşaltma olmak üzere iki yöntem kullanılmıştır. İki yöntemin uygulanmasından dolayı silah sisteminde üretilen eşdeğer bileşke gerilmeler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına, topoloji optimizasyonu yöntemi kullanılarak yapılan ağırlık azaltma işlemi ile test numunelerinin optimum bileşke gerilme dayanımı içerisinde %6,07 hafiflediği görülmüştür. Sistemin, parametrik tasarımı sayesinde farklı tip araçlarda evrensel olarak kullanılabilmesi anlaşılmıştır. Çalışma, silah sisteminin montaj tolerans boşluklarından kaynaklanan konum zaman gecikmelerinin yazılımsal olarak azaltılabileceğini önermiştir. Sistem, gelecekte otonom olarak hedefi takip edecek yapay zekâ, görüntü işleme ve diğer alt sistemlere bağlı ihtiyaçlara yönelik özellikler dikkate alınarak tasarlanmış ve üretilmiştir.

Bilim Kodu : 91432
Anahtar Kelimeler : Silah sistemi, ateşleme kontrol sistemi, İHA, matematiksel modelleme, tasarım
Sayfa Adedi : 81
Danışman : Prof. Dr. İhsan KORKUT

MULTIPLE IGNITION SYSTEM DESIGN, PROTOTYPE AND PRODUCTION FOR DRONE AND UNMANNED VEHICLES

(M. Sc. Thesis)

Alper Hasan KOCATAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2022

ABSTRACT

With the theoretical and applied studies, the conceptual design of a micro unmanned aerial vehicle (UAV) suitable for special forces and military tactical use has been completed. Many aspects of weapon design are covered, including lightness, practicability, and smart design. The study focused on the maximum successful firing of unguided munitions with calculations obtained from conceptual designs. Software, analysis and optimizations were used to prove this theory. In addition, an experimental setup was set up to operate stand-alone weapon and camera systems based on data from a laser range reader. It has been observed that the barrel system can autonomously orient itself in the direction the camera system is facing. Laser distance reader and camera module not on the barrel, facilitates the use of the weapon system in aircraft with different body designs or when the center of gravity needs to be shifted and vibration is not desired in the camera. With the mathematical modeling obtained, motor selection becomes easier according to the required torque value. In the thesis study, the weight optimization of the barrel in the weapon system was also made. Two methods, notch factor and topological unloading, were used for weight reduction. Equivalent resultant stresses produced in the weapon system due to the application of the two methods are compared. According to the comparison results, it was seen that the test specimens lightened by 6,07% within the optimum resultant tensile strength with the weight reduction process using the topology optimization method. of the system, Thanks to its parametric design, it has been understood that it can be used universally in different types of vehicles. The study suggested that the position time delays caused by the mounting tolerance gaps of the weapon system can be reduced in software. The system has been designed and produced by taking into account the needs-oriented features of artificial intelligence, image processing and other sub-systems that will follow the target autonomously in the future.

Science Code : 91432

Key Words : Weapon system, ignition control system, UAV, mathematical modelling, design

Page Number : 81

Supervisor : Prof. Dr. İhsan KORKUT

TEŞEKKÜR

Özel kuvvetler ve askeri taktik kullanıma uygun bir mikro insansız hava aracı (İHA) için kavramsal tasarımını tamamladığım, hafiflik, uygulanabilirlik ve akıllı tasarım dâhil olmak üzere birçok yönden ele aldığım silah sistemi ile ilgili yüksek lisans tez çalışmalarımı tamamladım. Çalışmalarım sırasında özgür koşullar içerisinde, her türlü bilgi, imkân ve desteklerini esirgemeyen İmalat Mühendisliği Bölüm Başkanı değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. İhsan KORKUT'a içtenlikle saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım sırasında desteklerini, bilgisini ve ilgisini esirgemeyen sevgili eşim ve meslektaşım Arş. Gör. Duygu GÜRKAN KOCATAŞ'a teşekkürlerimi sunarım. Küçüklüğümden bu zamanlara, yaşamımda, eğitim ve çalışma günlerimde da dâhil olmak üzere hayatım boyunca sevgilerini ve desteklerini esirgemeyen değerli ailem, babam Bünyamin KOCATAŞ ve annem Senay KOCATAŞ'a saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunarım. Neredeyse her konuda ve projede beraber düşündüğümüz, emek harcadığımız ve ürettiğimiz, ihtiyacım olduğunda maddi ve manevi olarak koşulsuz yanımda olan değerli kardeşim Ali KOCATAŞ'a sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım sırasında teknik bilgileri ile desteklerini esirgemeyen değerli dostum ve çalışma arkadaşım Abdurrahmon DADAJONOV'a teşekkürlerimi sunarım. Fikirlerimi rahatlıkla yanında paylaşabildiğim değerli ve kadim dostum Giray İSMETOĞLU'na saygım ve sevgim ile teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	ix
RESİMLERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. MATERYAL METOT.....	15
3.1. Konsept Tasarım	16
3.2. Matematiksel Modelleme	21
3.3. Simülasyon	28
3.4. Deneysel Çalışmalar.....	35
4.BULGULAR VE TARTIŞMA.....	41
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	51
KAYNAKLAR	55
EKLER.....	61
ÖZGEÇMİŞ	81

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Konsept tasarım gereksinimleri	17
Çizelge 3.2. Lançer mekanizması nümerik analiz değerleri	28
Çizelge 3.3. Al6063-T6 malzeme mekanik özellikleri	30
Çizelge 3.4. Optimize edilmiş gerilme konsantrasyon faktörlerinin regresyon analizi ..	33
Çizelge 4.1. Eşdeğer bileşke gerilme şartlarının karşılaştırılması	47

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Materyal metot çalışma ağacı	15
Şekil 3.2. ROKETSAN Yatağan 40mm lazer güdümlü füze.....	17
Şekil 3.3. Taktik silahlı mini insansız hava aracı konsept tasarımı	18
Şekil 3.4. SİHA silah sistemi kavramsal tasarımı.....	18
Şekil 3.5. SİHA lançer sistemi kavramsal tasarımı.....	19
Şekil 3.6. Lançer mekanizması birim namlu ince levhası (BNİL)	20
Şekil 3.7. Hava aracına ait lançer mekanizması kavramsal tasarımı	20
Şekil 3.8. Takviyeli delikli ince plakaların gerilim konsantrasyonu	21
Şekil 3.9. Silah sistemi vektörel kurgusu.....	22
Şekil 3.10. Konsept namlu mekanizması alt sistemi hareket benzetimi	29
Şekil 3.11. BNİL güvenlik katsayısına göre normal gerilme değerleri	30
Şekil 3.12. BNİL güvenlik katsayısına göre bileşke gerilme değerleri	31
Şekil 3.13. Çentik faktörüne bağlı BNİL’e ait bileşke gerilim değerleri.....	32
Şekil 3.14. Çentik faktörüne bağlı BNİL’e ait normal gerilim değerleri.....	32
Şekil 3.15. Topolojik optimizasyon ile ağırlığı azaltılan BNİL.....	34
Şekil 3.16. Topolojik iyileştirme uygulanan BNİL’in maksimum normal gerilme değeri	35
Şekil 3.17. Namlu mekanizması sistem tasarımı	37
Şekil 3.18. Namlu mekanizması ana bölümleri	38
Şekil 4.1. Sayısal analiz θ_2 açısal konum-zaman grafiği.....	41
Şekil 4.2. Hareket simülasyonu θ_2 açısal konum-zaman grafiği.....	41
Şekil 4.3. Deney düzeneği θ_2 açısal konum-zaman grafiği.....	42
Şekil 4.4. Sayısal analiz θ_4 açısal konum-zaman grafiği.....	43
Şekil 4.5. Hareket simülasyonu θ_4 açısal konum-zaman grafiği.....	43
Şekil 4.6. Deney düzeneği θ_4 açısal konum-zaman grafiği.....	44

Şekil	Sayfa
Şekil 4.7. Sayısal analiz ω_2 açısal hız-zaman grafiği	44
Şekil 4.8. Hız simülasyonu ω_2 açısal hız-zaman grafiği	45
Şekil 4.9. Deney düzeneği ω_2 açısal hız-zaman grafiği	45
Şekil 4.10. Nümerik analiz ω_4 açısal hız-zaman grafiği	46
Şekil 4.11. Hareket simülasyonu ω_4 açısal hız-zaman grafiği	46
Şekil 4.12. Deney düzeneği ω_4 açısal hız-zaman grafiği	47
Şekil 4.13. En iyileştirme yapılmamış BNİL çekme testi.....	48
Şekil 4.14. Çentik faktörüne göre en iyileştirme yapılmış BNİL çekme testi	49
Şekil 4.15. Topolojik optimizasyona göre en iyileştirme yapılmış BNİL çekme testi ...	49
Şekil 4.16. İyileştirme yapılmamış BNİL kullanılarak tasarlanmış namlu konsept tasarımı	50
Şekil 4.17. Topolojik en iyileştirmeye bağlı BNİL kullanılarak tasarlanmış namlu	50

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Deney numune çeşitleri	36
Resim 3.2. Deneyde kullanılan çekme cihazı	37
Resim 3.3. Namlu mekanizması deney düzeneği	39

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
$^{\circ}$	Derece
a	Değişken olmayan namlu hareket başlangıcı uzvu
c	Değişken olmayan namlu uzvu
d	Hareket başlangıç uzvu ile namlu mafsalı arasındaki mesafe
e	Sabit namlu uzvu
k	Değişken olmayan namlu hareket başlangıcı uzvu ile kamera mafsalı arasındaki mesafe
MPa	Megapascal
r	Uzaklık bulucu sensörün belirlediği değişken mesafe
s	Hedef e ait konum ile namlu hareket başlangıç uzvu arasındaki zahiri mesafe
s_{CB}	Namlu uzvuna ait değişken kayma hareketi yapan uzuv mesafesi
x	Namlu uzvu ile hedefe ait konum arasındaki mesafe
θ_1	Kamera mafsalının araç gövdesi ile yaptığı açı
θ_2	Değişken olmayan namlu hareket başlangıç uzvunun araç gövdesi ile yaptığı açı
θ_3	Hedefe e ait konum ve namlu hareket başlangıç uzvunun sanal araç gövdesi ile yaptığı açı
θ_4	Değişken olmayan namlu uzvunun araç gövdesiyle yaptığı açı
w_1	Kamera mafsalının açısal hızı
w_3	Hedef e ait konum ve hareket uzvu mafsalı arasındaki açısal hız
w_2	Namlu mekanizması alt sistemini tahrik uzvunun (a) açısal hızı
w_4	Değişken olmayan namlu uzvuna ait açısal hız
K_{tn}	Gerilme konsantrasyon faktörü
σ_{max}	Akma dayanımına göre uygulanan maksimum gerilme miktarı

Simgeler**Açıklamalar**

σ_{net}	Gerilme konsantrasyon oranına bağlı olarak malzemenin maksimum gerilme miktarı.
d	Boşaltama çapı ölçüsü.
D	Takviye malzeme çapı ölçüsü.
r	Takviye mazleme ile ince plaka arasındaki radius ölçüsü.
s	Güvenlik katsayısı.

Kısaltmalar**Açıklamalar**

BNİL	Birim namlu ince levhası. Silah sisteminin namlu parçasını oluşturan birim levha
EUROCONTROL	Avrupa Hava Güvenliği Örgütü
FAA	Amerikan Federal Havacılık İdaresi
ICAO	Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü
İHA	İnsansız hava aracı
JSF	Joint Strike Fighter (Çok amaçlı üretilen savaş uçağı projesi)
MTOW	Maximum take off weight (Maksimum kalkış ağırlığı)
SİHA	Silahlı İnsansız hava aracı
SLAM	Simultaneous Localisation and Mapping (Eş zamanlı konum belirleme ve haritalama)

1. GİRİŞ

Son yıllarda neredeyse her alanda insansız hava araçları kullanılmaktadır. Çevremizde her geçen gün daha fazla gördüğümüz insansız hava araçlarının 2015-2025 yılları arasında pazar payının 90 milyar dolar civarına ulaşacağı düşünülmektedir [1-3]. Savunma sektöründe İHA'lar öncelikli olarak keşif, gözlem ve harekât aktiviteleri dâhil birçok alanda sahalarda bulunmaktadır. Savunma-Havacılık otoriteleri, Müşterek Taarruz Uçağı (JSF) bünyesinde imal edilmiş F-35 savaş uçağının, çeşitli ülkeler tarafından kullanılan son kuşak savaş aracı [4] olacağını ve yeni nesil savaş hava araçları ile SİHA kullanımının büyük oranda yaygınlaşacağını düşünmektedirler [5]. Yüksek teknoloji ile üretilmiş silahlı insansız hava araçlarının (SİHA) hızlı lojistik üstünlüğü, satın alınabilme kolaylığı, çatışma bölgesi dışında kullanılması ve güvenlik riski oluşturmaması gibi hususlar ordular için SİHA'ların başlıca avantajlarını oluşturmaktadır [2]. Bazı SİHA'ların hızlarının yavaş olması ilk etapta dezavantaj olarak görülse de, hedef konumları çok yüksek irtifalarda saatlerce gözlemleyerek detaylı bilgi sağlama açısından avantajlı konuma ulaşmaktadırlar. Yeni nesil SİHA'ların tasarımları artık ses hızını aşacak şekilde tamamlanmakta ve bu tasarımlara uygun özel motorların geliştirildiği görülmektedir.

Son on yılda, ülke güvenliğini arttırmak maksadı ile SİHA'ların kullanımı önemli bir artış göstermiştir. Mevcut durumda birçok ülkede çok çeşitli modellerde SİHA üretimi yapılmakta, özel harekât operasyonlarında, sınır güvenliğinde, yasadışı faaliyet takibinde ve keşif analizlerinde pratik olarak kullanımı devam etmektedir [6]. Songar, SİHA tasarımına ve uygulamasına örnek olarak gösterilmektedir [7].

SİHA'lar, oluşturulmuş bir standart dâhilinde, özel koşullarda çalışabilecek durumlar için üretilmektedir. Çoğunlukla yüksek teknolojiye sahip silah sistemleri, optik teknolojiler, radarlar ve hedefleme teknolojilerine sahiptirler.

İnsansız hava araçlarındaki silah sistemleri genel olarak bünyesinde, bir mühimmatı ateşleyip gönderen bir lançer mekanizmasına ve bu mekanizmayı hareket ettirmek için farklı motorlar ve ayrıca kamera sistemleri bulundurmaktadır. Sistemde motorları çalıştıran kontrol kartları ve mesafe algılayıcı lazer teknolojileri de bulunmaktadır. Bazı sistemler, operatörün hedefe baktığı kamera açısına bağlı ve eş zamanlı olarak havada hareket etmektedirler. Son zamanlarda, silah sistemlerini otonom olarak sürmek için görüntü işleme

ve yapay zekâ teknolojileri de kullanılmaktadır. Önceki araştırmalardan türetilen elektronik görüntü hizalama teknikleri, gerçek zamanlı doğru görüntüleri yakalayan otonom kameralarının kullanımını sağlamaktadır. Sıralı hareket eden nesnelerde sınıflandırma, izleme, davranışın tanımı ve hareket algılama, görüntü işlemenin çalışma prensibinin bir parçasıdır [8-10].

Silahlı insansız hava araçları, kullanım kolaylığı ve taktiksel kullanım açısından gelişen popüler teknolojilerdir. Bu kapsamda farklı ağırlık ve boyutlardaki SİHA'lar fonksiyonel olarak tasarlanmakta ve üretilmektedir. SİHA'ların havacılık ve uzay sanayine uygun olarak üretilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu açıdan bakıldığında, tasarım gerekliliklerinin yanı sıra üzerlerine bütünleştiren silah sistemlerinin de kendileri gibi hafif ve dayanıklı olarak tasarlanması gerekmektedir. Mini taktik insansız hava araçlarının görece sınırlı menzil ve uçuş süreleri göz önünde bulundurulduğunda, SİHA'nın parça ve alt sistemlerinin en dayanıklı ve en az maliyetle görevlerini yerine getirebilecek hale dönüştürülebilmesi için gerekli ağırlık azaltma yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Mevcut SİHA çalışmalarının çoğu, uçak tasarlama ve modellemeye odaklanmaktadır. Birçok çalışma, orta ve büyük SİHA'lar için silah sistemlerinin geliştirilmesini incelemektedir. Mevcut SİHA tasarımı ve geliştirilmesinde birçok önemli sorun bulunmaktadır. Bunlar arasında mini döner kanatlı bir SİHA'nın hareket halinde kullanılamaması ve yalnızca SİHA tasarımlarının sınırlı füze atışları yer almaktadır. Bir silah sisteminin tasarımı, askeri ve kolluk kuvvetlerinin kullanımını etkilemektedir. Bu nedenle silah sisteminin ergonomik ve hafif olması önemlidir. Ayrıca, silah sistemleri üzerine bağlı kameralar kompensatör sistemleri olmasına rağmen titreşime maruz kalmaktadır.

Bu tez çalışması, güdümsüz mermilerin isabet oranını artırma fikri üzerine odaklanmıştır. Hafiflik, uygulanabilirlik ve akıllı tasarım dâhil olmak üzere silah tasarımının birçok yönü ele alınmış ve tasarım aşamasında değerlendirilmiştir. Bu teoriyi kanıtlamak amacı ile yazılım, analiz ve en iyileştirmelerden yararlanılmıştır. Ek olarak, bağımsız silah ve kamera sistemlerini bir lazer mesafe okuyucusunun verilerine dayanarak çalıştıran bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Lazer mesafe okuyucu-kamera modülünün namı üzerinde olmaması, farklı gövde tasarımlarına sahip uçaklarda veya ağırlık merkezinin kaydırılması gerektiğinde silah sisteminin kullanımını kolaylaştırmaktadır. Sistem, gelecekte otonom olarak hedefi takip edecek yapay zekâ, görüntü işleme ve diğer alt sistemlerden gelecek ihtiyaca yönelik özellikler dikkate alınarak tasarlanmış ve üretilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde insansız hava araçları, silah ve silah alt sistemleri, görüntüleme sistemleri ve çeşitli tasarım ve imalat yöntemleri ile ilgili çalışmalar özetlenmiştir.

Başta ABD Ulaştırma Bakanlığı bünyesindeki Federal Havacılık İdaresi (FAA: Federal Havacılık İdaresi), Birleşmiş Milletler bünyesindeki Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO: Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü) ve Avrupa Hava Seyrüsefer Güvenliği Örgütü (EUROCONTROL) olmak üzere birçok havacılık örgütü, dron kullanımının bazı potansiyel olumsuz etkilerine değinmişlerdir. Bu cihazların kullanımına ilişkin yasal çerçeve konusunda kapsamlı araştırmalar yürütmektedirler. Türkiye'de ise Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı'na bağlı Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü bu konularda bazı çalışmalar yapmıştır. Kahveci ve diğerleri çalışmalarında, Türkiye'de ve dünyadaki İHA'ların sivil sektörü, kullanımları ve mevzuatı hakkında bir durum analizi sunmuşlardır [1].

Graham, “Kuşatılan Şehirler Yeni Askeri Kentçilik”, kitabında 6. nesil savaş uçaklarının imal edilip üretilmesi ile birlikte insansız hava araçları kullanımının dünya çapında yaygınlaşacağından bahsetmektedir [6].

Ak ve diğerleri, SİHA'ların yapay zeka teknolojisi ile önümüzdeki yıllarda daha da fazla kullanılacağını, SİHA açısından ulusal güvenlik ve iç güvenliğe yeni bir yaklaşım getirilmesinin faydalı olacağını belirtmişlerdir [2].

Karaağaç ve arkadaşları, İHA'nın geleceğin Hava Kuvvetleri'nin önemli bir unsuru olacağına değinmişlerdir. İnsansız Hava araçları için standartlar ve kullanım kavramları geliştirmenin ve Hava Kuvvetleri bünyesinde bir drone kültürü oluşturmanın önemini vurgulamışlardır [4].

İnsansız hava araçları (İHA) veri toplama yöntemlerinden biridir ve düşük maliyetli, hızlı ve yüksek doğrulukta veri sağlamaktadırlar. Operasyon zamanı ve maliyeti göz önüne alındığında insansız hava aracı ile toplanmış bilgilerin daha kolay işlenmesinin önemli olduğu görülmüştür. Kabadayı ve diğerleri, drone ile havadan görüntüleme yoluyla görüntü verilerini üst üste bindirilmiş bir şekilde toplamıştır. Daha sonra, toplanan görüntü verilerini

değerlendirmek için fotogrametri kullanmışlardır. Son olarak, nesne tabanlı bir sınıflandırma yöntem kullanarak üretilen fotogrametrik ürünlerden mimari detaylar belirlenmiştir. Tespit çalışması sonucunda %94 başarı oranı elde edilmiştir [3].

İHA'ların kullanım trendlerinin artması ile birlikte SİHA'lar savunma sektörü için önemli bir değer haline gelmiştir. Aynı zamanda önerilen karmaşık teknik yapı nedeniyle bu alanda üretim yapılması ülkeyi çok çeşitli teknolojik faydalar elde etmeye yönlendirecektir. Bakır ve diğerleri ülkemizin bu önemli teknolojiyi ithalatçıdan ihracatçıya nasıl dönüştürdüğünü analiz etmişlerdir. Ayrıca, ithalat yerine yerli ve milli kaynaklarla imal edilen Bayraktar TB2, Karayel ve Anka insansız hava savunma teknolojilerinin devreye alındığından bahsedilmiştir [5].

Güleryüz, İstinye Üniversitesi Güvenlik ve Savunma Stratejileri Uygulama Araştırma Merkezi'nin dergisi "Gündeme Bakış" Dergisi'nin Kasım 2019 13. Sayısında yazmış olduğu makalede; Taarruz amaçlı olarak da etkin kullanılabilmek için geliştirilen SONGAR Silahlı İnsansız Hava Aracı'nın alt sistemlerinden bahsetmiştir. SONGAR'ın, Milli tasarım Otomatik Atış Stabilizasyon Sistemi (OASİS) ve Drone Üzeri Makineli Tüfek (DMT) geri tepme sönümlene yeteneğine sahip olmasının ve namlunun 0-60 derece dikey ekseninde yön değiştirmesini sağlamasının önemine dikkat çekmiştir [7].

Ojha ve arkadaşları görüntü işleme metodu ile nesne takibi yapabilme adına yenilikçi bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kameradan elde edilen ham veriler belirli algoritmalar ile bir işlemci yardımı ile işlenerek sanal bir konum oluşturulmuştur. Bu sayede kamera sistemi nesneleri otonom olarak takip edebilir hale getirilmiştir [8].

Wixson ve ekibi, hareketli bir kameranın bir hedef nokta üzerinde sabit tutulamaması ve bir kameranın belirli bir 3B konuma tam olarak hedeflenememesi problemlerini bertaraf etmek amacıyla çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında, elektronik görüntü hizalama tekniklerinin bu sorunları çözmek için kullanılabileceğini açıklamışlardır. Bu teknikler, bir kamera ve gerçek zamanlı görüntü hizalama kullanılarak test edilmiştir ve sabitlenmiş görüntüler elde edildiği görülmüştür [9].

Maddalena ve çalışma arkadaşları görüntü işleme ve yapay zekâ ile ilgili deneyler yapmışlardır. Bu çalışmaların amacı, hareketli nesne algılama ve izlemeye yapay zekâ

tabanlı bir yaklaşım önermektedir. Spesifik olarak, yapay sinir ağları aracılığıyla kendi kendine organizasyona dayalı hareketli nesne algılamaya yönelik bir yaklaşım benimsemişlerdir. Bu yaklaşım, hareketli arka planlar ve kademeli aydınlatma varyasyonları içeren sahnelerin işlenmesine olanak tanır ve sabit kameralarla çekilen farklı video türleri için sağlam algılama sağlar. Ayrıca, nesne takibi için, eldeki problem için uygun şekilde örneklenen Kalman filtreleme ile Çoklu Hipotez Testi sınıfına ait bir eşleştirme modeli arasında uygun bir bağlantı önermişlerdir [10].

Ekmen ve arkadaşları, görüntü işleme ile havadaki bir İHA'nın zemin üzerindeki renkli bir alana otonom olarak inmesini sağlamışlardır. Otonom iniş için gerekli olan ve anlık kontrol edilen değerleri, kamera görüntüsü kullanarak değerlendirmişlerdir [11].

Yayla ve arkadaşları, silahlı bir uçak sisteminin tasarım ve performans gereksinimleri için senaryolar oluşturmuş ve bir yöntem ortaya koymayı amaçlamışlardır. 4 farklı muharebe senaryosu içerisinde silahlı insansız hava aracının ihtiyacı olan kanat, gövde ve kuyruk çeşitlerine dayalı ihtiyaçları belirlenmiştir [12].

Nişancı ve arkadaşları, ışığın İHA ve farklı malzemeler üzerindeki etkisini incelemişler ve alüminyum ve kompozit malzemelerde iyi bir elektrik iletkeni (PEC) için akımın geri dönüşünün daha yüksek olduğunu bulmuşlar ve yine benzer sonuçlar vermişlerdir [13].

Ramesh ve Jeyan; boyut, menzil, dayanıklılık, çalışma irtifası, maksimum kalkış ağırlığı (MTOW) gibi parametrelerin mini İHA'ların kullanımı üzerine etkisini araştırmışlardır. Sadece askeri araçlar için değil, sivil araçlar için de parametrelerin önemli olduğunu belirlemişlerdir [14].

Bir Hindistan savunma dergisi olan "The Print" dergisinde yazar olan Dutta, A.N, Jammu Hava Kuvvetleri istasyonuna yapılan bir drone saldırısının, dikkatleri yeniden insansız hava araçlarına ve bunların Hindistan için yeni bir terör mücadelesini nasıl sembolize ettiğine çevirdiğine vurgu yapmışlardır [15].

Klasik dört rotorlu helikopter uçak gövdelerine göre birtakım avantajlar sergileyen dört rotorlu bir uçak gövdesi olan H-gövde yapısı tasarımcılar arasında yaygın değildir. Getsov ve çalışma arkadaşları makalelerinde, H-gövde yapısının faydalarını açıklamayı ve H-

gövdesini modern dört rotorlu insansız helikopterlerde kullanılan en iyi bilinen uçak gövdeleriyle karşılaştırmayı amaçlamışlardır. H-uçak gövdesinin dinamik özelliklerine ve bu gövde yapısına dayalı insansız helikopterlerin mekanik rijitlik, verimlilik ve manevra kabiliyetinde standart dört rotorlu uçak gövdelerinden üstün olduğuna dikkat çekmişlerdir [16].

Bauman, R. E. ve arkadaşı spin(döner) ve fin(kanatlı) mekanizmalı güdümsüz mühimmatları imalat kolaylığı ve mekanik özellikler açısından kıyaslayan bir çalışma yapmışlardır. Spin(döner) roket mekanizmasının fin roket mekanizmasına göre daha kolay ve hızlı imal edildiğini vurgulamışlardır [17].

Hauser ve arkadaşı çalışmalarında, bir spin(döner) rokete ait modüler bir lançer mekanizması tasarımını sunmuşlardır. Çalışmalarında; hafif, modüler ve kompakt tasarımlarından bahsetmişlerdir. Spin(döner) roketlerin patlatma plakasına ve tam kapalı namlu ihtiyacının olmamasına atıfta bulunarak, hafif olması önemli olan sistemlerde kullanımının yararlı olacağına değinmişlerdir [18].

Makine Kimya Enstitüsü Genel Müdürlüğü ürün kataloğunda 40mm çapında güdümsüz mühimmatların standart olarak geliştirilip üretilmesine devam edildiğinden ve envanterleri bu mühimmatların bulunduğu bahsedilmiştir [19].

Altmann ve ekibi Alman Barış Araştırmaları Vakfı DSF tarafından finanse edilen 'Küçük ve Çok Küçük Silahlı Uçaklar ve Füzerler için Önleyici Silahların Kontrolü' projesi içerisinde, sürülerde kullanımları da dâhil olmak üzere daha küçük uçak ve füzelerden beklenen özellikleri araştırmışlardır [20].

ROKETSAN ürün kataloğunda 40mm çapında lazer güdümlü mühimmatların standart olarak geliştirilip üretilmesine devam edildiğinden ve envanterlerinde bu mühimmatların bulunduğu bahsedilmiştir [21].

Aksu ve ekibi, füze aerodinamik parametrelerini rüzgâr açısını ölçmeden başarılı bir şekilde tahmin etmek için bir yöntem önermişlerdir. Tahmin çalışmalarında kullanılmak üzere rüzgâr açısı verilerini yeniden yapılandırmak yerine, bu yapılandırma sorunu tahmin sırasında ele alınmaktadır. Geliştirilen tahmin algoritması, model füzelerin benzetim

sonuçları üzerinde test edilmiştir. Tahmini sonuçların simülasyonda kullanılan gerçek değerlerle karşılaştırılması ile önerilen yöntemin rüzgâr açısının olmadığı durumlarda doğru ve güvenilir sonuçlar verebileceği gösterilmiştir. Yöntem, gerçek atış testi verilerine de başarıyla uygulanmıştır [22].

Silahlı dronlar, kullanım kolaylığı ve taktiksel kullanım için gelişmekte olan popüler bir teknolojidir. Bu bağlamda farklı ağırlık ve ebatlardaki SİHA'lar özel amaçlı işlevlerine göre tasarlanmakta ve üretilmektedir. SİHA'nın havacılık sanayisine göre üretimi önemli bir konudur. Bu açıdan bakıldığında üzerine entegre edilen silah sistemlerinin kendileri kadar hafif ve dayanıklı olması gerekmektedir. Minyatür taktik İHA'ların nispeten sınırlı menzil ve uçuş süresi göz önüne alındığında, SİHA'nın bileşenlerinin ve alt sistemlerinin en dayanıklı ve en uzun ömür ile görevlerini yerine getirilebilmesi için gerekli ağırlık azaltma yöntemlerinin benimsenmesi gerekmektedir. Bu aşamada çentik faktörüne dayalı parça ağırlık azaltma yöntemi ve topoloji en iyileştirmesi ile ağırlık azaltma yöntemi ortaya çıkmıştır. Bu hususta literatürde farklı çalışmalar bulunmaktadır.

Ürün kalitesini artırma ve ekonomik nedenlerden dolayı minimum malzeme ile uygun değer ihtiyacı karşılama doğrultusunda ağırlığı azaltılmış ince saclar araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiştir [23-28].

Jin ve diğerleri, son zamanlarda geliştirilen kısıtlı kabukların sonlu elemanlar yöntemini kullanarak bir dizi sayısal örnek üzerinden ince duvarlı elemanların elastik burkulmasını ve konik çelik kesitlere uygulanabilirliğini analiz etmektedir. Çelik yapılarda konik kesitler geniş bir uygulama alanına sahip olduğundan, bu malzemelerin kararlı davranışları sayısal olarak analiz edilmiş ve optimize edilmiştir [23].

Shen ve ekibi, ince plakaların kalın plaka bağlantılarıyla karşılaştırıldığında kaynak işleminde ilk kaynak deformasyonu, kaynak açısı deformasyonu ve kaynak yanlış hizalanması gibi kaynak kusurlarına eğilimli olduğundan yola çıkarak, kaynak kusurlarının yorulma mukavemeti üzerindeki etkisi göz önüne alındığında değiştirilmiş gerilme büyütme faktörü hesaplama formülü üzerinde çalışmışlardır [24].

Nie ve arkadaşları kesme modülünün yalnızca radyal yönde değiştiğini varsayarak dairesel bir delik etrafındaki gerilim konsantrasyon faktöründeki azalmayı analitik olarak

incelemiştir. Burada sunulan analitik sonuçlar, dairesel delikli bir sac levha için yaklaşık/sayısal çözümlerin doğruluğunu göstermek amacı ile karşılaştırma ölçütü çıkarıp deneysel olarak kıyas yapmışlardır [25].

Hawk ve ekibi çelik silindirik bir kabuktaki takviyeli dairesel bir delik etrafındaki gerilme dağılımını, çeşitli delik boyutları veya takviye dereceleri için deneysel olarak belirlemişlerdir. Sonuçları, düz plaka teorisi, Lure teorisi ve General Technology Corporation pertürbasyon tekniğinden gelen tahminlerle karşılaştırmışlardır. Deneyde bozulma olan alanlarda Huber-Hencky - VonMises maksimum bozulma enerjisi teorisine dayanan stres konsantrasyon faktörleri kullanılırken, bozulmamış alanlarda da mevcut olan teorik strese dayalı olan stres konsantrasyon faktörleri kullanılarak hesaplama yapmışlardır [26].

Dairesel boşlukların deney ortamında stres konsantrasyon faktörü analizi, çerçeveler ve makine parçalarında kullanıldığı için günümüzde ilgi görmektedir. Christy ve arkadaşları yapıların basitleştirilmiş şekilde modellenmesine izin veren sayısal bir prosedür olan uygulamalı eleman yöntemi (AEM) ile, rijit elemanlar ve yaylar kullanılarak bir deney modeli oluşturmuşlardır. Deneyde, sonsuz sayıda yaya sahip genelleştirilmiş iki boyutlu bir dairesel sektör elemanı düşünülmüştür. Sonuçlar mevcut analitik sonuçlarla karşılaştırılmış ve iyi bir uyum gözlemlenmiştir [27].

Huang ve arkadaşları eksenel yüklü ince duvarlı kirişleri bir sonlu eleman formülasyonu kullanarak incelemiştir. Kiriş elemanının kinematığı, mevcut eleman koordinat sisteminde açıklanmıştır. Eleman düğüm kuvvetleri, sanal çalışma prensibi ve tam geometrik olarak lineer olmayan kiriş teorisinin tutarlı ikinci dereceden lineerizasyonu kullanılarak türetilmiştir. İncelenen sayısal örnekler, açık kesitli kirişlerin burkulma sonrası davranışları üzerinde bimomentlerin etkilerinin görüldüğünü göstermektedir [28].

Genel kiriş teorisine dayanan ve deforme olabilen ince duvarlı kirişe sonlu elemanlar metodu uygulanan çalışmalarda, türetilen formülasyonların hassasiyetinin, diğer kiriş formülasyonlarına göre daha hassas olduğu tespit edilmiş, oluşan deformasyon çeşitleri incelenmiştir [29-33].

Peres ve arkadaşları, dairesel eksenli (ön bükümsüz) ve deforme olabilen ince duvarlı enine kesitlere sahip doğal eğri kirişlerin birinci mertebeden davranışını analiz etmek için Genelleştirilmiş Kiriş Teorisine (GBT) dayalı karışık bir sonlu eleman yöntemi önermişlerdir. Varsayılan gerinim kavramını, düz elemanlarda bulunmayan ve kilitlenmeye neden olan uzunlamasına gerinim terimlerine uygulamışlardır [29].

Duan ve ekibi büyük sapmalar, sonlu dönüşler, yerel burkulma ve dış bükeylik gibi deformasyonlara maruz kalan ince duvarlı elemanların elastik analizleri için genelleştirilmiş kiriş teorisine (GBT) dayalı yeni bir doğrusal olmayan kesitte deforme olabilen kiriş formülasyonu sunmuşlardır. Çalışmada, prizmatik ve kavisli ince duvarlı elemanları simüle etmek için hesaplama açısından daha verimli ve yapısal olarak açıklayıcı bir alternatif sağlamayı amaçlamışlardır. Geleneksel kiriş elemanları ve daha yüksek dereceli kiriş teorilerine dayanan diğer kiriş formülasyonları ile karşılaştırmışlar, malzeme kesit yer değiştirme alanının kinematik tanımını ve denge denklemlerini çözmek için Galerkin yöntemine dayalı bir kiriş sonlu elemanını geliştirmişlerdir [30].

Koiter gerilim (veya düzleminde bükülme) durumundaki bir sac malzemenin merkezi dairesel deliğin etrafındaki gerilim konsantrasyonu sorununu kapsamlı bir şekilde araştırmıştır. Deneysel araştırmaları, büyük delikler için gerilim konsantrasyon faktörü hakkında değerli veriler sağlamıştır [31].

Li ve arkadaşları, ince duvarlı çerçeve yapılar için doğrusal olmayan kiriş elemanlarının formülasyonu üzerine bir çalışma sunmaktadır. İlk olarak, tüm ana doğrusal olmayan gerinim terimlerini içeren kiriş teorisine dayalı bir formülasyon geliştirilmişlerdir. Daha sonra, doğrusal olmayan gerinim ifadelerindeki farklı terimler ve bunların doğrusal olmayan kararlılık ve burkulma sonrası analizlerdeki çözüm doğruluğu üzerindeki etkileri üzerinde kapsamlı bir araştırma yapmışlardır. Basitleştirilmiş bir gerinim ifadesi önererek ve formülasyon kullanarak fiziksel ve geometrik olarak doğrusal olmayan analizler için yeni bir ince duvarlı kiriş elemanı geliştirmişlerdir. Son olarak, önerilen formülasyonun ve elemanın etkinliğini göstermek için sayısal örnekler sunmuşlardır [32].

Hansen ve arkadaşlarının çalışmalarında, enerji prensiplerini kullanarak, deformasyona meyilli, deforme olabilen kesitlere sahip kirişlerin analizi için ince duvarlı bir kiriş elemanı tanıtılmıştır. Kiriş elemanı, gelişmiş bir ince duvarlı kiriş modelinin önceden elde edilen yarı

analitik yer değiştirme çözüm seçeneklerine dayanmaktadır. Lineer analiz için birinci dereceden kiriş elemanı, hem Timoshenko hem de Mindlin-Reissner tipi deformasyonlarla ilgili kayma deformasyonlarını, burulmanın çarpma etkilerini, ilgili çarpılma etkilerini içeren enine kesit distorsiyonunu ve ayrıca normal gerilmeden enine yer değiştirme etkisini ele alınmıştır. Çalışma sonucunda kesme transferi, katı elemanlar kullanılarak oluşturulan sonlu eleman modelinin incelenmesiyle doğrulanmıştır [33].

Bir plakada deliğin bulunması, her zaman gerilim alanının bölgesel bir şekilde bozulmasına ve bunun sonucunda plakanın gerilim konsantrasyonları nedeniyle zayıflamasına neden olmaktadır. Mansfield ve arkadaşları çalışmalarında, levhanın mukavemetinin arttırılması ile gerilim konsantrasyonlarının azaltılabileceğini belirtmişlerdir [34].

Bickley ve arkadaşları, ince bir plaka üzerinde bulunan dairesel deliğin çevresindeki gerilmeleri matematiksel olarak hesaplamış, yaklaşık bir çözüm ile gerilmelerin sadece delik çapı parça genişliğine kıyasla çok küçük olduğunda tespit edilebildiğini gözlemlemişlerdir [35].

Alonso ve arkadaşları, ince sac malzeme ile tasarlanmış kompozit malzemenin balistik davranışını gözlemek amacı ile bir sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen model, deneysel darbe testlerine göre doğrulanmıştır [36].

Duana ve arkadaşları da, teorik bir model oluşturarak, uzun cam takviyeli polipropilen (LGFRP) kompozitindeki delik büyüklüğünün delik gerilimine etkisini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar, gerilim konsantrasyonundan etkilenen alanının delik yarıçapının dört katı olduğunu ortaya koymuştur [37].

İnce sac malzemeler üzerinde hesaplama yapılırken, küresel, çarpıtılmış, yerel, düzlem içi kesme ve enine uzama gibi davranış bileşenlerinin aynı olması karmaşıklığa neden olmaktadır. Ádány, çalışmasında bu karmaşık hesaplamaları farklı açılardan bölerek basitleştirmiş ve çözümlemesini uygulamalı sonlu elemanlar yöntemi ile ispatlamıştır [38].

Son zamanlarda ince plakalarda topoloji optimizasyonu ile ağırlık azalımını ve maksimum gerilim kontrolü üzerine yapılan çalışmalar da bulunmaktadır [39].

Bujny ve arkadaşları, ince duvarlı yapıların nervür takviyelerinin optimizasyonu için evrimsel algoritmaları kullanan yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Sonuçlar, evrimsel optimizasyon algoritmaların, ince duvarlı yapıların topoloji optimizasyonu için verimli bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir [40].

Zhang ve arkadaşları, iki boyutlu plaka ve üç boyutlu boru bileşenlerine uygulanabilen ince duvarlı yapılar için çok bileşenli bir topoloji optimizasyon yöntemi sunmuş ve önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamışlardır [41].

Seika ve arkadaşları, son birkaç yılda Japonya Makine Mühendisleri Derneği'nin İşlemlerinde ve diğer süreli yayınlarda bölümler halinde yayınlanan takviye halkası hakkındaki çalışmasını derlemiştir. Araştırma, farklı oranlardaki halkalar ve çeşitli eğrilik yarıçaplarına sahip dolgular üzerinde gerçekleştirilmiştir ve takviyelerin dairesel deliklerin etrafındaki gerilme konsantrasyonları üzerindeki üç boyutlu etkileri incelenmiştir [42].

Mühimmat fırlatma mekanizmaları ve namlu sistemlerine ait kinematik, malzeme ve matematiksel çalışmalar araştırılıp incelenmiştir [43-56].

Tatar ve Yakut, dört ayaklı bir robotun üzerine konan bir topun dengesini incelemişlerdir. Bu doğrultuda üzerinde namlu sistemi bulunan dört ayaklı bir robotun hareketini temsil eden matematiksel bir model elde etmişlerdir. PID kontrol sistemi sayesinde robot hareket halindeyken tabancanın stabilitesi kontrol edilmektedir. Bu simülasyon için MATLAB yazılım paketi kullanılmış ve sonuçlar grafiksel olarak analiz edilmiştir [43].

Pehlivanlı ve Yıldız, dönmeyen silahlarda kullanılan sarkaç ve silahların ağırlıklarını ve döner silahlarda kullanılan zırh kapağının rotorlarını değiştirerek, savunma ve kalkan sisteminin montaj sürelerini incelemişlerdir. Ağırlık, balans çarklarında %7'den %38'e ve rotorlarda %9'dan %17'ye düşürülmüştür. Sarkaçların ağırlığının azaltılmasının kapanma süresini azalttığı, rotorların ağırlığının azaltılmasının ise durma süresini artırdığı sonucuna varılmıştır [44].

Yasul ve Güler, elektromanyetik silahın davranış modelini MATLAB Simulink'te modellemişlerdir. Bu çalışmada sistemi etkileyen parametrelerin değiştirilmesi durumunda, sistem davranışının analiz edilmesi ve uygulanabilirliğinin gösterilmesi amaçlanmıştır.

Ayrıca, elektromanyetik silahın kayıpları arttığında yer değiştirme, akım ve hız değerlerinin değişimi gözlemlenmiştir [45].

Güngör, zaman ve maliyet açısından birçok esneklik sağlayan bir iç balistik hesaplama ve namlu tasarım programı geliştirmiştir. Deneysel veriler ile bir namlu tasarımında gerekli olabilecek tüm parametreler iç balistik yöntemlerle hesaplanmıştır. Tasarlanan program ile birlikte iç balistik hesaplamalar yöntemi ile namlu tasarımında kullanılan değişkenlere ulaşmak mümkün hale gelmekte ve bu sayede bir namlu tasarımı nasıl yapılmalıdır sorusuna cevap vermektedir [46].

Geng ve arkadaşları, kaplama-alt tabaka arayüzündeki yorulma hasarı birikimine dayalı olarak bir silah namlusunun ömür tahmin yöntemi önermişlerdir. Küçük kalibreli bir silah namlusunun ömrü, sırasıyla sabit çekme mukavemeti ve sıcaklığa bağlı çekme mukavemeti kullanılarak tahmin edilir ve tahmin sonuçları karşılaştırılır ve analiz edilmiştir. Araştırma sonuçları, ateşleme sürecindeki sıcaklık artışına bağlı olarak arayüz gerilme mukavemetinin azalmasının, arayüz hasarı ve silah namlusu arızasının önemli bir tetikleyicisi olduğunu göstermektedir. Ömür tahmin modelinde sıcaklığa bağlı çekme mukavemeti dikkate alındığında, tahmin sonuçları sabit gerilme mukavemeti kullanılarak tahmin edilenden daha küçüktür ve ömür testi sonuçlarıyla iyi bir uyum içindedir. [47].

Rutci çalışmasında, genel olarak kullanılan 4140 ve türevi namlu malzemelerine alternatif olarak malzeme geliştirmiş, laboratuvar testleri yapmıştır. Çalışma kapsamında, 1.2340 sıcak iş takım çeliğinin özellikleri incelenmiş olup, namlu üretimine uygun olduğu görülmüştür. 1.2340 sıcak iş takım çeliğinden üretilen namlu parçasının kullanıldığı hafif polimer gövdeli silah, saha ve laboratuvar testlerinden başarı ile geçmiştir. Kullanılan yeni namlu malzemesiyle kullanım ömrü yaklaşık %66 oranında artırılmıştır [48].

Sönmez, Kundağı Motorlu Obüs namlusundaki en fazla gerilmenin olduğu namlu yanma odasına etki eden gerilmelerin matematiksel modelini oluşturmuştur. Anlık namlu iç basınç değerleri kullanılarak, temperlenmiş çelik, dökme demir ve titanyum alaşımlı çelikten üretilen namluların yanma odalarına etki eden gerilme değerleri ve yanma odalarındaki toplam deformasyon değerleri zamana bağlı olarak yapılan analizler neticesinde elde edilmiştir. Yapılan analizler ile, optimum namlu malzemesinin temperlenmiş çelik olduğu görülmüştür [49].

Kuchenreuther-Hummel ve Lietz silah namlusunda erozyon mekanizmaları ile farklı silah iticilerinin etkisini araştırmak ve daha yüksek erozyona neden olan faktörleri belirlemek için bir deney düzeneği hazırlamışlardır. Kapalı bir kaptaki tabanca itici gazının temel karakterizasyonuna ek olarak, bir basınç sensörü ile donatılmış havalandırılmalı bir kap kullanılmıştır. Daha yüksek ateşleme hızının, daha uzun bir soğutma süresi ile ilişkili olduğu, küçük parametre değişikliklerinin sıcaklık eğrisinde ölçülebilir bir değişikliğe yol açtığı gözlemlenmiştir [50].

Li ve arkadaşları, bir makineli tüfeğin kullanım ömrü boyunca iç balistik performansındaki değişimi incelemek için 12,7 mm kalibrelik bir silah namlusunun kapsamlı ömür testini yapmışlardır. Bu temelde, parametrik modelleme yöntemi kullanılarak üç boyutlu bir namlu aşınması sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Sonuçlar, 4300 mermi atıldıktan sonra mermi kafasının namludaki radyal salınımının 0,35 mm'ye ulaştığını ve mermi dönüş hızının önceki performansına kıyasla %57,5 azaldığını göstermektedir. Sonuç olarak, namlunun arka kısmındaki aşınmanın (tüfeklerin ilk konumu), namlu ömrünün sona ermesinin temel nedeni olduğu görülmüştür [51].

Bozdemir, silah amaçlı kullanılmak üzere masaüstü silah stabilizasyon sistemi tasarlamış ve 3D yazıcı ile prototipini geliştirmiştir. Havalı tabanca sistemine uygun olarak çalışan tabanca atış sistemi, sistemi sayesinde tabancayı ayarlayarak her seferinde aynı yerden belirlenen hedefi vurabilmektedir. Geliştirilen bu tip model ile tabancanın gövdesine zarar vermeyen, ergonomik, hatasız monte edilebilen, değiştirilebilen tabancanın bağlantı noktası değiştirilebilmektedir. Analiz ve kalibrasyon işlemi için geliştirilen bir model başarıyla kullanılmıştır [52].

Fan ve Gao çalışmalarında, fırlatma sırasında sondaj yüzeyinde meydana gelen çatlak ve aşınmaları açıklamakta, aşınmayı etkileyen faktörleri ve bunların kontrol önlemlerini analiz etmektedir. Ayrıca bu faktörlere dayanarak, erozyon azaltıcı katkı malzemeleri kapsamlı bir şekilde tartışılmıştır. Son olarak, kapsamlı analiz, ERAM teknolojisinin yüksek verimlilikle erozyon ve aşınmayı yavaşlatmanın etkili bir yolu olduğunu göstermektedir [53].

Susantez, Vallier-Heydenreich sistemindeki 7,62 mm ve 9 mm kalibreli topların balistikleri arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Silahın ele alınması için konumu, hızı, namlu iç basıncı ve

mermi iç balistik momentini birbirinin fonksiyonu olarak belirlenmiş ve bu değerlerin fonksiyonel denklemleri ilk defa oluşturulmuştur [54].

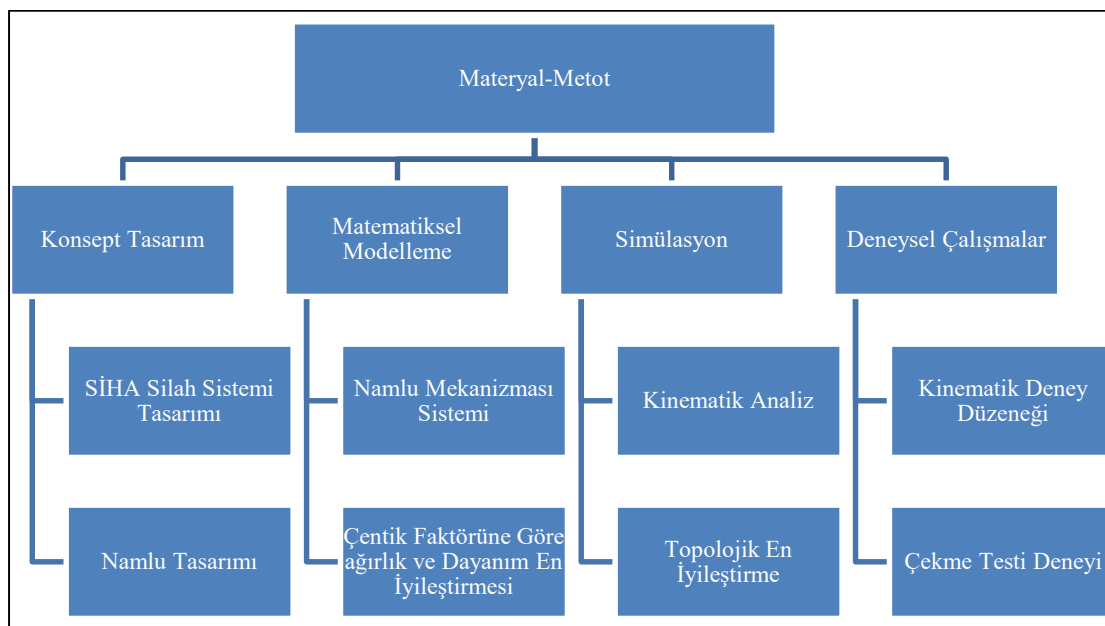
Silah namlusu toplam kullanım ömrü boyunca, yüksek basınç ve yüksek sıcaklıktaki itici gazın neden olduğu erozyondan ve mermi ile silah namlusu arasındaki yüksek hızlı sürtünmeden kaynaklanan aşınmaya ve ciddi hasara maruz kalmaktadır. Binlerce ateşleme döngüsü, silah namlusunun yorulmasına neden olmaktadır. Erozyon ve yorgunluk dâhil olmak üzere aşınma etkileşimi silah namlusuna zarar vermektedir. Wu ve arkadaşları, silah namlusunun hasar ve kırılma mekanizmasının analizine dayalı olarak hidrolik testler gerçekleştirmişlerdir. Test sonuçlarında, silah namlusu sağlığının, dış yüzey gerilimi izlenerek değerlendirilebileceğini ve gerilim hızla değiştiğinde, yorulma kırılmasını önlemek için silahın devam eden ateşinin durdurulması gerektiğini rapor etmişlerdir [55].

Xi ve Wu klasik iç balistik model yardımı ile namlu içi ve dışı termal ortam parametrelerini analiz etmişlerdir. Namlunun ısı transfer sürecini hesaplamak için sonlu farklar yöntemi kullanmış, tepe sıcaklık ve radyal sıcaklık alanının dağılımını elde etmişlerdir. İç duvar sıcaklığının ilk başta hızlı bir şekilde arttığını ve uç değere ulaştığında sıcaklık artış hızının giderek azaldığını gözlemlemişlerdir [56].

Bu çalışmada bir silahlı mini insansız hava aracına göre bir silah sistemi tasarımı ve modellenmesi yapılmıştır. Güdümsüz mühimmatların atış kesinliği ve verimini artırmak tezin amacıdır. Literatür çalışmaları incelendiğinde farklı birçok yöntem ve uygulama ile silah sistemleri üzerine çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Tez kapsamında literatür çalışmalarından farklı olarak, namlu sisteminden bağımsız bir kamera sisteminin tasarlanması ve deney düzeneğinin üretilmesini kapsamaktadır. Ayrıca literatürde var olan ince saclar üzerine yapılmış çalışmalardan farklı olarak tez içerisinde bir mühimmat namlusu tasarımında stres konsantrasyon faktörleri ile topolojik en iyileştirmeye dayalı malzeme boşaltmanın kıyaslanması yapılmıştır.

3. MATERİYAL METOT

Bu çalışmada, değişken tüm açılarda nişan alıp atış yapabilen, hareketli bir hedefi takip edebilen mini bir SİHA'ya ait yeni bir silah sistemi namlusu için matematiksel modelleme ve benzetim yapılmıştır. Ayrıca tasarım aşamasında, çentik faktörüne dayanarak parça üzerinde ağırlık azaltma yöntemi ve topolojik en iyileştirme ile ağırlık azaltma yöntemleri ön plana çıkmaktadır. SİHA silah sisteminin namlusunda kullanılacak olan takviyeli delikli ince plakaların çentik faktörü ve topolojik boşaltma yöntemleri ile optimizasyonu da gerçekleştirilmiştir. Optimizasyonda aynı malzeme kullanılarak farklı geometrik model ve aynı çekme gerilme yönlerine göre çalışılmıştır. Analiz sonuçları sayısallaştırılmış ve anlamlı hale getirilmiştir. Sonlu elemanlar metodu (FEM) ve regresyon analizi ile çıkan sonuçlar karşılaştırılarak elde edilen veri değişkenliğinin ne kadarının regresyon doğrusu tarafından açıklandığı saptanmıştır. Belirlenen geometrik modellemelerin aynı sayısal değerleri ile topolojik optimizasyon uygulanarak, ağırlık azaltma yapılmıştır. Ön tasarım çalışmaları birbirleri ile karşılaştırılmış ve son tasarım için dayanım-ağırlık oranında uygun değer sonucunu verecek sayısal veriler tercih edilmiştir. Ayrıca matematiksel modelleme ve simülasyonlardan elde edilen verilerin karşılaştırılması ve doğrulanması amacı ile bir masaüstü deney düzeneği tasarlanmıştır. Deney düzeneği 3 boyutlu baskı teknolojisi kullanılarak imal edilmiştir. Şekil 3.1.'de yapılan çalışmalar diyagram üzerinde özetlenmiştir.



Şekil 3.1. Materyal metot çalışma ağacı

3.1. Konsept Tasarım

Silah sisteminin tasarımına başlamadan önce, tasarım konseptine ve gereksinimlere göre blok oluşturulmalıdır. Bu sınırlar; Denge, elektronik cihazın gücüne ve silah sisteminin gerekli mekanik özelliklerine (örneğin, 0 ile 90 derece arasındaki hareket) karşılık gelmektedir. Ayrıca silah sisteminin tasarımını etkileyen en önemli faktörlerden biri de kullanılan mühimmatın özellikleridir.

İnsansız hava araçları, beş ağırlık kategorisine ayrılmıştır: nano (250 g'a kadar), mikro (250 g - 2 kg), küçük veya küçük (2-25 kg), orta (25-150 kg) ve büyük (150 kg'dan fazla) [15]. mini ihalar, 2 ila 25 kg ağırlığındadır ve taktik kullanım için uygun görünmektedir. Modellemede, tasarımsal sınırlandırmalar için mini insansız araçlar tercih edilmiştir. Mini insansız araçlara entegre edilecek silah sistemleri de araca uygun olarak küçük boyutlarda olmalıdır.

İHA'nın gövde tipi konsept tasarım olarak H gövde olarak tanımlanmış olup, H tipi şasinin en büyük avantajı elektronik modüllerin ve ekipmanların gövde üzerine rahatlıkla monte edilebilmesidir [16]. Döner kanadın çerçeve tasarım ölçülerine göre yaklaşık 700-1100mm arasında tasarlanmasının uygun olacağı belirlenmiştir.

Akıllı mühimmat boyutunu küçültmek, hasar ve isabet oranını artırmak ve bu mühimmatların taktik silahlı insansız hava araçlarında kullanılması günümüz silahlı insansız hava araçlarının tasarımı için etkili nedenlerdendir. Stabilizasyon işlevine sahip füze; Basit seri üretim, düşük maliyetli ve kolay kullanım özelliklerine sahip bir silah sistemi kullanılarak gerçekleştirilebilir [16-17]. Standart füze fırlatma sistemlerinde eksenel itme sağlamak ve serbest uçuştan önce dönme kararlılığını sağlamak için muhafaza mekanizmalarının, kapalı fırlatma rampalarının, uzun ve ağır fırlatma tüplerinin (patlama) veya benzeri montaj plakalarının kullanılmasını gerektirir [18]. Mühimmatın kapalı olması ve harp başlığına ihtiyaç duymadan çalıştırılabilmesi, küçük ve üretimi kolay SİHA silahının tasarımında kullanılabileceğini göstermektedir. Bu alanda çapı 40 mm ve daha az olan mühimmat bulunabilmektedir [19]. İkincisi, silah sistemlerinde güdümlü füzeler tercih edilmektedir. Şekil 3.2.'de gösterilmiş bu tür mühimmatların bir örneği, Roketsan tarafından üretilen 40 mm minyatür lazer füzesidir [20-21]. Günümüzde geliştirilen tahmin

algoritmaları sayesinde rüzgâr açısı olmadan gerçekleşen füzelerin aerodinamik parametrelerini çıkarmak mümkündür [22].



Şekil 3.2. ROKETSAN Yatağan 40mm lazer güdümlü füze [21]

Küçük silah taktik İHA'ları ve silah sistemleri, uygulanabilirlik sınırlamaları ve standartlarına göre tasarlanmaktadır. Tasarlanan sistemin temel gereksinimleri Çizelge 3.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Konsept tasarım gereksinimleri

Boyut	Mini
Gövde	H-Tipi
Mühimmat	40mm Güdümlü/Güdümsüz
Mühimmat Sayısı	6
Mekanizma Özelliği	0-90 Derece Hareketli Namlu
Elektronik Donanım	Lazer mesafe okuyucu Servo Motor Enkoder Kamera Kontrol Kartı Imu Sensor

Çizelge 3.1'de görüldüğü gibi, taktik silah sisteminin tasarımına bağlı olarak, farklı mühimmat türleri (güdümlü veya güdümsüz) arasından 40 mm mühimmat kullanılması tercih edilmiştir. Rüzgâr vektörü, basınç parametreleri vb. parametreler ihmal edilmiştir. Sistemde açık namlu ve geri tepme plakaları kullanılmamaktadır. Bu nedenle kullanılacak mühimmatın geri tepmesini ve sistemde oluşacak titreşimleri ortadan kaldırmak için ek bir kompensatör sistemine gerek yoktur. Küçük boyutlu akıllı güdümlü mühimmat ve güdümsüz füzeler, küçük insansız hava araçları için kullanılmaktadır. Ek olarak bu durum, sistemin hafif ve üretimi kolay olmasını sağlamaktadır.

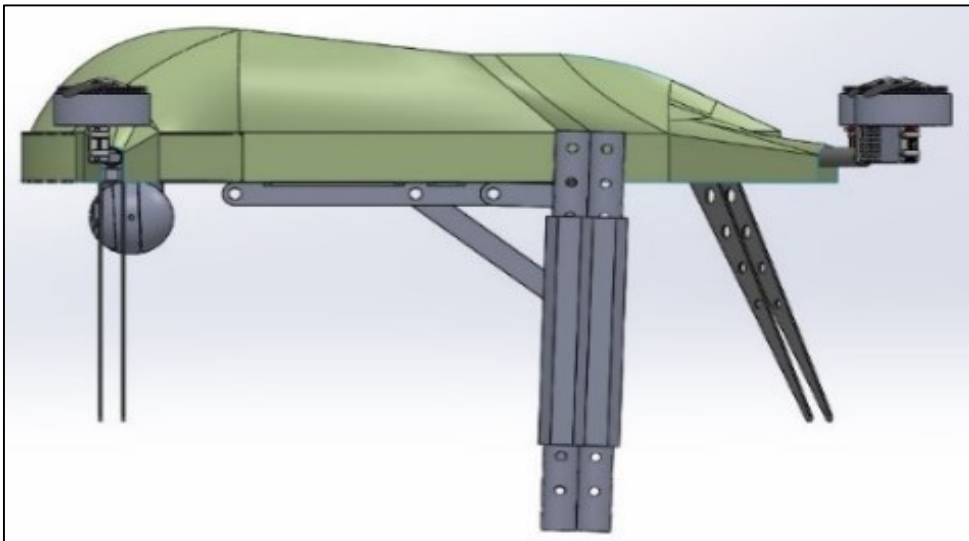
Tasarım üzerine;

- Servo motorlu ve kameralı lazer mesafe okuyucu alt sistemi
- 0-90° arasında hedef hareketi yapabilen, 3 mühimmat kapasiteli mekanizma alt sistemi eklenerek namlu yapısı bulunmaktadır.

Motor kontrollü lazer mesafe okuyucu ve namlu- motor mekanizması sistemlerinin konum kontrollerinin enkoderler tarafından sağlanmaktadır. Şekil 3.3.'te küçük taktik silahlı insansız hava aracının, Şekil 3.4.'te ise küçük insansız hava aracının silah mekanizması ve alt sistemlerinin kavramsal tasarımı sunulmuştur. Şekil 3.6.'da ise birim ince namlu levhası ölçüleri verilmiştir.

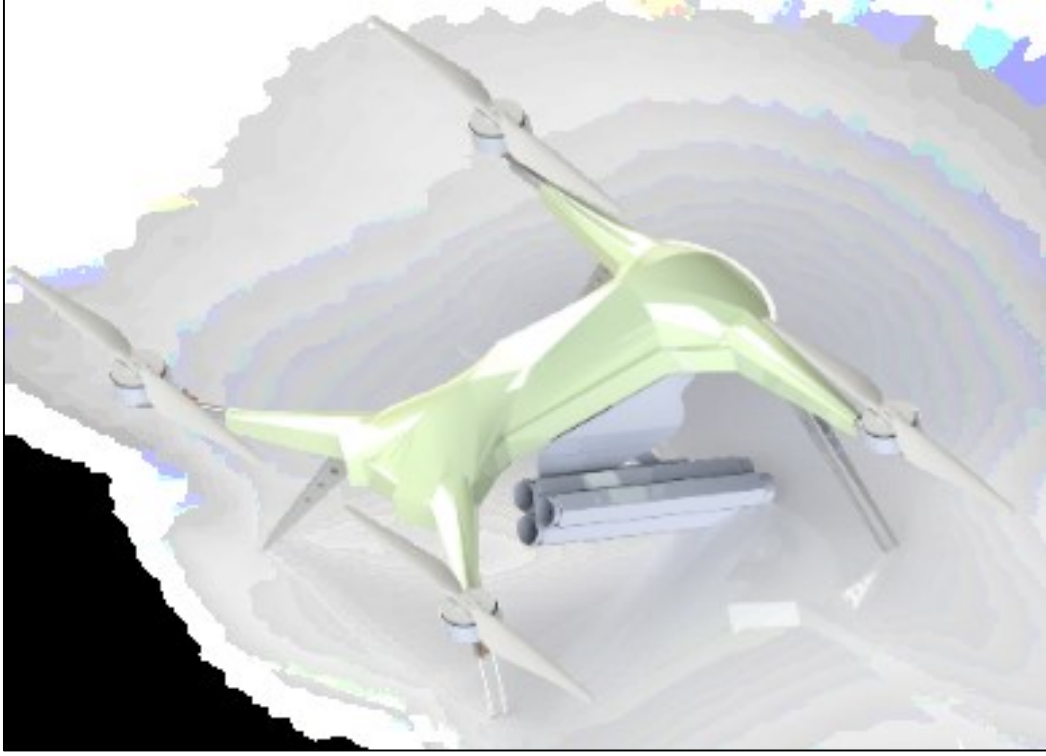


Şekil 3.3. Taktik silahlı mini insansız hava aracı konsept tasarımı

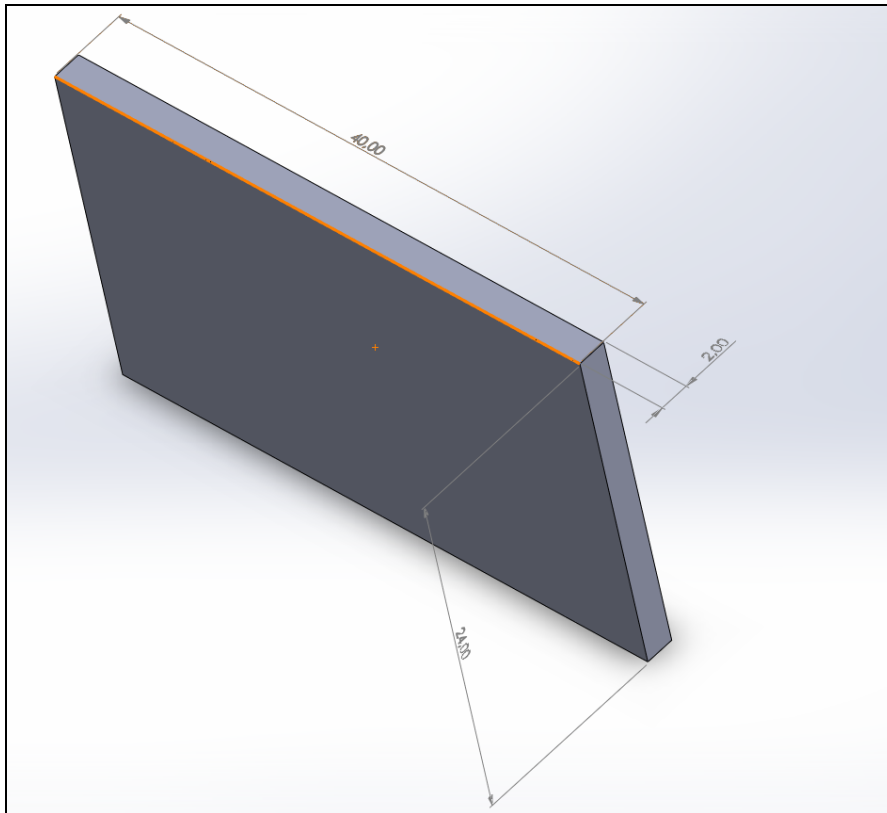


Şekil 3.4. SİHA silah sistemi kavramsal tasarımı

Mini insansız hava aracı için belirlenen 40mm 'lık mühimmat tipine uygun bir lançer sisteminin konsept tasarımı bu sınırlar doğrultusunda yapılmıştır (Şekil 3.5.).



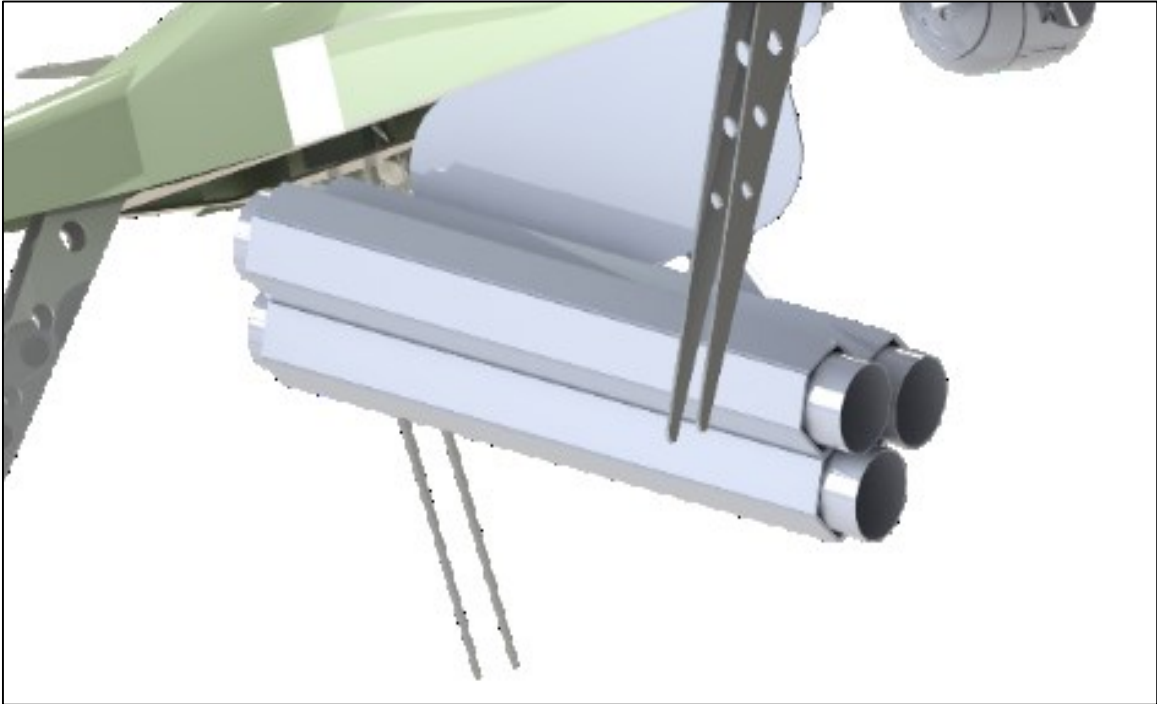
Şekil 3.5. SİHA lançer sistemi kavramsal tasarımı



Şekil 3.6. Lançer mekanizması birim namlu ince levhası (BNİL)

BNİL ölçüleri, 40mm çap mühimmat ölçüleri göz önüne alınarak 40 x 24 x 2 mm olarak belirlenmiştir. Yapılmış olan hesaplamalar ve çalışmalar her bir BNİL'in birbirleri ile kaynaklı imalat yöntemi kullanılarak bir namlu oluşturacak şekilde yapılmıştır.

Lançer mekanizması birim namlu ince levha ağırlığının azaltılması için çentik faktörüne bağlı hesaplamalar literatüre uygun olarak yapılmıştır (Şekil 3.7) [42].

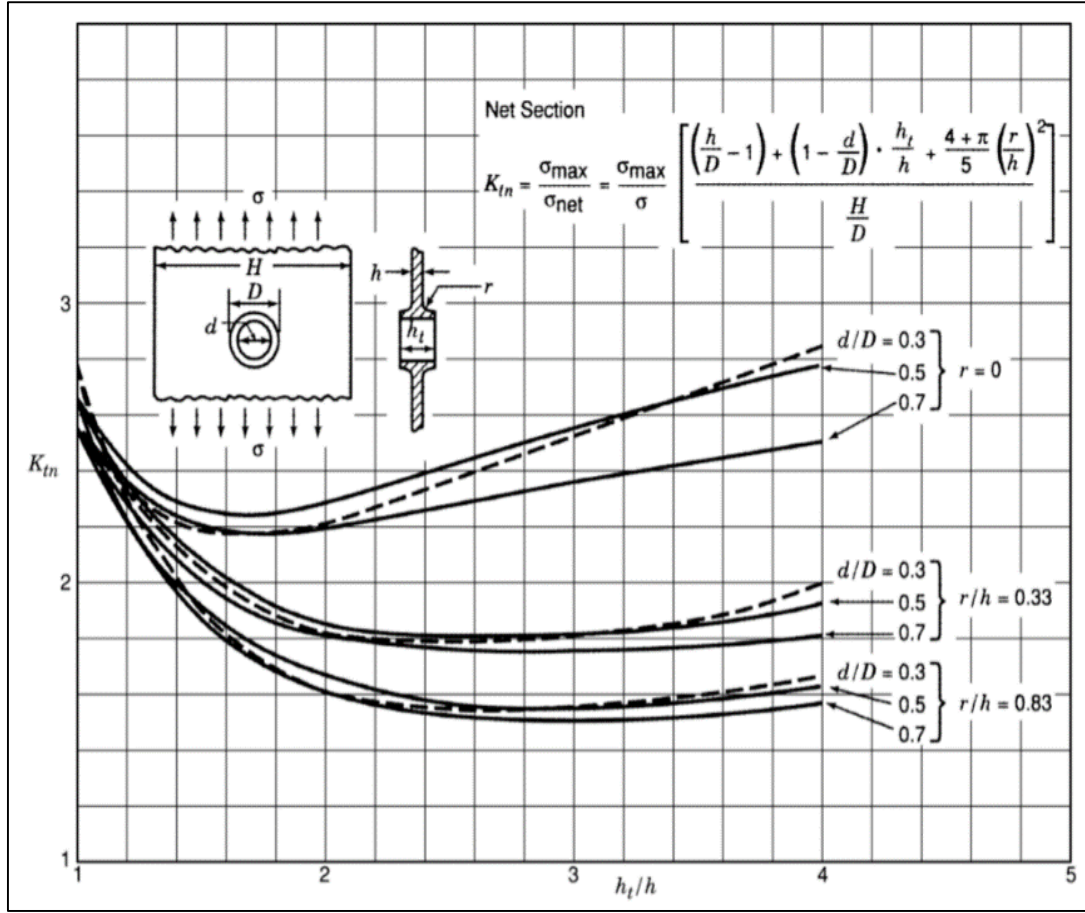


Şekil 3.7. Hava aracına ait lançer mekanizması kavramsal tasarımı

Konsept tasarımı önceden tamamlanmış silahlı mini insansız hava aracına ait silah sisteminin namlusu, sistemde ağırlığı en fazla olan parçadır. Namlu kısmının ağırlığının azaltılması amacıyla topolojik optimizasyon ve çentik faktörüne göre ağırlık azaltma yöntemleri tercih edilmiştir. Karmaşık tasarımların matematiksel ve veri seti olarak işlenmesinin zorluğu nedeni ile analizler birim namlu ince levha (BNİL) üzerinde yapılmıştır (Şekil 3.6.). Bu yöntem ile karmaşık geometrili parçalar bölünerek birim parça üzerinde hesaplama ve çözümleme kolayca yapılabilmektedir.

Lançer mekanizmasının namlu ince levhası Seika ve Ishii'nin ince plakaların gerilim konsantrasyonu grafiğinden yararlanılarak modellenmiştir [42]. Şekil 3.8.'de tasarım

ölçüleri oranına göre takviyeli delikli ince plakaların gerilim konsantrasyonu grafiği görülmektedir.



Şekil 3.8. Takviyeli delikli ince plakaların gerilim konsantrasyonu [42]

3.2. Matematiksel Modelleme

Konsept tasarımı yapılan silah sisteminin matematiksel modellemesi karmaşık sayılar yardımı ile gerçekleştirilmiştir.

Silah sisteminin parametrik tasarımı ve matematiksel modellemesi, farklı boyut ve büyüklükteki hava araçlarına daha kolay entegre edilebilmesi açısından önemlidir. Silah sisteminin karmaşık sayılarla matematiksel modellemesinin yapılabilmesi için gerekli olan vektörel kurgu Şekil 3.9.'da gösterilmiştir.

$$k^2 - k.s.e^{-i\theta_3} - k.s.e^{i\theta_3} + s^2 = r^2 \quad (3.11)$$

$$k^2 - k.s.[e^{i\theta_3} + e^{-i\theta_3}] + s^2 = r^2 \quad (3.12)$$

$$k^2 - k.s.2c \cos \theta_3 + s^2 = r^2 \quad (3.13)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{r^2 - s^2 - k^2}{-2.k.s} \right) \quad (3.14)$$

Değişken x mesafesinin bulunması için yeni vektör eşitliği (Denklem 3.15) yazılır.

$$\vec{r} = \vec{s} + \vec{c} + \vec{d} \quad (3.15)$$

$$s.e^{i\theta_3} + d = (x+c).e^{i\theta_4} + i.e.e^{i\theta_4} \quad (3.16)$$

$$s.e^{-i\theta_3} + d = (x+c).e^{-i\theta_4} - i.e.e^{-i\theta_4} \quad (3.17)$$

X eksenine göre vektörel simetriği ile çarpılır;

$$s^2 + s.d.[e^{i\theta_3} + e^{-i\theta_3}] + d^2 = (x+c)^2 - i.e.(x+c) + i.e.(x+c) + e^2 \quad (3.18)$$

$$x = \sqrt{s^2 + 2.s.d.\cos \theta_3 + d^2 - e^2} - c \quad (3.19)$$

Değişken θ_4 açısının bulunması için yeni vektör denklemi (Eşitlik 3.20.) yazılır;

$$\vec{r} = \vec{s} + \vec{c} + \vec{d} \quad (3.20)$$

$$s.e^{i\theta_3} - c.e^{i\theta_4} + d = x.e^{i\theta_4} + i.e.e^{i\theta_4} \quad (3.21)$$

$$s.e^{-i\theta_3} - c.e^{-i\theta_4} + d = x.e^{-i\theta_4} - i.e.e^{-i\theta_4} \quad (3.22)$$

X eksenine göre vektörel simetriği ile çarpılır;

$$-s.c.[e^{i(\theta_3-\theta_4)} + e^{-i(\theta_3-\theta_4)}] + s.d.[e^{i\theta_3} + e^{-i\theta_3}] - s.d.[e^{i\theta_4} + e^{-i\theta_4}] = x^2 + e^2 - s^2 - c^2 - d^2 \quad (3.23)$$

$$= x^2 + e^2 - s^2 - c^2 - d^2 \quad (3.24)$$

K Dönüşümü yapılırsa;

$$K_1 = -2.s.c \quad (3.25)$$

$$K_2 = -2.c.d \quad (3.26)$$

$$K_3 = x^2 + e^2 - s^2 - c^2 - d^2 - 2.s.d.\cos\theta_3 \quad (3.27)$$

$$K_1.\cos(\theta_3 - \theta_4) + K_2.\cos\theta_4 = K_3 \quad (3.28)$$

$$K_1.(\cos\theta_3.\cos\theta_4 + \sin\theta_3.\sin\theta_4) + K_2.\cos\theta_4 = K_3 \quad (3.29)$$

$$K_1.\cos\theta_3.\cos\theta_4 + K_1.\sin\theta_3.\sin\theta_4 + K_2.\cos\theta_4 = K_3 \quad (3.30)$$

$$\cos\theta_4.(K_1.\cos\theta_3 + K_2) + (K_1.\sin\theta_3).\sin\theta_4 = K_3 \quad (3.31)$$

Denklem 3.32’de yarım açı formülü yazılır;

$$(1 - \tan^2 \frac{\theta_4}{2}).(K_1.\cos\theta_3 + K_2) + 2\tan \frac{\theta_4}{2}.(K_1.\sin\theta_3) = K_3.(1 + \tan^2 \frac{\theta_4}{2}) \quad (3.32)$$

$$(K_1.\cos\theta_3 + K_2) - (K_1.\cos\theta_3 + K_2).\tan^2 \frac{\theta_4}{2} + (2.K_1.\sin\theta_3) \tan \frac{\theta_4}{2} = K_3 + K_3.\tan^2 \frac{\theta_4}{2} \quad (3.33)$$

$$A = -K_1.\cos\theta_3 - K_2 - K_3$$

$$B = 2.K_1.\sin\theta_3$$

$$C = K_1.\cos\theta_3 + K_2 - K_3 \quad (3.34)$$

$AX^2 + BX + C$ dönüşümü yapılır ve Denklem 3.36 elde edilir.

$$\tan \frac{\theta_4}{2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (3.35)$$

$$\theta_4 = 2.\tan^{-1} \left(\frac{-(2.K_1.\sin\theta_3) \pm \sqrt{(2.K_1.\sin\theta_3)^2 - 4.(-K_1.\cos\theta_3 - K_2 - K_3).(K_1.\cos\theta_3 + K_2 - K_3)}}{2(-K_1.\cos\theta_3 - K_2 - K_3)} \right) \quad (3.36)$$

Elde edilir.

Kamera alt sistemine bağlı olarak hareket edecek namlu mekanizması alt sistemi tahrik uzvunun değişken θ_2 açısı için Eşitlik 3.37. yazılır.

$$\vec{c} = \vec{s}_{CB} + \vec{e} \quad (3.37)$$

$$a.e^{i\theta_2} + d = s_{CB}.e^{i\theta_4} + i.e.e^{i\theta_4} \quad (3.38)$$

$$a.e^{-i\theta_2} + d = s_{CB}.e^{-i\theta_4} - i.e.e^{-i\theta_4} \quad (3.39)$$

$$a^2 + a.d.[e^{i\theta_2} + e^{-i\theta_2}] + d^2 = s_{CB}^2 + e^2 \quad (3.40)$$

$$2.a.d.\cos\theta_2 = s_{CB}^2 + e^2 - a^2 - d^2 \quad (3.41)$$

$$\cos\theta_2 = \frac{s_{CB}^2 + e^2 - a^2 - d^2}{2.a.d} \quad (3.42)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{s_{CB}^2 + e^2 - a^2 - d^2}{2.a.d}\right) \quad (3.43)$$

Farklı ağırlık merkezlerinde tasarlanan silah sistemlerinin ihtiyaç duyduğu tork değerlerini belirlemek gerekmektedir. Parametrik modelleme içerisinde, kamera ve ona bağlı olarak hareket edecek namli mekanizması alt sistemlerini tahrik eden servo motorların seçiminde sistemin açısal hızlarının etkisi bulunmaktadır.

Değişken ω_3 açısal hızı için Eşitlik 3.44. yazılır;

$$\vec{k} = \vec{s} + \vec{r} \quad (3.44)$$

$$k - s.e^{i\theta_3} = -r.e^{i\theta_1} \quad (3.45)$$

$$k - s.e^{-i\theta_3} = -r.e^{-i\theta_1} \quad (3.46)$$

3.45 ve 3.46 numaralı denklemlerin türevi alınır.

$$-i.s.e^{i\theta_3}.\omega_3 = i.r.e^{i\theta_1}.\omega_1 \quad (3.47)$$

$$i.s.e^{-i\theta_3}.\omega_3 = -i.r.e^{-i\theta_1}.\omega_1 \quad (3.48)$$

$$\omega_3 = \frac{\begin{vmatrix} -i.r.\omega_1.e^{i\theta_1} & -e^{i\theta_3} \\ i.r.\omega_1.e^{-i\theta_1} & -e^{-i\theta_3} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -i.s.e^{i\theta_3} & -e^{i\theta_3} \\ i.s.e^{-i\theta_3} & -e^{-i\theta_3} \end{vmatrix}} \quad (3.49)$$

$$\omega_3 = \frac{i.r.\omega_1.e^{i(\theta_1-\theta_3)} + i.r.\omega_1.e^{-i(\theta_1-\theta_3)}}{2.i.s} \quad (3.50)$$

$$\omega_3 = \frac{\omega_1.r.\cos(\theta_1 - \theta_3)}{s} \quad (3.51)$$

Değişken ω_4 açısal hızının belirlenmesi için Eşitlik 3.52. Yazılır;

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{\omega}_4 \times \vec{r}_{AB} \quad (3.52)$$

$$s.e^{i\theta_3} - c.e^{i\theta_4} + d = x.e^{i\theta_4} + i.e.e^{i\theta_4} \quad (3.53)$$

$$s.e^{-i\theta_3} - c.e^{-i\theta_4} + d = x.e^{-i\theta_4} - i.e.e^{-i\theta_4} \quad (3.54)$$

Eşitlik 3.53. ve Eşitlik 3.54.'ün türevi alınır;

$$(i.x + i.c - e).e^{i\theta_4}.\omega_4 + i.e.e^{i\theta_4}.\omega_3 = 0 \quad (3.55)$$

$$(-i.x - i.c - e).e^{-i\theta_4}.\omega_4 - i.e.e^{-i\theta_4}.\omega_3 = 0 \quad (3.56)$$

$$\omega_4 = \frac{\begin{vmatrix} i.e.e^{i\theta_4}.\omega_3 & e^{i\theta_4} \\ e^{-i\theta_3}.\omega_3 & e^{-i\theta_4} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} (i.x + i.c - e).e^{i\theta_4} & e^{i\theta_4} \\ (-i.x - i.c - e).e^{-i\theta_4} & e^{-i\theta_4} \end{vmatrix}} \quad (3.57)$$

$$\omega_4 = \frac{(s - \theta_4) + 2.i.s.\omega_3.\cos(\theta_3 - \theta_4)}{2.i.(x + c)} \quad (3.58)$$

$$\omega_4 = \frac{(s - \theta_4) + s.\omega_3.\cos(\theta_3 - \theta_4)}{x + c} \quad (3.59)$$

Değişken ω_2 açısal hızı için Denklem 3.60 yazılır.

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{\omega}_2 \times \vec{r}_{AB} \quad (3.60)$$

$$a.e^{i\theta_2} + d = s_{CB}.e^{i\theta_4} + i.e.e^{i\theta_4} \quad (3.61)$$

$$a.e^{-i\theta_2} + d = s_{CB}.e^{-i\theta_4} - i.e.e^{-i\theta_4} \quad (3.62)$$

$$i.a.e^{i\theta_2}.\omega_2 - i.s_{CB}.e^{i\theta_4}.\omega_4 - e.e^{i\theta_4}.\omega_4 = 0 \quad (3.63)$$

$$-i.a.e^{-i\theta_2}.\omega_2 - i.s_{CB}.e^{-i\theta_4}.\omega_4 - e.e^{-i\theta_4}.\omega_4 = 0 \quad (3.64)$$

$$\omega_2 = \frac{\begin{vmatrix} i.s_{CB}.e^{i\theta_4}.\omega_4 - e.e^{i\theta_4}.\omega_4 & -e^{i\theta_4} \\ -i.s_{CB}.e^{-i\theta_4}.\omega_4 - e.e^{-i\theta_4}.\omega_4 & -e^{-i\theta_4} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} i.a.e^{i\theta_2} & -e^{i\theta_4} \\ -i.a.e^{-i\theta_2} & -e^{-i\theta_4} \end{vmatrix}} \quad (3.65)$$

$$\omega_2 = \frac{s_{CB}.\omega_4}{a.\cos(\theta_2 - \theta_4)} \quad (3.66)$$

Dönüşüm yapılırsa;

$$\omega_2 = \frac{s_{CB}}{a.(x+c)\cos(\theta_2 - \theta_4)} \cdot \frac{\vartheta_4 + \omega_1.r.\cos(\theta_1 - \theta_3).\cos(\theta_3 - \theta_4)}{a.(x+c)\cos(\theta_2 - \theta_4)} \quad (3.67)$$

Olarak elde edilmiştir. Namlu tasarımının hava aracı üzerinde kullanılacağı göz önünde bulundurularak farklı yöntemler ile kütle azaltımı en iyileştirme çalışmaları yapılmıştır.

Takviyeli delikli sacların delik/takviye oranı ve radyüs oranına göre çekme testi çentik faktörleri incelenmiştir. Radyüs oranının oluşturduğu gerilim konsantrasyon faktörü, delik/takviye oranının sebep olduğu konsantrasyon faktörüne göre ters orantılı olmaktadır (Şekil 3.8.). Radyüs oranının artması ile konsantrasyon faktörünün düştüğü de gözlemlenmektedir. Yapılan çekme deneyi sonucunda oluşan gerilme, malzemeye ait maksimum gerilme ve gerilme-konsantrasyon arasındaki lineer ilişki aşağıdaki gibidir.

$$K_{tn} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{net}} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma} \left[\frac{\left(\frac{h}{D}-1\right) + \left(1-\frac{d}{D}\right)\frac{h_t}{h} + \frac{4+\pi}{5}\left(\frac{r}{h}\right)^2}{\frac{H}{D}} \right] \quad [42] \quad (3.68)$$

Burada formüle edilen delik derinliği h_t/h oranına bakıldığında sac üzerindeki takviyenin yüksekliği arttığında gerilme konsantrasyon oranında bir düşüş olsa da bu düşüşün devam etmediği görülmektedir. Tasarım ölçüleri oranına göre, minimum konsantrasyon faktörü ve malzeme ağırlığı göz önüne alındığında,

$$\frac{d}{D} = 0,7 \text{ ve } \frac{r}{h} = 0,33 \quad [42] \quad (3.69)$$

Oranları elde edilmiştir.

3.3. Simülasyon

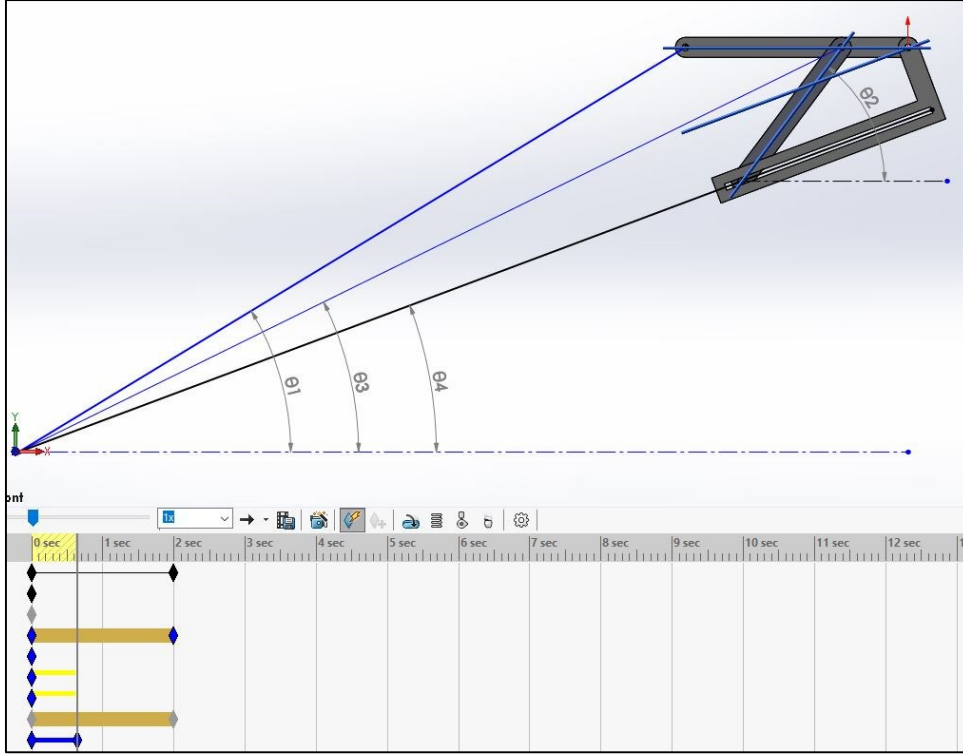
Namlu mekanizmasına ait türetilen değişken denklemler üzerinde nümerik analiz yapılmıştır. Nümerik analiz sonuçları hareket simülasyonu ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca namlu sac levhasını hafifletmek amacı ile Birim Namlu İnce Levha üzerinde bir dizi simülasyon yapıp, ağırlık-dayanım en iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Matematiksel modelleme ile elde edilmiş veriler, bilgisayar destekli hesaplama ortamına aktarılmıştır. Tasarım gereksinimlerine uygun olarak, 0-90° arasında ardışık menzil ve θ_1 açısı değerleri verilmiş, ω_2 değeri sabit açısal hız olarak kabul edilmiştir (60°/s). Çizelge 3.2.'de nümerik analiz değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Lançer mekanizması nümerik analiz değerleri

Girdiler ve Sonuçlar											
s	839,57	833,37	821,40	815,51	807,01	769,33	748,55	725,73	701,80	682,28	661,16
c	197,50	197,50	197,50	197,50	197,50	197,50	197,50	197,50	197,50	197,50	197,50
e	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
x	699,92	691,64	675,57	667,65	656,18	604,94	576,37	544,66	511,02	483,25	452,79
d	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
r	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700
k	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
a	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
S _{cb}	197,48	190,61	181,32	177,20	171,48	147,86	135,58	122,61	109,71	99,87	90,11
θ_1	4,92	19,36	32,62	37,52	43,72	65,18	75	85	95	103	111,70
θ_3	4,10	16,17	27,34	31,52	36,83	55,68	64,59	73,92	83,54	91,47	100,35
θ_2	23,58	39,79	54,79	60,37	67,45	92,03	103,23	114,51	125,54	134,10	143,13
θ_4	0,00	11,24	21,61	25,48	30,40	47,87	56,15	64,86	73,89	81,39	90
Lançer Mekanizması Analitik Hız Analizi											
ω_2	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
ω_4	41,77	41,48	41,54	41,66	41,90	43,67	45,21	47,53	50,89	54,61	59,77

Konsept tasarımı tamamlanmış silah namlu mekanizması alt sistemi, bilgisayar destekli hareket simülasyonu ortamına aktarılmıştır. Tasarım gereksinimlerine uygun olarak a uzvu, $0-90^\circ$ arasında ω_2 sabit açısal hız ile hareket ettirilmiştir ($60^\circ/\text{s}$). SolidWorks Programı'nda ilgili uzva servo motor eklenmiş ve hareket simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.10.'da konsept namlu mekanizması alt sistemi hareket simülasyonu gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Konsept namlu mekanizması alt sistemi hareket benzetimi

Hareket benzetimi sonucu namlu mekanizması alt sisteminin tahrik uzvu ve sabit namlu uzuvlarının θ_2 , θ_4 açısal yer değiştirmeleri ve ω_2 ve ω_4 açısal hızları için değişim grafikleri oluşturulmuştur.

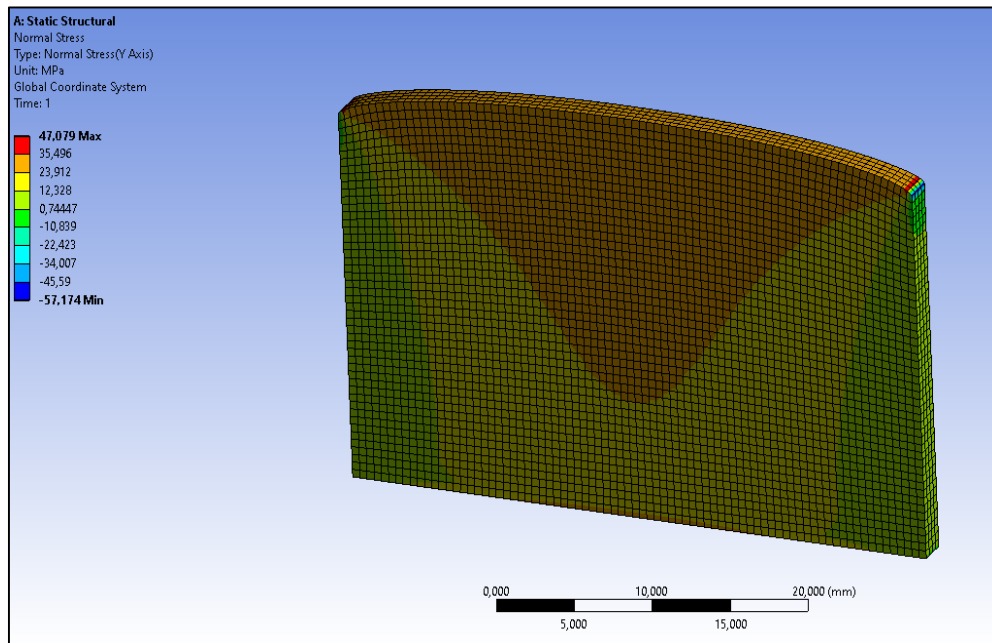
Birim namlu ince levhanın herhangi bir optimizasyon yapılmamış hali, çentik faktörüne ve topolojik optimizasyona bağlı olarak ağırlığı azaltılmış hali ayrı ayrı incelenmiştir. İncelemenin sonucunda eşdeğer bileşke değerlerinde en yüksek normal gerilme değerine sahip ve ağırlığı azaltılmış levhaya göre tasarıma devam edilmiştir.

Bu bölümde, birim namlu ince levhasının ağırlık azaltma işlemi yapılmamış halinin sonlu elemanlar yöntemi ile çekme testi yapılmıştır. Malzeme olarak Al6063-T6 seçilmiş, malzemenin özellikleri ANSYS programı ortamında tanımlanmıştır (Çizelge 3.3.).

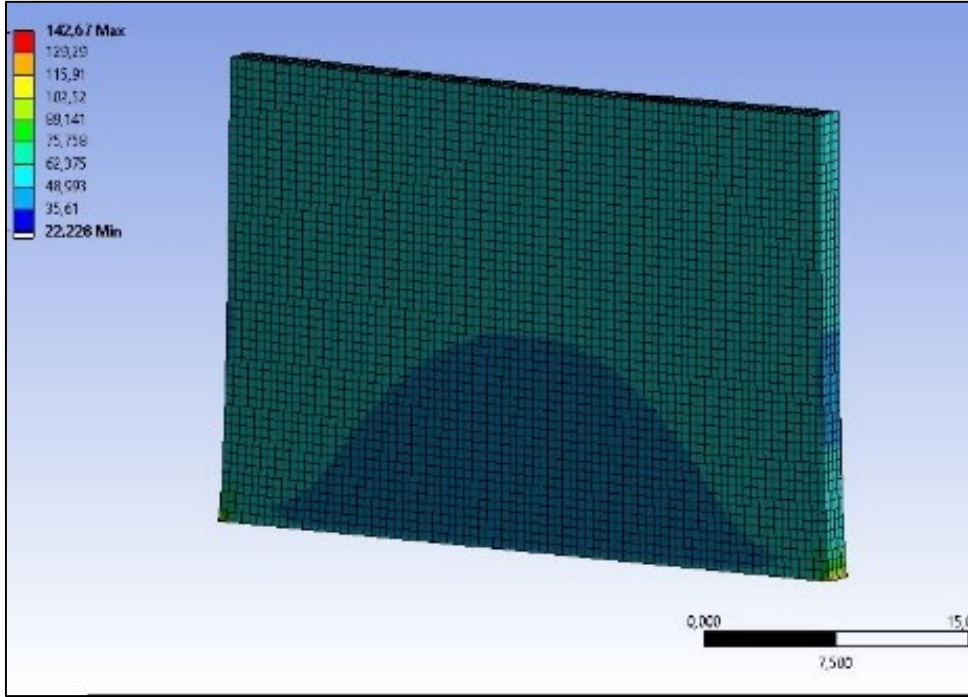
Çizelge 3.3. Al6063-T6 malzeme mekanik özellikleri

Brinell sertliği	73
Vickers sertliği	83
Çekme dayanımı	241 Mpa
Akma dayanımı	214 Mpa
Kopma uzaması	%12
Elastikiyet Modülü	68,9 GPa
Poisson oranı	0,33
Yorulma dayanımı	68,9 MPa
İşlenebilirlik	%50
Kayma modülü	25,8 GPa
Kayma dayanımı	152 MPa

Levha, emniyet katsayısı (s) 1,5 olacak şekilde çekme testine maruz bırakılmış, maksimum bileşke ve normal gerilme değerleri belirlenmiştir. Şekil 3.11.'de BNİL'in güvenlik katsayısına göre normal gerilme değerleri görülmektedir. Şekil 3.12.'de BNİL'in güvenlik katsayısına göre bileşke gerilme değerleri görülmektedir.



Şekil 3.11. BNİL güvenlik katsayısına göre normal gerilme değerleri



Şekil 3.12. BNİL güvenlik katsayısına göre bileşke gerilme değerleri

Al 6063 T6 malzemeye sahip BNİL'in ağırlık azaltma işleminden önce 1,5 güvenlik katsayısı ile 142,7 MPa max bileşke dayanımı, 47,08 MPa maksimum normal gerilme değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

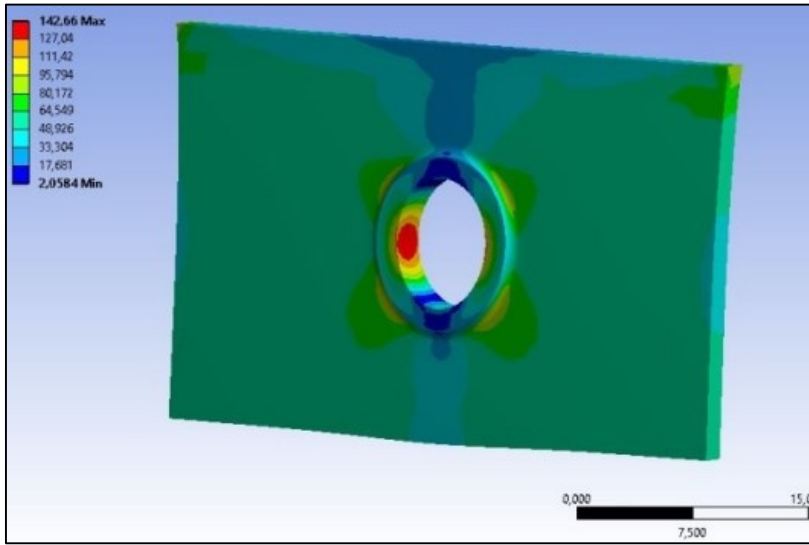
Şekil 3.8.'den elde edilen yaklaşık 800 nokta bilgisayar destekli hesaplama ortamına veri olarak eklenmiştir. 'd/D=0,7 ve r/h=0,33' oranlarına göre grafikteki sayısal değerler iterasyon ile x ve y eksenini olarak kaydedilmiştir. Elde edilen her bir nokta için sayısallaştırma yapılarak ilk modeller oluşturulmuştur. Bu modeller, ANSYS ortamında ilk çözümleme safhasında kullanılmıştır. Excel ortamında girilen parametrik değerler ile ANSYS ortamında parametrik tasarım yapılarak CAD model oluşturulmuştur (Şekil 3.13.). Hesaplama ortamında elde edilen σ_{net} değerleri, tek yönden çekme testine uygun bir şekilde modele uygulanmıştır. Çözümlemelerde statik analiz bölümündeki bütün sonuçlar parametrik olarak eklenmiştir.

Çözümleme içerisinde oluşturulan grafik üzerindeki anlamlı 11 nokta seçilmiştir. Çözümlemeler sonucunda elde edilen maksimum normal gerilme değerleri ve maksimum gerilme miktarı sayısal değerleri hesaplama ortamına eklenmiştir. İlk çözümlemede elde edilen verilere kuvvet optimizasyonu yapılmıştır. Al 6063 T6 malzemesi için belirlenen maksimum güvenlik katsayısına (1,5) bölünerek bulunan σ_{max} değeri, ilk çözümlemede de

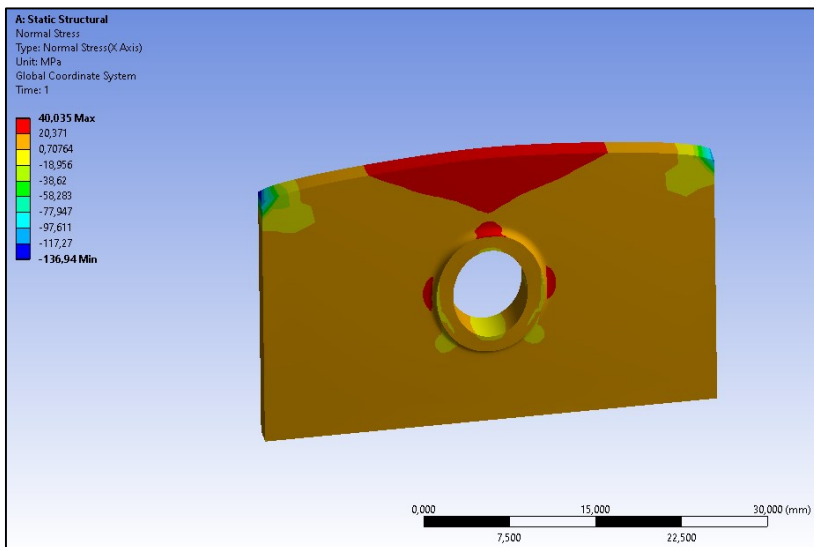
bulunan σ_{max} değeri ile oranlanarak ikinci çözümlemede kullanılacak kuvvet değerleri optimize edilmiştir. Kuvvet optimizasyonunda elde edilen gerilme değerleri ANSYS programında ikinci çözümleme için kullanılmıştır. İkinci çözümlemeden elde edilen normal maksimum gerilme değerleri;

$$K_{tn} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma} \quad [42] \quad (3.70)$$

Formülüne göre K_{tn} değerleri tekrardan hesaplanarak regresyon analizine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.13. Çentik faktörüne bağlı BNİL'e ait bileşke gerilim değerleri



Şekil 3.14. Çentik faktörüne bağlı BNİL'e ait normal gerilim değerleri

Şekil 3.14.'te BNİL'in çentik faktörüne dayalı olarak ağırlığı azaltılmış hali incelenmiştir. Al6063-T6 malzeme BNİL'in 1,5 güvenlik katsayısı ile, 142,67 MPa max bileşke dayanımı, 40,04 MPa maksimum normal gerilme değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

Simülasyon verilerinden elde edilen değerler modelleme kısmındaki hesaplamalardan elde edilen verilerle üst üste karşılaştırılmıştır. Eşdeğer bileşke gerilme değerleri içerisinde maksimum normal gerilme değerleri değişkenlerine göre gerilme konsantrasyon faktörlerini tahmin etmek amacı ile regresyon analizi yapılmıştır. Çizelge 3.4.'de, sonlu elemanlar yöntemi ile optimize edilmiş gerilme konsantrasyon faktörlerinin regresyon analizi gösterilmiştir.

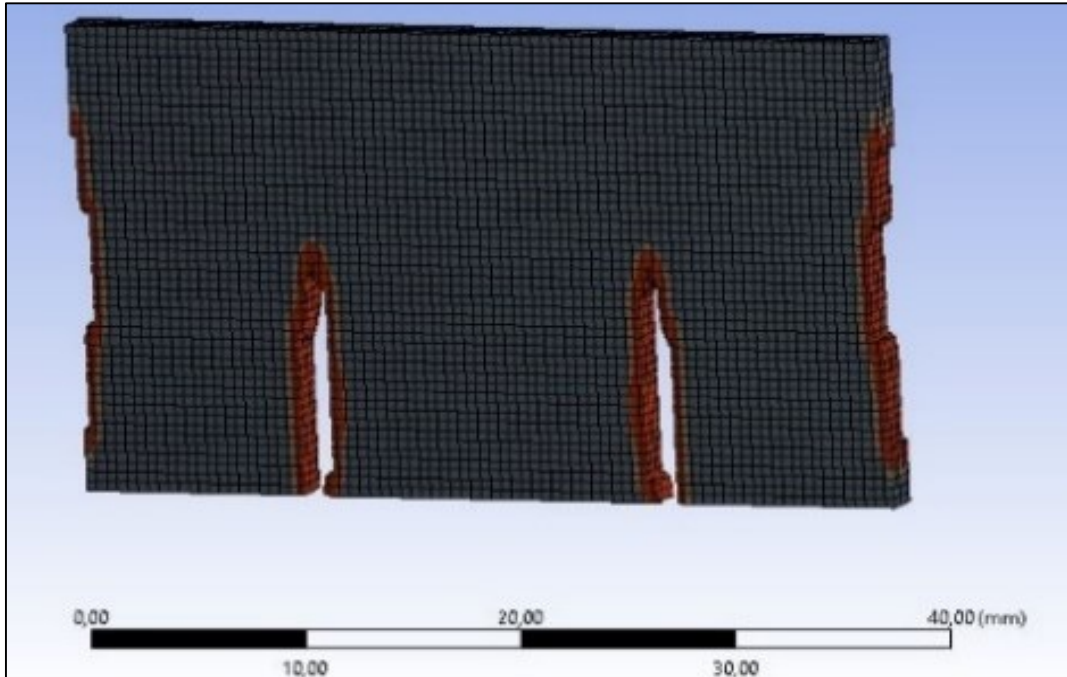
Çizelge 3.4. Optimize edilmiş gerilme konsantrasyon faktörlerinin regresyon analizi

	Çözümleme 1	Çözümleme 2	Çözümleme 2	Optimizasyon	Çözümleme 2	Ortalama Hata	RMS	RMS ^2
Excel σ_{max}	$\sigma_{max}(ansys)$	$\sigma_{max}(ansys)$	$\sigma_{normal}(ansys)$	Ktn (excel)	Ktn (ansys)		0,259616	0,991771
						-54,75 -26,25	0,741405	90,1015
142,67	164,97	142,67	40,04	3,547095	2,98552737	-36,75	0,315358	8,913374
142,67	163,41	142,67	40,97	3,06159	2,79120344	-47,36	0,073109	7,790817
142,67	167,01	142,67	41,98	2,829705	2,77990458	-59,21	0,00248	7,727869
142,67	163,55	142,67	42,69	2,706525	2,87278722	-64,48	0,027643	8,252906
142,67	163,22	142,85	42,27	2,64855	2,90438821	-66,90	0,065453	8,435471
142,67	163	142,38	37,92	2,63406	2,93092974	-62,84	0,088132	8,590349
142,67	165,58	142,67	38,76	2,641305	2,86747014	-60,85	0,051151	8,222385
142,67	167,97	142,67	39,13	2,64855	2,84024544	-60,36	0,036747	8,066994
142,67	163,24	142,67	39,14	2,655795	2,83938712	-58,62	0,033706	8,062119
142,67	161,89	142,67	39,46	2,66304	2,81615607	-58,66	0,023445	7,930735
142,67	162,47	142,67	39,03	2,692035	2,84754009	-54,75	0,024182	8,108485

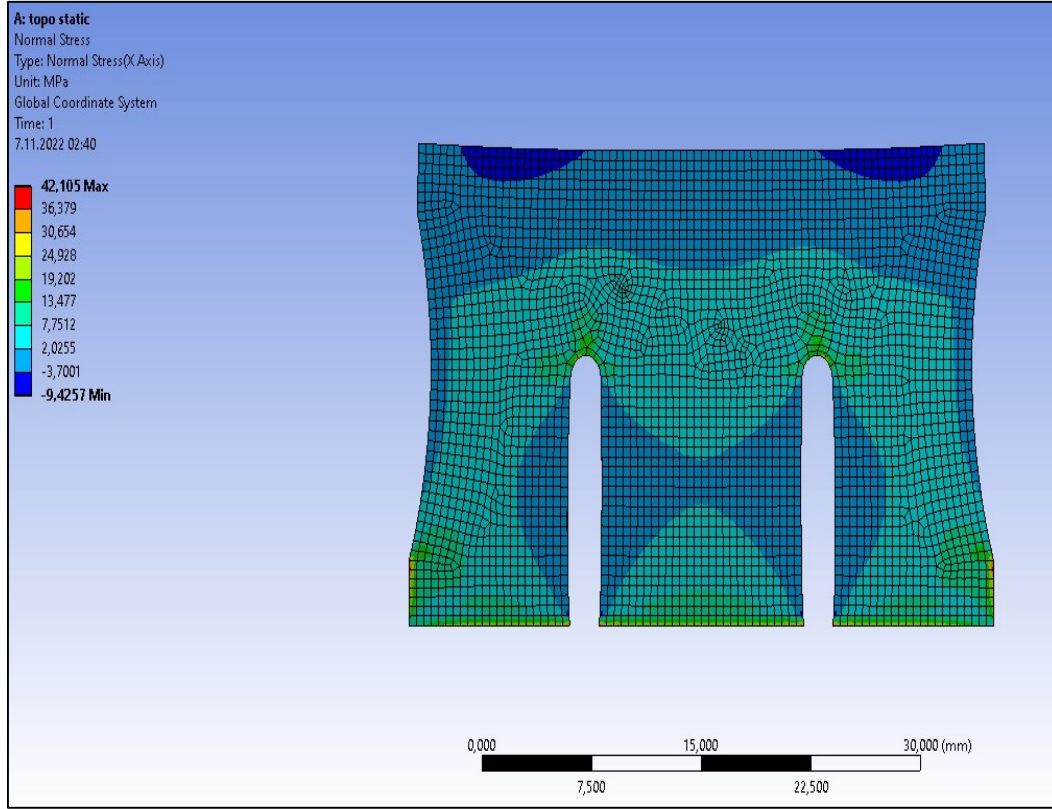
Regresyon analizi aşamasında, Şekil 3.8.'de gösterilen grafikte bulunan tasarım ve buna bağlı gerilme faktörüne ait eğriler, Çözümleme 2'de elde edilen bileşke ve normal gerilmelerin sebep olduğu gerilme konsantrasyon faktörü verileri ile regresyon sekmesine yerleştirilmiştir.

Çizelge 3.4.'te bulunan K_{tn} (excel) sütunu gerilme konsantrasyon faktörlerinin nominal değerlerini, K_{tn} (ansys) sütunu ise ANSYS ortamında elde edilen gerilme konsantrasyon faktörlerinin değerlerini ifade etmektedir. σ_{max} Sekmesindeki sütunlar ise ilgili tasarımın modellenmesi için gerekli parametreler için ayrılmıştır. K_{tn}(excel) sütunundaki verilerindeki değişkenliğin %99,18'inin regresyon doğrusu tarafından açıklandığı görülmüştür. 11 optimizasyon simülasyon numunelerinin ortalama σ_{normal} değerlerinin 40,13 MPa olduğu hesaplanmıştır.

ANSYS ortamında, birim namlu ince levhası ile aynı bileşke gerilme ve normal gerilme değerlerine sahip, ağırlığı topolojik optimizasyona bağlı sonlu elemanlar yöntemi ile azaltılmış bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan ham model CAD programında ağırlığı değiştirilmeden tekrar düzenlenmiş ve simülasyonda doğrulama yapmak amacı ile tekrar aynı mesh ve kuvvet değerlerinde analiz edilmiştir. Çıkan sonuçlar kıyaslanmak üzere hesaplama ortamına kaydedilmiştir. Şekil 3.15.'te, topolojik optimizasyon ile ağırlığı azaltılan BNİL ve Şekil 3.16.'da maksimum gerilme miktarı görülmektedir.



Şekil 3.15. Topolojik optimizasyon ile ağırlığı azaltılan BNİL



Şekil 3.16. Topolojik iyileştirme uygulanan BNİL'in maksimum normal gerilme değeri

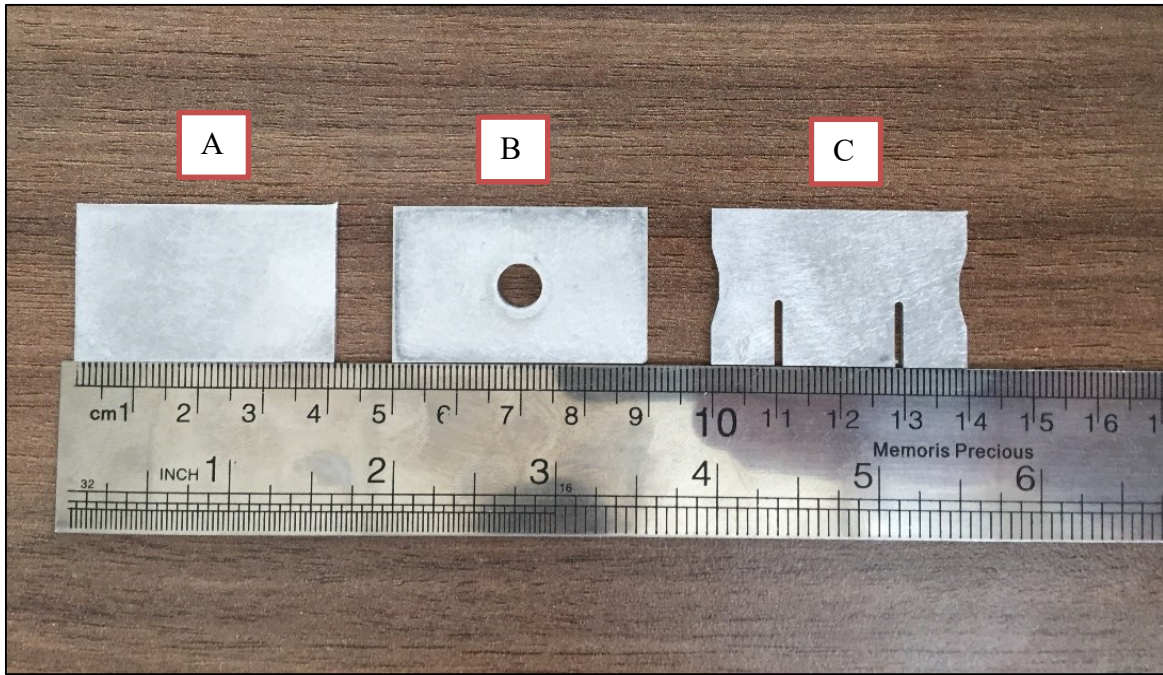
Şekil 3.15.'te BNİL'in topolojik optimizasyona bağlı ağırlığı azaltılmış hali incelenmiştir. Şekil 3.15.'te, Al6063-T6 malzeme BNİL'in 1,5 güvenlik katsayısı ile 142,67 MPa maksimum bileşke dayanımı olduğu görülmüştür. Tasarımın 68,04 MPa maksimum normal gerilme değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Elde edilen geometri düzenlenerek bir doğrulama simülasyonu yapıldıktan sonra Şekil 3.16.'da Al6063-T6 malzeme BNİL'in 1,5 güvenlik katsayısı ile 142,67 MPa maksimum bileşke dayanımında, 42,10 MPa maksimum normal gerilme değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

3.4. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar, namli sistemi ve namli tasarım ihtiyaçlarını karşılayacak mekanik özelliklerin elde edilmesi amacı ile iki ayrı çalışma şeklinde tamamlanmıştır. İlk olarak; Çentik faktörüne göre ve topolojik optimizasyona göre ağırlığı azaltılmış tasarımların hangisinin kullanılacağını belirlemek amacı ile BNİL ve ağırlık azaltma optimizasyonu yapılmış BNİL'ler üzerinde çekme testi yöntemi ile yapılmıştır. Yapılan deney, minimum ağırlıkta maksimum akma dayanımına sahip BNİL tasarımının deney ortamında belirlenmesini amaçlamaktadır.

Farklı tasarım BNİL numuneleri AL6063T6 malzeme ile talaşlı imalat yöntemleri kullanılarak üretilmiş ve çekme testine hazır hale getirilmiştir. Bu numuneler Resim 3.1.'de gösterildiği üzere simülasyon ortamındaki boyutları ile aynı olacak şekilde üretilmişlerdir. Bütün numunelerin ölçüleri 40 x 24 x 2 mm'dir.

Çekme deneyinde amaç en iyileştirme yapılmamış BNİL, çentik faktörüne dayalı en iyileştirme yapılmış BNİL ve topolojik en iyileştirme yapılarak ağırlığı azaltılmış BNİL'leri maksimum çekme dayanımlarına göre kıyaslayıp tasarımda tercih olarak kullanmaktır.



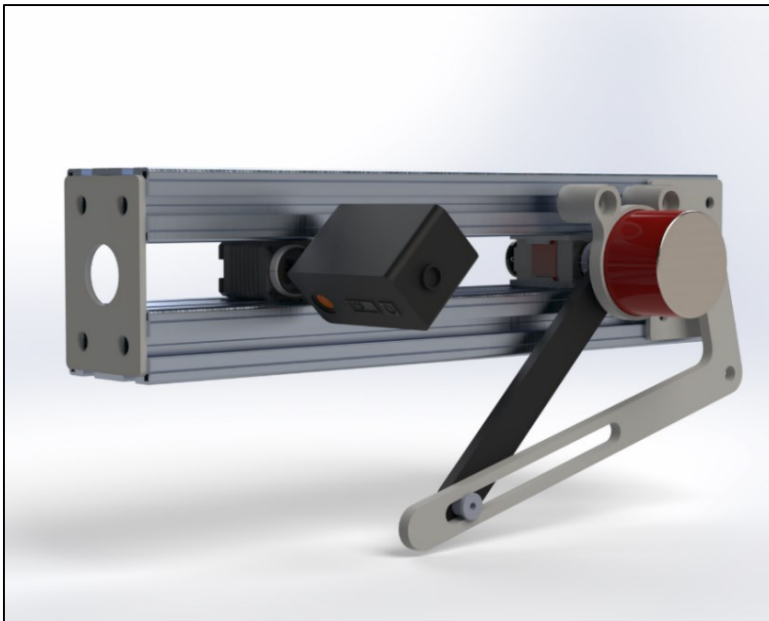
Resim 3.1. Deney numune çeşitleri (A. En iyileştirme yapılmamış BNİL, B. Çentik faktörüne dayalı en iyileştirme yapılmış BNİL, C. Topolojik en iyileştirme yapılmış BNİL)

BNİL çekme numuneleri kalibrasyonu yapılmış dijital kumpas ile akrediteli bir laboratuvar da gerçek boyut ölçüleri kontrol edildikten sonra Resim 3.2 de görülen bilgisayar destekli bir çekme ölçüm cihazında teste tabi tutulmuştur. Bütün numunelere ait gerilme, gerinim, akma dayanım ve maksimum dayanım bilgileri bilgisayara veri dosyası halinde kaydedilmiştir. Gerilme ve gerinim grafikleri oluşturulmuştur.



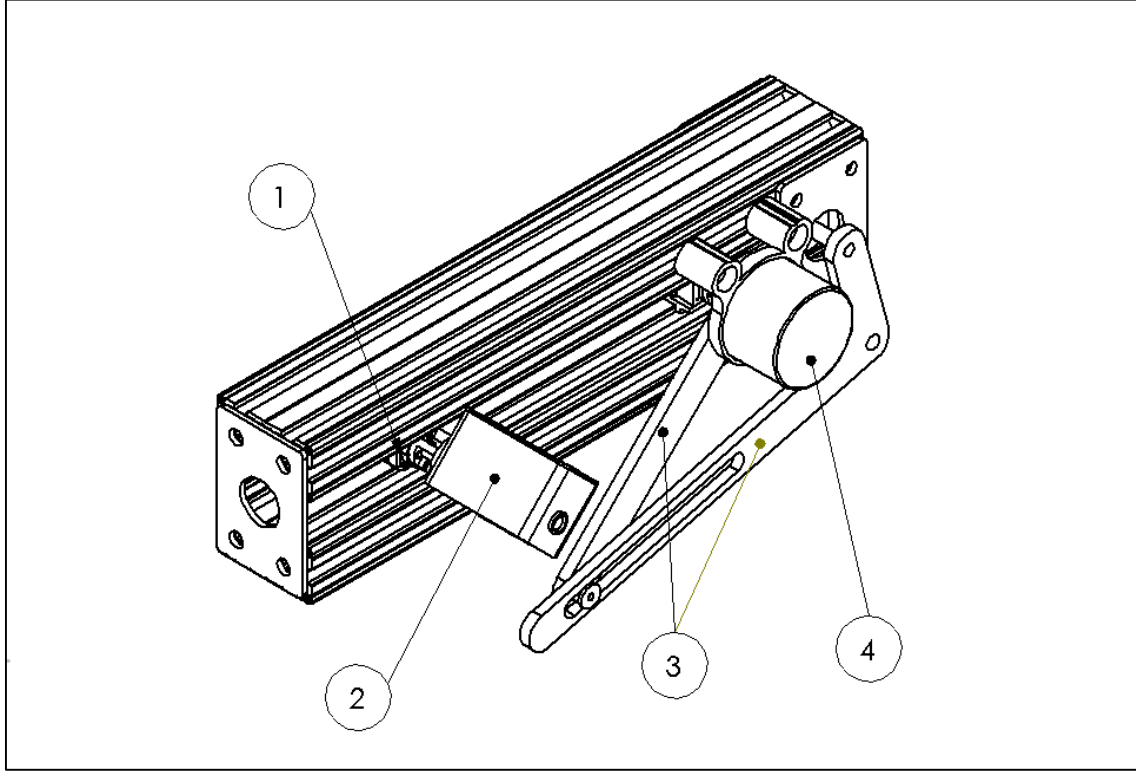
Resim 3.2. Deneyde kullanılan çekme cihazı

İkinci olarak; Şekil 3.17.'de namlu mekanizmasına ait parametrik matematiksel modellemeye dayalı yapılan deney düzeneği tasarımı görülmektedir. Deney düzeneği, matematiksel modelleme ve simülasyonların deney ortamında ne kadar tutarlı olduğunu göstermeyi amaçlamaktadır.



Şekil 3.17. Namlu mekanizması sistem tasarımı

Şekil 3.18.'de görüldüğü üzere iki bağımsız servo motorun matematiksel modellemeye dayalı olarak gerçek zamanlı hareket etüdünü gerçekleştiren deney düzeneği temel olarak 4 ana bölümden oluşmaktadır.

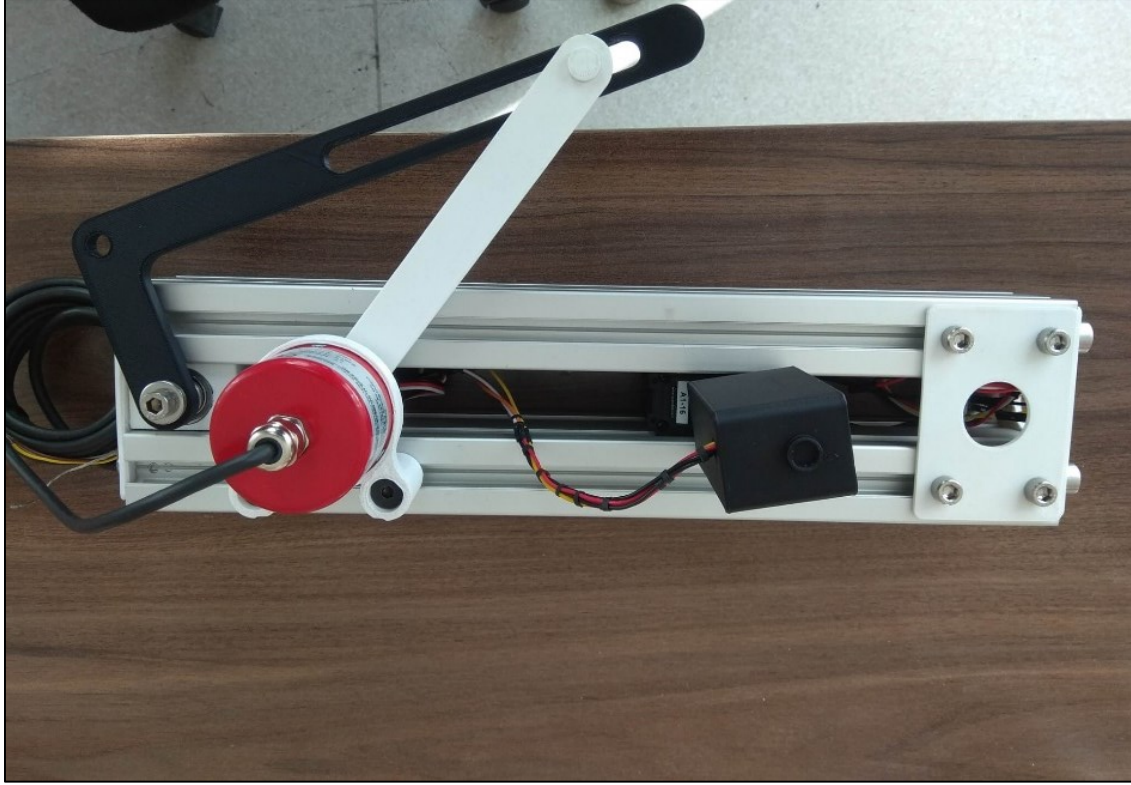


Şekil 3.18. Namlu mekanizması ana bölümleri

- 1. Akıllı Servo: Maksimum 20 kgcm tork değerine sahip, içerisinde 360 derece dahili mutlak enkoder ve dahili haberleşme çıkışı bulunduran, mesafe ölçer sensörünün hareketini sağlayan elektrik motoru.
- 2. Kamera Modülü: İçerisinde kamera ve mesafe ölçer sensörü bulunan namlu mekanizmasının pozisyonunu kontrol eden modül.
- 3. Namlu Mekanizması: Maksimum 20kgcm tork değerine sahip elektrik motoru ve mekanik taşıyıcı uzuvların bulunduğu mekanik sistem.
- 4. Harici Mutlak Enkoder: 360 derece içerisinde tam konum çıkışı alabilen endüstriyel analog enkoder. Harici mutlak enkoder, deney düzeneğine girdi verildiğinde namlu mekanizmasının konum doğruluğunu teyit amaçlı kullanılmaktadır.

Tasarlanmış deney düzeneği içerisindeki uzuvların ve uzuvlara air bağlantı parçaları Resim 3.3.'te görüldüğü üzere 3 boyutlu baskı yöntemi ile üretimi ve montajı tamamlanmıştır.

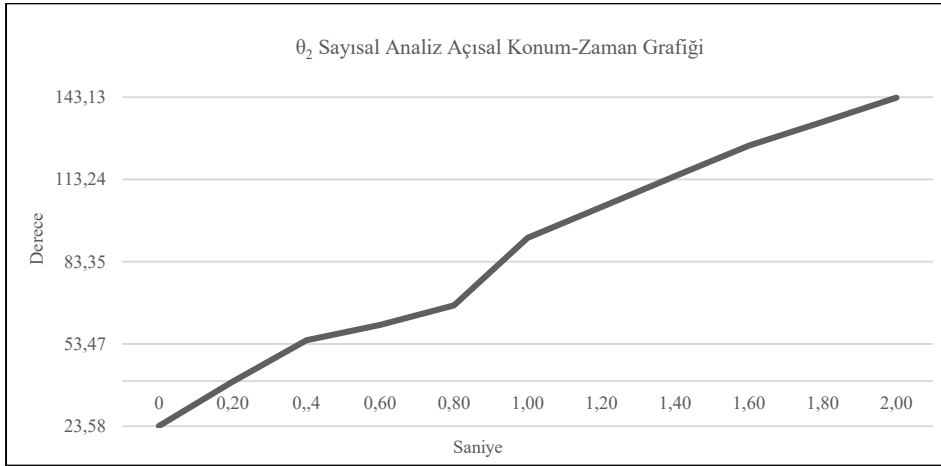
Servo motorlar bir geliştirme kartı vasıtası ile kontrol edilmiştir. Kontrol için geliştirme kartı içerisine yazılım yapılmıştır. Teorik olarak istenilen tahrik açısı elle girilmiş, uzaklık ise mesafe sensöründen gelen bilgiler ile yazılım içerisindeki matematiksel modellemeye aktarılarak deney gerçekleştirilmiştir. Elde edilen grafikler bilgisayar ortamına aktarılmış ve grafik haline getirilmiştir.



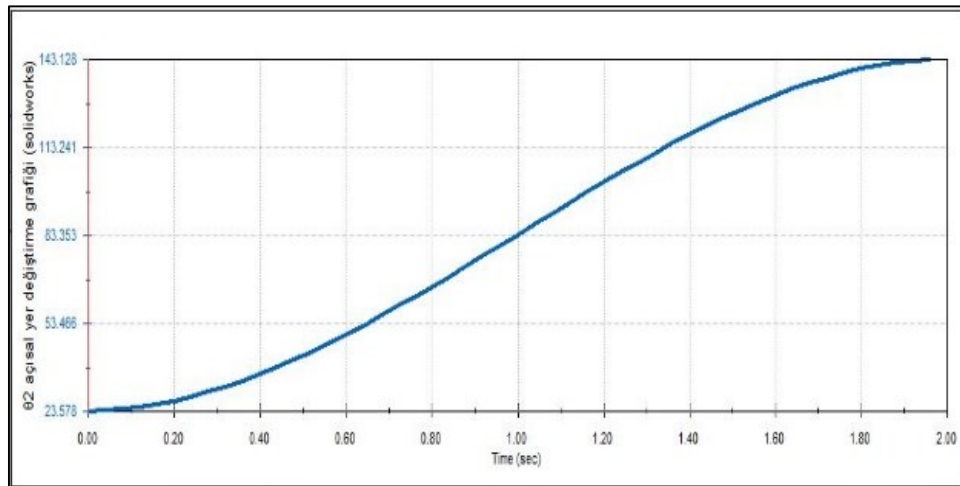
Resim 3.3. Namlu mekanizması deney düzeneği

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

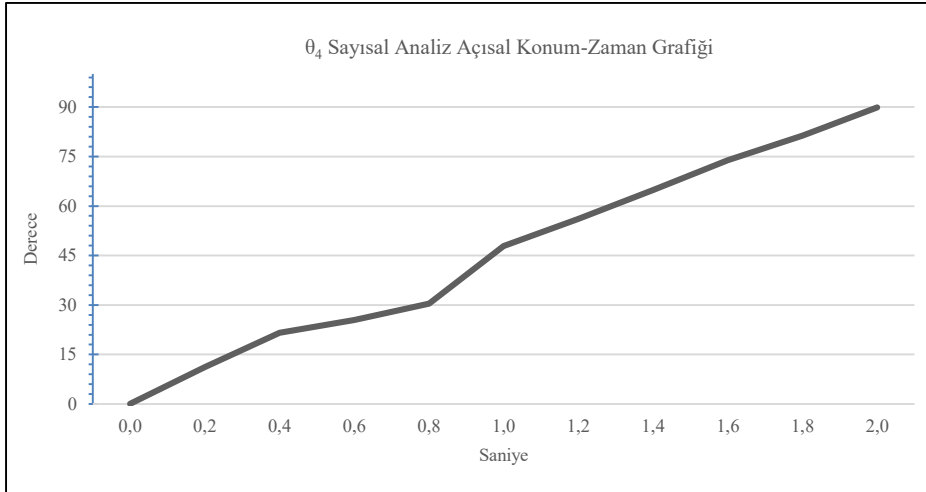
Namlu mekanizması test teçhizatı verilerindeki değerler, sayısal ve kinematik benzetimlerinden elde edilen veriler ve matematiksel modelleme verileri ile oluşturulan grafikler birbiriyle karşılaştırılmıştır. Bu tez çalışmasındaki deney düzeneğinin amacı silah sistemini sınavan deney düzeneğinin tutarlılığını ispatlamaktır. Bilgisayar destekli bir hesaplama ortamından ve bilgisayar destekli bir kinematik benzetimden elde edilen namlu mekanizma sistemi tahrik elemanının (a) açısal yer değiştirme grafikleri de karşılaştırılmıştır. Şekil 4.1.'de a uzvunun sayısal analiz açısal konum-zaman grafiği görülmektedir. Şekil 4.2. incelendiğinde namlu mekanizması alt sistemini tahrik uzvunun (a) simülasyon ortamında 2 saniyelik hareket boyunca yaklaşık olarak 120°'lik bir açı değişimi gerçekleştirdiği görülmüştür.



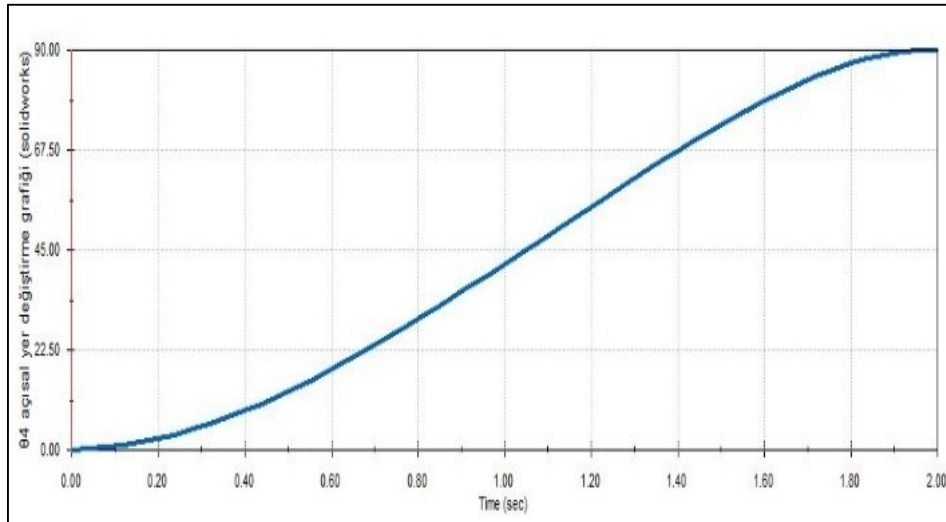
Şekil 4.1. Sayısal analiz θ_2 açısal konum-zaman grafiği



Şekil 4.2. Hareket simülasyonu θ_2 açısal konum-zaman grafiği



Şekil 4.4. Sayısal analiz θ_4 açısai konum-zaman grafiği

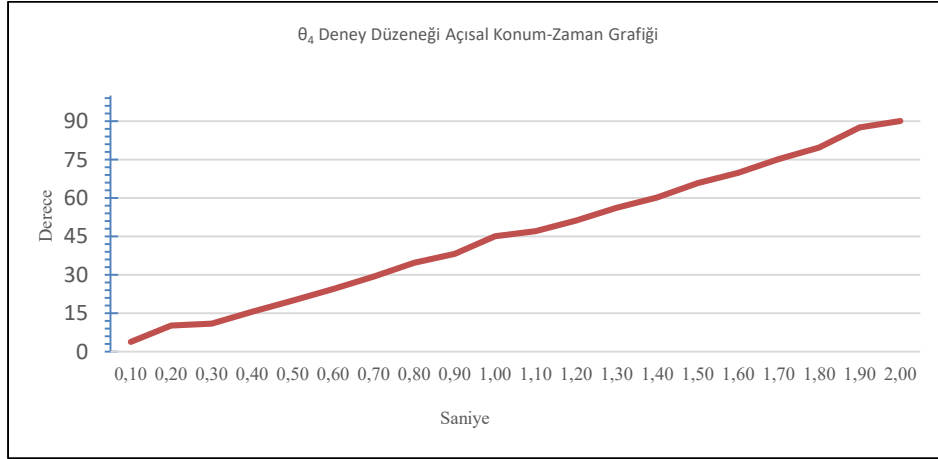


Şekil 4.5. Hareket simülasyonu θ_4 açısai konum-zaman grafiği

Şekil 4.5. incelendiğinde, namli mekanizması alt sistemi sabit namli uzvunun simülasyon ortamında harekete başlamadan önce 0° olarak kabul edilen konumda olduğu ve 2 saniyelik hareket boyunca 90° 'lik bir açısai yer değıştirme gerçekleştirdiği belirlenmiştir. Oluşturulan matematiksel denklemlerden ve hareket benzetimlerinden elde edilen değerlerin hareket süresi boyunca karşılaştırıldığı görülmektedir.

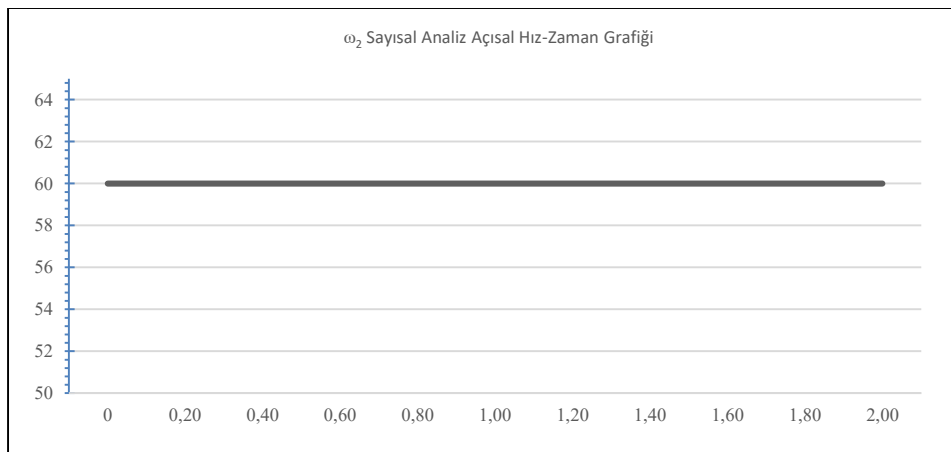
Deney düzeneğinden elde edilen verilerin oluşturduğu açısai konum-zaman grafiğinin sayısal ve benzetim ortamı grafikleri ile karşılaştırılmıştır. Teorik, simülasyon ve deney sonuçlarından, θ_4 açısai konumu başlangıç olarak 0° ve bitiş olarak 90° olarak elde edilmiştir. Zamana bağlı olarak başlangıç ve bitiş açılarının aynı olmasından ötürü teorik, simülasyon ve deney sonuçlarının tutarlı olduğu görülmüştür. Ancak deney düzeneği

montajında mekanizmanın işleyişini bozmayacak şekilde montaj boşlukları olması, deney süresi içerisinde θ_4 açısız konumunda belli başlı salınımlara neden olsa da zamana bağılı ilk ve son konumların bire bir aynı olduğu görülmüştür (Şekil 4.6.).

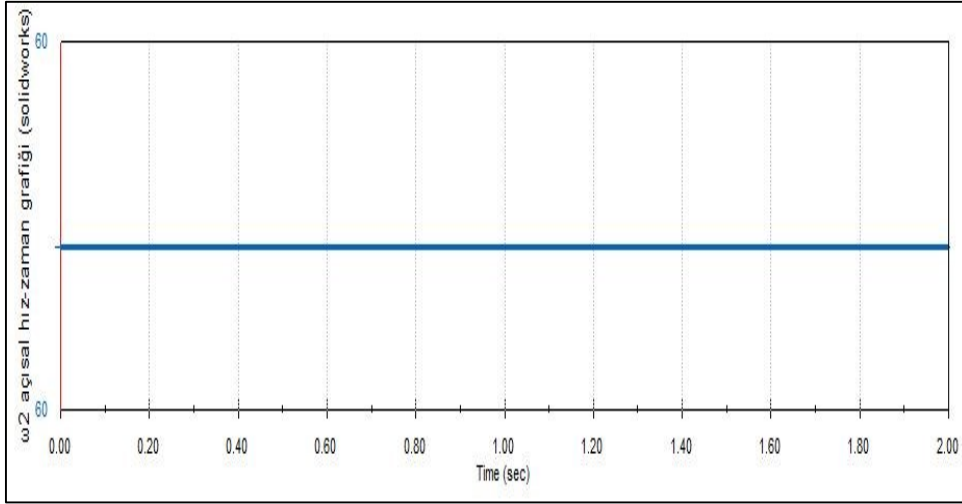


Şekil 4.6. Deney düzeneği θ_4 açısız konum-zaman grafiği

Matematiksel modelleme ile elde edilen konum verileri, hareket benzetimi aracılığı ile doğrulanmıştır. Şekil 4.7. ve Şekil 4.8.'da sistemdeki hareketli uzuvların (namlu mekanizması sistemine ait tahrik uzvu (a) ve namlu mekanizması sistemine ait sabit namlu uzvu (c)) açısız hız değerleri nümerik analiz ortamında ve hareket benzetimleri içerisinde karşılaştırılmıştır.

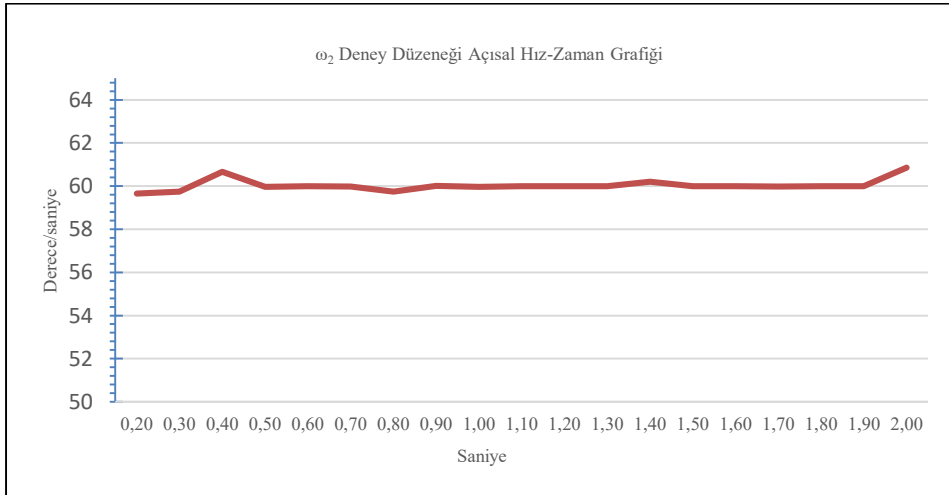


Şekil 4.7. Sayısal analiz ω_2 açısız hız-zaman grafiği



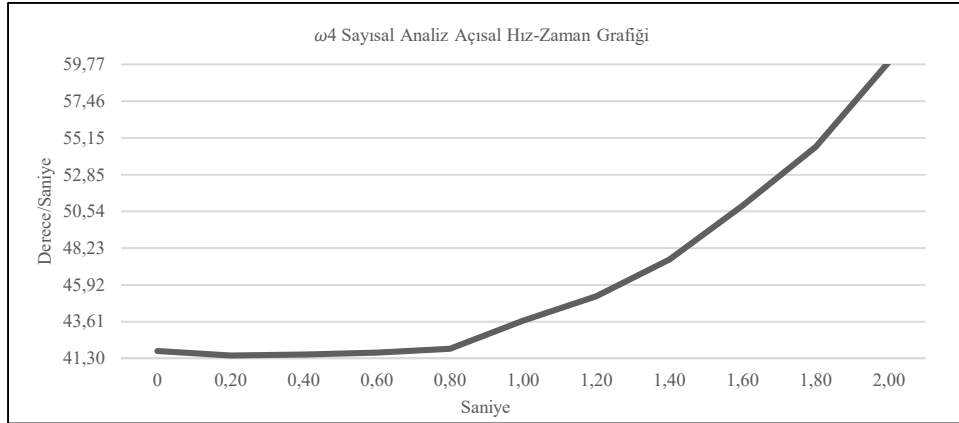
Şekil 4.8. Hız simülasyonu ω_2 açısal hız-zaman grafiği

Şekil 4.7. ve Şekil 4.8. incelendiğinde, bilgisayar destekli hesaplama ortamından alınan ω_2 sabit açısal hız değeriyle hareket benzetimi ve sayısal analiz ω_2 değerlerinin 2 saniyelik zaman dilimi boyunca $60^\circ/\text{s}$ olduğu görülmüştür. Şekil 4.9. incelendiğinde ise ω_2 nominal açısal hız değerinin $60^\circ/\text{s}$ olduğu görülmüştür. Ancak Şekil 4.9. deney düzeneği ω_2 açısal hız grafiği incelendiğinde bu açısal hızın belirli zamanlarda salınım eğilimi olduğu görülmüştür. Bu duruma montaj boşluklarının ve toleranslarının neden olduğu düşünülmektedir.



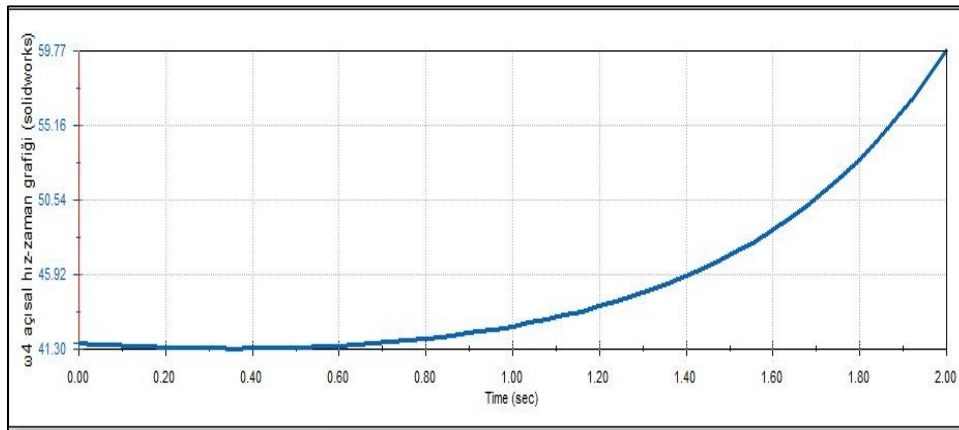
Şekil 4.9. Deney düzeneği ω_2 açısal hız-zaman grafiği

Şekil 4.10.'da namlu mekanizması alt sistemi sabit namlu uzvunun (c) ω_4 açısal hız-zaman değerlerinin sayısal analiz grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Nümerik analiz ω_4 açısai hız-zaman grafiği

Şekil 4.11. Solidworks programı hareket simülasyonundan alınan ω_4 açısai hız değerini göstermektedir.

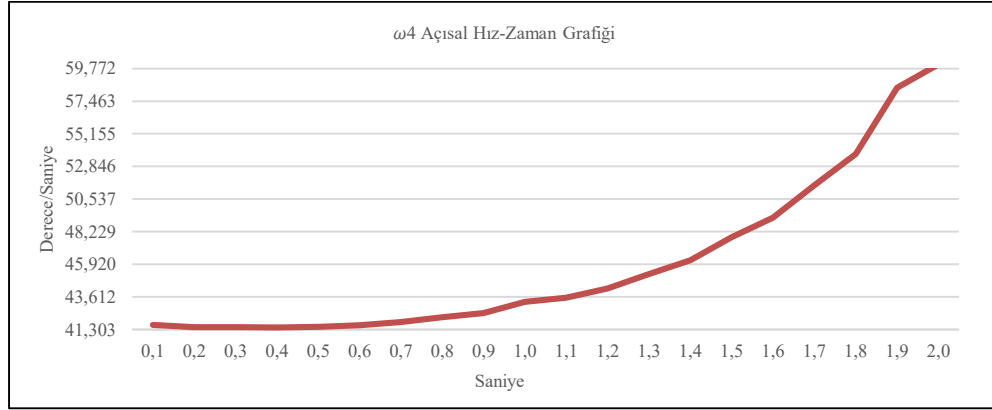


Şekil 4.11. Hareket simülasyonu ω_4 açısai hız-zaman grafiği

Şekil 4.10. bilgisayar destekli hesaplama ortamında hesaplanan ω_4 açısai hız değerini göstermektedir. Grafikler incelendiğinde, her iki grafikte de namli mekanizması alt sistemi sabit namli uzvunun (c) başlangıç açısai hızının 41,30 °/s olduğu görülmektedir. 2 saniyelik hareket sonucu ise hız değeri her iki grafikte de 59,77 değerine ulaşmıştır. Türetilen denklemlerden elde edilen ω_4 ara değerlerinin ise, hareket benzetimlerinden elde edilen ara değerler 2 saniyelik hareket süresi boyunca aynı olduğu görülmektedir.

Şekil 4.12.'de görüldüğü üzere deney düzeneğinden elde edilen verilerin oluşturduğu açısai hız-zaman grafiğinin ayrıca diğer grafiklerdeki zamana bağlı hız değerleriyle tutarlı olduğu görülmüştür. Ancak deney verilerinden elde edilen ω_4 açısai hız-zaman grafiği (Şekil 4.12.)

incelendiğinde deney zamanı içerisinde belirli aralıklarla salınımsal bir grafik olduğu görülmektedir. Bu duruma montaj boşluklarının ve toleranslarının neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.12. Deney düzeneği ω_4 açısal hız-zaman grafiği

Materyal-Metot bölümünde elde edilen deneysel çalışmalar sonucunda elde edilmiş en iyileştirme sonuçları tablo haline getirilmiştir (Çizelge 4.1.) . Tez çalışmasının bu kısmı, havacılık alanında kullanılacak bir silah sistemine ait namlu tasarımının minimum ağırlıkta ve maksimum mukavemette olmasını sağlama amacı taşımaktadır.

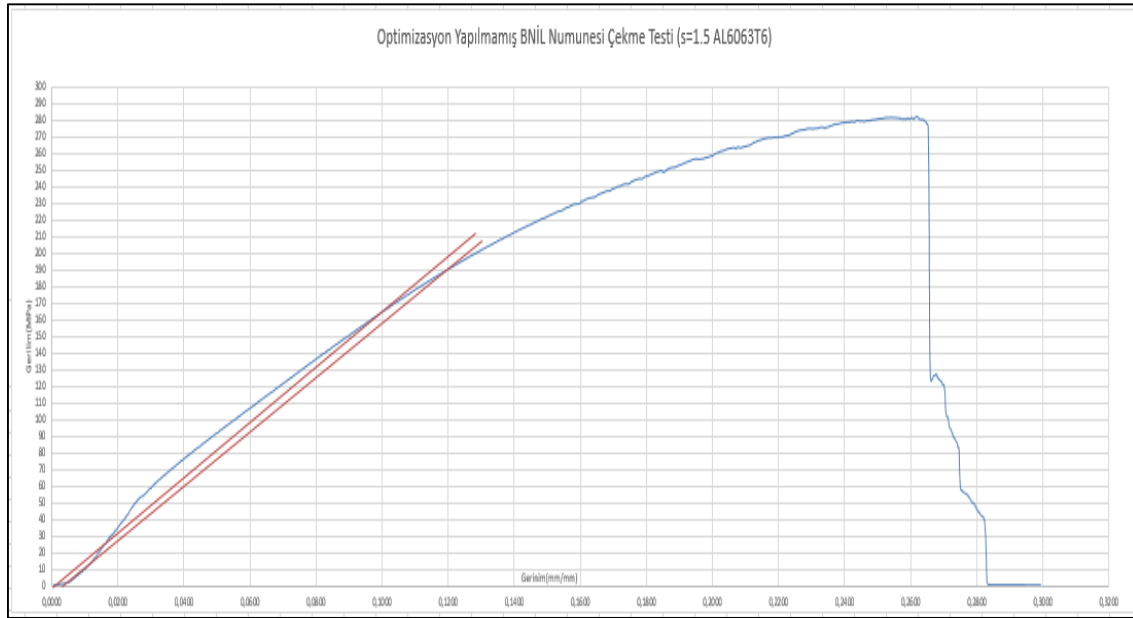
Birim namlu ince levha'nın (BNİL) herhangi bir en iyileştirme yapılmamış hali, çentik faktörüne ve topolojik optimizasyona bağlı olarak ağırlığı azaltılmış tasarımlar ayrı ayrı incelenmiştir

Çizelge 4.1. Eşdeğer bileşke gerilme şartlarının karşılaştırılması

Birim Namlu İnce Levhası	$\sigma_{max}(ansys)$	$\sigma_{normal}(ansys)$	Ağırlık oranı %	Ağırlık azalması %
Ağırlık azaltma yapılmamış	142,67	47,08	100	0
Çentik Faktörüne bağlı ağırlık azaltma (ortalama)	142,67	40,13	98,76	1,24
Topolojik Optimizasyona bağlı ağırlık azaltma	142,67	68,04	93,93	6,07
Topolojik Optimizasyona bağlı ağırlık azaltma (Doğrulanmış)	142,67	42,10	93,93	6,07

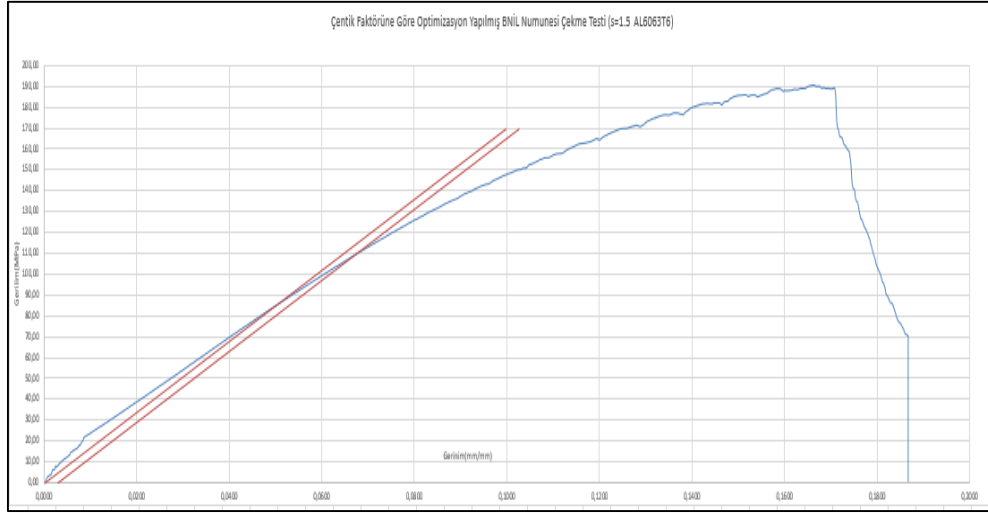
Yapılan en iyileştirme çalışmaları sonucunda, ağırlık oranının çentik faktörüne göre %1,24, topolojik optimizasyona göre ise %6,07 azaldığı görülmektedir (Çizelge 4.1). Topolojik optimizasyon ile elde edilen yaklaşık %6'lık bir ağırlık düşüşüne karşılık ince levhada mukavemet kaybının çentik faktörü ile en iyileştirme yapılmış numunelerin değerlerine yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Çekme deneyi sonucunda üretilmiş olan BNİL numunelerinin kıyaslanması ayrıca hedeflenmiştir. Test içerisinde Şekil 4.13. , Şekil 4.14. ve Şekil 4.15.'te gösterildiği üzere, optimizasyon yapılmamış numune, çentik faktörü baz alınarak yapılmış optimizasyon numunesi ve topolojik optimizasyon numunesi sonuçları gözlemlenmiştir.



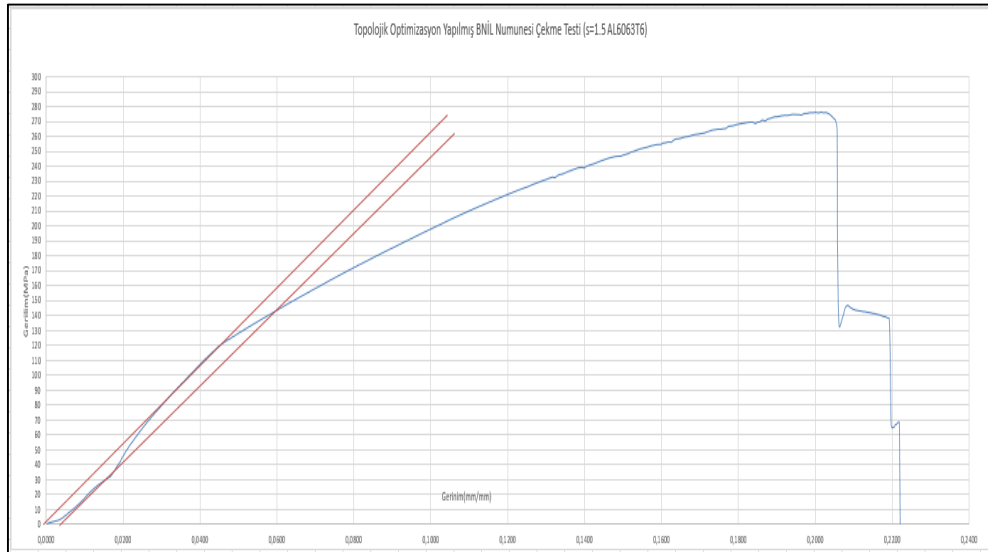
Şekil 4.13. En iyileştirme yapılmamış BNİL çekme testi

En iyileştirme yapılmamış 3 adet BNİL numunelerinin güvenlik katsayısı 1,5 olduğu koşulda ortalama 282,03 MPa gerilimde koptuğu görülmüştür.



Şekil 4.14. Çentik faktörüne göre en iyileştirme yapılmış BNİL çekme testi

Çentik faktörüne göre en iyileştirme yapılmış 3 adet BNİL numunelerinin güvenlik katsayısı 1,5 olduğu koşulda ortalama ortalama 190,26 MPa gerilimde koptuğu görülmüştür.



Şekil 4.15. Topolojik optimizasyona göre en iyileştirme yapılmış BNİL çekme testi

Topolojik en iyileştirmeye göre en iyileştirme yapılmış BNİL numunesinin güvenlik katsayısı 1,5 olduğu koşulda ortalama 276,23 MPa gerilimde koptuğu görülmüştür.

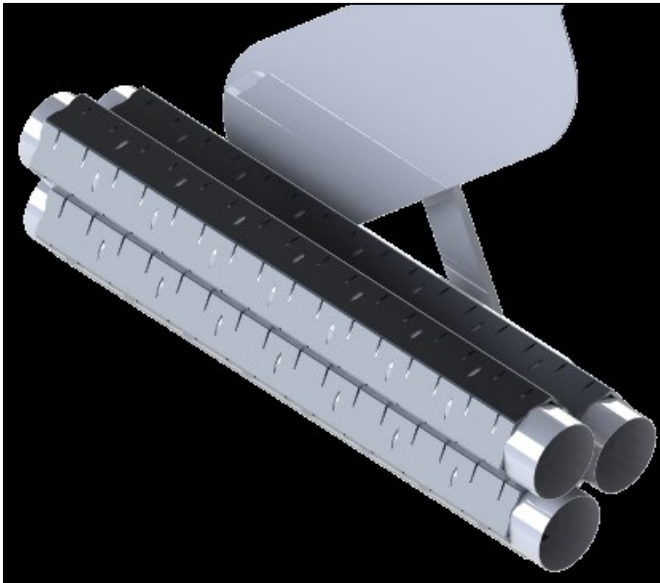
Çekme deneyi sonrasında aynı çekme hızında teste giren 9 adet numuneden elde edilen verilere göre ilk kopan numunelerin çentik faktörü optimizasyonu yapılan numuneler olduğu görülmüştür. Topolojik en iyileştirme ile ağırlık azaltılması yapılmış numunelerin ise ikinci sırada koptuğu gözlenmiştir. En iyileştirme yapılmamış BNİL numunelerinin ise diğer tasarım

numunelere kıyasla en son koptuğu görülmüştür. Benzetim ve deney çalışmaları temel alınarak topolojik en iyileştirme yapılmış tasarımın dayanım/ağırlık oranına göre tercih edilebilmesi için uygun olduğu görülmüştür.

Tasarımın son hali için yapılmış olan BNİL kıyaslamasında, Şekil 4.16.'te optimizasyon yapılmamış BNİL levhalardan oluşmuş kavram tasarım, Şekil 4.17.'te topolojik optimizasyona bağlı olarak ağırlığı azaltılmış BNİL levhalardan oluşmuş kavramsal tasarıma evrilmiştir.



Şekil 4.16. İyileştirme yapılmamış BNİL kullanılarak tasarlanmış namlu konsept tasarımı



Şekil 4.17. Topolojik en iyileştirmeye bağlı BNİL kullanılarak tasarlanmış namlu

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada, hareketli bir cisme nişan alabilen ve farklı açılardan ateş edebilen mühimmatlı taşınabilir bir silahlı insansız hava aracına ait namli mekanizmasının kavramsal tasarımı, karmaşık sayılar yardımıyla matematiksel olarak modellenmiş ve Kurulumu dayalı bir deney yapılmıştır. Bu modellerden elde edilen fonksiyon verilerinin bilgisayar destekli hareket benzetim verileriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Deney düzeneğinden elde edilen verilerin teorik ve sanal benzetim verilerinin başlangıç ve sonuç değerlerinin birim zamanda aynı olduğu görülmüştür.

Çalışmada ayrıca, takviyeli delikli ince plakaların aynı malzeme kullanılarak farklı geometrik model ve aynı çekme yönlerine göre elde edilmiş deneysel sonuçlar, bilgisayar destekli hesaplama ortamında sayısallaştırılarak anlamlı hale getirilmiştir. Elde edilen interpolasyon grafikleri, bilgisayar ortamında kullanılabilir ham veri haline dönüştürülmüştür. Takviyeli delikli ince plakaların gerilme altındaki gerilme konsantrasyon faktörü teorik olarak ve ANSYS ortamında uygulamalı olarak incelenmiş, yeniden hesaplanmıştır. Tek değişkenli regresyon analizi sonuçlarından elde edilen grafikler, formüllerden elde edilmiş olan teorik grafikler ile üst üste bindirilmiştir. Analiz sonucunda değişkenliklerin regresyon doğrusu tarafından %99,18 oranında güvenilir olduğu belirlenmiştir. Sonraki aşamada aynı sınır şartları esas alınarak ince levha üzerinde ANSYS ortamında topolojik boşaltma yöntemi ile optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Çentik faktörü ve topolojik optimizasyon yöntemi ile ağırlık azaltılması yapılmış ince levhada eşdeğer bileşke gerilme değerleri kıyaslanmıştır. ANSYS ortamında topolojik optimizasyona bağlı olarak ağırlık azaltma uygulandıktan sonra ince levha, CAD ortamında düzenlenmiş ve yeniden tasarlanmıştır. Bu tasarlama maksimum bileşke gerilimi ve ağırlık ilk yapılan simülasyondaki veri ile aynı tutularak ikinci bir doğrulama simülasyonu yapılmıştır. Tasarımı yapılan BNİL numuneleri ayrıca çekme testine tabi tutulmuş ve normal dayanım /ağırlık oranı en yüksek numunelerin topolojik en iyileştirme yapılmış numuneler olduğu belirlenmiştir.

Bilgisayar destekli kinematik benzetimleri ile doğrulanmış parametrik silah namli mekanizması ve bu mekanizma ile beraber çalışan mesafe bulucu sensör-kamera sistemi matematiksel modellemesi ile aşağıdaki bazı sonuçlar elde edilmiştir:

- Mühimmat fırlatma mekanizmasının parametrik tasarımı sayesinde farklı malzemelerden, farklı boyutlarda ve farklı ağırlıklarda üretilen varyantları için gerekli servo motor özellikleri açısal hız ve atalet momentinden hesaplanabilmektedir.
- Mesafe sensörü tarafından elde edilen mesafe (r) verileri ve kamera sisteminin gövdeye göre referans açısı, hedefin en uygun mercek namlusu açısında yakalanmasını sağlamaktadır.
- Konsept tasarımı, SİHA'nın hareket halindeyken, negatif ve pozitif hücum açılarıyla (araç şasisinin yatay eksene olan açısı) en yüksek isabetle atış yapmasını sağlamaktadır.
- Hedef cismin menzil sensörü ile belirlenen mesafesi ve SİHA'nın konum değişikliğinden elde edilen mutlak bağlı hızı kullanılarak hareket halindeki bir uçak ile hareketli bir hedefi yüksek isabet oranıyla vurmak mümkün olacaktır.

Namlu sistemini hafifletmek amacıyla yapılmış sayısal analizler, en iyileştirmeler ve deneyler sonucu elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- ANSYS ortamında takviyeli delikli ince levhaların delik/takviye oranı ve radyüs oranına göre gerilim konsantrasyonları incelenmiştir. ANSYS model tasarımında radyüs oranının oluşturmuş olduğu gerilme konsantrasyon faktörünün, delik/takviye oranının oluşturmuş olduğu konsantrasyon faktörüne göre ters orantılı olduğu görülmektedir. Radyüs oranının artması ile konsantrasyon faktörü azalmaktadır.
- Eşdeğer bileşke gerilme koşullarında çentik faktörüne göre ağırlığı azaltılmış en hafif BNİL'in, ağırlık azaltılma yapılmamış BNİL'e göre normal dayanımına göre daha düşük olduğu görülmüştür.
- Çentik faktörü esas alınarak parçada boşaltma yapıldığında, takviye miktarı arttıkça maksimum net gerilme dayanımının arttığı görülmüş, ancak bu durum dezavantaj olarak ağırlık artışına sebep olmuştur. Çentik faktörüne dayanarak istenilen maksimum gerilme değerlerinde boşaltma yapılabildiği belirlenmiştir.
- Eşdeğer bileşke gerilme koşullarında, herhangi bir optimizasyon yapılmamış BNİL'in maksimum gerilme değerinin, topolojik optimizasyon ile ağırlığı azaltılmış BNİL'in gerilme değeri ile yüksek oranda benzer olduğu görülmüştür. Ancak topolojik optimizasyon ile ağırlığı azaltılmış BNİL'in, ham BNİL'e göre ağırlığının %6,07 oranında daha hafif olduğu gözlemlenmiştir.

- Topolojik optimizasyon yöntemi ile yapılan ağırlık azaltma işlemlerinin bu tasarımda daha uygun olduğu görülmüş (Çizelge 4.1) ve tasarımın nihai hali topolojik optimizasyona göre belirlenmiştir (Şekil 4.17).

Çalışma sonuçlarına dayanarak gelecekte yapılacak namlu mekanizmalarına ait çalışmalar geliştirilebilir:

- Mesafe sensörü yerine çoklu kamera kullanılarak elde edilen uzaklık verileri kullanılarak yazılmış görüntü işleme programları ile otonom hedef alan alt kamera sistemine bağlı olan, namlu mekanizması ile operatör kullanmadan otonom hedef alan bir sistem geliştirilebilir.
- Matematiksel modellemeye bağlı hız fonksiyonları eklenerek lançer sistemi dinamik olarak geliştirilebilir. Bu sistem yazılımsal olarak SİHA'nın kendi ivme ölçer verilerini ve hedefin anlık hızını ölçen SLAM teknolojisi kullanan kamera verileri ile sağlanabilir.
- Farklı sensörler eklenerek (rüzgâr, sıcaklık vb.) lançer mekanizmasının dinamik optimizasyonu gerçekleştirilerek atış kalitesi ve kesinliği artırılabilir.
- Sensör verileri kullanılarak yapay sinir ağları ile atış kesinliği ve kalitesi artırılabilir.
- Namlu mekanizmasındaki montaj ve tolerans boşlukları, sistemin çalışmasında bazı konum-süre gecikmelerine ve salınlara neden olmaktadır. Sisteme gerekli yazılımsal dönüşümler yapılarak bu zaman kayıplarının ve hataların önüne geçilebilir.
- Sistem evrensel olarak insansız kara ve su üstü araçlarında kullanılabilir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Strategic Defence Intelligence (2015). The Global UAV Market 2015-2025. Web: <https://store.strategicdefenceintelligence.com/report/df0060sr--the-global-uav-market-2015-2025>, Son erişim tarihi: 04.06.2022.
2. Ak, T. & Avaner, T. (2019). Silahlı insansız hava araçlarının uluslararası alanda ve iç güvenlikte sevk ve idaresine ilişkin hukuki saptamalar. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 18(36), 43-66.
3. Kabadayı, A. & Uysal, M. (2019). İnsansız hava aracı ile elde edilen verilerden binaların tespiti. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 1(1), 8-14.
4. Karaağaç, C. (2016). İHA sistemleri yol haritası geleceğin hava kuvvetleri 2016-2050. *STM Uzay ve Havacılık Sektör Raporu*, Ankara, 1-75.
5. Bakır, G. (2019). İnsansız hava araçlarının savunma sanayi harcamasında yeri ve önemi. *Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 6(2), 127-134.
6. Graham, S. (2011). *Kuşatılan şehirler yeni askeri kentçilik*, 1.baskı, Ankara: Nota Bene Yayınları, 147-223.
7. Guleryuz, M. (2019). Yeni nesil yerli silahlı drone songar, *Gündeme Bakış*, 13(16), 12-25.
8. Ojha, S. & Sakhare S. (2015). *Image processing techniques for object tracking in video surveillance- A survey*. International Conference on Pervasive Computing (ICPC), Pune, 1-6.
9. Wixson L., Eledath J., Hansen, M., Mandelbaum, R. & Mishra, D. (1998). *Image alignment for precise camera fixation and aim, proceedings*. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Santa Barbara, 594-600.
10. Maddalena, L., Petrosino, A. & Ferone, A. (2008). Object motion detection and tracking by an artificial intelligence approach. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 22(05), 915-928.
11. Ekmen, M. İ. & Aydoğdu, Ö. (2020). İnsansız hava araçları için görüntü işleme tabanlı otonom iniş. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 1(1), 297-303.
12. Yayla, M., Ergin, Ü., Mutlu, T. & Kurtulus, D.F. (2014). *Bir muharip insansız uçak sistemi için performans gereksinimlerinin belirlenmesi*. HİTEK-2014-024, III. Ulusal Havacılıkta İleri Teknolojiler Konferansı, İstanbul, 45-102.
13. Nişancı, M. H., Teşneli, A.Y. & Teşneli, N.B. (2018). Yıldırım darbelerinin silahlı insansız hava araçları (SİHA) üzerindeki dolaylı etkilerinin analizi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(3), 390-395.

14. Ramesh, P. S., & Jeyan, J.M.L. (2020). *Comparative analysis of the impact of operating parameters on military and civil applications of mini unmanned aerial vehicle (UAV)*. AIP Conference Proceedings, Jalandhar, 030034.
15. İnternet: Dutta, A.N. & Deol, T. (2021). Nano, micro, small: The different drone types in India & if Jammu-like strike can be averted. *The Print*. Web: <https://theprint.in/defence/nano-micro-small-the-different-drone-types-in-india-if-jammu-like-strike-can-be-averted/686158/>, Son erişim tarihi: 05.08.2022.
16. Getsov, P., Zabunov, S. & Mardirossian, G. (2014). H-Airframe benefits for constructing quad-rotor unmanned helicopters. *International Journal of Science and Research*, 3(8), 3,12.
17. Bauman, R. E. & Christenson, J. R. (1971). *Spin and fin stabilized rocket*. DC: U.S. Patent and Trademark Office, U.S. Patent No: 3,610,096, Washington.
18. Hauser, G. R., Hunter, W. H., Hynes, J. F., Keller, D. R., Thurston, J.R.D. & Manda, L. J. (1966). *Spin rocket and launcher*. DC: U.S. Patent and Trademark Office, U.S. Patent No: 3,251,267. Washington.
19. İnternet: MKE Genel Müdürlüğü (2022). Ürün Kataloğu, Web: <https://urunler.mke.gov.tr/Urunlerimiz/> Son erişim tarihi: 20.02.2022.
20. Altmann, J. & Suter, D. (2022). Survey of the Status of Small and very Small Missiles. *DSF*, Osnabrück, 1-49.
21. İnternet: ROKETSAN (2022). Ürün Kataloğu. Web: <https://www.roketsan.com.tr/tr/urunler/lazer-gudumlu-mini-fuze-sistemi>, Erişim tarihi: 20.02.2022.
22. Aksu, A. (2014). *Aerodynamic parameter estimation of a missile without wind angle measurements*. AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference, Georgia, 2557.
23. Jin, S., Li, Z., Huang, F., Gan, D., Cheng, R. & Deng, G. (2019). Constrained shell finite element method for elastic buckling analysis of thin-walled members. *Thin-Walled Structures*, 145(3), 106409.
24. Shen, W., Qiu, Y., Xu, L. & Song, L. (2019). Stress concentration effect of thin plate joints considering welding defects. *Ocean Engineering*, 184(2), 273-288.
25. Nie, G. J. & Batra, R. C. (2019). Reducing stress concentration factor by strengthening circular hole with functionally graded incompressible material layer. *Thin-Walled Structures*, 144(1), 106223.
26. Hawk, A. H. & Pierce, J. T. (1963). *The stresses around a reinforced circular hole in a pressurized cylindrical Shell*. Doctoral Dissertation, Webb Institute of Naval Architecture, New York.
27. Christy, D. L., Pillai, T. M. & Nagarajan, P. (2019). Thin plate element for applied element method. *Structures*, 22(1), 1-12.

28. Huang, C. C., Peng, S. C., Lin, W. Y., Fujii, F. & Hsiao, K. M. (2018). A buckling and postbuckling analysis of axially loaded thin-walled beams with point-symmetric open section using corotational finite element formulation. *Thin-Walled Structures*, 124(6), 558-573.
29. Peres, N., Gonçalves, R. & Camotim, D. (2020). A GBT-based mixed finite element for curved thin-walled members with circular axis. *Thin-Walled Structures*, 146(3), 106462.
30. Duan, L. & Zhao, J. (2019). A geometrically exact cross-section deformable thin-walled beam finite element based on generalized beam theory. *Computers & Structures*, 218(4), 32-59.
31. Koiter, W.T. (1957). An elementary solution of two stress concentration problems in the neighborhood of a hole. *Quarterly of Applied Mathematics*, 15(3), 303-308.
32. Li, W. & Ma, H. (2017). A geometrically exact thin-walled beam element with simplified strain definition. *Thin-Walled Structures*, 117(1), 49-62.
33. Hansen, A. B. & Jönsson, J. (2019). A thin-walled beam element based on semi-analytical solution modes. *Thin-Walled Structures*, 144(1), 106344.
34. Mansfield, E. H. & Hanson, C. J. (1972). Optimum reinforcement around a circular hole in a flat sheet under uniaxial tension, *MOD*, Farnborough, 1-11.
35. Bickley, W.G. (1928). X. The distribution of stress round a circular hole in a plate. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 227(647-658), 383-415.
36. Alonso, L., Martínez-Hergueta, F., Garcia-Gonzalez, D., Navarro, C., García-Castillo, S. K. & Teixeira-Dias, F. (2020). A finite element approach to model high-velocity impact on thin woven GFRP plates. *International Journal of Impact Engineering*, 142(1), 103593.
37. Duan, S., Zhang, Z., Wei, K., Wang, F. & Han, X. (2020). Theoretical study and physical tests of circular hole-edge stress concentration in long glass fiber reinforced polypropylene composite. *Composite Structures*, 236(1), 111884.
38. Ádány, S. (2019). Modal identification of thin-walled members by using the constrained finite element method. *Thin-Walled Structures*, 140(2), 31-42.
39. Goo, S., Wang, S., Hyun, J. & Jung, J. (2016). Topology optimization of thin plate structures with bending stress constraints. *Computers & Structures*, 175(2), 134-143.
40. Bujny, M., Aulig, N., Olhofer, M. & Duddeck, F. (2016). *Evolutionary crashworthiness topology optimization of thin-walled structures*. 11th ASMO UK / ISSMO / NOED2016: International Conference on Numerical Optimisation Methods for Engineering Design, Munich, 1-12.

41. Zhang, J., Wang, S., Zhou, H. & Ning, L. (2021). Multi-component topology optimization for thin-walled structures. *Engineering Optimization*, 54(5), 1-17.
42. İnternet: Seika, M., & Ishii, M. (1964). Photoelastic investigation of the maximum stress in a plate with a reinforced circular hole under uniaxial tension. Web: <https://nagoya.repo.nii.ac.jp/record/31231/files/19-2-01.pdf>, Erişim tarihi: 05.05.2022.
43. Tatar, A.B. & Yakut, O. (2019). Dört bacaklı robot üzerindeki silah kulesinin stabilizasyon simülasyonu. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 12(3), 1413-1424.
44. Yıldız, S. & Pehlivanlı, Z.O. (2019). Mekanik Tapalardaki Pandül ve Rotor Ağırlık Değişimlerinin Namlu Önü Emniyetine Etkilerinin İncelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(2), 489-495.
45. Guler, H. & Yasul, M.F. (2020). Elektromanyetik Silah Matlab/Simulink Modeli. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 32(2), 521-529.
46. GÜNGÖR, D. (2021). *İç balistik hesaplama ve namlu tasarımprogramı geliştirilmesi* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü/Savunma Teknolojileri Ana Bilim Dalı).
47. Geng, X., Zhou, K. & He, L. (2020). Influence of temperature-dependent tensile strength on gun barrel life prediction. *Mathematical Problems in Engineering*, 1(1), 1-9.
48. Rutci, T. A. (2019). *Hafif silahlarda kullanılan namlu malzemesinin geliştirilmesi ve işleme parametrelerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
49. Sönmez, U. (2009). *Obüs namlusu yanma odasında atış esnasında ortaya çıkan gerilmelerin matematiksel modellenmesi ve analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
50. İnternet: Kuchenreuther-Hummel, V., & Lietz, M. (2022). Erosion test facility for small caliber gun barrels. Web: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/ca56c6c2-41c6-496d-b0f6-704929a962bf/details>, Son erişim tarihi: 08.06.2022.
51. Li, X., Wang, Y., Zang, Y., Guan, B. & Qin, Q. (2019). Analysis of interior ballistic performance degradation of a worn gun barrel based on finite element method. *Journal of Physics: Conference Series* 1314(1), 012090.
52. Bozdemir, M. (2019). Silah sabitleme sistemi tasarım ve prototip üretimi. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3(1), 76-85.
53. Fan, W. & Gao, P. (2021). A review on erosion-reducing additive materials to extend the lifespan of gun barrels. *Journal of Materials Science*, 56(36), 19767-19790.

54. Susantez, Ç. (2020). Vallier-Heydenreich metodu ile silahların namlu iç balistiğinin incelenmesi. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 19(37), 73-94.
55. Wu, B., Zheng, J., Luo, T. F., Wang, T., Zhou, Y. C., & Huang, X. (2020). Damage and fracture of gun barrel under wear-fatigue interaction. *Journal of Physics: Conference Series*, 1507(10), 102034.
56. Xi, S. & Wu, H. (2021). Numerical Calculation and Analysis of Gun Barrel Heat Transfer. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 632(3), 032008.

EKLER

(Simülasyon, video, hesaplama ve deney verileri Ekleri Tezin arka kapağında CD ortamında verilmiştir.)

EK-1. Lançer mekanizması sayısal analizi uygulaması, Çentik faktörü matematiksel modelleme temel alınarak yapılmış ansys çözümlmeleri sayısal analizi ve optimizasyonu;

SABİT	SONUÇ															sol1	
DEĞİŞKEN	BİRİM	H	D	d	h	ht	r	h/D	d/D	D/h	H/D	sem	σak	σ	σnet	σmax	σmax(ansys)
ht/h	Ktn	r/h															
1,13746	2,36473	0,33	40	10	7	2	2,27492	0,66	0,2	5	4	142,7	214	-5,34333	60,33106	142,7	180,1621139
1,46061	2,04106	0,33	40	10	7	2	2,92122	0,66	0,2	5	4	142,7	214	-4,21161	69,89832	142,7	195,1460177
1,72588	1,88647	0,33	40	10	7	2	3,45176	0,66	0,2	5	4	142,7	214	-2,79903	75,62626	142,7	210,2829008
2,09244	1,80435	0,33	40	10	7	2	4,18488	0,66	0,2	5	4	142,7	214	-0,387	79,06818	142,7	227,1991224
2,459	1,7657	0,33	40	10	7	2	4,918	0,66	0,2	5	4	142,7	214	2,199534	80,79893	142,7	234,7262828
2,72428	1,75604	0,33	40	10	7	2	5,44856	0,66	0,2	5	4	142,7	214	4,099973	81,2434	142,7	238,1743436
3,0426	1,76087	0,33	40	10	7	2	6,0852	0,66	0,2	5	4	142,7	214	6,348405	81,02056	142,7	232,3783073
3,36093	1,7657	0,33	40	10	7	2	6,72186	0,66	0,2	5	4	142,7	214	8,584608	80,79893	142,7	229,5424055
3,41399	1,77053	0,33	40	10	7	2	6,82798	0,66	0,2	5	4	142,7	214	8,935794	80,57851	142,7	228,8470359
3,57315	1,77536	0,33	40	10	7	2	7,1463	0,66	0,2	5	4	142,7	214	10,0321	80,35929	142,7	226,3571736
3,78537	1,79469	0,33	40	10	7	2	7,57074	0,66	0,2	5	4	142,7	214	11,40216	79,49377	142,7	226,4145737
error(%)																	
Ktn excel	Ktn OPT.	σ OPT.															
3,547095	2,985527	47,79725	-26,2524														
3,06159	2,791203	51,1249	-36,7526														
2,829705	2,779905	51,3327	-47,3601														
2,706525	2,872787	49,67301	-59,2145														
2,64855	2,904388	49,13255	-64,4893														
2,63406	2,93093	48,68762	-66,9056														
2,641305	2,86747	49,76512	-62,8439														
2,64855	2,840245	50,24214	-60,8566														
2,655795	2,839387	50,25732	-60,3693														
2,66304	2,816156	50,67191	-58,6245														
2,692035	2,84754	50,11343	-58,6647														

Şekil 1.1. Sayısal analiz en iyileştirmesi

EK-1. (devam) Lançer mekanizması sayısal analizi uygulaması, Çentik faktörü matematiksel modelleme temel alınarak yapılmış ansys çözümleri sayısal analizi ve optimizasyonu;

Launcher Mekanizması Nümerik Analizi									
Girdiler									
s	95,18171	834,2005	833,5862	829,0059	823,593	817,187	808,9468	798,5913	791,3517
c	197,5	197,5	197,5	197,5	197,5	197,5	197,5	197,5	197,5
e	60	60	60	60	60	60	60	60	60
x	812,0186	692,7411	691,9187	685,7819	678,5181	669,9054	658,8001	644,7997	634,9812
d	60	60	60	60	60	60	60	60	60
r	700	700	700	700	700	700	700	700	700
k	255	140	140	140	140	140	140	140	140
a	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Sch	195,4841	191,3416	190,7948	187,0074	182,9139	178,3549	172,7609	166,0028	161,404
θ1	10,58	18,11	19,05	24,99	30,6	36,185	42,375	49,17	53,481
θ3	7,76047	15,11968	15,90762	20,89883	25,63597	30,37983	35,67665	41,54737	45,30714
θ2	29,19055	38,37363	39,43291	46,14174	52,50083	58,85212	65,91258	73,68361	78,62141
θ4	3,900114	10,25891	10,99126	15,62748	20,02367	24,4292	29,33225	34,77178	38,25544
Konum Analizi, 04 için									
K1 katsayısı	25,29043	28,11473	28,44166	30,51425	32,47716	34,4292	36,58033	38,91182	40,36597
K2 katsayısı	-375968	-329509	-329267	-327457	-325319	-322789	-319534	-315444	-312584
K3 katsayısı	-23700	-23700	-23700	-23700	-23700	-23700	-23700	-23700	-23700
A katsayısı	794984,2	693447,8	691677,6	678510,8	663022,3	644792,4	621502,8	592488,7	572372,3
B katsayısı	-101535	-171896	-180495	-233620	-281500	-326488	-372711	-418429	-444424
C katsayısı	2535,48	9842,632	10963,14	19281,84	29031,99	40457,87	54974,3	72928	85287,89
Launcher Mekanizması Analitik Hız Analizi									
w2	59,656	59,741	60,663	59,967	60,002	59,987	59,741	60,004	59,967
w2	85,98685	86,40111	87,75275	86,78071	86,73248	86,47467	85,68391	85,34174	84,68843
w3	43,82002	50,06202	50,86487	50,5062	50,80648	51,12117	51,34237	52,13133	52,50569
w4	41,38817	41,30719	41,936	41,43825	41,50971	41,61265	41,65294	42,18897	42,46201

Şekil 1.2. Lançer mekanizması sayısal analiz uygulaması

EK-2. Namlu mekanizması deney düzeneği yazılım kodları

```
#include <XYZrobotServo.h>

// On boards with a hardware serial port available for use, use
// that port. For other boards, create a SoftwareSerial object
// using pin 10 to receive (RX) and pin 11 to transmit (TX).
#ifdef SERIAL_PORT_HARDWARE_OPEN
#define servoSerial SERIAL_PORT_HARDWARE_OPEN
#else
#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial servoSerial(19, 18);
#endif

const uint8_t servoId = 1;
XYZrobotServo servo(servoSerial, servoId);

unsigned long cam_Servo_Tick_ms = 0;
int Cam_servo_konum_once = 549;
int Cam_servo_Okunan_konum = 0;

//Cikis Servo Variables For Func begin
const int Cikis_Servo_Pin = 3;
int Cikis_Servo_Son_Konum = 235;
unsigned long cikis_Servo_Tick_ms = 0;
//Cikis Servo Variables For Func end

// Main loop inside variables
unsigned long Tick_ms = 0;

int pot_data_max = 0;
int pot_data_min = 1023;

const int trigger_pin = 7;
```

EK-2. (devam) Namlu mekanizması deney düzeneği yazılım kodları

```

const int echo_pin = 6;

unsigned long sure_tur_ilk = 0;

int cikis_servo_deger_gir = 0;
float Hc_mesafe_yen = 100;
bool ilkd_defa_amk = true;

void setup() {

// Seri haberleşmeyi başlatıyoruz
Serial.begin(115200);

// Turn on the serial port and set its baud rate.
servoSerial.begin(115200);
servoSerial.setTimeout(20);

// Cıkis Servo Pini Cıkis olarak ayarlandı
pinMode(Cikis_Servo_Pin, OUTPUT);

// initialize digital pin LED_BUILTIN as an output.
pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);

pinMode(trigger_pin, OUTPUT);
pinMode(echo_pin, INPUT);

delay(10);

//Cam Servo baslangi konuma getir
//servo.setPosition(260, 200);
//Cıkis Servo baslangi konuma getir
EK-2. ... Devam ...

```

EK-2. (devam) Namlu mekanizması deney düzeneği yazılım kodları

```
while( Cikis_Servo_fun(60,10) != 60);
```

```
delay(200);
```

```
sure_tur_ilk = millis();
```

```
cikis_servo_deger_gir = 230;
```

```
Tick_ms = millis();
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
//Cikis Servo Loop
```

```
Cikis_Servo(cikis_servo_deger_gir,10);
```

```
//sensor yok-----
```

```
/*digitalWrite(trigger_pin, HIGH);
```

```
delayMicroseconds(1000);
```

```
digitalWrite(trigger_pin, LOW);
```

```
int Hc_sure = pulseIn(echo_pin, HIGH);
```

```
float Hc_mesafe = ((Hc_sure/2) / 29.1) * 10;
```

```
if(Hc_mesafe < 3000 && Hc_mesafe > 100);
```

```
{
```

```
Hc_mesafe_yen = Hc_mesafe;
```

```
}*/
```

```
if(millis() - Tick_ms >= 100)
```

```
{
```

```
Tick_ms = millis();
```

```
float Cikis_Servo_Abs_Encoder = (0.35307501 * float(analogRead(A0))) - 163.23147637;
```

EK-2. (devam) Namlu mekanizması deney düzeneği yazılım kodları

```

if(ilkd_defa_amk){
Serial.println(Cikis_Servo_Abs_Encoder);

if(Cikis_Servo_Abs_Encoder > 140)
{
unsigned long sure_tur = millis() - sure_tur_ilk;
Serial.println(sure_tur);
ilkd_defa_amk = false;
}
}

//float cam_aci = Formula (122, Hc_mesafe_yen);
//derece kontrol
//cikis_servo_deger_gir = map(cam_aci,23,143,60,235);

//Serial.print("Ccikis_servo_deger_gir ");
//Serial.println(cikis_servo_deger_gir);
}
}

//*****
*****

float Formula(float derece, float mesafe)
{
float r = 700;
float teta1 = derece*f

float k = 275;
float d = 60;
float e = 60;
float c = 197.5;
float a = 150 ;

```

formula

begin

EK-2. (devam) Namlu mekanizması deney düzeneği yazılım kodları

```
float s = sqrt( pow(k, 2) + ( k * r * 2 * cos(radians(teta1)) ) + pow(r, 2));
```

```
float teta3 = 57.2957795 * acos( ( pow(r, 2) - pow(s, 2) - pow(k, 2) ) / ( - 2 * k * s ) );
```

```
float x = sqrt( pow(s, 2) + ( 2 * s * d * cos(radians(teta3))) + pow(d, 2) - pow(e, 2) ) - c;
```

```
float k1 = - 2 * s * c;
```

```
float k2 = - 2 * d * c;
```

```
float k3 = pow(x,2) + pow(e,2) - pow(s,2) - pow(c,2) - pow(d,2) -  
( 2*s*d*cos(radians(teta3)));
```

```
float A = -k1*cos(radians(teta3))-k2-k3;
```

```
float B = 2*k1*sin(radians(teta3));
```

```
float C = k1*cos(radians(teta3))+k2-k3;
```

```
float teta4 = 2 * 57.2957795 * (atan(((B-sqrt(pow(B,2)-4*A*C))/(2*A))));
```

```
float scb =( 2 * d * cos(radians(teta4)) + sqrt( pow((-2*d*cos(radians(teta4))),2) - 4*  
( pow(e,2) + pow(d,2) - pow(a,2) + 2 * e * d * sin(radians(teta4)) ) ) ) / 2 ;
```

```
float teta2 = 57.2957795 *(acos((pow(scb,2)+pow(e,2)-pow(a,2)- pow(d,2)) /(2*a*d)));
```

```
/*Serial.print("s : ");
```

```
Serial.println(s, 4);
```

```
Serial.print("c : ");
```

```
Serial.println(c, 4);
```

```
Serial.print("e : ");
```

```
Serial.println(e, 4);
```

EK-2. (devam) Namlu mekanizması deney düzeneği yazılım kodları

```
Serial.print("x : ");  
Serial.println(x,3);  
Serial.print("d : ");  
Serial.println(d, 4);
```

```
Serial.print("r : ");  
Serial.println(r, 4);
```

```
Serial.print("k : ");  
Serial.println(k,3);
```

```
Serial.print("a : ");  
Serial.println(a, 4);
```

```
Serial.print("scb : ");  
Serial.println(scb,3);
```

```
Serial.print("teta1 : ");  
Serial.println(teta1,3);
```

```
Serial.print("teta2 : ");  
Serial.println(teta2,3);
```

```
Serial.print("teta3 : ");  
Serial.println(teta3,4);
```

```
Serial.print("teta4 : ");  
Serial.println(teta4,3);
```

```
Serial.print("k1 : ");  
Serial.println(k1,3);  
Serial.print("k2 : ");
```

EK-2. (devam) Namlu mekanizması deney düzeneği yazılım kodları

```

Serial.println(k2,3);
Serial.print("k3 : ");
Serial.println(k3,3);

Serial.print("A : ");
Serial.println(A,3);
Serial.print("B : ");
Serial.println(B,3);
Serial.print("C : ");
Serial.println(C,3);*/

return teta2;
}
//*****Formulaend*****
*****

//----- Cam Servo begin -----
int readStatusPos(XYZrobotServo & servo)
{
XYZrobotServoStatus status = servo.readStatus();
if (servo.getLastError())
{
Serial.println("Error reading Cam Servo status: ");
digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
}
else
{
Serial.print("Cam Ps: ");
Serial.println(status.position);
return status.position;
}
}

```

EK-2. (devam) Namlu mekanizması deney düzeneği yazılım kodları

```

}

return 0;
}

int Cam_Servo_func(int Cam_servo_konum, int Hiz)
{
Hiz = 10;

if(millis() - cam_Servo_Tick_ms > 100)
{
cam_Servo_Tick_ms = millis();

if(Cam_servo_konum != Cam_servo_konum_once)
{
if(Cam_servo_konum >= 260 && Cam_servo_konum <= 550)
{
servo.setPosition(Cam_servo_konum, Hiz);
Cam_servo_konum_once = Cam_servo_konum;
}
}else
{
Cam_servo_Okunan_konum = readStatusPos(servo);
}
}

return Cam_servo_Okunan_konum;
}

//----- Cam Servo end -----

//----- Cikis Servo begin -----

```

EK-2. (devam) Namlu mekanizması deney düzeneği yazılım kodları

```

/*
*Konum_git: geigilecek cikis servo motor konumu
*/
void Cikis_Servo(int Konum_git, int Hiz)
{
//Hiz = 10;
if(Konum_git != Cikis_Servo_Son_Konum)
{
Cikis_Servo_fun(Konum_git,Hiz);
}
}
/*Cikis servo motor kontrol function.
* Konum_git: 60-235 arasında olmalı acı ama değil
* Hiz: 5 en hızlısı, 15 ideal, 40 yavas
*/
int Cikis_Servo_fun(int Konum_git, int Hiz) // konuma 60-235 olmalı//ideal hiz 15
{
if(millis() - cikis_Servo_Tick_ms > Hiz)
{
cikis_Servo_Tick_ms = millis();

if(Konum_git >= 60 && Konum_git <= 235)
{
if(Cikis_Servo_Son_Konum > Konum_git)
Cikis_Servo_Son_Konum--;
else
Cikis_Servo_Son_Konum++;
analogWrite(Cikis_Servo_Pin, Cikis_Servo_Son_Konum);
}
}
return Cikis_Servo_Son_Konum;
}

```

EK-3. Optimizasyon yapılmamış BNİL numunesi çekme verileri;

TestID:20221017162409159

Batch No.:1 Sample Numb:3 Test Date:2022-10-17 Tester:

Material: Form: Temperature: Coef.: Type:plate Lc(mm): Size:1.85*40 So(mm²):74.000

Lo(mm):

Le:50

Fm(kN):20.87 Rm(MPa):282.03 FeH(kN):12.54 ReH(MPa):169.46 FeL(kN):12.54

ReL(MPa):169.46 Fp0.2(kN):12.54 Rp0.2(MPa):169.46 Fp0.5(kN):0.00

Rp0.5(MPa):0.00

Ft0.5(kN):0.00 Rt0.5(MPa):0.00 E(MPa):0.000000 Ae(%):0.00

Ag(%):0.00

Agt(%):0.00

At(%):-0.002000 Rm/ReL:1.664287 ReL/Rm:0.600858

:0.000000

:7.187000

TurnX:2.475000

:0.005000

MaxXX:-0.000000

TurnXX:0.000000

:0.000000

:6.768000

:-0.001000

Tablo 3.1. Data Curve

Force	Ext.	Time	Disp.	Stress	strain
0,01	0,005	0,1	0,00020833	0,17	0,000208333
0,01	0,005	0,1	0,00020833	0,17	0,000208333
0,01	0,005	0,1	0,00020833	0,17	0,000208333
0,01	0,005	0,1	0,00020833	0,17	0,000208333
0,06	0,01	0,16	0,00041667	0,84	0,000416667
0,08	0,015	0,21	0,00062500	1,12	0,000625
0,09	0,03	0,4	0,00125000	1,21	0,00125
0,09	0,035	0,45	0,00145833	1,25	0,001458333
0,1	0,04	0,51	0,00166667	1,3	0,001666667
0,1	0,043	0,56	0,00179167	1,37	0,001791667
0,11	0,048	0,62	0,00200000	1,44	0,002
0,11	0,053	0,67	0,00220833	1,49	0,002208333
0,12	0,058	0,73	0,00241667	1,56	0,002416667
0,12	0,06	0,78	0,00250000	1,6	0,0025
0,12	0,06	0,78	0,00250000	1,6	0,0025
0,12	0,066	0,84	0,00275000	1,67	0,00275
0,13	0,071	0,89	0,00295833	1,73	0,002958333
0,13	0,076	0,95	0,00316667	1,82	0,003166667
0,14	0,078	1	0,00325000	1,9	0,00325
0,15	0,083	1,06	0,00345833	2	0,003458333
0,16	0,088	1,11	0,00366667	2,12	0,003666667
0,17	0,093	1,17	0,00387500	2,28	0,003875
0,18	0,099	1,23	0,00412500	2,43	0,004125
0,19	0,104	1,28	0,00433333	2,51	0,004333333
0,19	0,104	1,28	0,00433333	2,51	0,004333333
0,19	0,106	1,34	0,00441667	2,62	0,004416667
0,2	0,111	1,39	0,00462500	2,69	0,004625
0,21	0,116	1,45	0,00483333	2,79	0,004833333
0,21	0,121	1,5	0,00504167	2,87	0,005041667
0,23	0,126	1,56	0,00525000	3,05	0,00525
0,24	0,129	1,61	0,00537500	3,25	0,005375
0,26	0,134	1,67	0,00558333	3,54	0,005583333
0,29	0,139	1,73	0,00579167	3,86	0,005791667
0,31	0,144	1,78	0,00600000	4,17	0,006
0,31	0,144	1,78	0,00600000	4,17	0,006
0,34	0,149	1,84	0,00620833	4,54	0,006208333
0,36	0,152	1,89	0,00633333	4,83	0,006333333
0,38	0,157	1,95	0,00654167	5,18	0,006541667
0,41	0,162	2	0,00675000	5,48	0,00675
0,43	0,167	2,06	0,00695833	5,83	0,006958333
0,46	0,172	2,12	0,00716667	6,2	0,007166667
0,48	0,175	2,17	0,00729167	6,49	0,007291667
0,51	0,18	2,23	0,00750000	6,84	0,0075
0,53	0,185	2,28	0,00770833	7,13	0,007708333
0,53	0,185	2,28	0,00770833	7,13	0,007708333
0,56	0,19	2,34	0,00791667	7,5	0,007916667
0,58	0,195	2,39	0,00812500	7,8	0,008125
0,6	0,2	2,45	0,00833333	8,15	0,008333333
0,62	0,203	2,5	0,00845833	8,44	0,008458333
0,62	0,203	2,5	0,00845833	8,44	0,008458333
0,65	0,208	2,56	0,00866667	8,78	0,008666667
0,67	0,213	2,61	0,00887500	9,07	0,008875
0,72	0,223	2,73	0,00929167	9,78	0,009291667
0,72	0,223	2,73	0,00929167	9,78	0,009291667

Tablo 3.1. (devam) Data Curve

0,75	0,228	2,79	0,00950000	10,16	0,0095
0,77	0,231	2,84	0,00962500	10,45	0,009625
0,8	0,236	2,9	0,00983333	10,8	0,009833333
0,82	0,241	2,95	0,01004167	11,11	0,010041667
0,85	0,246	3,01	0,01025000	11,46	0,01025
0,87	0,248	3,06	0,01033333	11,77	0,010333333
0,9	0,253	3,12	0,01054167	12,18	0,010541667
0,93	0,258	3,17	0,01075000	12,52	0,01075
0,96	0,264	3,23	0,01100000	12,92	0,011
0,96	0,264	3,23	0,01100000	12,92	0,011
0,98	0,266	3,28	0,01108333	13,3	0,011083333
1,02	0,271	3,34	0,01129167	13,79	0,011291667
1,05	0,276	3,39	0,01150000	14,2	0,0115
1,09	0,281	3,45	0,01170833	14,7	0,011708333
1,12	0,286	3,5	0,01191667	15,12	0,011916667
1,15	0,291	3,56	0,01212500	15,6	0,012125
1,19	0,294	3,62	0,01225000	16,12	0,01225
1,23	0,299	3,67	0,01245833	16,57	0,012458333
1,27	0,304	3,73	0,01266667	17,12	0,012666667
1,27	0,304	3,73	0,01266667	17,12	0,012666667
1,27	0,304	3,73	0,01266667	17,12	0,012666667
1,78	0,365	4,46	0,01520833	24,02	0,015208333
1,82	0,37	4,52	0,01541667	24,63	0,015416667
1,86	0,373	4,57	0,01554167	25,11	0,015541667
1,86	0,373	4,57	0,01554167	25,11	0,015541667
1,86	0,373	4,57	0,01554167	25,11	0,015541667
1,9	0,378	4,63	0,01575000	25,68	0,01575
1,94	0,383	4,68	0,01595833	26,16	0,015958333
2,02	0,393	4,8	0,01637500	27,32	0,016375
2,06	0,398	4,86	0,01658333	27,85	0,016583333
2,1	0,401	4,91	0,01670833	28,33	0,016708333
2,14	0,406	4,97	0,01691667	28,86	0,016916667
2,17	0,411	5,02	0,01712500	29,31	0,017125
2,21	0,416	5,08	0,01733333	29,81	0,017333333
2,24	0,418	5,13	0,01741667	30,23	0,017416667
2,24	0,418	5,13	0,01741667	30,23	0,017416667
2,27	0,423	5,19	0,01762500	30,69	0,017625
2,3	0,429	5,24	0,01787500	31,07	0,017875
2,33	0,434	5,3	0,01808333	31,52	0,018083333
2,36	0,439	5,35	0,01829167	31,88	0,018291667
2,39	0,444	5,41	0,01850000	32,28	0,0185
2,42	0,449	5,47	0,01870833	32,77	0,018708333
2,46	0,451	5,52	0,01879167	33,21	0,018791667

EK-4. Çentik faktörüne göre optimizasyon yapılmış BNİL çekme testi verileri;

TestID:20221017162409159

Batch No.:2 Sample Numb.:3

Test Date:2022-10-17

Coef.:

Type:plate Lc(mm):

Size:32.745*2 So(mm²):65.490

Lo(mm):

Le:50

Size_After:

Su(mm²):0.000

Lu(mm):

Z(%):100.000000 A(%):0

Fm(kN):12.46 Rm(MPa):190.26 FeH(kN):7.39 ReH(MPa):112.84 FeL(kN):7.39

ReL(MPa):112.84 Fp0.2(kN):7.39 Rp0.2(MPa):112.84 Fp0.5(kN):0.00

Rp0.5(MPa):0.00

Ft0.5(kN):0.00

Rt0.5(MPa):0.00 E(MPa):0.000000 Ae(%):-0.00

Ag(%):0.00

Agt(%):0.00 At(%):0.002000 Rm/ReL:1.686104 ReL/Rm:0.593083

:0.000000

:5.422000

TurnX:1.680000

:0.005000

MaxXX:0.001000 TurnXX:0.001000

:0.000000

:4.351000

:0.001000

Tablo 4.1. Data curve

Force	Ext.		Disp.	Time	Stress	Strain
	0	0	0,005	0,1	0,01	0,000208
	0	0	0,005	0,1	0,01	0,000208
	0	0	0,005	0,1	0,01	0,000208
0,07	0	0	0,01	0,16	1,07	0,000417
0,07	0	0	0,01	0,16	1,07	0,000417
0,17	0	0	0,015	0,21	2,56	0,000625
0,41	0	0	0,025	0,35	3,32	0,001042
0,52	0	0	0,035	0,45	3,89	0,001458
0,52	0	0	0,035	0,45	3,89	0,001458
0,56	0	0	0,038	0,5	4,48	0,001583
0,6	0	0	0,043	0,56	6,11	0,001792
0,6	0	0	0,043	0,56	6,11	0,001792
0,69	0	0	0,055	0,69	6,49	0,002292
0,72	0	0	0,058	0,74	7,96	0,002417
0,75	0	0	0,063	0,79	7,42	0,002625
0,78	0	0	0,068	0,85	7,94	0,002833
0,81	0	0	0,073	0,91	8,42	0,003042
0,84	0	0	0,076	0,96	8,83	0,003167
0,87	0	0	0,081	1,02	9,3	0,003375
0,9	0	0	0,086	1,07	9,69	0,003583
0,93	0	0	0,091	1,13	10,15	0,003792
0,93	0	0	0,091	1,13	10,15	0,003792
0,95	0	0	0,093	1,18	10,52	0,003875
0,98	0	0	0,099	1,24	10,95	0,004125
1,01	0	0	0,104	1,3	11,35	0,004333
1,03	0	0	0,109	1,35	11,66	0,004542
1,03	0	0	0,109	1,35	11,66	0,004542
1,05	0	0	0,114	1,41	11,98	0,00475
1,06	0	0	0,119	1,46	12,26	0,004958
1,11	0	0	0,126	1,58	12,9	0,00525
1,11	0	0	0,126	1,58	13,0	0,00525
1,12	0	0	0,132	1,63	13,16	0,0055
1,14	0	0	0,137	1,69	14,47	0,005708
1,16	0	0	0,142	1,75	14,76	0,005917
1,18	0	0	0,147	1,8	15,04	0,006125
1,2	0	0	0,149	1,86	15,33	0,006208
1,22	0	0	0,154	1,91	15,57	0,006417
1,24	0	0	0,159	1,97	15,9	0,006625
1,26	0	0	0,165	2,03	16,18	0,006875
1,27	0	0	0,17	2,08	16,43	0,007083
1,27	0	0	0,17	2,08	16,43	0,007083
1,29	0	0	0,175	2,14	17,00	0,007292
1,31	0	0	0,177	2,19	17	0,007375
1,33	0	0	0,182	2,25	18,00	0,007583
1,35	0	0	0,187	2,31	18,00	0,007792
1,36	0	0	0,192	2,36	19,00	0,008
1,38	0	0	0,198	2,42	20,00	0,00825
1,4	0	0	0,203	2,48	20,4	0,008458
1,42	0	0	0,205	2,53	21,67	0,008542

EK-5. Topoloji optimizasyonu yapılmış BNİL numuneleri çekme verileri

TestID:20221017162409159

Batch No.:3 Sample Numb.:3 Test Date:2022-10-17 Tester:

Material: Form: Temperature: Coef.: Type:plate

Lc(mm): Size:32.745*2 So(mm²):65.490

Lo(mm):

Le:50

Fm(kN):18.09 Rm(MPa):276.23 FeH(kN):9.24 ReH(MPa):141.09 FeL(kN):9.24

ReL(MPa):141.09 Fp0.2(kN):9.24 Rp0.2(MPa):141.09 Fp0.5(kN):0.00

Rp0.5(MPa):0.00

Ft0.5(kN):0.00

Rt0.5(MPa):0.00 E(MPa):0.000000 Ae(%):0.00 Ag(%):0.00

Agt(%):0.00 At(%):0.000000 Rm/ReL:1.957828 ReL/Rm:0.510770

:0.000000

:5.331000

TurnX:1.406000

:0.005000

MaxXX:-0.000000

TurnXX:-0.000000

:0.000000

:5.263000

:-0.000000

Tablo 5.1. Data curve

Force		Disp.	Time	Stress / strain
0	0	0,005	0,10	0,03 0,000208333
0	0	0,005	0,10	0,03 0,000208333
0,02	0	0,01	0,16	0,3 0,000416667
0,02	0	0,01	0,16	0,3 0,000416667
0,02	0	0,01	0,16	0,3 0,000416667
0,04	0	0,015	0,22	0,54 0,000625
0,06	0	0,025	0,35	0,93 0,001041667
0,08	0	0,035	0,45	1,2 0,001458333
0,09	0	0,038	0,50	1,31 0,001583333
0,1	0	0,043	0,56	1,47 0,001791667
0,1	0	0,048	0,61	1,6 0,002
0,11	0	0,053	0,67	1,74 0,002208333
0,12	0	0,058	0,73	1,86 0,002416667
0,13	0	0,06	0,78	1,96 0,0025
0,13	0	0,06	0,78	1,96 0,0025
0,14	0	0,066	0,84	2,12 0,00275
0,15	0	0,071	0,89	2,24 0,002958333
0,16	0	0,076	0,95	2,41 0,003166667
0,17	0	0,081	1,01	2,58 0,003375
0,18	0	0,086	1,06	2,78 0,003583333
0,2	0	0,088	1,12	3,06 0,003666667
0,22	0	0,093	1,17	3,33 0,003875
0,24	0	0,099	1,23	3,69 0,004125
0,26	0	0,104	1,28	3,9 0,004333333
0,26	0	0,104	1,28	4 0,004333333
0,29	0	0,109	1,34	4,43 0,004541667
0,31	0	0,111	1,39	4,78 0,004625
0,34	0	0,116	1,45	5,2 0,004833333
0,37	0	0,121	1,51	5,6 0,005041667
0,39	0	0,126	1,56	5,97 0,00525
0,42	0	0,132	1,62	6,43 0,0055
0,45	0	0,134	1,67	6,82 0,005583333
0,48	0	0,139	1,73	7,26 0,005791667
0,48	0	0,139	1,73	7,26 0,005791667
0,5	0	0,144	1,79	7,7 0,006
0,53	0	0,149	1,84	8,05 0,006208333
0,56	0	0,154	1,90	8,48 0,006416667
0,56	0	0,154	1,90	8,48 0,006416667
0,58	0	0,157	1,95	8,84 0,006541667
0,61	0	0,162	2,01	9,24 0,00675
0,66	0	0,172	2,13	10,14 0,007166667
0,69	0	0,177	2,18	10,53 0,007375
0,69	0	0,177	2,18	10,53 0,007375
0,72	0	0,182	2,24	11,04 0,007583333
0,75	0	0,185	2,29	11,44 0,007708333
0,78	0	0,190	2,35	11,92 0,007916667

Tablo 5.1. (devam) Data curve

0,81	0	0,195	2,40	12,34 0,008125
0,84	0	0,200	2,46	12,81 0,008333333
0,87	0	0,205	2,52	13,35 0,008541667
0,90	0	0,210	2,57	13,79 0,00875
0,94	0	0,213	2,63	14,3 0,008875
0,94	0	0,213	2,63	14,3 0,008875
0,97	0	0,218	2,68	14,74 0,009083333
1,00	0	0,223	2,74	15,28 0,009291667
1,04	0	0,228	2,80	15,83 0,0095
1,07	0	0,233	2,85	16,3 0,009708333
1,10	0	0,238	2,91	16,85 0,009916667
1,10	0	0,238	2,91	16,85 0,009916667
1,13	0	0,241	2,96	17,33 0,010041667
1,13	0	0,241	2,96	17,33 0,010041667
1,17	0	0,246	3,02	17,94 0,01025
1,26	0	0,256	3,14	19,16 0,010666667
1,29	0	0,261	3,20	19,73 0,010875
1,32	0	0,266	3,25	20,2 0,011083333
1,36	0	0,271	3,31	20,73 0,011291667
1,39	0	0,274	3,36	21,19 0,011416667
1,42	0	0,279	3,42	21,73 0,011625
1,46	0	0,284	3,48	22,23 0,011833333
1,48	0	0,289	3,53	22,67 0,012041667
1,48	0	0,289	3,53	22,67 0,012041667
1,52	0	0,294	3,59	23,18 0,01225
1,55	0	0,297	3,64	23,6 0,012375
1,58	0	0,302	3,70	24,06 0,012583333
1,60	0	0,307	3,76	24,48 0,012791667
1,63	0	0,312	3,81	24,84 0,013
1,65	0	0,317	3,87	25,26 0,013208333
1,65	0	0,317	3,87	25,26 0,013208333
1,65	0	0,317	3,87	25,26 0,013208333
1,68	0	0,319	3,92	25,61 0,013291667
1,70	0	0,324	3,98	25,98 0,0135
1,75	0	0,335	4,10	26,79 0,013958333
1,78	0	0,340	4,16	27,2 0,014166667
1,80	0	0,345	4,21	27,5 0,014375
1,83	0	0,350	4,27	27,91 0,014583333
1,85	0	0,355	4,33	28,29 0,014791667



Gazili olmak ayrıcalıktır