



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



GELENEKSEL VE IZGARA YÜZEY
UYGULANMIŞ NAMLUNUN MODAL
ANALİZ KARŞILAŞTIRMASI VE
PERFORMANS ANALİZİ

Recep Safa DURAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Recep Safa DURAN tarafından hazırlanan “Geleneksel ve Izgara Yüzey Uygulanmış Namlunun Modal Analiz Karşılaştırması ve Performans Analizi” adlı tez çalışması 23/01/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Üye (Danışman)

Doç. Dr. Mustafa TINKIR

.....

Üye

Doç. Dr. Ümit Önen

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Erdi GÜLBAHÇE

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../20... gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Şerife Yurdagül KUMCU
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Recep Safa DURAN

Tarih: 23/01/2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GELENEKSEL VE IZGARA YÜZEY UYGULANMIŞ NAMLUNUN MODAL ANALİZ KARŞILAŞTIRMASI VE PERFORMANS ANALİZİ

Recep Safa DURAN

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Mustafa TINKIR

2023, 58 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Mustafa TINKIR

Doç. Dr. Ümit Önen

Dr. Öğr. Üyesi Erdi GÜLBAHÇE

Barutun keşfi ile birlikte başlayan ateşli silahlar serüveni, günümüzde teknolojik gelişimini son hızla devam ettirmektedir. Ateşli silahlarda hassasiyet ve verimlilik çalışmaları önemine istinaden mermi çekirdeğine kinetik enerji kazandırılan namlu bölümü ile ilgili detaylı çalışmalar yapılmaktadır. Namlu bölümünde patlama enerjisinden kaynaklı olarak titreşim meydana gelmektedir. Bu titreşim hedef üzerinde atış hassasiyetini ve doğruluğunu bozmaktadır. Bu çalışmada 763 gr ağırlığa sahip geleneksel bir AR-15 otomatik tüfeğinin namlusu kullanılarak, nTopology programı ile ızgara (isogrid) yüzey uygulanarak topolojik optimizasyon sonucu namlu 699 gr. ağırlığa ulaşmıştır. Her iki namlu için Ansys programında modal analiz gerçekleştirilmiştir. Mod frekanslarının artışı hedeflenerek yapısal rijitliğin artırılması amaçlanmıştır. Aynı zamanda ANSYS Workbench LS-Dyna programı ile yapısal dayanım kontrolü yapılarak ızgara yüzey uygulanmış namlunun doğrulaması yapılmıştır. Modal analiz sonucunda ilk on bir mod için yalnızca beşinci, altıncı ve sekizinci modda modal frekans düşüşü olduğu görülmüş ve diğer modlar için farklı yüzdelerde artış gerçekleştiği görülmüştür. Geleneksel namluda iç balistik basınç-zaman grafiğine göre en yüksek basıncın olduğu zaman adımıyla Workbench LS-Dyna programında yapılan yapısal analizde 856,91 MPa gerilme olduğu görülmüştür. Izgara yüzey uygulanmış namluda ise 811,38 MPa gerilme görülerek yüzde 5,31 oranında gerilme düşüşü sağlanmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda ızgara yüzey uygulanmış namlunun hedef hassasiyeti ve doğruluğunun artış gösterdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Izgara Yüzey, Modal Analiz, Namlu Harmoniği, Sonlu Elemanlar Metodu, nTopology, WB LS-Dyna

ABSTRACT

MS THESIS

MODAL ANALYSIS COMPARISON AND PERFORMANCE ANALYSIS OF CONVENTIONAL AND ISOGRID SURFACE BARREL

Recep Safa DURAN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE / DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Doç. Dr. Mustafa TINKİR

2023, 58 Pages

**Jury
Assoc. Prof. Mustafa TINKİR
Assoc. Prof. Ümit Önen
Asst. Prof. Erdi GÜLBAHÇE**

The firearms adventure, which started with the discovery of gunpowder, continues its technological development at full speed today. Considering the importance of precision and efficiency studies in firearms, detailed studies are carried out on the barrel section where kinetic energy is added to the bullet core. Vibration occurs in the barrel section due to explosion energy. This vibration impairs shooting sensitivity and accuracy on the target. In this study, by using the barrel of a conventional AR-15 automatic rifle with a weight of 763 g, by applying a grid (isogrid) surface with the nTopology program, as a result of topological optimization, the barrel was 699 g. reached weight. Modal analysis was performed in the Ansys program for both barrels. It is aimed to increase structural rigidity by increasing the mode frequencies. At the same time, the barrel with a grid surface was verified by checking the structural strength with the ANSYS Workbench LS-Dyna program. As a result of the modal analysis, it was seen that there was a decrease in modal frequency only in the fifth, sixth and eighth modes for the first eleven modes, and an increase in different percentages was observed for the other modes. According to the internal ballistic pressure-time graph in the conventional barrel, it was seen that there was a stress of 856.91 MPa in the structural analysis performed in the Workbench LS-Dyna program at the time step with the highest pressure. In the barrel with a gridded surface, a stress of 811.38 MPa was observed, resulting in a stress reduction of 5.31 percent. In line with these results, it was observed that the target sensitivity and accuracy of the barrel with a grid surface applied increased.

Keywords: Isogrid Surface, Modal Analysis, Barrel Harmonics, Finite Element Method, nTopology, WB LS-Dyna

ÖNSÖZ

Lisans, Yüksek Lisans ve tez sürecinde, her koşulda samimi ve içten bir şekilde değerli yönlendirmeleri, deneyimi ve desteği ile rehberlik eden Doç. Dr. Mustafa TINKIR hocama, emeği geçen tüm hocalarıma, Numesys firmasına desteklerinden dolayı teşekkürü ve saygılarımı sunarım. Bu tezin araştırma sürecinde tavsiyeleri ile yardımcı olan Prof. Dr. Süleyman Neşeli hocama teşekkürlerimi ifade etmek isterim. Onların destek ve yönlendirmeleri araştırmamın verimli bir şekilde ilerlemesine katkı sağlamıştır. Bu tez çalışmasında edindiğim bilgiler ve yaşadığım deneyimler, kariyerimde bir dönüm noktası olmuştur. Ayrıca, destekleri ile moral ve motivasyon kaynağı olan aileme, arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Recep Safa DURAN
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Ateşli Silahların Tarihçesi ve Teknolojik Gelişimi.....	1
1.2. Örnek Bir Otomatik Tüfeğin Bölümleri.....	4
1.3. Otomatik Tüfeklerde Namlu ve Namlu Çeşitleri	5
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	8
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	12
3.1. AR-15 Namlu CAD Modeli	12
3.2. İç Balistik ve Namlu İç Balistik Dataları	13
3.3. Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE)	20
3.4. Sonlu Elemanlar Metodu.....	20
3.4.1. Sonlu Elemanlar Analizi İş Akış Şeması	24
3.5. Modal Analiz.....	27
3.6. Namlu Harmoniği ve Namlu Dalgalanması	32
3.7. Izgara&Isogrid Yüzey	35
3.8. nTopology Programı	38
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	40
4.1. Geleneksel Namlu Modal Analiz Sonuçları.....	40
4.2. Izgara Yüzey Namlun Modal Analiz Sonuçları	43
4.3. Geleneksel Namlu ve Izgara (Isogrid) Namlunun Mod Şekillerinin Karşılaştırılması	47
4.4. Geleneksel Namlu ve Izgara (Isogrid) Namlunun Mod Frekanslarının Karşılaştırılması	49
4.5. Kritik Patlama Basıncı Altında Geleneksel ve Izgara Yüzey Namlunun Yapısal Dayanımının Karşılaştırılması	52
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	54
5.1. Sonuçlar.....	54
5.2. Öneriler	55
6. KAYNAKLAR	56

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

η	Ortalama Basınç ve Maksimum Basınç Oranı
P_{avg}	Namlu İçi Ortalama Basınç
P_m	Namlu İçi Maksimum Basınç
S_m	Gaz Basıncının En Yüksek Anında Mermi Mesafesi
t_m	Çekirdeğin Namlu İçinde Geçirdiği Zaman
L	Namlu Uzunluğu
$\Sigma(\eta)$	Heydenreich İç Balistik Katsayısı
$\Theta(\eta)$	Heydenreich İç Balistik Katsayısı
$\Phi(\eta)$	Heydenreich İç Balistik Katsayısı
$\Pi(\eta)$	Heydenreich İç Balistik Katsayısı
$T(\eta)$	Heydenreich İç Balistik Katsayısı
t_0	Namlu İçi Çekirdek Hareket Zamanı
P_0	Namlu Ağız Gaz Basıncı
λ	Herhangi Bir Anda Merminin Konumu
K	Genel Rijitlik Matrisi
C	Sönüm Matrisi
M	Kütle Matrisi
σ_x	X Ekseninde Gerilme (MPa)
σ_y	Y Ekseninde Gerilme (MPa)
τ_{xy}	XY Düzlemin Kayma Gerilimi
$\psi(\lambda)$	Konumuna Bağlı Vallier-Heydenreich Deneysel Katsayısı
$\phi(\lambda)$	Konumuna Bağlı Vallier-Heydenreich Deneysel Katsayısı
$\delta(\lambda)$	Konumuna Bağlı Vallier-Heydenreich Deneysel Katsayısı
V	Hız (m/sn)
V	Hacim (mm ³)
m_p	Kütle (kg)
D	Namlu İç Çapı (mm)
u	Deplasman
F	Dış Kuvvetler
b	Kiriş Kalınlığı
h	İsogrid Üçgen Yüksekliği
a	Düğüm Noktalarının Uzaklığı
e_i	İ'nci Gerinim
P_i	İ'nci Yük (MPa)
E	Elastikiyet Modülü (MPa)

Kısaltmalar

3D	Üç Boyut
BDM	Bilgisayar Destekli Mühendislik
CAE	Computer Aided Enginnering
CAD	Computer Aided Desing
FEM	Finite Element Method
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
NATO	The North Atlantic Treaty Organization
ROT	Rotasyon Ekseni
gr	Gram
sn	Saniye
ms	Milisaniye

1. GİRİŞ

1.1. Ateşli Silahların Tarihçesi ve Teknolojik Gelişimi

Yanma ve patlama özelliğine sahip olan barutun keşfi ateşli silahların gelişimine öncülük etmiştir. Barut ilk olarak askeri maksatla kullanılmasa dahi sonrasında yanma ve patlama özellikleri sebebiyle savaşlarda kullanılmaya, aynı zamanda ateşli silahların oluşmasına neden olmuştur. Barutun yanması sonucu ortaya çıkan enerjinin bir mermi veya benzeri bir cisme kinetik enerji kazandırarak hedefe ulaştıran silahların genel adına ateşli silahlar denir (Black & Özkan, 2009).

Ateşli silahlar ile ilgili en eski belgeler Çin kaynaklarına dayanmaktadır. Arkeologların Mançurya'n bölgesinde yapılan kazı çalışmaları esnasında 1200 yıllarından kalma bir silahlar keşfetmişlerdir. Bir tarihçi ise Sichuan'da 1100'lerden kalma ateşli silahlı bir figür tespit etmiştir. 1300 yıllarında önce Avrupa'da ateşli silahlara dair güçlü bir kanıt yoktur. Ateşli silahlar ile ilgili tespit edilen diğer bulgularında Çin kökenli olduğu ifade edilmiştir. Geçmiş dönemlerde ateşli silahlar ile ilgili yapılan tartışmalar yerini günümüzde ateşli silahların Çin kökenli olduğu kabul edilmektedir (Chase & Chase, 2003).

1300lü yılların ilk yarısından itibaren ateşli silahlar Avrupalılar, Araplar, Türkler, İranlılar, Hintliler, Koreliler, Japonlar ve Portekizliler başta olmak üzere dünyada yaygınlaşmaya başlamıştır.

Ateşli silahların askerler tarafında portatif olarak kullanılması ilk olarak İspanya bölgesinde gerçekleştirmiştir. Arkebüz olarak isimlendirilen bu tüfekler namludan doldurma, metal bilye mermiler atılan özelliklere sahiptir (B. S. Hall, 1997).

On ikinci yüzyılda başlayan top teknolojisi özellikle on beşinci ve on altıncı yüzyıllarında oldukça etkili olarak kullanılmıştır. İstanbul'un Fethinde kullanılan toplar ve sahip olduğu özellikler, döneminde gösterdiği etkileri örnek olarak verilebilmektedir (Kurt, 2018).

On altıncı yüzyılın ortalarında ateşli silahlarda önemli bir gelişme ise ateşleme sisteminin silahlar ile kullanılmaya başlanması ile olmuştur. İlk olarak fitilli mekanizma(matchlock) ortaya çıkmıştır (Şekil 1). Önceden ateşlenen fitil barut haznesine serpantin (S şekline benzer bir parça) yaklaştırılması ile patlamanın mermiyi hedefe gönderilmek istendiği anda gerçekleştirilmesi sağlanmıştır (Willbanks, 2004).



Şekil 1. Fital ile Ateşlemeli Örnek Bir Ateşli Silah 16. yy

On altıncı yüzyılda zemberekli mekanik ateşleme (wheellock) icat edilmiştir (Şekil 2). Zemberekli mekanizma ateşleyici(horoz) parçaya sıkıştırılarak, tetik çekildiğinde çakmak taşından çıkan kıvılcımlar ile barutun ateşlenmesi sağlanmıştır (Westwood, 2005).



Şekil 2. Mekanik Ateşlemeye Sahip Örnek Bir Tüfek

1644 yılına ait bir Çin Askeri El Kitabında diğer devletler ile ateşli silahların karşılaştırılması yapılmıştır. Ateşli silahların 1650'li yıllara kadar gelişimini ifade eden eserde fazla menzil ve güç konusunda Osmanlı tüfeğini ilk sırada değerlendirerek Avrupa tüfeklerini ikinci sırada değerlendirmiştir (Chase & Chase, 2003).

On dokuzuncu yüzyılda ateşli silahlar için önemli gelişmelerin yaşandığı bir dönemdir. Bu dönemde ateşli silah teknolojisinde birçok alanda ilerlemeler yaşanmış ve savaş stratejilerini önemli ölçüde değiştirmiştir. 19. yy. başlarında tek atışlı tabancalar ve tüfekler yaygın olarak kullanılmaktaydı. 19. yy ortalarında tekrarlı atışa imkan veren yarı otomatik ve otomatik sistemler geliştirilmeye başlanmıştır (Keegan, 2011).

Günümüzün önemli silah üreticilerinden Colt şirketinin kurulması ile birlikte yenilikçi tabanca ve tetik tasarımlarının çalışmaları hız kazanmıştır. Aynı zamanda

yenilikçi mermi tasarımları çalışmaları da on dokuzuncu yüzyıl ortalarında hız kazanmıştır (Smith & Smith, 1973). On dokuzuncu yüzyıl sonlarında dumansız barutun geliştirilmesi ile silah teknolojilerinin ilerlemesine fırsat sunmuştur. Maxim, Browning ve Gatling gibi makinalı tüfeklerin geliştirilmesi ile ateşli silahlar alanında evrim niteliğinde ilerlemeler sağlanmıştır (Smithurst, 2015)(Britannica, 1993).



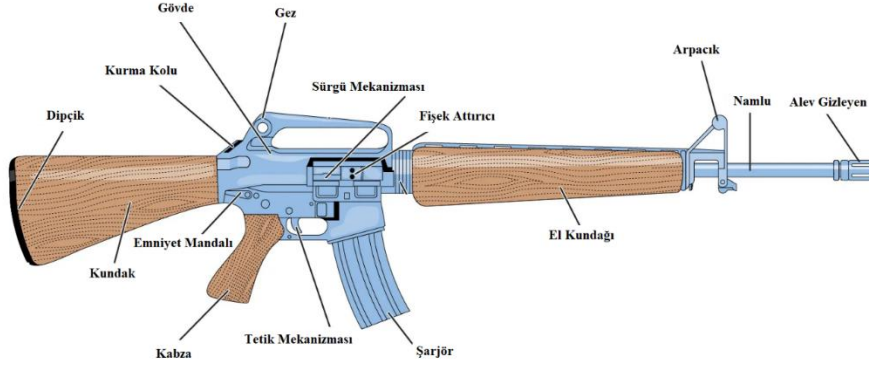
Şekil 3. Gatling Makinalı Tüfeği (Sol) ve Maxim Makinalı Tüfeği (Sağ)

Yirminci yüzyıl ve günümüze kadar gelen süreçte silah teknolojileri gelişim ivmesini büyük ölçüde artırarak devam etmiştir. Yaşanılan dünya savaşları silah teknolojisi çalışmalarının önemini ve gerekliliğini birçok kez göstermiştir. Son yüzyıl içerisinde çok çeşitli amaçlarla kullanılan tabanca, tüfek, top ve benzeri sistemlerin, bilgisayar ve yazılım sistemlerinin gelişmesi ile birlikte araştırma ve geliştirme çalışmaları artmıştır. Akıllı mühimmatlar, lazer sistemleri, füze sistemleri bu gelişimlere örnek verilebilir.

Günümüz koşullarında teknolojik gelişmeler ile silah sistemlerinde literatür çalışmaları artış göstermektedir. Ateşli silahların optimizasyonu ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Günümüzde üretilen silahlar üzerinde yapılan çalışmalar, halen performans kriterlerinin geliştirilmesi veya iyileştirilmesinin mümkün olduğunu göstermektedir (Güngör, 2021). Bilgisayar destekli mühendislik metotlarının gelişmesi ile birlikte performans iyileştirmeleri ve iyileştirme öncesi mevcut durum tespitleri yapılabilmektedir.

1.2. Örnek Bir Otomatik Tüfeğin Bölümleri

Genel olarak otomatik tüfeklerde sistem tasarımlarının farklı olmasına rağmen çalışma prensibi ve görevleri benzerlik göstermektedir. Bu bölümler aşağıda maddeler halinde kısaca açıklanmıştır (Britannica, 1993).



Şekil 4. M16 Otomatik Tüfeğin Bölümleri (Brad, 2023)

- **Dipçik:** Tüfeğin omuz boşluğuna yaslanan kısmına denir. Destekleme amacıyla kullanılır metal, kauçuk ahşap gibi malzemelerden üretilebilir
- **Kundak:** Tüfeğin tutma ergonomisi sebebiyle özel olarak tasarlanmış bölümdür. İçerisinde icra borusu ve icra yayını bulundurabilir. Ayrıca farklı fonksiyonellikler eklenerek daha rahat bir kullanım için optimize edilebilir.
- **Kurma Kolu:** İlk ateşleme periyodunu başlatmak için şarjörden namluya mermi sürme görevini gerçekleştiren el ile kullanılan kısımdır.
- **Emniyet Mandalı:** Atış güvenliği için herhangi bir can güvenliği ve kazaya sebebiyet vermemek amaçlı tasarlanmış ateşlemeyi gerçekleştirmemek amacıyla kullanılan sistemdir.
- **Gövde:** Silahın ana gövdesi ve tetik mekanizması sürgü mekanizması gibi diğer önemli parçaların bir araya geldiği bölümdür. Namlu, ateşleme mekanizması ve şarjör genellikle çerçevenin içine monte edilir.
- **Kabza:** Tüfeğin el ile tutulduğu bölümdür.
- **Tetik Mekanizması:** Sürgü mekanizması içerisinde bulunan iğnenin serbest kalarak ateşleme görevini yerine getirmesini sağlayan parçadır.
- **Şarjör:** İçerisinde mermilerin düzenli sıra ile tutulduğu bölümdür. Şarjör yayı, gerdel ve tapayı barındırır.

- **Sürgü Mekanizması:** Her ateşlemeden sonra sistemi tekrar ateşlemeye hazırlayan bölümdür. Barut patlamasının ardından oluşan basıncın bir kısmı da bu mekanizmasının aksiyonu için harcanır.
- **Fişek Attırıcı:** Fişğin silah içerisinde taşınması ve boş kovanın dış ortama atılması için kullanılan parçadır.
- **Gez ve Arpacık:** Atış esnasında hedefe nişan almak için kullanılan genellikle silahların üst kısmında bulunan bölümdür.
- **El Kundağı:** tüfek Ağırlığının rahat taşınması ve ağırlığın dengelenmesi amacıyla kullanılan kısımdır.
- **Namlu:** Merminin ateşlendiği ve mermi çekirdeğinin kinetik enerji kazanarak dış ortama ulaştırıldığı bölümdür.
- **Alev Gizleyen:** Mermi çekirdeğinin namludan çıktığı esnada oluşan alevi gizlemek amaçlı kullanılan parçadır.

Yukarıda açıklanan tüfeğin bölümleri aynı zamanda optimizasyon ve geliştirme çalışmaları için çok fazla konu başlığı olduğunu ifade etmektedir. Tez konusunda da belirtildiği gibi namlu gelişimi konusunda bir araştırma gerçekleştirilmiştir.

1.3. Otomatik Tüfeklerde Namlu ve Namlu Çeşitleri

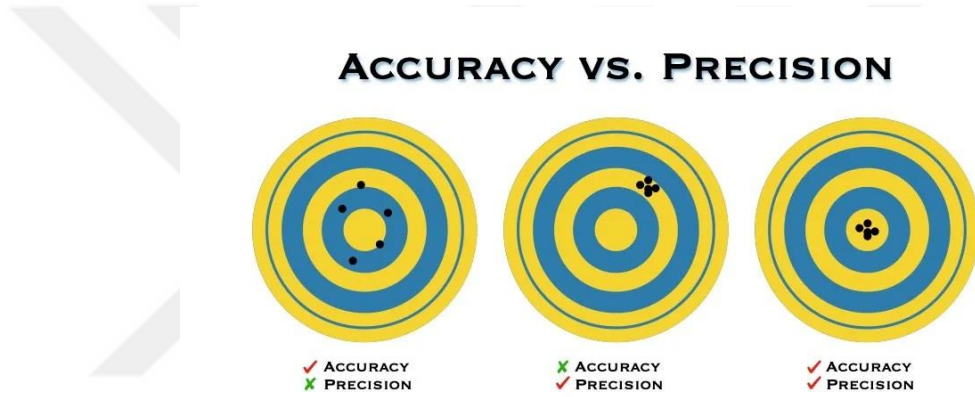
Ateşli silahların namlusu, silahın ateşlenen mermiyi yönlendiren ve hızlandıran, genellikle metal veya alaşım malzemelerin kullanıldığı silindirik geometriye sahip bir tasarımdır. Patlama enerjisiyle harekete zorlanan mermi çekirdeği hedefe doğru ivmelenmesini yine namlu boyunca gerçekleştirir. Bu görevi sürekli olarak gerçekleştirebilmek için belirli bir yapısal dayanım ve davranışta olması gerekmektedir. Bu koşullar altında namlunun görevini verimli bir şekilde gerçekleştirebilmesi için yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet değerlerine sahip kırılma olmayan ve yüksek basınç altında bozulmaya uğramayan malzeme türleri tercih edilmektedir.

Tabanca, otomatik silah, av tüfeği, top gibi farklı işlevsellikte namlu çeşitleri bulunmaktadır. Bu tez içeriğinde AR-15 model otomatik silah namlusu için çalışma yapılmıştır.



Şekil 5. Örnek Bir AR 15 Tüfeğinin Namlusu

Otomatik tüfeklerde namlular yapıldığı malzeme ve tasarımsal farklılıklar ile çeşitlere ayrılmaktadır. Bu çeşitliliğin nedeni doğruluk ve hassasiyet etkileridir. Tüfeğin kullanım alanına göre namlu seçimi yapılabilmektedir. Doğruluk nişan alınan noktaya isabetliliği ifade etmektedir. Hassasiyet ise atış yapılan mühimmatların hedefte birbirine yakınlığını ifade eder. Bu duruma grupman adı verilmektedir. Doğruluk (accuracy) ve hassasiyetin (precision) hedef üzerindeki etkisi Şekil 6’da ifade edilmiştir (Matt, 2021).



Şekil 6. Atış Yapılan Hedefte Doğruluk ve Hassasiyetin Şematik Gösterimi

Namluda yüksek mukavemet, yüksek ısı direnç ve esneklik gibi genel isterler doğrultusunda birçok malzeme çeşidi kullanılmaktadır. Bu malzemelerde 42CrMoS4, 50CrMo4, 4150 CroMoV ve 416R (1.4005) paslanmaz çelik en çok kullanılan malzeme türlerindedir. Namlunun kullanım koşuluna göre sertlik, esneme, işlenebilirlik vb. gibi ihtiyaçlarda tercih edilebilmektedir (Depot, 2019).

Otomatik tüfeklerde tasarımsal olarak çeşitlilik gösteren namlular ifade edilir ise normal namlular genel amaç ile kullanılan birçok operasyonel faaliyet için uygunluk gösteren namlu çeşididir. Kullanılan silah çeşidine göre boyu ve çapı olarak farklılık gösterebilmektedir. Ortalama olarak normal bir AR-15 tüfeğinin namlusu 770 gram ağırlığındadır (Cleckner, 2019).

Hafifletirilmiş namlular kullanıcının ergonomik durumlar için tercih edebileceği çeşitlerdir. Hafifletirilmiş namlularda esneklik artacağından dolayı tercih nedenleri

önem arz etmektedir. Ortalama olarak bir AR-15 tüfeğinin hafifletirilmiş namlusu 610 gram ağırlığındadır.

Boğa namlu olarak ifade edilen namlu çeşidi ise normal namlulardan daha kalın bir cidar kullanılarak üretilen namlu çeşididir. Genellikle kullanıcılar yapısal sertlik artışı sebebiyle azalan titreşimlerin doğruluğu ve hassasiyeti etkilemesinden kaynaklı bu tür namluları seçebilmektedir. Ancak ağırlık artışı, ısıl kapasite artışı namlu üzerinde kötü etkiler oluşturabilmektedir (Wu, 2005). Ortalama olarak bir AR-15 tüfeğinin boğa namlusu 1150 gram ağırlığındadır.

Farklı tasarımlar arasında en dikkat çeken namlu ise dış yüzeyi işlenmiş namlu çeşididir. Genellikle büyük çaplı mermilerde ve uzun mesafe atışlarında tercih edilebilmektedir. Bu namluların dış yüzeyi farklı desenler ile talaş kaldırarak işlenmektedir. İşlenmiş yüzeye sahip namlularda, kütle artırılmadan tasarımsal olarak sertlik sağlanabilmektedir. İşlenmiş yüzeye sahip namlular, özellikle yivli silahlarda titreşim etkisinin düzenini bozabilir. Bu nedenle balistik hesaplamaları iyi bir şekilde yapılmamış, işlenmiş yüzeye sahip namlular için atış kararlılığını bozabilir (Lewis, 2022).



Şekil 7. Farklı Tasarımlara Sahip AR-15 Namlu Çeşitleri (Hung, 2023)

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Gimm vd. merminin namlu içerisindeki hareketi nedeniyle namlu ucunun aşağı ve yukarı hareketi, atış isabetliliğini olumsuz yönde etkilediğini ifade etmiştir. Çalışmalarında şok titreşimlerinin davranışını deneysel olarak araştırılmışlardır. Şok etkisi sebebiyle namlu davranışında fiziksel yorum yapabilmek için şok tepki analizi gerçekleştirmişlerdir. Üç farklı konfigürasyonda deneysel modal sonuçları ve numerik sonuçları inceleyip karşılaştırmışlardır (Gimm et al., 2012)

Koç ve arkadaşları yaptığı çalışmalarında uçaksavar ve tank namlusunun atış hassasiyetini olumsuz etkileyen namlu sapmaları, coriolis etkisi ve merkezkaç kuvvetleri dikkate alarak Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) ile mermiye ait dönme merkezinden kayma ve açılma hız gibi parametrelerin namlu dinamiği üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Milimetrik kaymaların aşırı titreşime yol açtığını ve namlu isabetliliğini tehlikeye attığını tespit etmişlerdir (Koç et al., 2018).

Balla, gövdesi ile birlikte bir silah sisteminin sekiz serbestlik derecesi içeren modeli üzerinde namlu titreşimini incelemiştir. Kütleler, atalet momenti, sertlik, sönümlenme katsayıları, silah çalışma prensibi gibi dinamik koşulların atış anında nişan alma hataları ve olası değişiklikleri değerlendirmişlerdir. Nişan alma hatalarında ana etkenin gövde titreşimleri olduğunu ifade etmiştir (Balla, 2011).

Alexander, 2007; Ding et al., 2017, 155mm olarak geliştirilmiş silah sisteminin mermi ve namlu arasındaki etkileşimini modellemek için ABAQUS programında sonlu elemanlar metodu ile yapılan çalışmanın deneysel çalışma ile karşılaştırması yapılmıştır (Edward Alexander, 2012).

Esen ve Koç, uçaksavar sisteminin namlu ve mermi arasındaki etkileşiminin dinamik davranışını incelemişler, aynı zamanda namlu titreşimlerini azaltmaya yönelik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Pasif bir titreşim sönümleyici ile namlunun doğrusal olmayan davranışını belirleyen genetik algoritma ile sönümleyiciyi optimize eden bir yöntem üzerinde çalışmışlardır. Elde ettikleri sonuçların uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir (Esen & Koç, 2015).

Sava vd. 5,56mm otomatik silah için oluşturdukları test sistemi ile yüksek FPS kayıt yaparak özel bir yazılım ile atış esnasında oluşan titreşiminden dolayı meydana gelen sapma miktarı ile ilgili çalışma yapmışlardır. Aynı zamanda çalışmalarında eğilme titreşiminin farklı ağırlık çeşitlerinde sapma miktarı ile ilgili ilişkiyi incelemişlerdir (Sava et al., 2015).

Deng vd. yaptığı çalışmada 9mm yiv sete sahip bir tabanca için sonlu elemanlar metodu ile zamana bağlı bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında namlu basınç sınır şartı için Vallier-Heydenreich formülü kullanarak hesaplamışlardır. Deneysel veriler ile simülasyon verileri arasında güvenilir olduğunu gösteren hatanın yüzde 2,56 olarak hesaplamışlardır. Sonlu elemanlar analizlerinin namlu çalışmalarında önemli ölçüde zaman kazandırdığını söylemişlerdir. Çalışmalarında deplasman, hız, ivme, stres, temas, deformasyon gibi dataları incelemişlerdir. Geleneksel deneme yanılma yöntemlerinden farklı olarak bilgisayar destekli mühendislik (CAE) hesaplamaları, verimli bir şekilde sistem tasarlamaya ve geliştirmeye yardımcı olmaktadır. Günümüzde CAE birçok alanda kullanılmakta ve kabul görmektedir. Deng vd çalışmasında CAE ile deneysel yöntemlerin karşılaştırılmasında önemli bir araç olduğunu belirtmişlerdir (Deng et al., 2014).

Hall 2015 yılında yaptığı çalışmada kurduğu test sistemi ile geri tepme kuvvetini azaltmak için sönümleme çalışması yapmıştır. Geri tepme kuvvetinde yüzde 20-25 arasında düşüş sağlamıştır. Geri tepme kuvvetinin azaltılması aynı zamanda titreşim etkisinin azalmasına neden olur. Bu durum namlu dalgalanmasını da azaltacaktır (M. Hall, 2015).

Gündüzer, yaptığı yüksek lisans tezi çalışmasında balistik, ateşli silahlar ile ilgili tarihsel gelişimi detaylı bir şekilde aktarmıştır. Çalışmasında M101 top namlusunun, Prodas programı ile belirli mesafelerden balistik değerlerini hesaplatarak sonlu elemanlar programı ile analizini gerçekleştirmiştir. Aynı zamanda hesaplatılan değerlerin tablosunu tezinde paylaşmıştır. Belirlediği güvenlik katsayısı ile namlu cidar kalınlığında optimizasyona gitmiş 270 kilogram ağırlığından 115,95 kilograma düşürmüştür (Gündüzer, 2011).

Özcan çalışmasında, 9mm altı yiv sete sahip tabanca için sonlu elemanlar metodu (FEM) ile namlu yapısal analizini gerçekleştirmiştir. Çalışmasında Ansys Explicit modülü kullanmıştır. Tespit ettiği sonuçlarda namlu çıkış hızını yüzde 1,82 fark ile deneysel değerlere yaklaşmıştır. Namlu geliştirmeleri için FEM metodunun kullanılabilir olduğunu söylemiştir. Patlama anındaki iç balistik enerjisinin büyük kısmının setlere sıkışan merminin plastik deformasyonu için kullanıldığını söylemiştir. Maksimum gerilmenin çekirdeğin plastik deformasyonu esnasında oluştuğunu belirtmiştir. Özcan çalışmasında ısıl etkileri ihmal ettiğini belirtmiştir (Özcan, 2019)

Uğur çalışmasında, tasarım optimizasyonu için test sistemi kurmuş, elde ettiği veriler ile Ansys programında yanıt yüzey optimizasyonu yapmıştır. Test sisteminden basınç, geri tepme yüzey gerinimi ve mermi çıkış hızı değerlerini elde etmiştir. Yanıt yüzey optimizasyonu ile patlama bölgesinde uygun basınç değerinin hesaplanması, hız ve basınç değişimi verilerini işlemiştir. Bu sayede optimum tasarım parametreleri oluşturmayı amaçlamıştır. Kullandıkları sistemin testi esnasın geri tepme yükünün 5,15kg olduğunu tespit

etmişlerdir. Çalışma sonucunda 0,636kg olan namlu ağırlığını 0,497kg'a düşürdüğünü belirtmiştir. Analitik hesaplamaların tasarım optimizasyonuna olan katkısından bahsetmiştir (Uğur, 2019).

Çelik ve Aykan tank namlusunun çalışma koşulu ve sistemden aldığı etkenler nedeniyle kontrolsüz salınım ve deplasman gerçekleştirdiğini söylemektedirler. Namlu ucu deplasmanını azaltıcı önlemler üzerine çalışmışlardır. Namlunun operasyonel modal analiz ve deplasman hesaplamalarını gerçekleştirmişlerdir. Namlunun ilk mod frekansını yükseltmek için kütle eklemesinin yapılacağını söylemişlerdir. Salınım azaltıcı değişikliklerin vuruş kabiliyetini geliştireceğini ifade etmişlerdir (Çelik & Aykan, 2004).

Lisy ve Bridik, iki farklı orta kalibreye sahip namlunun modal davranışını incelemişlerdir. Çalışmalarının detayında modal analizin patlama periyodunda gerçekleşen olayları tanımlamak için güçlü bir yöntem olduğunu söylemişlerdir. Modal analiz aşamalarını iteratif Lanczos yöntemini kullanarak LS-Dyna programında gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuca göre patlama anında atış hassasiyetini etkileyen ilk titreşimin iyileştirilebilir olduğunu ifade etmişlerdir (Lisy & Bridik, 2019).

Guan ve diğerleri, keskin nişancı tüfeğinin atış doğruluğunun namlu titreşiminden önemli ölçüde etkilendiğini ifade etmişlerdir. Oluşturdukları test sistemi ile ortalama titreşim frekansı ve namlu titreşiminin genliğini elde etmişlerdir. Ayrıca namlu modelinin sonlu elemanlar metodu ile modal analiz gerçekleştirmişlerdir. Hem test verileri hem de numerik hesaplamaları karşılaştırmışlardır. Analiz çıktılarının büyük ölçüde eşleştiğini ifade etmişlerdir. Xu vd, çalışmalarında önemli titreşim genlik verileri, deneysel ve numerik frekans verileri içermektedir (Xu et al., 2019).

Yang ve diğerleri, örnek bir namlunun isogeometrik analiz ve ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı ile modal analiz gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçları deneysel datalar ile karşılaştırmışlardır. Sonuçlar arasında düşük bir fark tespit etmişlerdir. İso geometrik analiz ile tüm modelde yapılan analizde birbirine çok yakın değerler olduğu görülmektedir. Yapılan çalışma sonucunda namlu kütesinden yüzde 5'e yakın düşürme gerçekleştirmişlerdir (Yang et al., 2017).

Huybrechts vd (1999), grid yapıların davranışı üzerinde çalışmışlardır. Grid yapıların davranışını karakterize etmek için çok sayıda çalışma yapıldığını belirtmişlerdir. Grid yapı modelindeki bozulmanın, yapının etkinliğini azalttığını söylemişlerdir. Çoğu grid yapısındaki başarısızlık durumunu ribs olarak ifade edilen elemanların burkulma eğiliminden kaynaklandığını söylemişlerdir. Grid yapıların geometrisine, hasar durumuna, hasar konumuna bağlı olarak yapısal davranışın büyük ölçüde değişebileceğini söylemişlerdir. Bu nedenle hasar ile ilgili durumların tespitinin zor olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında

isogrid yapıların tasarıma dayalı kontrol edilebilir sertlik değerlerinin olabileceğini ifade etmişlerdir. Grid yapılarda hasar çalışmaları için bazı tasarımsal önerilerde bulunmuşlardır (Huybrechts et al., 1999).

Meyer vd, 1973 yılında yayınladığı kitabında isogrid yapılar ile ilgili teorik bilgiler, isogrid karakteristiği, oluşturduğu avantajlar, analitik teknikler testler ve üretim tekniklerini içeren bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu kitap isogrid yapılar ile ilgili çalışmalarda oldukça verimli olabilecek faydalı bilgiler içeren önemli bir kaynaktır. Aynı zamanda isogrid yapılar ile ilgili patent sahibi olan McDonnell Douglas ile beraber geliştirilmiştir (Meyer et al., 1973).

Kanou vd, çalışmalarında silindirik bir yüzeye uygulanmış isogrid yapının Ansys programı ile aksenal yükleme veya basınç yükleri altında hasar durumlarını incelemişlerdir. Diğer bir araştırma makalesi ile karşılaştırma yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda grid kalınlığında veya kabuk kalınlığının artırılması ile kritik yükün de arttığını söylemişlerdir (Kanou et al., 2013).

Maes vd, yaptıkları çalışmada grid yapı ile güçlendirilmiş yapılarda geometrik karmaşıklıktan dolayı verimli bir çalışma için tekniğin ve analizin çok önemli olduğunu söylemişlerdir. Analiz yöntemi için termal durumların grid yapısı için önemli olduğunu belirtmişlerdir. Referans bir tasarım ile yaptıkları çalışmalarında yüzde 20 ağırlık tasarrufu gerçekleştirmeyi başarmışlardır. Grid yapılarının parametrik yollar ile oluşturularak incelenmesinin analiz ve optimizasyon süreci için uygulanabilir olduğunu söylemişlerdir. Grip yapıların çözümlenmesinde lineer analiz yaklaşımının davranışı doğru bir şekilde gerçekleştiremeyeceğini söylemişlerdir (Maes et al., 2019).

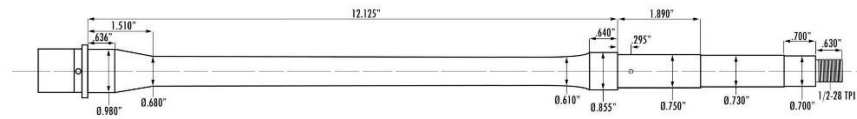
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bir araştırma veya çalışma yapılırken, materyal ve yöntem bölümü çalışmanın temel yapı taşlarını oluşturan önemli bir bölümdür. Bu bölüm, yapılan çalışmanın güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini sağlamak amacıyla kullanılan yöntemleri detaylı bir şekilde açıklar. Materyal ve yöntem bölümü, okuyuculara araştırmanın nasıl yürütüldüğü konusunda bilgi vererek, elde edilen sonuçların geçerliliğini anlamalarına yardımcı olur. Bu doğrultuda, bu çalışmada kullanılan materyal ve uygulanan yöntemler, araştırmanın temelini oluşturarak bilimsel bir yaklaşımın benimsendiği bu çalışmanın yapısal temelini oluşturacaktır.

Bu çalışma için kullanılan yöntemler ve yapılan araştırmalar alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

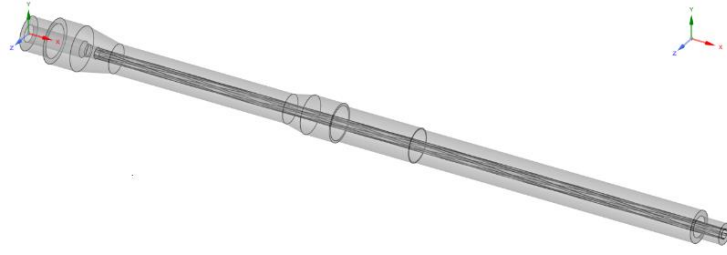
3.1. AR-15 Namlu CAD Modeli

Geliştirme ve optimizasyon çalışmaları için 5.56 mm çapa sahip 45mm uzunluğunda NATO standartlarında mühimmat kullanılabilen AR-15 olarak isimlendirilen otomatik piyade tüfeğinin genel kullanımına uygun olan 16 inç uzunluğunda namlusu kullanılmıştır. Namlu ile ilgili yapılan çalışmaların çeşitliliği ve gerekli data'lara ulaşılabilirliği nedeni ile tercih edilmiştir. Aşağıda örnek bir AR-15 namlusunun Şekil 8'de basit olarak teknik resmi verilmiştir.



Şekil 8. AR-15 Tüfeğinin Genel Namlu Ölçüleri

Çalışmalarda kullanılacak olan AR-15 namlusunun CAD görseli Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. AR-15 namlusunun CAD görseli

3.2. İç Balistik ve Namlu İç Balistik Dataları

Ateşli silahlarda barutun yanmaya başladığı andan itibaren başlayan ve mermi çekirdeğinin namluyu terk edinceye kadar geçen zaman zarfında meydana gelen olayların tümünü inceleyen bilim dalına iç balistik adı verilir. Barutun keşfi ile birlikte iç balistik biliminin başladığı kabul edilmektedir. İç balistiğin temel görevi mermi çekirdeği, namluyu terk ederken, mermi çekirdeğine doğrusal ve açısal hız kazandırarak kinetik enerjisini artırmaktır. Açısal hız kazanımı namlu içerisinde yiv set olarak tabir edilen helisel yapı sayesinde gerçekleşmektedir. Yivsiz setsiz silahlarda sadece ilk hız kazandırmaktadır (Öztürk, 1984).

İç balistik hesaplamalarında birçok sayısal yöntem bulunmaktadır. Hesaplamalar için Literatürde en çok kullanılan yöntemlerden olan Vallier-Heydenreich Metodu tercih edilmiştir.

Denklem 1'de basınç oranı, namlu içerisinde oluşan ortalama basıncın namlu içerisindeki maksimum basınca oranı ile ifade edilmiştir.

$$\eta = \frac{P_{avg}}{P_m} \quad (1)$$

Denklem 2,3,4'de verilen gaz basıncının en yüksek olduğu anda mermi mesafesi (S_m), mermi hızı (V_m), çekirdeğin namlu içinde geçirdiği zamanı (t_m) ve namlunun uzunluğu L ile gösterilmiştir. Tablo 1'de basınç oranına bağlı balistik katsayıları kullanılarak hesaplanabilmektedir. Bu parametreler deneysel olarak elde edilmiş Heydenreich tarafından ortaya konulmuştur. İç balistik hesaplamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

$$S_m = L * \Sigma(\eta) \quad (1)$$

$$t_m = \frac{2 * L * \Theta(\eta)}{V_0} \quad (2)$$

$$V_m = V_0 * \Phi(\eta) \quad (3)$$

Tablo 1. Heydenreich Balistik Tablosu (Öztürk, 1984)

η	$\Sigma(\eta)$	$\Theta(\eta)$	$\Phi(\eta)$	$\Pi(\eta)$	$T(\eta)$
0,20	0,0262	0,150	0,322	0,274	0,744
0,25	0,0360	0,196	0,337	0,306	0,792
0,30	0,0471	0,246	0,352	0,338	0,842
0,35	0,0597	0,300	0,367	0,368	0,893
0,40	0,0740	0,358	0,383	0,400	0,946
0,45	0,0903	0,420	0,399	0,432	1,000
0,50	0,1090	0,487	0,416	0,465	1,056
0,55	0,132	0,560	0,435	0,501	1,116
0,60	0,160	0,642	0,457	0,541	1,180
0,65	0,192	0,734	0,482	0,585	1,249
0,70	0,231	0,835	0,511	0,635	1,322
0,75	0,283	0,958	0,546	0,697	1,406
0,80	0,360	1,115	0,592	0,779	1,507

Merminin namlu içerisinde geçirdiği süre (t_0) ve namlu ağzındaki gaz basıncı (P_0) Denklem 5,6'da deneysel balistik faktörleri $T(\eta)$ ve $\Pi(\eta)$ parametrelerine göre hesaplanabilmektedir.

$$t_0 = \frac{2 * L * T(\eta)}{V_0} \quad (4)$$

$$P_0 = P_{avg} * \Pi(\eta) \quad (5)$$

Maksimum basınç anındaki mermi konumu belirlendikten sonra, Denklem 8,9,10 eşitliklerinde kullanılacak olan merminin herhangi bir andaki konumuna karşılık gelen λ parametresi Denklem 7 ile hesaplanabilmektedir.

$$\lambda = \frac{S}{S_m} \quad (6)$$

Vallier-Heydenreich yönteminin deneysel veri tablosu kullanılarak (Tablo 2), λ parametresine bağlı $\Psi(\lambda)$, $\Phi(\lambda)$, $\delta(\lambda)$ değişkenleri yardımıyla Denklem 8,9,10'daki merminin namlu içerisindeki herhangi bir konuma karşılık gelen basınç, hız ve zaman belirlenebilir.

Tablo 2. Vallier-Heydenreich Deneysel Veri Tablosu (Öztürk, 1984)

$\lambda=x/x_1$	$\psi(\lambda)$	$\Phi(\lambda)$	$\delta(\lambda)$
0,25	0,690	0,375	0,689
0,50	0,890	0,624	0,830
0,75	0,970	0,828	0,924
1,00	1,000	1,000	1,000
1,25	0,966	1,145	1,063
1,50	0,893	1,268	1,119
1,75	0,828	1,372	1,170
2,0	0,769	1,460	1,218
2,5	0,668	1,609	1,306
3,0	0,590	1,726	1,387
3,5	0,527	1,824	1,463
4,0	0,475	1,909	1,536
4,5	0,433	1,981	1,606
5,0	0,397	2,046	1,672
6	0,340	2,158	1,801
7	0,297	2,250	1,923
8	0,263	2,328	2,042
9	0,236	2,395	2,156
10	0,214	2,453	2,267
11	0,195	2,505	2,376
12	0,179	2,551	2,483
13	0,166	2,592	2,588
14	0,154	2,630	2,692
15	0,144	2,665	2,794

$$P = P_m * \Psi(\lambda) \quad (7)$$

$$V = V_m * \Phi(\lambda) \quad (8)$$

$$t = t_m * \delta(\lambda) \quad (9)$$

Tablo 1’de verilen Heydenreich balistik tablosu kullanılarak, Denklem 11’de verilen ortalama basınç (P_{avg}) hesaplanabilmektedir. Böylece mermiye uygulanması sırasında ihtiyaç duyulan basınç değişimini gösteren basınç-zaman grafiği elde edilmiştir.

$$P_{avg} = 2 * \left(\frac{M + 0,5 * m_p}{L * \pi * D^2} \right) * V_0^2 \quad (10)$$

İç balistik hesaplamaları bilgisayar yazılımları ile hesaplanması daha hızlı, detaylı ve pratik hale gelmiştir. Bu yazılımlara örnek verilecek olur ise dünyada çeşitli ordular tarafından da kullanılan Prodas, QuickLoad ve Gordons Reloading Tools gibi bilgisayar yazılımları örnek verilebilir.

Bu çalışma için gerekli olan basınç zaman grafiği ve gerekli diğer detayların elde edilmesi için Gordons Reloading Tools yazılımı kullanılmıştır. Yazılımda Şekil 10,11,12’de gerekli bilgilerin girdisi verilmiştir.

Şekil 10’da kullanılacak mühimmat bilgileri, namlu ve yiv set uzunluğu belirtilmiştir. Namlu uzunluğu 420mm ve yiv set uzunluğu 400mm’dir.

Property	Value
223 Rem. (5.56 x 45 NATO)	
Barrel (grooves)	5.69 mm
Max. allowed pressure	62366 psi
eff. cross section	25.030 mm ²
Case length	44.70 mm
Case volume	31.00 grain H ₂ O
Cartridge length	57.40 mm
eff. case volume	1.7673 cm ³
Sebert factor	0.6
Barrel length	420.00 mm
Projectile path	385.50 mm
Optional Parameters / Info	
Gun weight	0.0 kg
Twist length	400.00 mm
Gas-Leakage (gas losses)	Edit..
Bullet Jump	Unlock

Şekil 10. 5.56*45mm NATO Mühimmat ve Namlu Değerleri

Şekil 11’de mermi çekirdeği verileri ifade edilmiştir. Çekirdek ağırlığı ve ölçüleri veri kütüphanesinden güncellenmiştir.

Property	Value
Sierra, HPBT MK 1380, 0.224, 69.00 grain	
Projectile Ø	5.69 mm
Projectile mass	69.00 grain
Projectile length	22.90 mm
Seating depth	10.20 mm
Guided seating depth	5.15 mm (+36%)
Tail type	boattail
Initial pressure	3626 psi
Bullet resistance	Unlock
Optional Parameters / Info	
Construction / Material	Edit..
G1 BC	0.296
G7 BC	0.169
Sectional Density (gsd)	0.1381 g/mm ²

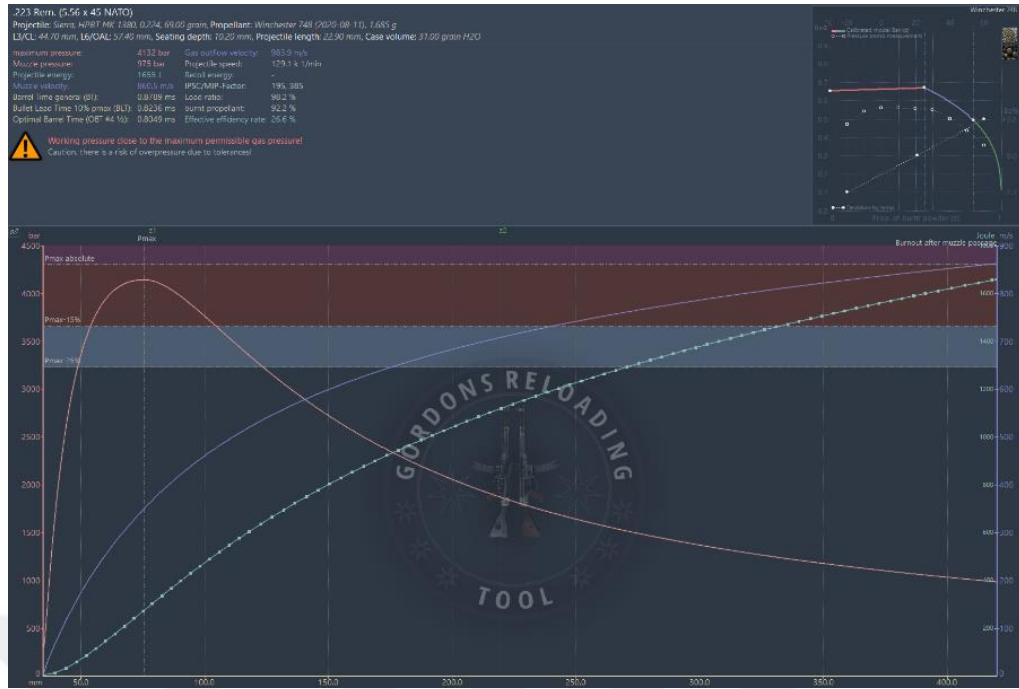
Şekil 11. 5.56*45mm Mühimmat Çekirdeği Değerleri

Şekil 12’de NATO STANAG 4367 standartlarına uygun olarak barut verileri kullanılarak yazılıma girdisi sağlanmıştır.

Property	Value
Winchester 748 (2020-08-11)	
spec. explosive heat (Qex)	3700 kJ/kg
Isentropic exponent (k)	1.2352
Combustion coefficient (Ba)	0.6545
prog./deg. coefficient (a0)	0.1242
Transition limit (z1)	0.5522
Transition limit (z2)	0.8385
Material density (Pc)	1650 kg/m ³
Bulk density (Pcd)	971 kg/m ³
Powder temperature (Pt)	21 °C
Powder mass (mc)	26.00 grain
Loading ladder steps	1 (disabled)
Step size	0.30

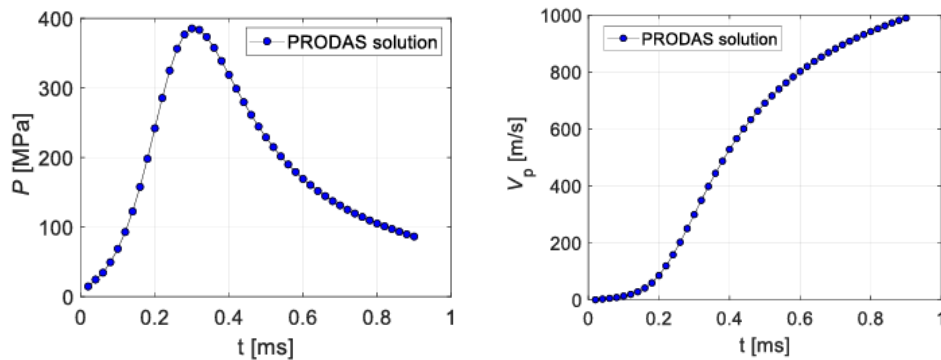
Şekil 12. 5.56*45mm Mühimmat Barut Değerleri

Şekil 13’de iç balistik hesaplama yazılımının kütüphanesine bulunan 5.56mm*45mm NATO standardında mühimmat ve namlu içerisindeki mermi yuvasının teknik ölçüleri verilmiştir. Özel çalışmalar için verilen datalarla ilgili değişiklik yapılabilmektedir.



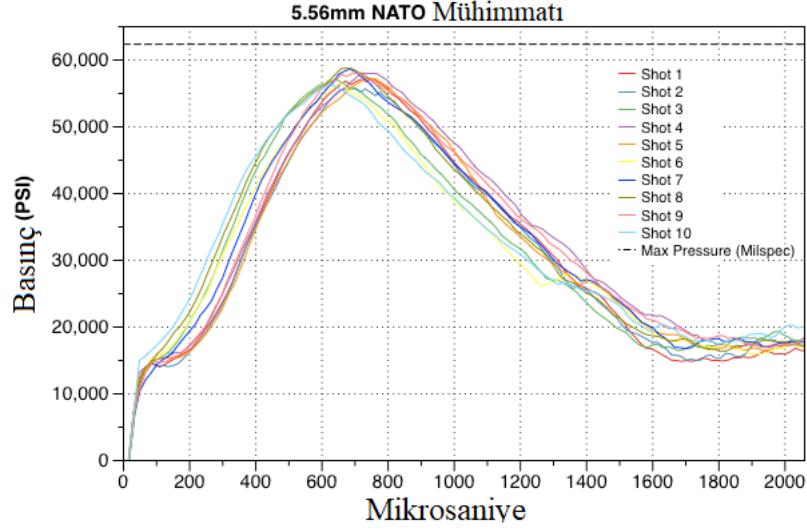
Şekil 15. İç Balistik Basınç-Çekirdek Deplasmanı Grafiği

Gordons Reloading Tools yazılımından elde edilen verilerin doğruluk karşılaştırması için deneysel ve sayısal çalışmalar incelenmiştir. Loiola vd. PRODAS programında Bear ve Brankle İç Balistik Modeli ile yaptığı çalışmada elde ettikleri 5.56*45mm NATO mühimmatının iç balistik verileri ile örtüşmektedir. Şekil 16'da karşılaştırılan basınç zaman ve hız zaman grafikleri verilmiştir (Loiola et al., 2023).



Şekil 16. Prodass Yazılımı Basınç-Zaman Grafiği ve Hız-Zaman Grafiği (Loiola et al., 2023)

Anrew'in 2012 yılında yaptığı deneysel bir çalışmanın verileri ile iç balistik hesaplama yazılımından elde edilen veriler karşılaştırıldığında sonuçların büyük oranda benzerlik göstermektedir. Şekil 17'de deneysel çalışmanın basınç zaman grafiği belirtilmiştir (Andrew, 2012).



Şekil 17. 5.56mm NATO Mermisi Basınç-Zaman Grafiği (Andrew, 2012)

3.3. Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE)

Bilgisayar Destekli Mühendislik, İngilizce tabiri ile Computer-Aided Engineering (CAE), mühendislik disiplinlerinde hemen hemen her alanda kullanılan, bilgisayar tabanlı teknolojilerin kullanılarak yapılan tasarım, analiz, optimizasyon ve üretim süreçlerini ifade eder. Bu tür sistemler, bilgisayar programları ve simülasyon araçlarını içerir ve mühendislerin ürünlerin tasarımını ve performansını değerlendirmelerine yardımcı olur (Mac Donald, 2007).

Bilgisayarın ilk kullanılması ile birlikte mühendisler de sayısal analizler ve modellemeler konusunda yeni imkânlarla sahip oldular. Bu dönemde bilgisayar tabanlı hesaplamaların kullanılmaya başlanmasıyla yeni bir süreç başlamıştır (Sabat & Kundu, 2020).

Bilgisayar teknolojilerinin gelişimi ile birlikte üç boyutlu modellemeler simülasyon, optimizasyon, konu odaklı özel uygulamalar ve günümüzde yapay zekâ ile makine öğrenimi konuları ile bilgisayar destekli mühendislik bilimler ve endüstri açısından çok önemli bir duruma gelmiştir.

3.4. Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu Elemanlar Metodu (Finite Element Method veya FEM), karmaşık yapıların analiz edilmesinde kullanılan bir sayısal analiz yöntemidir. Bu yöntem, karmaşık yapıları

ağ(mesh) yapı olarak isimlendirilen daha küçük ve daha basit elemanlara böler ve her elemanın davranışını matematiksel olarak tanımlar. Daha sonra bu elemanları matris formunda bir araya getirerek genel yapının davranışını tahmin etmeye çalışır. Tüm bu işlemler özel yazılımlarda ve uygulamalarda gerçekleştirilir. Sonlu elemanlar yöntemi genellikle üç aşamalı bir süreç olarak gerçekleştirilir (Reddy, 2019):

Ön işlem (Pre-processing): İlk olarak, yapı veya sistemin matematiksel bir modeli oluşturulur. Bu adımda, geometri, malzeme özellikleri ve sınırlayıcı koşullar gibi bilgileri içeren bir modele dönüştürülür. Daha sonra bu model, elemanlara ve düğümlere ayrılır.

Çözüm (Solution): Yapı, elemanların matematiksel denklemlerini iteratif bir şekilde çözerek analiz edilir. Her eleman, kendi davranışını ifade eden denklemlere sahiptir. Bu denklemler genellikle diferansiyel formda denklemlerdir ve kuvvetler dengesi yaklaşımı ile sınır koşulları kullanılarak elde edilir.

Son işlem (Post-processing): Çözüm aşamasında elde edilen sonuçlar, genellikle görselleştirme veya analiz için kullanışlı hale getirilir. Bu aşamada, gerilme dağılımı, deplasmanlar, rezonans frekansları gibi bilgiler elde edilebilir. Aynı zamanda istenilen sonuçlar için farklı sonuçlarında elde edilmesine imkân sağlar.

Nihai olarak, Sonlu Elemanlar Yöntemi mühendislik disiplinine sahip her alanda kullanılabilir. Yöntem, gerçek dünyadaki karmaşık yapıların davranışını tahmin etmek ve optimize etmek için güçlü bir araç sağlar. Ancak doğru sonuçlar elde etmek için doğru modele sahip olmak ve matematiksel denklemleri etkili bir şekilde çözmek önemlidir.

Sonlu Elemanlar Yönteminde kullanılan bazı basitleştirilmiş denklemler ifade edilmiştir.

Sonlu Elemanlar Yönteminde deformasyonlar veya tepki kuvvetlerinin yapı üzerindeki etkisini açıklayan ilk ve en basit yasa Hooke Kanunu'dur. Hooke kanunu ilk olarak on yedinci yüzyılda Robert Hooke tarafından ifade edilmiştir. Yapının bozunumunun kuvvetle yaklaşık doğru orantılı olduğunu ifade etmiştir. Bu kanuna uyan yapılar için lineer elastik model olarak da ifade edilmektedir (Chandrupatla & Belegundu, 2021).

$$[\bar{K}] \cdot [\bar{u}] = [\bar{F}] \quad (11)$$

Burada:

K : Sistemin genel rijitlik matrisi (stiffness matrix)

u : Sistemdeki düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin vektörü

F : Dış kuvvetlerin vektörü

Sonlu elemanlar metodunda farklı olarak birçok denklem kullanılmaktadır. Genel bir sonlu elemanlar denklemi aşağıda ifade edilmiştir. İfade edilen denklem Newton'un ikinci hareket yasasına dayanmaktadır. Karmaşık ve iteratif çözümler matris çözümü gerektirdiğinden matris formunda ifade edilmiştir (Hughes, 2012).

$$[M] \cdot [\ddot{u}] + [C] \cdot [\dot{u}] + [K] \cdot [u] = [F] \quad (12)$$

Burada:

M : Kütle matrisi, yapıdaki kütlelerin dağılımını ifade eder.

\ddot{u} : İkinci dereceden yer değiştirme türevidir (ivme).

C : Sönüm matrisi, yapının sönüm özelliklerini ifade eder. Bu terim, yapının titreşimlerini ve enerji kayıplarını hesaba katar.

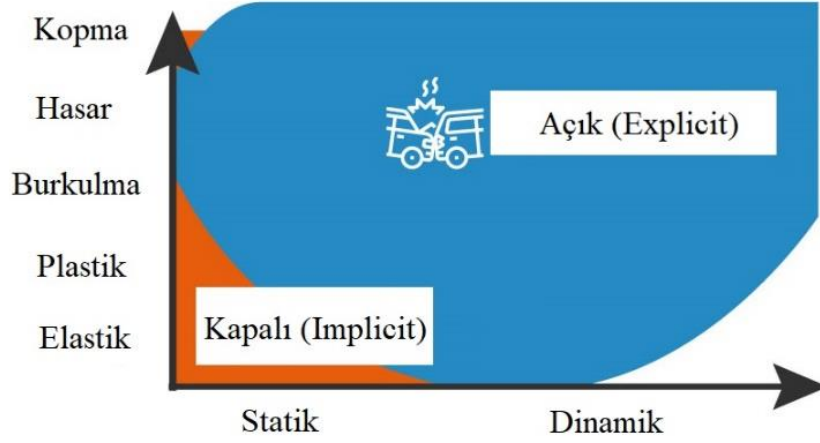
\dot{u} : Birinci dereceden yer değiştirme türevidir (hız).

K : Rijitlik matrisi, yapının elastik özelliklerini ifade eder.

u : Yer değiştirme vektörü.

F : Dış kuvvetlerin vektörü.

Sonlu elemanlar analizlerinde probleme karşı sistem çözümü için yaklaşımlar bulunmaktadır. Problemin gerçekleşme fiziği ile ilgili olan bu durum kapalı (implicit) ve açık (explicit) analizler olarak isimlendirilir. Bu analizler statik çözümler ile dinamik çözümler arasında ayrım içermektedir. Bu ayrım için en önemli iki ekten zaman adımı ve sisteme verilen yük koşullarıdır. Zamana bağlı olmayan analizler için kapalı yöntem tercih edilebilir. Kısa zaman adımlarında oluşan yüksek etkenler için açık yöntem tercih edilmelidir. Örneğin çarpışma, patlama, yüksek deformasyon içeren durumlar da açık yöntem tercih edilmelidir (Prior, 1994). Şekil 18'de implicit ve explicit ile ilgili durum grafiği verilmiştir.



Şekil 18. Implicit (Kapalı) ve (Açık) Explicit Analiz Yaklaşımı (Axiro, n.d.)

Kapalı ve açık motoadların genel özellikleri liste halinde sıralanmıştır.

Kapalı (Implicit) Metod

- Kütle ve sönümlenme etkisine sahip değildir.
- Çözümü sertlik ve deplasman matrisleri ile gerçekleştirir.
- Zaman adımı limiti yoktur.
- Matris dönüşümüne ihtiyaç duyar.

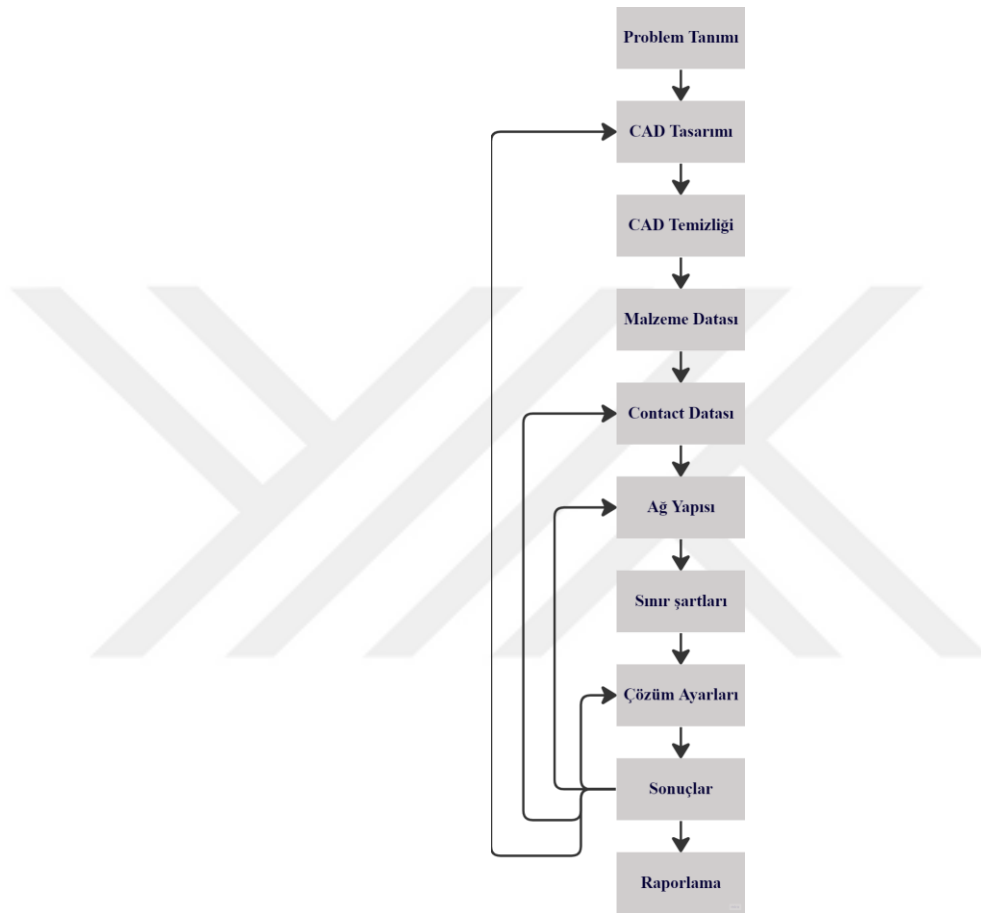
Açık (Explicit) Metod

- Atalet ve sönümlenme etkisini kullanır.
- Direk olarak ivme ve kuvvet üzerinden çözüm gerçekleştirir.
- Matris dönüşümü gerekmez.

Bu çalışmada içeriğinde yapılacak çalışma için açık yöntem tercih edilmiştir. Kısa zaman adımında yüksek basınç değişimleri görülmektedir. Analiz sınır şartları için verilen değerler bu yöntemde daha uygundur. Tez içeriğinde yapılan analizde geleneksel namlu ve ızgara yüzey uygulanmış namlu arasında performans karşılaştırması yapılmıştır. Çalışma koşullarında yapısal olarak performans durumları incelenmiştir. Ara aşamalar model hazırlığı, malzeme modeli, örgü ağı oluşturma, sınır koşulları tayini, çözüm parametreleri ve alınan sonuçların incelenmesini içermektedir. Bu çalışmalar ANSYS explicit çözücüsü olan Workbench LS Dyna kullanılarak yapılacaktır.

3.4.1. Sonlu Elemanlar Analizi İş Akış Şeması

Sonlu elemanlar metodu ile yapılan çalışmalar belirli bir akış ile ilerlemektedir. Problemin tanımına göre bu akışta bazı değişiklikler olabilmektedir. Şekil 19'da örnek bir sonlu elemanlar analizinin basit bir akış şeması verilmiştir.



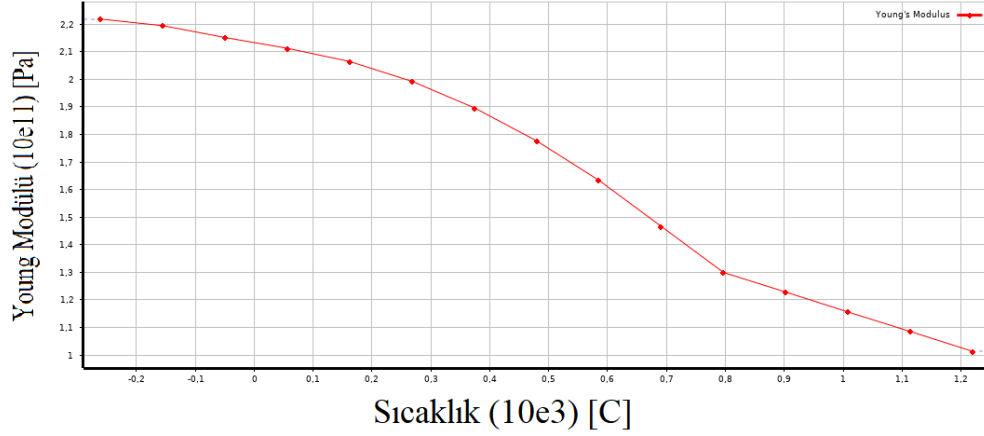
Şekil 19. Sonlu Elemanlar Metodu İş Akış Şeması

Sonlu Elemanlar Yönteminde iş akışı öncelikle problem tanımı ile başlar. Çalışması yapılması gereken konu ile ilgili ihtiyaç olan dataların toplanması, gerekli iyileştirmelerin belirlenmesi, çalışılacak sistemin sorunları vb. gibi aşamalar problem tanımının önemli bir aşamasıdır. Çalışma içeriğindeki ihtiyaçları doğru bir şekilde belirlemek harcanan zaman ve çalışma sonucunda elde edilen verilerin doğruluğu açısından önemlidir.

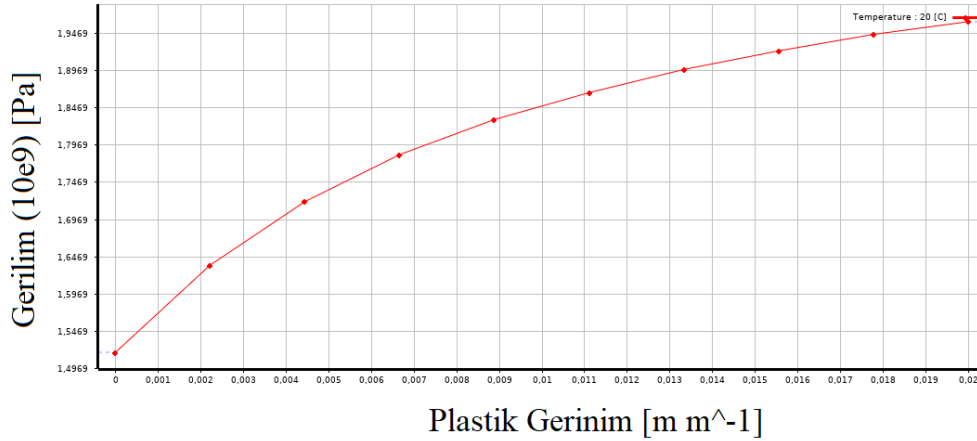
CAD (Computer Aided Desing veya Bilgisayar Destekli Tasarım) tasarımı olan bir parçanın veya sistemin analiz aşamalarında kullanılmak üzere sanal ortamda işleme başlanır. CAD dosyası incelenir ve CAD temizliğine hazır hale getirilir. CAD temizliği,

FEM yazılımının daha verimli bir çözüm gerçekleştirmesi için gereksiz kısımlar üzerinde düzenlemeler yapılarak analiz aşamasına dahil edilmesi kısmıdır. Sistem üzerindeki gereksiz detayları temizlemek analiz süresi ve sonuçlarda oldukça etkili olmaktadır.

Malzeme datası girdileri analiz aşamasında yapılan çalışmanın detayına bağlı olarak kilit rol üstlenen kısımlardandır. Analiz çözümü için malzemeler konusunda ihtiyaç duyulan veriler bu bölümde işlenir. Bu tez içeriğinde yapılan çalışmanın AISI 4140 malzeme bilgileri Şekil 20 ve Şekil 21’de ifade edilmiştir.



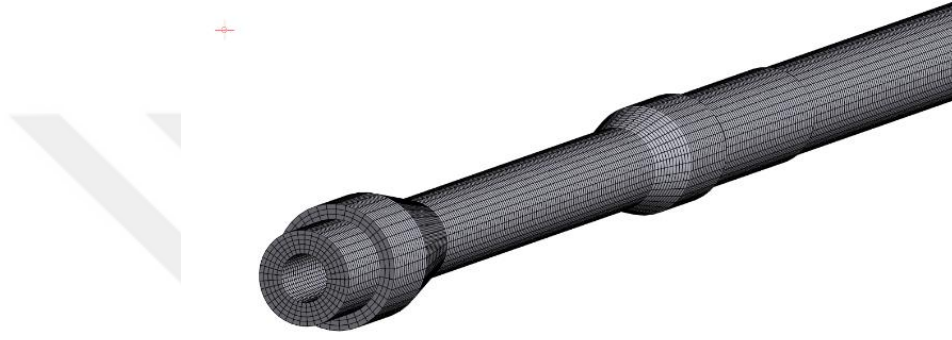
Şekil 20. AISI 4140 Sıcaklığa Bağlı İzotropik Elastikiyet (Isotropic Elasticity) (Granta, 2022)



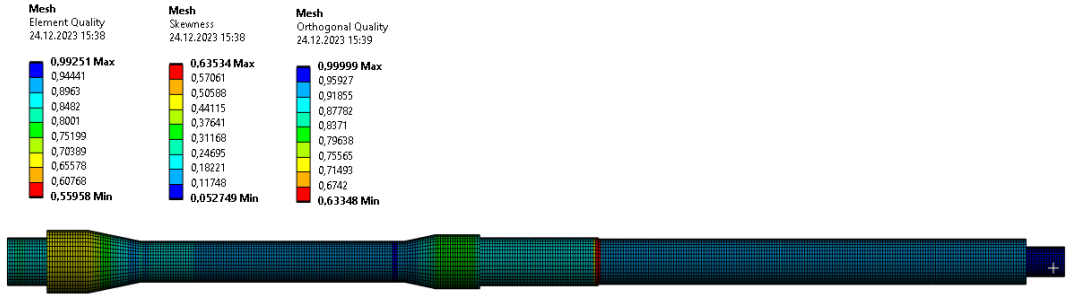
Şekil 21. AISI 4140 Multilineer İzotropik Sertleşme (Multilineer Isotropic Hardening) (Granta, 2022)

Temas noktaları sonlu elemanlar metodunda çözüm için kritik adımlardan birisidir. Kontak mekaniğinde birçok sayısal detaylar mevcuttur. Karmaşık sistemlerin çözümünde bu aşamalara dikkat edilmelidir. Namlu analizleri tek parça olarak gerçekleştirildiğinden dolayı sadece montajlanan kısmında sınır şartından dolayı bir temas noktası mevcuttur.

CAD tasarımı matris formlarının oluşabilmesi için küçük parçalara ayrılır. Bu ayırım analiz programlarında algoritmalar ile yapılır. Üçgenel ve dörtgen gibi geometrik şekillerde farklı formları vardır. Bu yapılara ağ yapısı (mesh) adı verilir. Bu çokgenlerin köşe noktalarına düğüm noktası denir. Matematiksel hesaplamalar bu düğüm noktalarına göre hesaplanır (Eymard et al., 2010). AR-15 namlu modelinin ağ yapısı ve ağ yapısı ile ilgili kalite değerleri Şekil 22 ve Şekil 23’de verilmiştir. Ağ eleman kalitesinde en küçük değer 0.559’dur. Elemanların çarpıklık (skewness) değeri en yüksek 0.635’dir. Ortogonal kalite değerinin en küçük görülen değer 0.633’dür.



Şekil 22. Geleneksel AR-15 Namlusu Ağ Yapısı Görünümü

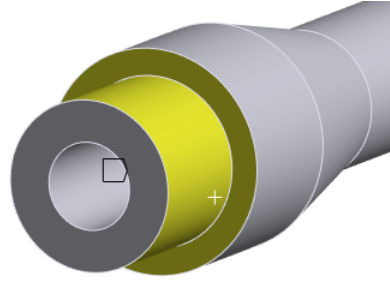


Şekil 23. Geleneksel AR-15 Namlusu Ağ yapısı Kalite Değerleri

Sınır şartları, sistem üzerinde deplasman hız değişimi, kuvvet basınç gibi dış etkilerin olduğu durumlarda analize girdi olarak işlenen verilerdir. Tez çalışmasında namluya etki olarak tüm eksenlerde hareketine engelleyen sınır şartı uygulanmıştır. Uygulanan yüzey bölgesi Şekil 24’de ifade edilmiştir.

D: Modal
 Remote Displacement
 Frequency: N/A
 24.12.2023 15:35

Remote Displacement
 Components: 0,0,0, mm
 Rotation: 0, 0, 0, °
 Location: 9,4361, -6,1199e-016, -6,0969e-018 mm



Şekil 24. Geleneksel Namlu Sınır Şartı Gösterimi

Bilgisayar destekli mühendislik yazılımlarında çözüm aşamasına müdahale edilebilecek değer ayarlamaları mevcuttur. Yapılan çalışmalarda bu değerler doğruluk ve verim artışı için kullanılabilir.

Tüm sonlu elemanlar analizinde sonuçların incelenmesi ve yorumlanması en önemli kısımlardan biridir. Çalışma çıktılarını diğer birimlere ve kişilere doğru ve anlaşılır bir biçimde aktarmak önem arz etmektedir. SEM sonuçlarından alınan birçok çıktı bulunmaktadır. Genel olarak bu çıktılarda deformasyon, gerinim, gerilim, enerjileri tepki kuvvetleri ve özel denklemler incelenebilir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar bölümünde ifade edilmiştir.

3.5. Modal Analiz

Tüm mekanik ve yapısal sistemlerin tümünde doğal frekans ve rezonans durumları oldukça önemlidir. Yapılarda bazen sebebi belirli olmayan titreşimlerle karşılaşılır. Bu durumda temelinde doğal frekans etkilidir. Bu değer zaman zaman bozulmalar ve kırılmalar gibi riskli sonuçlara neden olabilmektedir. Doğal frekansı terimsel olarak açıklandığında bir cismin sertliğine (stiffness) ve kütesine bağlı olarak etkin frekanslarda uyarıldığında yüksek genlikte sürekli olarak titreyeceği frekanslara denir. Bir Cismin veya sistemin doğal frekansı etkisinde sürekli olarak titreşmesi rezonans olarak adlandırılır. Titreşim denge konumu etrafındaki salınım hareketidir (Çağlayan, 2009). Doğal frekans bazlı incelenen analizlerin başında modal analiz yer almaktadır. Yapıların rezonans etkisinde doğal frekanslarını ve mod şekillerini tahmin etmek amacıyla oldukça sık kullanılmaktadır.

Uzun süreli titreşimler cisim veya sistemler üzerinde yorulmalar, hasar veya kırılmalara neden olabilir. Sistemlerin güvenli ve verimli bir şekilde çalışması için modal ve dinamik analizler ile desteklenmesi gerekmektedir (Hüseyinoğlu & Tayfun, 2019).

Tek bir serbestlik dereceli sönümsüz sistemler için doğal frekansın hesaplanması Denklem 14'de ifade edilmiştir. Hareket denkleminde yola çıkılarak denklem hesaplanmıştır.

$$[M][\ddot{u}] + [K][u] = [F] \quad (13)$$

Hareket denkleminin çözümü için $u(t) = a e^{st}$ kabulü yapılır. Kabuk edilen değer ve türevleri hareket denkleminde yerlerine koyulduğunda:

$$\ddot{u}(t) = s^2 a e^{st} \quad (14)$$

$$[ms^2 + k] a e^{st} = 0 \quad (15)$$

Çözüm geçerliliği için $a e^{st}$ 'nin sıfırdan farklı olması gerekmektedir. Bu durumda Denklem 15'nin çarpanı sıfıra eşit olmalıdır. Denklemi sıfır yapan s değeri sistemin özdeğerleri olarak adlandırılır. Buradan:

$$ms^2 + k = 0 \quad (16)$$

$$s_{1,2} = \pm \sqrt{-\frac{k}{m}} = \pm \sqrt{\frac{k}{m}} i = \pm i \omega_n \quad (17)$$

Denklem sadeleştirildiğinde elde edilen titreşimlerin frekansı:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ (rad/s)} \quad (18)$$

Ansys analiz programında yapılan AR-15 namlusunun modal analizinde 24 farklı mod hesaplanması yapılmıştır. Modal kütle, kinetik enerjiler ve ötelenme efektif kütle özetleri analiz sonucundan elde edilen Tablo 3'de ifade edilmiştir.

Tablo 3. Geleneksel Namlu Modal Kütle, Kinetik Enerji, Ötelenme Etkif Kütlesi Özeti Tablosu

***** MODAL MASSES, KINETIC ENERGIES, AND TRANSLATIONAL EFFECTIVE MASSES SUMMARY *****

MODE	FREQUENCY	MODAL MASS	KENE	X-Dir	EFFECTIVE MASS				
					RATIO%	Y-Dir	RATIO%	Z-Dir	RATIO%
1	82.81	0.2153E-03	29.14	0.000	0.00	0.3427E-03	45.14	0.9499E-04	12.51
2	82.81	0.2153E-03	29.14	0.000	0.00	0.9499E-04	12.51	0.3427E-03	45.14
3	567.0	0.1814E-03	1151.	0.000	0.00	0.9640E-04	12.70	0.2902E-04	3.82
4	567.0	0.1814E-03	1151.	0.000	0.00	0.2902E-04	3.82	0.9640E-04	12.70
5	1542.	0.1730E-03	8119.	0.000	0.00	0.3157E-04	4.16	0.1078E-04	1.42
6	1542.	0.1730E-03	8119.	0.4531E-18	0.00	0.1077E-04	1.42	0.3157E-04	4.16
7	1935.	0.2160E-03	0.1596E+05	0.4693E-16	0.00	0.7851E-18	0.00	0.1287E-17	0.00
8	3002.	0.1545E-03	0.2749E+05	0.1640E-17	0.00	0.1806E-04	2.38	0.6205E-05	0.82
9	3002.	0.1545E-03	0.2749E+05	0.1287E-16	0.00	0.6203E-05	0.82	0.1807E-04	2.38
10	3173.	0.3729E-03	0.7410E+05	0.5810E-03	76.53	0.5172E-12	0.00	0.8848E-15	0.00
11	4693.	0.1828E-03	0.7945E+05	0.000	0.00	0.1430E-04	1.88	0.7479E-05	0.99
12	4693.	0.1828E-03	0.7945E+05	0.000	0.00	0.7475E-05	0.98	0.1431E-04	1.89
13	6199.	0.1485E-03	0.1127E+06	0.2333E-17	0.00	0.3916E-17	0.00	0.000	0.00
14	6704.	0.1536E-03	0.1363E+06	0.000	0.00	0.9101E-05	1.20	0.5331E-05	0.70
15	6704.	0.1536E-03	0.1363E+06	0.3562E-18	0.00	0.5329E-05	0.70	0.9106E-05	1.20
16	9026.	0.1693E-03	0.2722E+06	0.000	0.00	0.5538E-05	0.73	0.6776E-05	0.89
17	9026.	0.1693E-03	0.2722E+06	0.4709E-18	0.00	0.6777E-05	0.89	0.5537E-05	0.73
18	9953.	0.2907E-03	0.5685E+06	0.4310E-04	5.68	0.3781E-11	0.00	0.6790E-14	0.00
19	0.1144E+05	0.1546E-03	0.3991E+06	0.000	0.00	0.4364E-05	0.57	0.4215E-05	0.56
20	0.1144E+05	0.1546E-03	0.3991E+06	0.000	0.00	0.4219E-05	0.56	0.4358E-05	0.57
21	0.1158E+05	0.1297E-03	0.3435E+06	0.3877E-17	0.00	0.5327E-16	0.00	0.1364E-17	0.00
22	0.1429E+05	0.6699E-04	0.2701E+06	0.000	0.00	0.5206E-05	0.69	0.4312E-06	0.06
23	0.1429E+05	0.6699E-04	0.2701E+06	0.1187E-17	0.00	0.4315E-06	0.06	0.5187E-05	0.68
24	0.1439E+05	0.1231E-03	0.5031E+06	0.2784E-17	0.00	0.9437E-16	0.00	0.1130E-16	0.00
sum				0.6241E-03	82.21	0.6924E-03	91.21	0.6924E-03	91.21

Modal analiz sonucunda her üç eksen için baskın olan ilk iki mod bulunur. Baskın modların tespit edilmesi için katılım faktörlerinin incelenmesi gerekmektedir. Geleneksel namlu için yapılan modal analizde 6 eksen (öteleme ve dönme eksenleri) için katılım faktörleri tabloları verilmiştir (Tablo 4-8).

Tablo 4. Geleneksel Namlu Modal Analizi Katılım Faktörü X Eksen

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** X DIRECTION

MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	82.8066	0.12076E-01	0.0000	0.000000	0.00000	0.00000	0.00000
2	82.8069	0.12076E-01	0.0000	0.000000	0.00000	0.00000	0.00000
3	566.967	0.17638E-02	0.0000	0.000000	0.00000	0.00000	0.00000
4	566.968	0.17638E-02	0.0000	0.000000	0.00000	0.00000	0.00000
5	1541.80	0.64859E-03	0.0000	0.000000	0.00000	0.00000	0.00000
6	1541.80	0.64859E-03	-0.67316E-09	0.000000	0.453144E-18	0.726041E-15	0.596899E-15
7	1934.65	0.51689E-03	0.68503E-08	0.000000	0.469269E-16	0.759136E-13	0.618138E-13
8	3002.25	0.33308E-03	0.12808E-08	0.000000	0.164039E-17	0.785419E-13	0.216078E-14
9	3002.25	0.33308E-03	0.35869E-08	0.000000	0.128657E-16	0.991557E-13	0.169472E-13
10	3172.68	0.31519E-03	0.24104E-01	1.000000	0.581026E-03	0.930937	0.765349
11	4692.57	0.21310E-03	0.0000	0.000000	0.00000	0.930937	0.00000
12	4692.57	0.21310E-03	0.0000	0.000000	0.00000	0.930937	0.00000
13	6199.23	0.16131E-03	-0.15274E-08	0.000000	0.233294E-17	0.930937	0.307303E-14
14	6703.79	0.14917E-03	0.0000	0.000000	0.00000	0.930937	0.00000
15	6703.79	0.14917E-03	0.59683E-09	0.000000	0.356210E-18	0.930937	0.469213E-15
16	9025.53	0.11080E-03	0.0000	0.000000	0.00000	0.930937	0.00000
17	9025.53	0.11080E-03	-0.68624E-09	0.000000	0.470926E-18	0.930937	0.620321E-15
18	9953.03	0.10047E-03	-0.65654E-02	0.272372	0.431044E-04	1.00000	0.567788E-01
19	11435.3	0.87449E-04	0.0000	0.000000	0.00000	1.00000	0.00000
20	11435.3	0.87449E-04	0.0000	0.000000	0.00000	1.00000	0.00000
21	11582.6	0.86337E-04	0.19691E-08	0.000000	0.387728E-17	1.00000	0.510730E-14
22	14291.6	0.69971E-04	0.0000	0.000000	0.00000	1.00000	0.00000
23	14291.6	0.69971E-04	0.10894E-08	0.000000	0.118687E-17	1.00000	0.156339E-14
24	14390.0	0.69493E-04	0.16685E-08	0.000000	0.278394E-17	1.00000	0.366711E-14
sum					0.624131E-03		0.822128

Tablo 5. Geleneksel Namlu Modal Analizi Katılım Faktörü Y Eksenini

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** Y DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	82.8066	0.12076E-01	0.18511E-01	1.000000	0.342658E-03	0.494881	0.451362
2	82.8069	0.12076E-01	0.97461E-02	0.526502	0.949864E-04	0.632064	0.125120
3	566.967	0.17638E-02	-0.98181E-02	0.530394	0.963958E-04	0.771283	0.126976
4	566.968	0.17638E-02	-0.53866E-02	0.290996	0.290159E-04	0.813189	0.382208E-01
5	1541.80	0.64859E-03	0.56185E-02	0.303521	0.315673E-04	0.858779	0.415817E-01
6	1541.80	0.64859E-03	0.32824E-02	0.177323	0.107743E-04	0.874340	0.141923E-01
7	1934.65	0.51689E-03	-0.88608E-09	0.000000	0.785142E-18	0.874340	0.103422E-14
8	3002.25	0.33308E-03	-0.42497E-02	0.229576	0.180599E-04	0.900423	0.237892E-01
9	3002.25	0.33308E-03	-0.24906E-02	0.134546	0.620298E-05	0.909382	0.817080E-02
10	3172.68	0.31519E-03	0.71919E-06	0.000039	0.517233E-12	0.909382	0.681318E-09
11	4692.57	0.21310E-03	0.37820E-02	0.204313	0.143039E-04	0.930040	0.188416E-01
12	4692.57	0.21310E-03	0.27341E-02	0.147701	0.747532E-05	0.940836	0.984678E-02
13	6199.23	0.16131E-03	-0.19790E-08	0.000000	0.391638E-17	0.940836	0.515881E-14
14	6703.79	0.14917E-03	-0.30167E-02	0.162970	0.910076E-05	0.953980	0.119879E-01
15	6703.79	0.14917E-03	-0.23085E-02	0.124710	0.532919E-05	0.961676	0.701981E-02
16	9025.53	0.11080E-03	-0.23533E-02	0.127127	0.553780E-05	0.969674	0.729459E-02
17	9025.53	0.11080E-03	0.26032E-02	0.140632	0.677690E-05	0.979462	0.892679E-02
18	9953.03	0.10047E-03	-0.19446E-05	0.000105	0.378136E-11	0.979462	0.498095E-08
19	11435.3	0.87449E-04	-0.20891E-02	0.112857	0.436435E-05	0.985765	0.574888E-02
20	11435.3	0.87449E-04	-0.20541E-02	0.110967	0.421937E-05	0.991859	0.555791E-02
21	11582.6	0.86337E-04	0.72985E-08	0.000000	0.532674E-16	0.991859	0.701658E-13
22	14291.6	0.69971E-04	0.22816E-02	0.123256	0.520565E-05	0.999377	0.685708E-02
23	14291.6	0.69971E-04	0.65692E-03	0.035488	0.431543E-06	1.000000	0.568445E-03
24	14390.0	0.69493E-04	0.97145E-08	0.000001	0.943708E-16	1.000000	0.124309E-12
sum					0.692406E-03		0.912063

Tablo 6. Geleneksel Namlu Modal Analizi Katılım Faktörü Z Eksenini

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** Z DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	82.8066	0.12076E-01	-0.97461E-02	0.526501	0.949866E-04	0.137180	0.125120
2	82.8069	0.12076E-01	0.18511E-01	1.000000	0.342660E-03	0.632051	0.451365
3	566.967	0.17638E-02	0.53867E-02	0.291000	0.290168E-04	0.673957	0.382220E-01
4	566.968	0.17638E-02	-0.98184E-02	0.530407	0.964009E-04	0.813179	0.126983
5	1541.80	0.64859E-03	-0.32827E-02	0.177334	0.107758E-04	0.828742	0.141943E-01
6	1541.80	0.64859E-03	0.56192E-02	0.303557	0.315750E-04	0.874342	0.415917E-01
7	1934.65	0.51689E-03	0.11344E-08	0.000000	0.128685E-17	0.874342	0.169509E-14
8	3002.25	0.33308E-03	0.24909E-02	0.134565	0.620482E-05	0.883304	0.817323E-02
9	3002.25	0.33308E-03	-0.42508E-02	0.229636	0.180695E-04	0.909399	0.238018E-01
10	3172.68	0.31519E-03	-0.29745E-07	0.000002	0.884760E-15	0.909399	0.116544E-11
11	4692.57	0.21310E-03	-0.27347E-02	0.147733	0.747858E-05	0.920200	0.985106E-02
12	4692.57	0.21310E-03	0.37834E-02	0.204386	0.143141E-04	0.940873	0.188551E-01
13	6199.23	0.16131E-03	0.0000	0.000000	0.000000	0.940873	0.000000
14	6703.79	0.14917E-03	0.23089E-02	0.124732	0.533110E-05	0.948572	0.702233E-02
15	6703.79	0.14917E-03	-0.30176E-02	0.163017	0.910605E-05	0.961723	0.119948E-01
16	9025.53	0.11080E-03	0.26031E-02	0.140626	0.677635E-05	0.971509	0.892606E-02
17	9025.53	0.11080E-03	0.23531E-02	0.127119	0.553710E-05	0.979506	0.729368E-02
18	9953.03	0.10047E-03	0.82403E-07	0.000004	0.679025E-14	0.979506	0.894437E-11
19	11435.3	0.87449E-04	0.20531E-02	0.110911	0.421515E-05	0.985593	0.555235E-02
20	11435.3	0.87449E-04	-0.20875E-02	0.112769	0.435756E-05	0.991887	0.573994E-02
21	11582.6	0.86337E-04	-0.11681E-08	0.000000	0.136445E-17	0.991887	0.179731E-14
22	14291.6	0.69971E-04	-0.65664E-03	0.035473	0.431170E-06	0.992509	0.567953E-03
23	14291.6	0.69971E-04	0.22774E-02	0.123031	0.518675E-05	1.000000	0.683219E-02
24	14390.0	0.69493E-04	-0.33613E-08	0.000000	0.112984E-16	1.000000	0.148826E-13
sum					0.692423E-03		0.912086

Tablo 7. Geleneksel Namlu Modal Analizi Katılım Faktörü RotX Eksen

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION *****ROTX DIRECTION

MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	82.8066	0.12076E-01	0.14761E-07	0.000000	0.217872E-15	0.725669E-14	0.585587E-14
2	82.8069	0.12076E-01	0.10337E-07	0.000000	0.106861E-15	0.108159E-13	0.287215E-14
3	566.967	0.17638E-02	-0.98885E-07	0.000001	0.977834E-14	0.336504E-12	0.262817E-12
4	566.968	0.17638E-02	-0.26513E-07	0.000000	0.702928E-15	0.359916E-12	0.188929E-13
5	1541.80	0.64859E-03	0.20791E-06	0.000001	0.432283E-13	0.179972E-11	0.116187E-11
6	1541.80	0.64859E-03	0.10634E-06	0.000001	0.113080E-13	0.217636E-11	0.303931E-12
7	1934.65	0.51689E-03	-0.16172	1.000000	0.261542E-01	0.871121	0.702961
8	3002.25	0.33308E-03	-0.36693E-06	0.000002	0.134634E-12	0.871121	0.361863E-11
9	3002.25	0.33308E-03	-0.14408E-06	0.000001	0.207596E-13	0.871121	0.557966E-12
10	3172.68	0.31519E-03	-0.45885E-06	0.000003	0.210544E-12	0.871121	0.565891E-11
11	4692.57	0.21310E-03	0.49171E-06	0.000003	0.241778E-12	0.871121	0.649839E-11
12	4692.57	0.21310E-03	0.23656E-06	0.000001	0.559617E-13	0.871121	0.150411E-11
13	6199.23	0.16131E-03	0.35429E-01	0.219073	0.125523E-02	0.912929	0.337373E-01
14	6703.79	0.14917E-03	-0.30777E-06	0.000002	0.947248E-13	0.912929	0.254597E-11
15	6703.79	0.14917E-03	-0.16326E-06	0.000001	0.266552E-13	0.912929	0.716426E-12
16	9025.53	0.11080E-03	0.42209E-07	0.000000	0.178160E-14	0.912929	0.478849E-13
17	9025.53	0.11080E-03	-0.35039E-07	0.000000	0.122774E-14	0.912929	0.329987E-13
18	9953.03	0.10047E-03	0.13560E-05	0.000008	0.183869E-11	0.912929	0.494194E-10
19	11435.3	0.87449E-04	0.51124E-06	0.000003	0.261365E-12	0.912929	0.702485E-11
20	11435.3	0.87449E-04	0.35459E-06	0.000002	0.125731E-12	0.912929	0.337934E-11
21	11582.6	0.86337E-04	-0.35553E-01	0.219838	0.126400E-02	0.955029	0.339732E-01
22	14291.6	0.69971E-04	-0.12862E-05	0.000008	0.165421E-11	0.955029	0.444609E-10
23	14291.6	0.69971E-04	-0.17558E-06	0.000001	0.308277E-13	0.955029	0.828571E-12
24	14390.0	0.69493E-04	-0.36745E-01	0.227210	0.135019E-02	1.000000	0.362898E-01
sum					0.300237E-01		0.806961

Tablo 8. Geleneksel Namlu Modal Analizi Katılım Faktörü RotY Eksen

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION *****ROTY DIRECTION

MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	82.8066	0.12076E-01	2.9544	0.526502	8.72871	0.208194	0.208105
2	82.8069	0.12076E-01	-5.6115	1.000000	31.4884	0.959246	0.750728
3	566.967	0.17638E-02	-0.54784	0.097630	0.300133	0.966405	0.715560E-02
4	566.968	0.17638E-02	0.99855	0.177949	0.997103	0.990188	0.237723E-01
5	1541.80	0.64859E-03	0.24463	0.043595	0.598455E-01	0.991615	0.142680E-02
6	1541.80	0.64859E-03	-0.41875	0.074624	0.175352	0.995797	0.418063E-02
7	1934.65	0.51689E-03	-0.11368E-06	0.000000	0.129231E-13	0.995797	0.308106E-15
8	3002.25	0.33308E-03	-0.14352	0.025576	0.205970E-01	0.996289	0.491063E-03
9	3002.25	0.33308E-03	0.24490	0.043643	0.599772E-01	0.997719	0.142994E-02
10	3172.68	0.31519E-03	0.24685E-06	0.000000	0.609346E-13	0.997719	0.145277E-14
11	4692.57	0.21310E-03	0.12843	0.022887	0.164934E-01	0.998113	0.393226E-03
12	4692.57	0.21310E-03	-0.17767	0.031662	0.315658E-01	0.998866	0.752573E-03
13	6199.23	0.16131E-03	0.51879E-08	0.000000	0.269140E-16	0.998866	0.641668E-18
14	6703.79	0.14917E-03	-0.90708E-01	0.016165	0.822791E-02	0.999062	0.196165E-03
15	6703.79	0.14917E-03	0.11855	0.021126	0.140531E-01	0.999397	0.335046E-03
16	9025.53	0.11080E-03	-0.87488E-01	0.015591	0.765409E-02	0.999580	0.182484E-03
17	9025.53	0.11080E-03	-0.79085E-01	0.014093	0.625441E-02	0.999729	0.149114E-03
18	9953.03	0.10047E-03	-0.77290E-06	0.000000	0.597369E-12	0.999729	0.142421E-13
19	11435.3	0.87449E-04	-0.60742E-01	0.010825	0.368960E-02	0.999817	0.879652E-04
20	11435.3	0.87449E-04	0.61764E-01	0.011007	0.381483E-02	0.999908	0.909509E-04
21	11582.6	0.86337E-04	0.34957E-07	0.000000	0.122196E-14	0.999908	0.291334E-16
22	14291.6	0.69971E-04	0.17225E-01	0.003070	0.296688E-03	0.999915	0.707346E-05
23	14291.6	0.69971E-04	-0.59762E-01	0.010650	0.357154E-02	1.000000	0.851506E-04
24	14390.0	0.69493E-04	0.91674E-07	0.000000	0.840407E-14	1.000000	0.200365E-15
sum					41.9258		0.999569

Tablo 9. Geleneksel Namlu Modal Analizi Katılım Faktörü RotZ Eksen

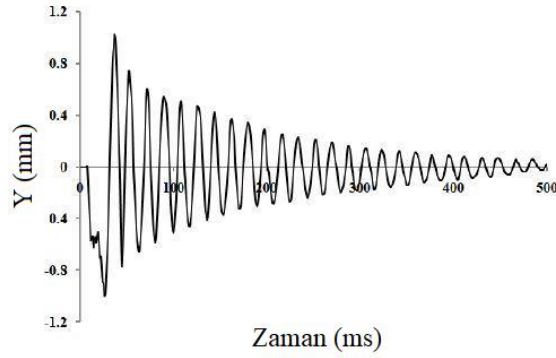
***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION *****ROTZ DIRECTION								
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC. FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS	
1	82.8066	0.12076E-01	5.6115	1.000000	31.4884	0.751052	0.750728	
2	82.8069	0.12076E-01	2.9544	0.526502	8.72871	0.959247	0.208105	
3	566.967	0.17638E-02	-0.99855	0.177949	0.997106	0.983029	0.237724E-01	
4	566.968	0.17638E-02	-0.54784	0.097629	0.300131	0.990188	0.715554E-02	
5	1541.80	0.64859E-03	0.41874	0.074623	0.175346	0.994370	0.418049E-02	
6	1541.80	0.64859E-03	0.24463	0.043595	0.598446E-01	0.995798	0.142678E-02	
7	1934.65	0.51689E-03	-0.48410E-07	0.000000	0.234350E-14	0.995798	0.558724E-16	
8	3002.25	0.33308E-03	-0.24489	0.043641	0.599721E-01	0.997228	0.142982E-02	
9	3002.25	0.33308E-03	-0.14351	0.025575	0.205960E-01	0.997719	0.491038E-03	
10	3172.68	0.31519E-03	0.68304E-05	0.000001	0.466543E-10	0.997719	0.111230E-11	
11	4692.57	0.21310E-03	0.17765	0.031659	0.315612E-01	0.998472	0.752465E-03	
12	4692.57	0.21310E-03	0.12842	0.022886	0.164920E-01	0.998865	0.393192E-03	
13	6199.23	0.16131E-03	-0.89345E-07	0.000000	0.798246E-14	0.998865	0.190313E-15	
14	6703.79	0.14917E-03	-0.11854	0.021124	0.140512E-01	0.999201	0.335000E-03	
15	6703.79	0.14917E-03	-0.90704E-01	0.016164	0.822720E-02	0.999397	0.196148E-03	
16	9025.53	0.11080E-03	-0.79086E-01	0.014094	0.625462E-02	0.999546	0.149119E-03	
17	9025.53	0.11080E-03	0.87489E-01	0.015591	0.765427E-02	0.999729	0.182489E-03	
18	9953.03	0.10047E-03	-0.18339E-04	0.000003	0.336308E-09	0.999729	0.801806E-11	
19	11435.3	0.87449E-04	-0.61780E-01	0.011010	0.381673E-02	0.999820	0.909962E-04	
20	11435.3	0.87449E-04	-0.60752E-01	0.010826	0.369078E-02	0.999908	0.879933E-04	
21	11582.6	0.86337E-04	0.21948E-06	0.000000	0.481703E-13	0.999908	0.114845E-14	
22	14291.6	0.69971E-04	0.59801E-01	0.010657	0.357621E-02	0.999993	0.852620E-04	
23	14291.6	0.69971E-04	0.17227E-01	0.003070	0.296781E-03	1.000000	0.707569E-05	
24	14390.0	0.69493E-04	0.25890E-06	0.000000	0.670295E-13	1.000000	0.159808E-14	
sum					41.9257		0.999569	

Izgara yüzey uygulanmış namlunun modal analizinden elde edilen veriler sonuçlar bölümünde geleneksel namlu modal analizi verileri ile karşılaştırma amaçlı verilmiştir.

3.6. Namlu Harmoniği ve Namlu Dalgalanması

Namlu harmoniği bu çalışmanın çıkış noktalarından birisidir. Atış esnasında patlama enerjisi ile birlikte silah üzerinde bir titreşim meydana gelmektedir. Bu titreşim namlu üzerinde de belirli bir titreşim oluşturmaktadır. Her atışta bu harmonik etkinin korunması önemlidir. Önemli olan bu durumun nedeni ise atış kararlılığının etkilenmemesidir. Ancak namlu titreşimi ile namlu dalgalanması karıştırılmamalıdır. Harmonik etki düzenli bir harekettir. Ancak dalgalanma davranışı düzenli değildir. Harmonik etki tekrarlı atışlarda hedef doğruluğu anlamında belirli bir yaklaşım oluşturabilir. Ancak namlu dalgalanması atış doğruluğunu negatif etkileyen bir durumdur. Namlu harmoniği pratikte azaltılabilir ancak sifıra indirilemez. Dalgalanma için bu durum gerekli CAE çalışmaları ile düzenlenebilir.

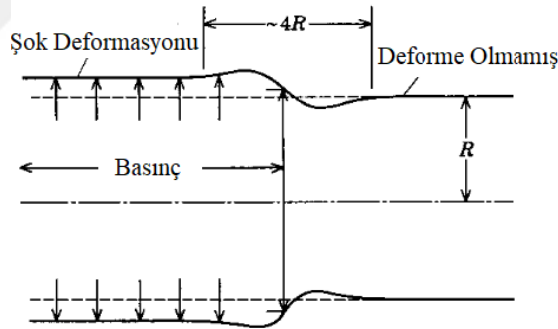
Şekil 25’de namlu harmoniğinin namlu ucundaki deplasmanı gösteren grafik gösterilmektedir. Namlu ucu deplasmanı tez içeriğinde yapılacak çalışmalarda önemli karşılaştırmalardan birisidir (Xu et al., 2019).



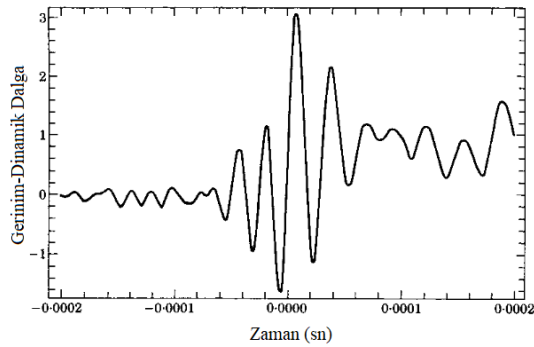
Şekil 25. Namlu Ucu (Muzzle) Deplasmanı (Xu et al., 2019)

Namlu dalgalanması etkisi namlu içerisinde hareket eden mermi çekirdeğinin hem iç balistik hem dış balistik davranışını etkiler. Bu durum ile ilgili görsel aşağıda verilmiştir (Tim, n.d.).

Bir diğer ifade ile namlularda titreşim açıklanır ise Simkins 1994 yılında yaptığı çalışmasında namlu içerisinde ki dalğanın gerinim ve zamana bağlı dinamik grafiğini ifade etmiştir. Grafik 8’de bu grafik gösterilmiştir. Çok kısa süreli gerçekleşen şok etkisinin yapı üzerindeki davranışının şeması Şekil 26’da ifade edilmiştir (Simkins, 1994).

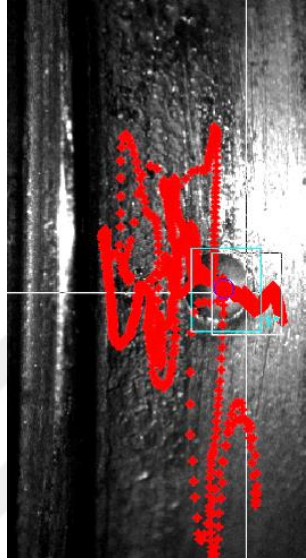


Şekil 26. Patlamaya Bağlı Olarak Namlu İçi Deformasyon (Simkins, 1994)



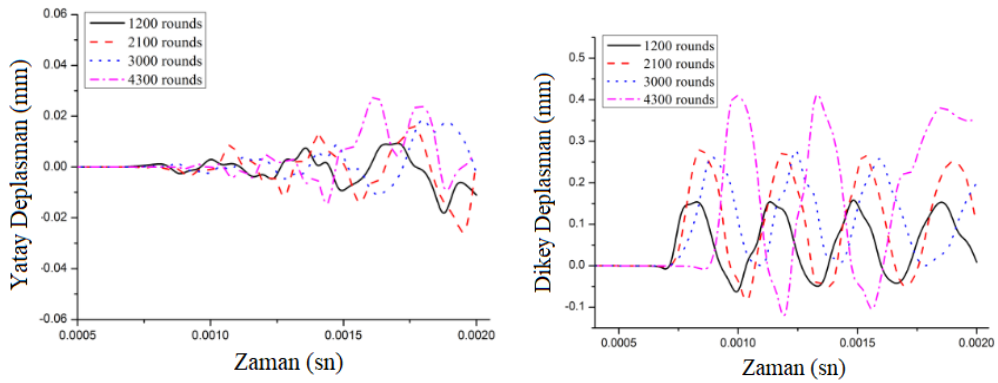
Şekil 27. Dinamik Etkide Namlu İçi Gerinim-Zaman Grafiği (Simkins, 1994)

Sava ve arkadaşları namlu dalgalanması ve atış doğruluğu konusunda yaptıkları deneysel çalışmalarında 5,56mm çapında mühimmat ile atış süresince namlu ucunun hedefteki sapmasını tespit ederek görselleştirmişlerdir. Şekil 28’de tespit edilen sapmanın görseli verilmiştir (Sava et al., 2015).



Şekil 28. Namlu Ucu Sapmanın Hedef Üzerindeki Değişimi (Sava et al., 2015)

Li vd. yaptıkları çalışmada tekrarlı atışların yapıldığı 12.7mm çapa sahip bir tüfeğin mermi çekirdeğinin yatay ve dikey yönde deplasmanının grafiğini açıklamışlardır. Bu grafiğe göre tekrarlı atışlarda tribolojik olarak şekil değiştirmiş namlunun, mermi çekirdeğinin de hareket karakteristiğinin değiştiği gözlemlenmektedir. Bu duruma bağlı olarak namlu içerisindeki titreşim durumları da değişecektir (Li et al., 2019). Şekil 29’da mermi çekirdeğinin tekrarlı atışlarda yatay ve dikey deplasmanı verilmiştir.



Şekil 29. 12,7mm Çapında Mermi Çekirdeğinin Tekrarlı Atışlarda Yatay (Solda) ve Dikey (Sağda) Deplasmanı (Li et al., 2019)

Gözlemlenen bu davranışlar tez içeriğinde yapılan sertlik artışı, ızgara yüzey çalışmaları ile iyileştirilmiş, kontrol edilebilir ve geliştirilebilir farklı etkenler sunacaktır.

3.7. Izgara&Isogrid Yüzey

Izgara veya diğer bir tabir ile isogrid yapılar ilk olarak 1960 yıllarında havacılık sektöründe verimlilik artırma çalışmaları ile gelişmeye başlamış bir konudur. Isogrid, genellikle hafif, dayanıklı ve mukavemetli malzemelerden yapılan bir ızgara desenine sahip bir yapıdır. Isogrid tasarımı, malzeme mukavemetini ve dayanıklılığını artırmak için kullanılır. Aynı zamanda ağırlığı azaltırken yapısal sağlamlığı artırmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu tür bir yapı, malzemenin optimum kullanımını sağlar ve aynı zamanda yüksek mukavemetli bir yapı elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Kompozit yapılar literatüründe sürekli olarak çalışmaları devam eden bir konudur (Meyer et al., 1973). Kiriş sertleştirilmesi olarak da (grid stiffened) isimlendirilir.

Tasarımsal olarak üçgenel veya çokgen formunun bir düzlemde, genel olarak homojen dağılımda kullanılan formdur. Ana malzemenin elastik davranışı ile uyumlu davranacak şekilde tasarlanır (Meyer et al., 1973). Aşağıda Şekil 30'da ızgara yüzey uygulanmış örnek bir türbin motorunun görseli verilmiştir. Bu sayede en büyük katkı olarak kütle optimizasyonu, sertlik optimizasyonu ve termal çalışma koşulları için ısınma ve soğuma optimizasyonu sağlanmıştır (Kopecki & Świąch, 2019).



Şekil 30. Izgara Yüzey Uygulanmış Türbin Motoru (Kopecki & Świąch, 2019)

Bilgisayar destekli uygulamalar ve yazılımların gelişmesi ile birlikte isogrid çalışmaları detay kazanarak ilerlemeler sağlanmıştır. Bazı açık kaynak kodlar ve bilgisayar yazılımları ile isogrid, uygulamalarda kullanılmaktadır. Kullanışlı ve verimli

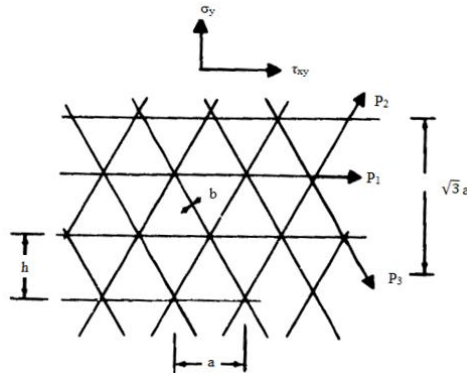
olan programlardan birside nTopology programıdır. Topolojik optimizasyon mekaniğinde çalışan bu bilgisayar yazılımı teorik konularda ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Yenilikçi çalışmalar için kullanılan araç olmaktadır. Bu tez çalışması içerisinde de geleneksel namlu yüzeyine nTopology programı ile isogrid uygulanarak inceleme ve karşılaştırma yapılacaktır. İsoGrid uygulanmış namlu ile ilgili detaylar ve görseller başlık 3.9 da paylaşılmıştır.

NTopology yazılımı ile tasarlanmış örnek bir isogrid yüzey görseli Şekil 31’de verilmiştir.



Şekil 31. Izgara Yüzey Uygulanmış Bir Uzay Aracının Dış Görünümü (Harris, 2019)

Izgara yüzeylerin gerinim ve dayanım hesaplamaları ile ilgili denklemler aşağıda işlenmiştir (Denklem 22,23,24). Izgara yüzeylerde üçgenel formların kiriş kalınlığı ve yüksekliği tasarım parametresi oluşturmaktadır. Yapılan dayanım hesaplamalarında bu değerler optimize edilerek nihai tasarıma ulaşılabilir (Meyer et al., 1973).



Şekil 32. 2D Isogrid Yüzey Görünümü (Meyer et al., 1973)

Şekil 32’de σ_x ve σ_y XY eksenlerinde ki gerilimi τ_{xy} , XY düzlemindeki kayma gerilimini ifade etmektedir. Üçgen yüksekliği olan ifade h , kiriş kalınlığı ise b , düğüm noktalarının birbirine uzaklığı ise a harfleri ile ifade edilmektedir. P_1 , P_2 ve P_3 kiriş doğrultularındaki yükü ifade etmektedir.

Denklem 20'de gerinim dönüşüm yasası ile ifade edilir ise:

$$e_i = e_x \cos^2 \theta_i + \gamma_{xy} \sin \theta_i \cos \theta_i + e_y \sin^2 \theta_i \quad (19)$$

Tek eksenli kiriş gerinimleri, kiriş koordinatlarında ifade edilir ise:

$$\begin{Bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 \\ 1 & \sqrt{3} & 3 \\ 1 & -\sqrt{3} & 3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_x \\ \gamma_{xy} \\ e_y \end{Bmatrix} \quad (20)$$

Denklem tersinir olarak ifade edilebilir:

$$\begin{Bmatrix} e_x \\ e_{xy} \\ e_y \end{Bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 2\sqrt{3} & -2\sqrt{3} \\ -1 & 2 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{Bmatrix}$$

Denklem 22'de tek eksenli kiriş yüklemeleri ifade edilmiştir.

$$P_i = b E e_i \quad (21)$$

X ve Y yönlerinde kiriş yüklerinin geometrik üçgen katsayılarına bölünmesi ızgara elemanlarda yayılmış veya ortalama değer gerinimlerini verir.

$$\sigma_x = \frac{2P_1 + (P_2 + P_3) \cos 60}{\sqrt{3}a} = \frac{4P_1 + P_2 + P_3}{2\sqrt{3}a} \quad (22)$$

$$\sigma_y = \frac{(P_2 + P_3) \sin 60}{a} = \frac{\sqrt{3}(P_2 + P_3)}{2a} \quad (23)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{(P_2 - P_3) \sin 60}{\sqrt{3}a} = \frac{P_2 - P_3}{2a} \quad (24)$$

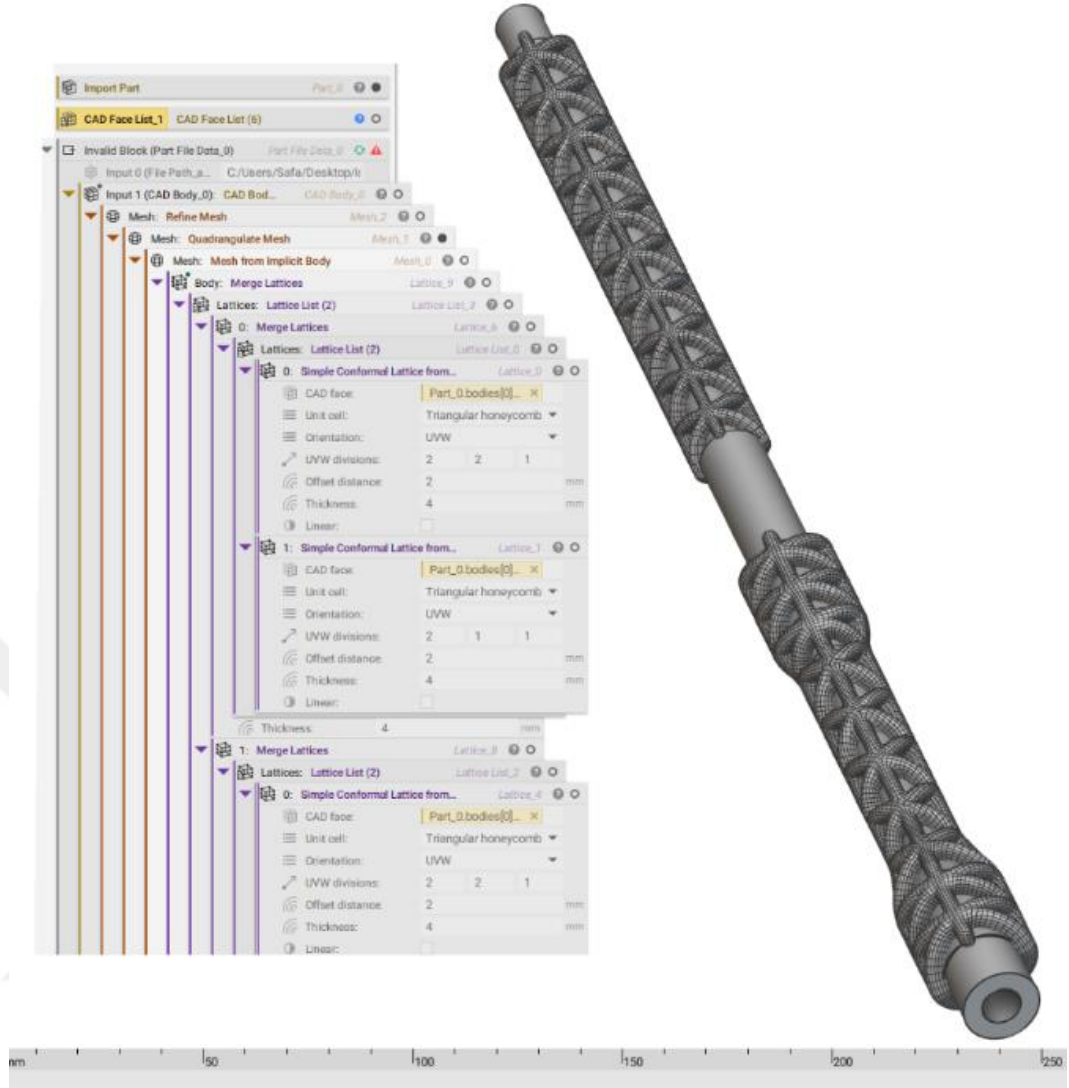
3.8. nTopology Programı

Günümüz endüstriyel çalışmalarının tamamında gerekli isterlerin yerine getirilmesi temel amaçlardır. Bu doğrultuda tüm çalışmalar belirli metotlarla optimize edilerek yapılmaktadır. Bilgisayar yazılımları bu konular için de yoğun çalışmalar ile sonuçlar göstermektedir. nTopology programı yapılan tasarımların kütle, dayanım ve verimlilik esaslarında topolojik optimizasyon algoritmaları kullanarak nihai aşamaya getirmektedir. Optimizasyon yöntemleri, elde edilen sonuçları doğrulamak ve tasarım değişikliğinin gerekliliğini belirlemek için modelde yapılan bir değişikliğe analizlerin eşlik ettiği yinelemeli bir akış mantığı ile çalışmaktadır. nTopology, tasarım değişikliği, doğrulama ve problem çözümlerini de baz alarak özel iş akışına olanak tanıyan yenilikçi bir yazılımdır (Mata, 2022).

nTopology arayüzünde iş akışları bloklar kullanılarak oluşturulmaktadır. Bloklar, girdi ve çıktı verilerini kullanarak geometrileri oluşturan veya değiştiren temel komutlardır. Bir blok, çıktı verileri üretmek için girdilere ihtiyaç duyar ve her veri bir değişkene dönüştürülebilir veya başka bir blokta girdi olarak kullanılabilir. (Mata, 2022).

Isogrid yüzey uygulanan namlunun nTopology programında iş akışı ile ilgili detaylar açıklanmıştır. Namlu CAD modeli son aşamasına kadar yinelemeli çalışmalardan geçmiştir. Bu çalışmalar kiriş yoğunluğu, kiriş kalınlığı değişkenlerinde doğrulama sağlanılana kadar çözüm devam etmiştir. İterasyonlar sonunda geleneksel namlunun ağırlığı 763 gram iken ızgara yüzey uygulanmış namlunun ağırlığı 699 grama düşürülmüştür. Burada önemli olan husus ağırlık düşüşü ile yapısal dayanımında düşmemesidir. Bu nedenle dayanım kriteri başlık 4.5’de incelenmiştir.

nTopology programına geleneksel namlu CAD dosyası aktarılmıştır. Geleneksel namlunun işlem yapılacak yüzeyleri tanıtılmıştır. Bu yüzeyler üzerine topolojik bir yapıya sahip olan ve aynı zamanda ızgara yüzeyli yapıyı oluşturan uyumlu Lattice yapı uygulanmıştır. Analiz sürecince namluda ayrıştırılmış parçalar için ağ yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan ağ yapısı algoritmada bulunan iyileştirme fonksiyonları ile kullanılabilir hale getirilmiştir. Şekil 33’de işlem akışı ve blokların detaylarını içeren görsel verilmiştir.



Şekil 33. nTopology Bloklar ve Izgara (Isogrid) Yüzey Uygulanmış Namlu Görşeli

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Geleneksel Namlu Modal Analiz Sonuçları

Geleneksel namlu modal analizinde X, Y, Z, ROTX, ROTY ve ROTZ eksenlerinde kütle katılım oranları elde edilmiştir (Tablo 10-16). Ortalama kütle katılım %92 seviyelerindedir. X ekseninde kütle katılım oranlarının düşük olmasının nedeni koordinat düzleminde X ekseninin namlu doğrultusu boyunca olmasından kaynaklanmaktadır. Tüm eksenler için efektif kütleler elde edilmiştir. Geleneksel namlunun modal analizinde efektif kütle ise %91.2'dir.

Tablo 10. Geleneksel Namlu X Eksen Kütle Katılım Oranı Tablosu

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** X DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	82.8066	0.12076E-01	0.0000	0.000000	0.00000	0.00000	0.00000
2	82.8069	0.12076E-01	0.0000	0.000000	0.00000	0.00000	0.00000
3	566.967	0.17638E-02	0.0000	0.000000	0.00000	0.00000	0.00000
4	566.968	0.17638E-02	0.0000	0.000000	0.00000	0.00000	0.00000
5	1541.80	0.64859E-03	0.0000	0.000000	0.00000	0.00000	0.00000
6	1541.80	0.64859E-03	-0.67316E-09	0.000000	0.453144E-18	0.726041E-15	0.596899E-15
7	1934.65	0.51689E-03	0.68503E-08	0.000000	0.469269E-16	0.759136E-13	0.618138E-13
8	3002.25	0.33308E-03	0.12808E-08	0.000000	0.164039E-17	0.785419E-13	0.216078E-14
9	3002.25	0.33308E-03	0.35869E-08	0.000000	0.128657E-16	0.991557E-13	0.169472E-13
10	3172.68	0.31519E-03	0.24104E-01	1.000000	0.581026E-03	0.930937	0.765349
11	4692.57	0.21310E-03	0.0000	0.000000	0.00000	0.930937	0.00000
12	4692.57	0.21310E-03	0.0000	0.000000	0.00000	0.930937	0.00000
13	6199.23	0.16131E-03	-0.15274E-08	0.000000	0.233294E-17	0.930937	0.307303E-14
14	6703.79	0.14917E-03	0.0000	0.000000	0.00000	0.930937	0.00000
15	6703.79	0.14917E-03	0.59683E-09	0.000000	0.356210E-18	0.930937	0.469213E-15
16	9025.53	0.11080E-03	0.0000	0.000000	0.00000	0.930937	0.00000
17	9025.53	0.11080E-03	-0.68624E-09	0.000000	0.470926E-18	0.930937	0.620321E-15
18	9953.03	0.10047E-03	-0.65654E-02	0.272372	0.431044E-04	1.00000	0.567788E-01
19	11435.3	0.87449E-04	0.0000	0.000000	0.00000	1.00000	0.00000
20	11435.3	0.87449E-04	0.0000	0.000000	0.00000	1.00000	0.00000
21	11582.6	0.86337E-04	0.19691E-08	0.000000	0.387728E-17	1.00000	0.510730E-14
22	14291.6	0.69971E-04	0.0000	0.000000	0.00000	1.00000	0.00000
23	14291.6	0.69971E-04	0.10894E-08	0.000000	0.118687E-17	1.00000	0.156339E-14
24	14390.0	0.69493E-04	0.16685E-08	0.000000	0.278394E-17	1.00000	0.366711E-14
sum					0.624131E-03		0.822128

Tablo 11. Geleneksel Namlu Y Ekseni Kütle Katılım Oranı Tablosu

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** Y DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC. FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	82.8066	0.12076E-01	0.18511E-01	1.000000	0.342658E-03	0.494881	0.451362
2	82.8069	0.12076E-01	0.97461E-02	0.526502	0.949864E-04	0.632064	0.125120
3	566.967	0.17638E-02	-0.98181E-02	0.530394	0.963958E-04	0.771283	0.126976
4	566.968	0.17638E-02	-0.53866E-02	0.290996	0.290159E-04	0.813189	0.382208E-01
5	1541.80	0.64859E-03	0.56185E-02	0.303521	0.315673E-04	0.858779	0.415817E-01
6	1541.80	0.64859E-03	0.32824E-02	0.177323	0.107743E-04	0.874340	0.141923E-01
7	1934.65	0.51689E-03	-0.88608E-09	0.000000	0.785142E-18	0.874340	0.103422E-14
8	3002.25	0.33308E-03	-0.42497E-02	0.229576	0.180599E-04	0.900423	0.237892E-01
9	3002.25	0.33308E-03	-0.24906E-02	0.134546	0.620298E-05	0.909382	0.817080E-02
10	3172.68	0.31519E-03	0.71919E-06	0.000039	0.517233E-12	0.909382	0.681318E-09
11	4692.57	0.21310E-03	0.37820E-02	0.204313	0.143039E-04	0.930040	0.188416E-01
12	4692.57	0.21310E-03	0.27341E-02	0.147701	0.747532E-05	0.940836	0.984678E-02
13	6199.23	0.16131E-03	-0.19790E-08	0.000000	0.391638E-17	0.940836	0.515881E-14
14	6703.79	0.14917E-03	-0.30167E-02	0.162970	0.910076E-05	0.953980	0.119879E-01
15	6703.79	0.14917E-03	-0.23085E-02	0.124710	0.532919E-05	0.961676	0.701981E-02
16	9025.53	0.11080E-03	-0.23533E-02	0.127127	0.553780E-05	0.969674	0.729459E-02
17	9025.53	0.11080E-03	0.26032E-02	0.140632	0.677690E-05	0.979462	0.892679E-02
18	9953.03	0.10047E-03	-0.19446E-05	0.000105	0.378136E-11	0.979462	0.498095E-08
19	11435.3	0.87449E-04	-0.20891E-02	0.112857	0.436435E-05	0.985765	0.574888E-02
20	11435.3	0.87449E-04	-0.20541E-02	0.110967	0.421937E-05	0.991859	0.555791E-02
21	11582.6	0.86337E-04	0.72985E-08	0.000000	0.532674E-16	0.991859	0.701658E-13
22	14291.6	0.69971E-04	0.22816E-02	0.123256	0.520565E-05	0.999377	0.685708E-02
23	14291.6	0.69971E-04	0.65692E-03	0.035488	0.431543E-06	1.000000	0.568445E-03
24	14390.0	0.69493E-04	0.97145E-08	0.000001	0.943708E-16	1.000000	0.124309E-12
sum					0.692406E-03		0.912063

Tablo 12. Geleneksel Namlu Z Ekseni Kütle Katılım Oranı Tablosu

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** Z DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC. FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	82.8066	0.12076E-01	-0.97461E-02	0.526501	0.949866E-04	0.137180	0.125120
2	82.8069	0.12076E-01	0.18511E-01	1.000000	0.342660E-03	0.632051	0.451365
3	566.967	0.17638E-02	0.53867E-02	0.291000	0.290168E-04	0.673957	0.382220E-01
4	566.968	0.17638E-02	-0.98184E-02	0.530407	0.964009E-04	0.813179	0.126983
5	1541.80	0.64859E-03	-0.32827E-02	0.177334	0.107758E-04	0.828742	0.141943E-01
6	1541.80	0.64859E-03	0.56192E-02	0.303557	0.315750E-04	0.874342	0.415917E-01
7	1934.65	0.51689E-03	0.11344E-08	0.000000	0.128685E-17	0.874342	0.169509E-14
8	3002.25	0.33308E-03	0.24909E-02	0.134565	0.620482E-05	0.883304	0.817323E-02
9	3002.25	0.33308E-03	-0.42508E-02	0.229636	0.180695E-04	0.909399	0.238018E-01
10	3172.68	0.31519E-03	-0.29745E-07	0.000002	0.884760E-15	0.909399	0.116544E-11
11	4692.57	0.21310E-03	-0.27347E-02	0.147733	0.747858E-05	0.920200	0.985106E-02
12	4692.57	0.21310E-03	0.37834E-02	0.204386	0.143141E-04	0.940873	0.188551E-01
13	6199.23	0.16131E-03	0.000000	0.000000	0.000000	0.940873	0.000000
14	6703.79	0.14917E-03	0.23089E-02	0.124732	0.533110E-05	0.948572	0.702233E-02
15	6703.79	0.14917E-03	-0.30176E-02	0.163017	0.910605E-05	0.961723	0.119948E-01
16	9025.53	0.11080E-03	0.26031E-02	0.140626	0.677635E-05	0.971509	0.892606E-02
17	9025.53	0.11080E-03	0.23531E-02	0.127119	0.553710E-05	0.979506	0.729368E-02
18	9953.03	0.10047E-03	0.82403E-07	0.000004	0.679025E-14	0.979506	0.894437E-11
19	11435.3	0.87449E-04	0.20531E-02	0.110911	0.421515E-05	0.985593	0.555235E-02
20	11435.3	0.87449E-04	-0.20875E-02	0.112769	0.435756E-05	0.991887	0.573994E-02
21	11582.6	0.86337E-04	-0.11681E-08	0.000000	0.136445E-17	0.991887	0.179731E-14
22	14291.6	0.69971E-04	-0.65664E-03	0.035473	0.431170E-06	0.992509	0.567953E-03
23	14291.6	0.69971E-04	0.22774E-02	0.123031	0.518675E-05	1.000000	0.683219E-02
24	14390.0	0.69493E-04	-0.33613E-08	0.000000	0.112984E-16	1.000000	0.148826E-13
sum					0.692423E-03		0.912086

Tablo 13. Geleneksel Namlu ROTZ Eksenine Kütle Katılım Oranı Tablosu

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION *****ROTZ DIRECTION

MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	82.8066	0.12076E-01	0.14761E-07	0.000000	0.217872E-15	0.725669E-14	0.585587E-14
2	82.8069	0.12076E-01	0.10337E-07	0.000000	0.106861E-15	0.108159E-13	0.287215E-14
3	566.967	0.17638E-02	-0.98885E-07	0.000001	0.977834E-14	0.336504E-12	0.262817E-12
4	566.968	0.17638E-02	-0.26513E-07	0.000000	0.702928E-15	0.359916E-12	0.188929E-13
5	1541.80	0.64859E-03	0.20791E-06	0.000001	0.432283E-13	0.179972E-11	0.116187E-11
6	1541.80	0.64859E-03	0.10634E-06	0.000001	0.113080E-13	0.217636E-11	0.303931E-12
7	1934.65	0.51689E-03	-0.16172	1.000000	0.261542E-01	0.871121	0.702961
8	3002.25	0.33308E-03	-0.36693E-06	0.000002	0.134634E-12	0.871121	0.361863E-11
9	3002.25	0.33308E-03	-0.14408E-06	0.000001	0.207596E-13	0.871121	0.557966E-12
10	3172.68	0.31519E-03	-0.45885E-06	0.000003	0.210544E-12	0.871121	0.565891E-11
11	4692.57	0.21310E-03	0.49171E-06	0.000003	0.241778E-12	0.871121	0.649839E-11
12	4692.57	0.21310E-03	0.23656E-06	0.000001	0.559617E-13	0.871121	0.150411E-11
13	6199.23	0.16131E-03	0.35429E-01	0.219073	0.125523E-02	0.912929	0.337373E-01
14	6703.79	0.14917E-03	-0.30777E-06	0.000002	0.947248E-13	0.912929	0.254597E-11
15	6703.79	0.14917E-03	-0.16326E-06	0.000001	0.266552E-13	0.912929	0.716426E-12
16	9025.53	0.11080E-03	0.42209E-07	0.000000	0.178160E-14	0.912929	0.478849E-13
17	9025.53	0.11080E-03	-0.35039E-07	0.000000	0.122774E-14	0.912929	0.329987E-13
18	9953.03	0.10047E-03	0.13560E-05	0.000008	0.183869E-11	0.912929	0.494194E-10
19	11435.3	0.87449E-04	0.51124E-06	0.000003	0.261365E-12	0.912929	0.702485E-11
20	11435.3	0.87449E-04	0.35459E-06	0.000002	0.125731E-12	0.912929	0.337934E-11
21	11582.6	0.86337E-04	-0.35553E-01	0.219838	0.126400E-02	0.955029	0.339732E-01
22	14291.6	0.69971E-04	-0.12862E-05	0.000008	0.165421E-11	0.955029	0.444609E-10
23	14291.6	0.69971E-04	-0.17558E-06	0.000001	0.308277E-13	0.955029	0.828571E-12
24	14390.0	0.69493E-04	-0.36745E-01	0.227210	0.135019E-02	1.000000	0.362898E-01
sum					0.300237E-01		0.806961

Tablo 14. Geleneksel Namlu ROTY Eksenine Kütle Katılım Oranı Tablosu

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION *****ROTY DIRECTION

MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	82.8066	0.12076E-01	2.9544	0.526502	8.72871	0.208194	0.208105
2	82.8069	0.12076E-01	-5.6115	1.000000	31.4884	0.959246	0.750728
3	566.967	0.17638E-02	-0.54784	0.097630	0.300133	0.966405	0.715560E-02
4	566.968	0.17638E-02	0.99855	0.177949	0.997103	0.990188	0.237723E-01
5	1541.80	0.64859E-03	0.24463	0.043595	0.598455E-01	0.991615	0.142680E-02
6	1541.80	0.64859E-03	-0.41875	0.074624	0.175352	0.995797	0.418063E-02
7	1934.65	0.51689E-03	-0.11368E-06	0.000000	0.129231E-13	0.995797	0.308106E-15
8	3002.25	0.33308E-03	-0.14352	0.025576	0.205970E-01	0.996289	0.491063E-03
9	3002.25	0.33308E-03	0.24490	0.043643	0.599772E-01	0.997719	0.142994E-02
10	3172.68	0.31519E-03	0.24685E-06	0.000000	0.609346E-13	0.997719	0.145277E-14
11	4692.57	0.21310E-03	0.12843	0.022887	0.164934E-01	0.998113	0.393226E-03
12	4692.57	0.21310E-03	-0.17767	0.031662	0.315658E-01	0.998866	0.752573E-03
13	6199.23	0.16131E-03	0.51879E-08	0.000000	0.269140E-16	0.998866	0.641668E-18
14	6703.79	0.14917E-03	-0.90708E-01	0.016165	0.822791E-02	0.999062	0.196165E-03
15	6703.79	0.14917E-03	0.11855	0.021126	0.140531E-01	0.999397	0.335046E-03
16	9025.53	0.11080E-03	-0.87488E-01	0.015591	0.765409E-02	0.999580	0.182484E-03
17	9025.53	0.11080E-03	-0.79085E-01	0.014093	0.625441E-02	0.999729	0.149114E-03
18	9953.03	0.10047E-03	-0.77290E-06	0.000000	0.597369E-12	0.999729	0.142421E-13
19	11435.3	0.87449E-04	-0.60742E-01	0.010825	0.368960E-02	0.999817	0.879652E-04
20	11435.3	0.87449E-04	0.61764E-01	0.011007	0.381483E-02	0.999908	0.909509E-04
21	11582.6	0.86337E-04	0.34957E-07	0.000000	0.122196E-14	0.999908	0.291334E-16
22	14291.6	0.69971E-04	0.17225E-01	0.003070	0.296688E-03	0.999915	0.707346E-05
23	14291.6	0.69971E-04	-0.59762E-01	0.010650	0.357154E-02	1.000000	0.851506E-04
24	14390.0	0.69493E-04	0.91674E-07	0.000000	0.840407E-14	1.000000	0.200365E-15
sum					41.9258		0.999569

Tablo 15. Geleneksel Namlu ROTZ Eksenine Kütle Katılım Oranı Tablosu

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION *****ROTZ DIRECTION

MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	82.8066	0.12076E-01	5.6115	1.000000	31.4884	0.751052	0.750728
2	82.8069	0.12076E-01	2.9544	0.526502	8.72871	0.959247	0.208105
3	566.967	0.17638E-02	-0.99855	0.177949	0.997106	0.983029	0.237724E-01
4	566.968	0.17638E-02	-0.54784	0.097629	0.300131	0.990188	0.715554E-02
5	1541.80	0.64859E-03	0.41874	0.074623	0.175346	0.994370	0.418049E-02
6	1541.80	0.64859E-03	0.24463	0.043595	0.598446E-01	0.995798	0.142678E-02
7	1934.65	0.51689E-03	-0.48410E-07	0.000000	0.234350E-14	0.995798	0.558724E-16
8	3002.25	0.33308E-03	-0.24489	0.043641	0.599721E-01	0.997228	0.142982E-02
9	3002.25	0.33308E-03	-0.14351	0.025575	0.205960E-01	0.997719	0.491038E-03
10	3172.68	0.31519E-03	0.68304E-05	0.000001	0.466543E-10	0.997719	0.111230E-11
11	4692.57	0.21310E-03	0.17765	0.031659	0.315612E-01	0.998472	0.752465E-03
12	4692.57	0.21310E-03	0.12842	0.022886	0.164920E-01	0.998865	0.393192E-03
13	6199.23	0.16131E-03	-0.89345E-07	0.000000	0.798246E-14	0.998865	0.190313E-15
14	6703.79	0.14917E-03	-0.11854	0.021124	0.140512E-01	0.999201	0.335000E-03
15	6703.79	0.14917E-03	-0.90704E-01	0.016164	0.822720E-02	0.999397	0.196148E-03
16	9025.53	0.11080E-03	-0.79086E-01	0.014094	0.625462E-02	0.999546	0.149119E-03
17	9025.53	0.11080E-03	0.87489E-01	0.015591	0.765427E-02	0.999729	0.182489E-03
18	9953.03	0.10047E-03	-0.18339E-04	0.000003	0.336308E-09	0.999729	0.801806E-11
19	11435.3	0.87449E-04	-0.61780E-01	0.011010	0.381673E-02	0.999820	0.909962E-04
20	11435.3	0.87449E-04	-0.60752E-01	0.010826	0.369078E-02	0.999908	0.879933E-04
21	11582.6	0.86337E-04	0.21948E-06	0.000000	0.481703E-13	0.999908	0.114845E-14
22	14291.6	0.69971E-04	0.59801E-01	0.010657	0.357621E-02	0.999993	0.852620E-04
23	14291.6	0.69971E-04	0.17227E-01	0.003070	0.296781E-03	1.000000	0.707569E-05
24	14390.0	0.69493E-04	0.25890E-06	0.000000	0.670295E-13	1.000000	0.159808E-14
sum					41.9257		0.999569

Tablo 16. Geleneksel Namlu Modal Kütle, Kinetik Enerjiler ve Efektif Kütle Tablosu

***** MODAL MASSES, KINETIC ENERGIES, AND TRANSLATIONAL EFFECTIVE MASSES SUMMARY *****

MODE	FREQUENCY	MODAL MASS	KENE	X-DIR	EFFECTIVE MASS					
					RATIO%	Y-DIR	RATIO%	Z-DIR	RATIO%	
1	82.81	0.2153E-03	29.14		0.000	0.00	0.3427E-03	45.14	0.9499E-04	12.51
2	82.81	0.2153E-03	29.14		0.000	0.00	0.9499E-04	12.51	0.3427E-03	45.14
3	567.0	0.1814E-03	1151.		0.000	0.00	0.9640E-04	12.70	0.2902E-04	3.82
4	567.0	0.1814E-03	1151.		0.000	0.00	0.2902E-04	3.82	0.9640E-04	12.70
5	1542.	0.1730E-03	8119.		0.000	0.00	0.3157E-04	4.16	0.1078E-04	1.42
6	1542.	0.1730E-03	8119.		0.4531E-18	0.00	0.1077E-04	1.42	0.3157E-04	4.16
7	1935.	0.2160E-03	0.1596E+05		0.4693E-16	0.00	0.7851E-18	0.00	0.1287E-17	0.00
8	3002.	0.1545E-03	0.2749E+05		0.1640E-17	0.00	0.1806E-04	2.38	0.6205E-05	0.82
9	3002.	0.1545E-03	0.2749E+05		0.1287E-16	0.00	0.6203E-05	0.82	0.1807E-04	2.38
10	3173.	0.3729E-03	0.7410E+05		0.5810E-03	76.53	0.5172E-12	0.00	0.8848E-15	0.00
11	4693.	0.1828E-03	0.7945E+05		0.000	0.00	0.1430E-04	1.88	0.7479E-05	0.99
12	4693.	0.1828E-03	0.7945E+05		0.000	0.00	0.7475E-05	0.98	0.1431E-04	1.89
13	6199.	0.1485E-03	0.1127E+06		0.2333E-17	0.00	0.3916E-17	0.00	0.000	0.00
14	6704.	0.1536E-03	0.1363E+06		0.000	0.00	0.9101E-05	1.20	0.5331E-05	0.70
15	6704.	0.1536E-03	0.1363E+06		0.3562E-18	0.00	0.5329E-05	0.70	0.9106E-05	1.20
16	9026.	0.1693E-03	0.2722E+06		0.000	0.00	0.5538E-05	0.73	0.6776E-05	0.89
17	9026.	0.1693E-03	0.2722E+06		0.4709E-18	0.00	0.6777E-05	0.89	0.5537E-05	0.73
18	9953.	0.2907E-03	0.5685E+06		0.4310E-04	5.68	0.3781E-11	0.00	0.6790E-14	0.00
19	0.1144E+05	0.1546E-03	0.3991E+06		0.000	0.00	0.4364E-05	0.57	0.4215E-05	0.56
20	0.1144E+05	0.1546E-03	0.3991E+06		0.000	0.00	0.4219E-05	0.56	0.4358E-05	0.57
21	0.1158E+05	0.1297E-03	0.3435E+06		0.3877E-17	0.00	0.5327E-16	0.00	0.1364E-17	0.00
22	0.1429E+05	0.6699E-04	0.2701E+06		0.000	0.00	0.5206E-05	0.69	0.4312E-06	0.06
23	0.1429E+05	0.6699E-04	0.2701E+06		0.1187E-17	0.00	0.4315E-06	0.06	0.5187E-05	0.68
24	0.1439E+05	0.1231E-03	0.5031E+06		0.2784E-17	0.00	0.9437E-16	0.00	0.1130E-16	0.00
sum					0.6241E-03	82.21	0.6924E-03	91.21	0.6924E-03	91.21

4.2. Izgara Yüzey Namlun Modal Analiz Sonuçları

Izgara yüzey uygulanmış namlunun modal analizinde X, Y, Z, ROTX, ROTY ve ROTZ eksenlerinde kütle katılım oranları elde edilmiştir (Tablo 17-23). Ortalama kütle katılım %90,3 seviyelerindedir. X ekseninde kütle katılım oranlarının düşük olmasının nedeni koordinat düzleminde X ekseninin namlu doğrultusu boyunca olmasından

kaynaklanmaktadır. Tüm eksenler için efektif kütleler elde edilmiştir. Izgara yüzey uygulanmış namlunun modal analizinde efektif kütle ise %90.5'dir.

Tablo 17. Izgara Yüzey Uygulanmış Namlunun X Eksenli Kütle Katılım Oranı Tablosu

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** X DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	140.190	0.71332E-02	-0.53626E-06	0.000024	0.287574E-12	0.519286E-09	0.415651E-09
2	140.984	0.70930E-02	0.24458E-06	0.000011	0.598192E-13	0.627305E-09	0.864609E-10
3	605.678	0.16510E-02	0.15692E-05	0.000070	0.246239E-11	0.507376E-08	0.355906E-08
4	608.665	0.16429E-02	-0.25218E-05	0.000113	0.635961E-11	0.165576E-07	0.919199E-08
5	1460.64	0.68463E-03	-0.20387E-05	0.000091	0.415611E-11	0.240625E-07	0.600712E-08
6	1462.56	0.68373E-03	-0.54540E-06	0.000024	0.297465E-12	0.245997E-07	0.429948E-09
7	2700.47	0.37031E-03	-0.92074E-05	0.000413	0.847762E-10	0.177684E-06	0.122533E-06
8	2703.32	0.36992E-03	0.93997E-05	0.000422	0.883547E-10	0.337230E-06	0.127705E-06
9	3203.34	0.31217E-03	0.22295E-01	1.000000	0.497080E-03	0.897602	0.718464
10	4223.79	0.23675E-03	0.17801E-05	0.000080	0.316868E-11	0.897602	0.457992E-08
11	4226.73	0.23659E-03	-0.13065E-04	0.000586	0.170701E-09	0.897602	0.246726E-06
12	5055.74	0.19780E-03	0.92262E-05	0.000414	0.851230E-10	0.897602	0.123034E-06
13	5936.02	0.16846E-03	-0.33023E-05	0.000148	0.109049E-10	0.897602	0.157616E-07
14	5941.78	0.16830E-03	0.25539E-04	0.001146	0.652264E-09	0.897603	0.942764E-06
15	6971.48	0.14344E-03	-0.68280E-06	0.000031	0.466209E-12	0.897603	0.473845E-09
16	8009.33	0.12485E-03	-0.23590E-04	0.001058	0.556500E-09	0.897604	0.804348E-06
17	8013.37	0.12479E-03	-0.39002E-05	0.000175	0.152118E-10	0.897604	0.219867E-07
18	9169.33	0.10906E-03	-0.75300E-02	0.337741	0.567015E-04	0.999993	0.819547E-01
19	10371.8	0.96415E-04	0.10749E-04	0.000482	0.115545E-09	0.999993	0.167005E-06
20	10374.7	0.96388E-04	0.28169E-04	0.001263	0.793488E-09	0.999995	0.114688E-05
21	11131.1	0.89838E-04	-0.73034E-05	0.000328	0.533396E-10	0.999995	0.770956E-07
22	12702.7	0.78723E-04	-0.12290E-04	0.000551	0.151035E-09	0.999995	0.218302E-06
23	12724.1	0.78591E-04	0.61495E-06	0.000028	0.378158E-12	0.999995	0.546579E-09
24	13964.6	0.71610E-04	0.53095E-04	0.002381	0.281911E-08	1.000000	0.407466E-05
sum					0.553787E-03		0.800427

Tablo 18. Izgara Yüzey Uygulanmış Namlunun Y Eksenli Kütle Katılım Oranı Tablosu

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** Y DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	140.190	0.71332E-02	0.10758E-01	0.647310	0.115726E-03	0.185101	0.167267
2	140.984	0.70930E-02	0.16619E-01	1.000000	0.276188E-03	0.626860	0.399194
3	605.678	0.16510E-02	-0.35841E-02	0.215667	0.128461E-04	0.647407	0.185674E-01
4	608.665	0.16429E-02	-0.89884E-02	0.540852	0.807907E-04	0.776630	0.116773
5	1460.64	0.68463E-03	0.32081E-02	0.193042	0.102922E-04	0.793093	0.148761E-01
6	1462.56	0.68373E-03	0.59099E-02	0.355615	0.349273E-04	0.848958	0.504829E-01
7	2700.47	0.37031E-03	-0.41597E-02	0.250299	0.173030E-04	0.876634	0.250093E-01
8	2703.32	0.36992E-03	0.33692E-02	0.202734	0.113516E-04	0.894791	0.164073E-01
9	3203.34	0.31217E-03	-0.32291E-05	0.000194	0.104272E-10	0.894791	0.150712E-07
10	4223.79	0.23675E-03	0.38857E-02	0.233814	0.150989E-04	0.918941	0.218235E-01
11	4226.73	0.23659E-03	-0.29937E-02	0.180139	0.896232E-05	0.933276	0.129539E-01
12	5055.74	0.19780E-03	-0.24137E-04	0.001452	0.582614E-09	0.933277	0.842093E-06
13	5936.02	0.16846E-03	-0.41255E-02	0.248240	0.170196E-04	0.960500	0.245997E-01
14	5941.78	0.16830E-03	0.70013E-03	0.042128	0.490178E-06	0.961284	0.708490E-03
15	6971.48	0.14344E-03	-0.26501E-04	0.001595	0.702279E-09	0.961285	0.101505E-05
16	8009.33	0.12485E-03	0.44426E-03	0.026732	0.197367E-06	0.961601	0.285269E-03
17	8013.37	0.12479E-03	0.31564E-02	0.189926	0.996266E-05	0.977536	0.143997E-01
18	9169.33	0.10906E-03	-0.10155E-04	0.000611	0.103133E-09	0.977536	0.149066E-06
19	10371.8	0.96415E-04	-0.27277E-02	0.164135	0.744060E-05	0.989437	0.107544E-01
20	10374.7	0.96388E-04	0.10931E-02	0.065773	0.119482E-05	0.991348	0.172696E-02
21	11131.1	0.89838E-04	0.61081E-04	0.003675	0.373085E-08	0.991354	0.539246E-05
22	12702.7	0.78723E-04	0.25803E-03	0.015526	0.665780E-07	0.991461	0.962299E-04
23	12724.1	0.78591E-04	0.22930E-02	0.137975	0.525786E-05	0.999871	0.759955E-02
24	13964.6	0.71610E-04	-0.28439E-03	0.017112	0.808756E-07	1.000000	0.116895E-03
sum					0.625202E-03		0.903648

Tablo 19. Izgara Yüzey Uygulanmış Namlunun Z Eksenine Kütle Katılım Oranı Tablosu

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** Z DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	140.190	0.71332E-02	0.16597E-01	1.000000	0.275476E-03	0.440078	0.398165
2	140.984	0.70930E-02	-0.10749E-01	0.647651	0.115549E-03	0.624670	0.167011
3	605.678	0.16510E-02	-0.90415E-02	0.544751	0.817486E-04	0.755264	0.118157
4	608.665	0.16429E-02	0.35913E-02	0.216375	0.128972E-04	0.775868	0.186413E-01
5	1460.64	0.68463E-03	0.59265E-02	0.357070	0.351229E-04	0.831977	0.507656E-01
6	1462.56	0.68373E-03	-0.31868E-02	0.192006	0.101558E-04	0.848201	0.146789E-01
7	2700.47	0.37031E-03	-0.34055E-02	0.205180	0.115972E-04	0.866728	0.167623E-01
8	2703.32	0.36992E-03	-0.41331E-02	0.249018	0.170823E-04	0.894018	0.246903E-01
9	3203.34	0.31217E-03	-0.50101E-05	0.000302	0.251015E-10	0.894018	0.362809E-07
10	4223.79	0.23675E-03	0.30431E-02	0.183345	0.926020E-05	0.908811	0.133844E-01
11	4226.73	0.23659E-03	0.38478E-02	0.231831	0.148056E-04	0.932463	0.213996E-01
12	5055.74	0.19780E-03	0.52116E-05	0.000314	0.271603E-10	0.932463	0.392567E-07
13	5936.02	0.16846E-03	-0.77832E-03	0.046894	0.605781E-06	0.933431	0.875578E-03
14	5941.78	0.16830E-03	-0.41497E-02	0.250020	0.172200E-04	0.960940	0.248894E-01
15	6971.48	0.14344E-03	0.65063E-05	0.000392	0.423322E-10	0.960940	0.611857E-07
16	8009.33	0.12485E-03	0.31827E-02	0.191759	0.101297E-04	0.977123	0.146411E-01
17	8013.37	0.12479E-03	-0.36595E-03	0.022048	0.133916E-06	0.977337	0.193558E-03
18	9169.33	0.10906E-03	-0.48844E-05	0.000294	0.238576E-10	0.977337	0.344831E-07
19	10371.8	0.96415E-04	-0.11907E-02	0.071738	0.141771E-05	0.979601	0.204912E-02
20	10374.7	0.96388E-04	-0.27293E-02	0.164442	0.744918E-05	0.991502	0.107668E-01
21	11131.1	0.89838E-04	0.40440E-05	0.000244	0.163541E-10	0.991502	0.236378E-07
22	12702.7	0.78723E-04	0.22988E-02	0.138503	0.528449E-05	0.999944	0.763804E-02
23	12724.1	0.78591E-04	-0.18218E-03	0.010977	0.331907E-07	0.999997	0.479729E-04
24	13964.6	0.71610E-04	0.45160E-04	0.002721	0.203943E-08	1.000000	0.294773E-05
sum					0.625971E-03		0.904760

Tablo 20. Izgara Yüzey Uygulanmış Namlunun ROTX Eksenine Kütle Katılım Oranı Tablosu

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION *****ROTX DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	140.190	0.71332E-02	0.10940E-04	0.000072	0.119678E-09	0.409685E-08	0.350007E-08
2	140.984	0.70930E-02	-0.26682E-04	0.000176	0.711948E-09	0.284685E-07	0.208215E-07
3	605.678	0.16510E-02	0.38385E-04	0.000253	0.147342E-08	0.789071E-07	0.430912E-07
4	608.665	0.16429E-02	-0.86911E-07	0.000001	0.755347E-14	0.789073E-07	0.220907E-12
5	1460.64	0.68463E-03	0.30152E-04	0.000198	0.909140E-09	0.110029E-06	0.265885E-07
6	1462.56	0.68373E-03	-0.19351E-04	0.000127	0.374474E-09	0.122848E-06	0.109518E-07
7	2700.47	0.37031E-03	-0.62811E-04	0.000413	0.394524E-08	0.257903E-06	0.115381E-06
8	2703.32	0.36992E-03	-0.26093E-04	0.000172	0.680864E-09	0.281211E-06	0.199124E-07
9	3203.34	0.31217E-03	-0.43886E-04	0.000289	0.192602E-08	0.347143E-06	0.563279E-07
10	4223.79	0.23675E-03	0.63313E-04	0.000417	0.400849E-08	0.484363E-06	0.117231E-06
11	4226.73	0.23659E-03	-0.84781E-04	0.000558	0.718783E-08	0.730420E-06	0.210214E-06
12	5055.74	0.19780E-03	0.15193	1.000000	0.230832E-01	0.790192	0.675085
13	5936.02	0.16846E-03	-0.18180E-03	0.001197	0.330515E-07	0.790193	0.966617E-06
14	5941.78	0.16830E-03	0.19935E-04	0.000131	0.397406E-09	0.790193	0.116224E-07
15	6971.48	0.14344E-03	0.99646E-02	0.065586	0.992930E-04	0.793593	0.290390E-02
16	8009.33	0.12485E-03	0.83184E-04	0.000548	0.691966E-08	0.793593	0.202371E-06
17	8013.37	0.12479E-03	-0.17387E-04	0.000114	0.302316E-09	0.793593	0.884146E-08
18	9169.33	0.10906E-03	-0.65059E-04	0.000428	0.423271E-08	0.793593	0.123789E-06
19	10371.8	0.96415E-04	-0.66212E-04	0.000436	0.438399E-08	0.793593	0.128213E-06
20	10374.7	0.96388E-04	-0.17773E-03	0.001170	0.315893E-07	0.793594	0.923854E-06
21	11131.1	0.89838E-04	-0.25175E-01	0.165703	0.633805E-03	0.815291	0.185361E-01
22	12702.7	0.78723E-04	0.25046E-03	0.001649	0.627311E-07	0.815293	0.183462E-05
23	12724.1	0.78591E-04	0.67774E-04	0.000446	0.459331E-08	0.815293	0.134335E-06
24	13964.6	0.71610E-04	0.73455E-01	0.483476	0.539568E-02	1.000000	0.157801
sum					0.292121E-01		0.854331

Tablo 21. Izgara Yüzey Uygulanmış Namlunun ROTY Eksenine Kütle Katılım Oranı Tablosu

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION *****ROTY DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	140.190	0.71332E-02	-4.9363	1.000000	24.3675	0.683182	0.682881
2	140.984	0.70930E-02	3.1965	0.647548	10.2177	0.969653	0.286344
3	605.678	0.16510E-02	0.72045	0.145948	0.519049	0.984205	0.145460E-01
4	608.665	0.16429E-02	-0.28385	0.057502	0.805694E-01	0.986464	0.225790E-02
5	1460.64	0.68463E-03	-0.47684	0.096598	0.227376	0.992839	0.637205E-02
6	1462.56	0.68373E-03	0.25719	0.052102	0.661485E-01	0.994693	0.185376E-02
7	2700.47	0.37031E-03	0.19226	0.038947	0.369627E-01	0.995730	0.103585E-02
8	2703.32	0.36992E-03	0.23277	0.047154	0.541818E-01	0.997249	0.151840E-02
9	3203.34	0.31217E-03	0.23149E-03	0.000047	0.535864E-07	0.997249	0.150172E-08
10	4223.79	0.23675E-03	-0.14035	0.028432	0.196987E-01	0.997801	0.552041E-03
11	4226.73	0.23659E-03	-0.17749	0.035957	0.315042E-01	0.998684	0.882881E-03
12	5055.74	0.19780E-03	-0.12710E-04	0.000003	0.161537E-09	0.998684	0.452695E-11
13	5936.02	0.16846E-03	0.29428E-01	0.005962	0.866020E-03	0.998709	0.242695E-04
14	5941.78	0.16830E-03	0.15739	0.031883	0.247709E-01	0.999403	0.694185E-03
15	6971.48	0.14344E-03	-0.12013E-03	0.000024	0.144318E-07	0.999403	0.404440E-09
16	8009.33	0.12485E-03	-0.10460	0.021190	0.109411E-01	0.999710	0.306617E-03
17	8013.37	0.12479E-03	0.12153E-01	0.002462	0.147699E-03	0.999714	0.413914E-05
18	9169.33	0.10906E-03	0.18673E-03	0.000038	0.348669E-07	0.999714	0.977119E-09
19	10371.8	0.96415E-04	0.33165E-01	0.006719	0.109992E-02	0.999745	0.308245E-04
20	10374.7	0.96388E-04	0.76086E-01	0.015413	0.578900E-02	0.999907	0.162232E-03
21	11131.1	0.89838E-04	-0.41234E-03	0.000084	0.170027E-06	0.999907	0.476487E-08
22	12702.7	0.78723E-04	-0.57355E-01	0.011619	0.328960E-02	0.999999	0.921887E-04
23	12724.1	0.78591E-04	0.45851E-02	0.000929	0.210232E-04	1.000000	0.589159E-06
24	13964.6	0.71610E-04	0.12495E-03	0.000025	0.156122E-07	1.000000	0.437522E-09
sum					35.6676		0.999559

Tablo 22. Izgara Yüzey Uygulanmış Namlunun ROTZ Eksenine Kütle Katılım Oranı Tablosu

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION *****ROTZ DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	140.190	0.71332E-02	3.1971	0.647442	10.2216	0.286587	0.286454
2	140.984	0.70930E-02	4.9381	1.000000	24.3848	0.970271	0.683366
3	605.678	0.16510E-02	-0.28160	0.057027	0.793009E-01	0.972494	0.222235E-02
4	608.665	0.16429E-02	-0.70422	0.142610	0.495927	0.986399	0.138980E-01
5	1460.64	0.68463E-03	0.25771	0.052187	0.664127E-01	0.988261	0.186117E-02
6	1462.56	0.68373E-03	0.47891	0.096983	0.229354	0.994691	0.642748E-02
7	2700.47	0.37031E-03	-0.23453	0.047494	0.550049E-01	0.996234	0.154147E-02
8	2703.32	0.36992E-03	0.19143	0.038766	0.366452E-01	0.997261	0.102696E-02
9	3203.34	0.31217E-03	-0.20066E-03	0.000041	0.402649E-07	0.997261	0.112840E-08
10	4223.79	0.23675E-03	0.17845	0.036138	0.318451E-01	0.998154	0.892435E-03
11	4226.73	0.23659E-03	-0.13967	0.028283	0.195066E-01	0.998701	0.546659E-03
12	5055.74	0.19780E-03	-0.50713E-03	0.000103	0.257182E-06	0.998701	0.720734E-08
13	5936.02	0.16846E-03	-0.15661	0.031714	0.245258E-01	0.999388	0.687318E-03
14	5941.78	0.16830E-03	0.28151E-01	0.005701	0.792466E-03	0.999411	0.222083E-04
15	6971.48	0.14344E-03	-0.41919E-03	0.000085	0.175724E-06	0.999411	0.492453E-08
16	8009.33	0.12485E-03	0.13333E-01	0.002700	0.177781E-03	0.999416	0.498218E-05
17	8013.37	0.12479E-03	0.10397	0.021055	0.108097E-01	0.999719	0.302933E-03
18	9169.33	0.10906E-03	-0.21910E-03	0.000044	0.480058E-07	0.999719	0.134533E-08
19	10371.8	0.96415E-04	-0.75735E-01	0.015337	0.573584E-02	0.999880	0.160743E-03
20	10374.7	0.96388E-04	0.31385E-01	0.006356	0.984998E-03	0.999907	0.276039E-04
21	11131.1	0.89838E-04	0.88334E-03	0.000179	0.780281E-06	0.999907	0.218668E-07
22	12702.7	0.78723E-04	0.57869E-02	0.001172	0.334888E-04	0.999908	0.938499E-06
23	12724.1	0.78591E-04	0.57080E-01	0.011559	0.325809E-02	0.999999	0.913055E-04
24	13964.6	0.71610E-04	-0.43521E-02	0.000881	0.189412E-04	1.000000	0.530813E-06
sum					35.6667		0.999535

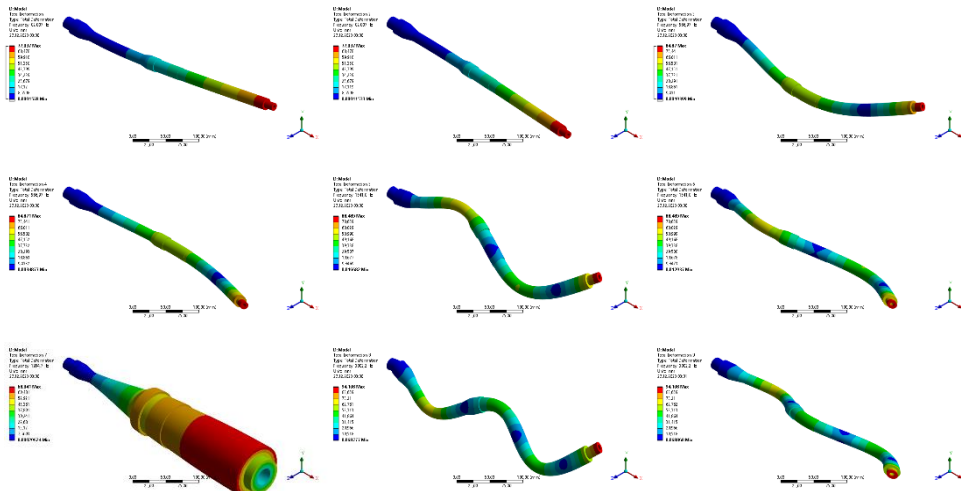
Tablo 23. Izgara Yüzey Uygulanmış Namlunun Modal Kütle, Kinetik Enerjiler ve Efektif Kütle Tablosu

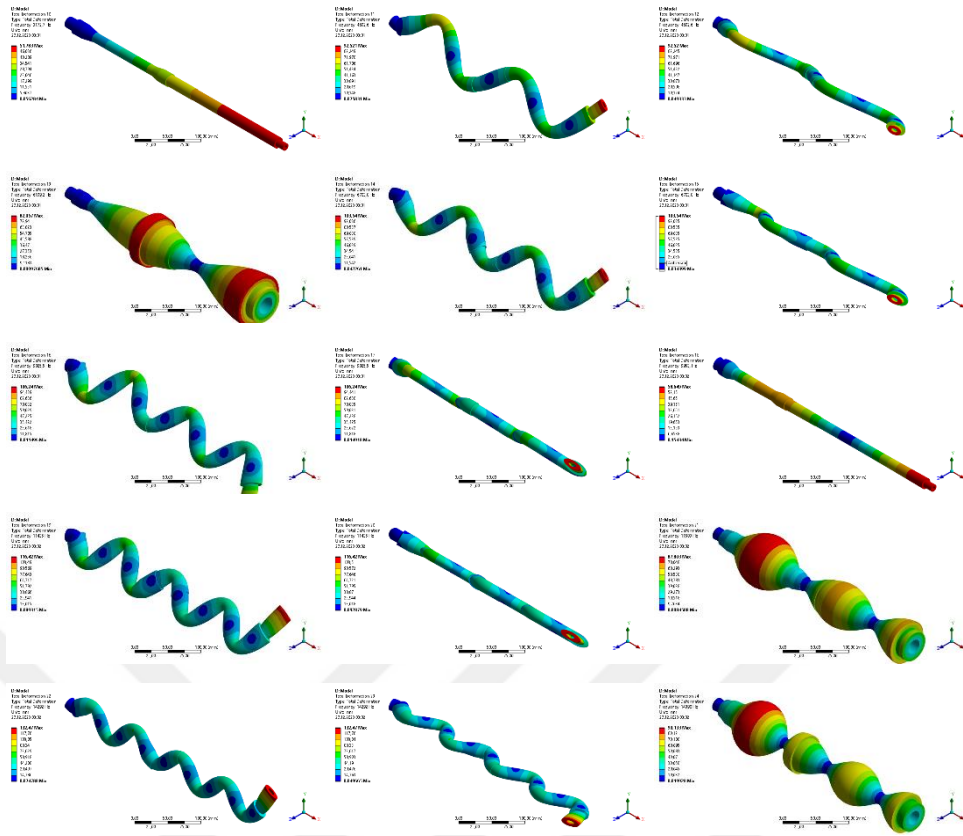
***** MODAL MASSES, KINETIC ENERGIES, AND TRANSLATIONAL EFFECTIVE MASSES SUMMARY *****

MODE	FREQUENCY	MODAL MASS	KENE		X-DIR	EFFECTIVE MASS			RATIO%		
						Y-DIR	RATIO%	Z-DIR			
1	140.2	0.2357E-03	91.44		0.2876E-12	0.00	0.1157E-03	16.73	0.2755E-03	39.82	
2	141.0	0.2379E-03	93.34		0.5982E-13	0.00	0.2762E-03	39.92	0.1155E-03	16.70	
3	605.7	0.1358E-03	983.2		0.2462E-11	0.00	0.1285E-04	1.86	0.8175E-04	11.82	
4	608.7	0.1356E-03	991.6		0.6360E-11	0.00	0.8079E-04	11.68	0.1290E-04	1.86	
5	1461.	0.1405E-03	5918.		0.4156E-11	0.00	0.1029E-04	1.49	0.3512E-04	5.08	
6	1463.	0.1401E-03	5915.		0.2975E-12	0.00	0.3493E-04	5.05	0.1016E-04	1.47	
7	2700.	0.1694E-03	0.2438E+05		0.8478E-10	0.00	0.1730E-04	2.50	0.1160E-04	1.68	
8	2703.	0.1695E-03	0.2445E+05		0.8835E-10	0.00	0.1135E-04	1.64	0.1708E-04	2.47	
9	3203.	0.2934E-03	0.5942E+05		0.4971E-03	71.85	0.1043E-10	0.00	0.2510E-10	0.00	
10	4224.	0.1634E-03	0.5753E+05		0.3169E-11	0.00	0.1510E-04	2.18	0.9260E-05	1.34	
11	4227.	0.1628E-03	0.5743E+05		0.1707E-09	0.00	0.8962E-05	1.30	0.1481E-04	2.14	
12	5056.	0.1435E-03	0.7238E+05		0.8512E-10	0.00	0.5826E-09	0.00	0.2716E-10	0.00	
13	5936.	0.9760E-04	0.6789E+05		0.1090E-10	0.00	0.1702E-04	2.46	0.6058E-06	0.09	
14	5942.	0.9818E-04	0.6842E+05		0.6523E-09	0.00	0.4902E-06	0.07	0.1722E-04	2.49	
15	6971.	0.8747E-04	0.8391E+05		0.4662E-12	0.00	0.7023E-09	0.00	0.4233E-10	0.00	
16	8009.	0.7879E-04	0.9977E+05		0.5565E-09	0.00	0.1974E-06	0.03	0.1013E-04	1.46	
17	8013.	0.7940E-04	0.1006E+06		0.1521E-10	0.00	0.9963E-05	1.44	0.1339E-06	0.02	
18	9169.	0.2758E-03	0.4577E+06		0.5670E-04	8.20	0.1031E-09	0.00	0.2386E-10	0.00	
19	0.1037E+05	0.9509E-04	0.2019E+06		0.1155E-09	0.00	0.7441E-05	1.08	0.1418E-05	0.20	
20	0.1037E+05	0.9552E-04	0.2029E+06		0.7935E-09	0.00	0.1195E-05	0.17	0.7449E-05	1.08	
21	0.1113E+05	0.8694E-04	0.2126E+06		0.5334E-10	0.00	0.3731E-08	0.00	0.1635E-10	0.00	
22	0.1270E+05	0.6507E-04	0.2073E+06		0.1510E-09	0.00	0.6658E-07	0.01	0.5284E-05	0.76	
23	0.1272E+05	0.6614E-04	0.2114E+06		0.3782E-12	0.00	0.5258E-05	0.76	0.3319E-07	0.00	
24	0.1396E+05	0.7759E-04	0.2987E+06		0.2819E-08	0.00	0.8088E-07	0.01	0.2039E-08	0.00	
sum						0.5538E-03	80.04	0.6252E-03	90.36	0.6260E-03	90.48

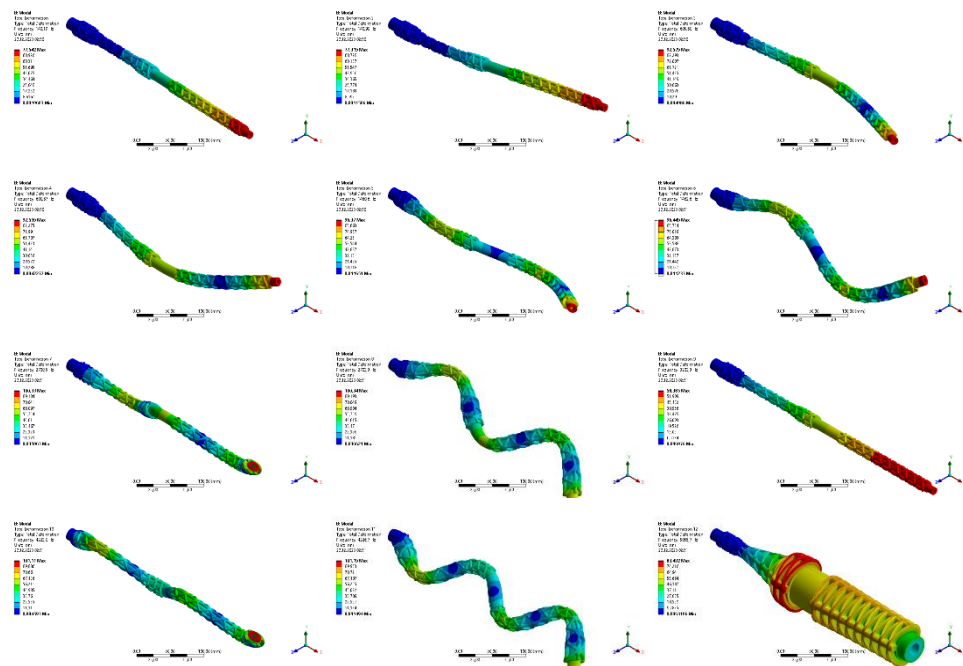
4.3. Geleneksel Namlu ve Izgara (Isogrid) Namlunun Mod Şekillerinin Karşılaştırılması

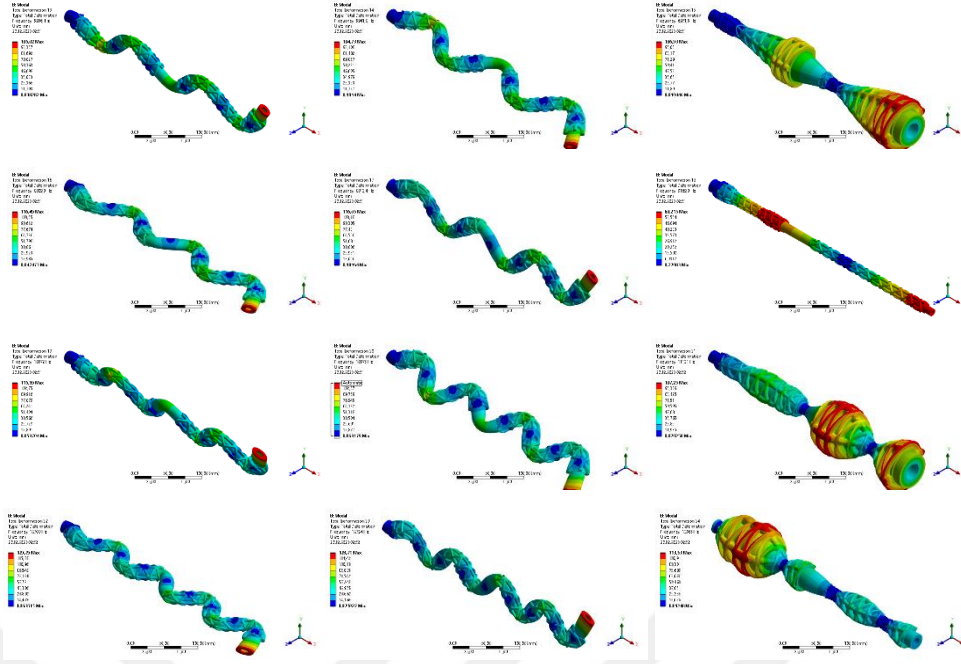
Bilgisayar Destekli Mühendislik uygulamalarında paket programlar ile yapılan modal analiz çalışmalarında incelenen yapının doğal frekans modlarında temsili davranışları görselleştirilmektedir. Bu görselleştirmeler yapının davranışını anlamak amacı ile oluşturulmaktadır. ANSYS programı ile yapılan bu çalışmada mod görsellerini detaylandırma amacı ile 24 farklı mod hesaplanmıştır. Bu mod görselleri sırası ile Şekil 34 ve Şekil 35’de ifade edilmiştir.





Şekil 34. Geleneksel Namlunun Mod 1- Mod 24 Görşelleri





Şekil 35. Izgara Yüzey Uygulanmış Namlunun Mod 1- Mod 24 Görselleri

4.4. Geleneksel Namlu ve Izgara (Isogrid) Namlunun Mod Frekanslarının Karşılaştırılması

Modal analiz çalışmasının sayısal değerleri incelendiğinde 11. moda kadar 5. ve 6. mod hariç diğer modlarda geleneksel namluya göre doğal frekanslarda artış görülmüştür. İlk modlarda görülen bu artış yapısal sertlik için avantaj oluşturmuştur. Ancak yapısal dayanımının kontrolü bu aşamada önemlidir. Yapısal sertlik ve yapısal dayanım dengesinin tutarlılığı için ızgara yüzey uygulanmış namluda yinelemeli çalışmalar yapılmıştır. 11. moddan sonra görülen frekans düşüşü namlu yapısının bu modlarda karşılaşıcağı rezonansa uzak olduğu düşünülmüştür. Bu yorumlamanın nedeni ise 5.56*45mm NATO standardı mühimmatın en yüksek basıncının sınırlandırılmış olmasıdır.

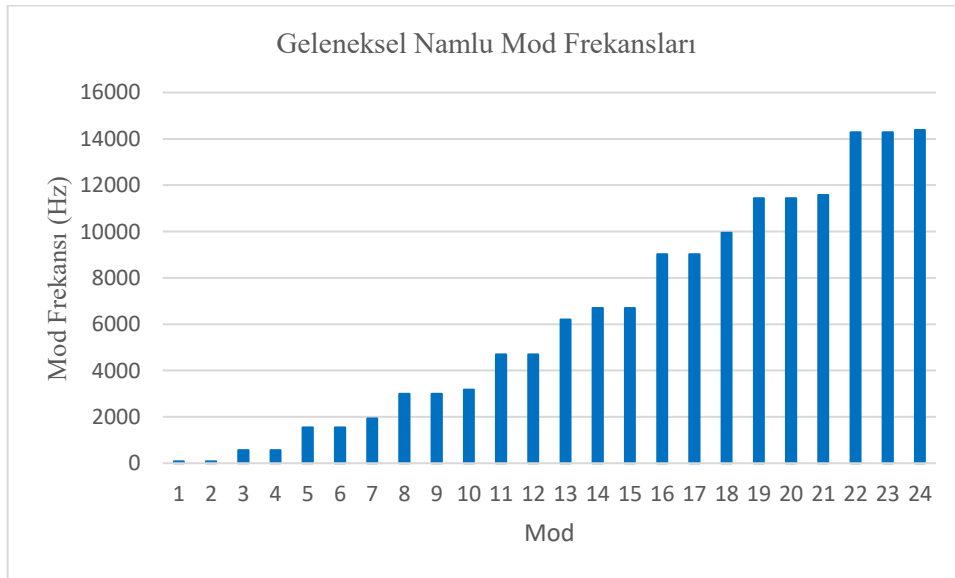
Tablo 24’de geleneksel namlu ve ızgara yüzey uygulanmış namlunun 24 mod için modal frekans değerleri verilmiştir

Tablo 24. Geleneksel ve Izgara Yüzey Uygulanmış Namlunun Modal Frekans Değerleri Tablosu

Mod	Geleneksel Namlu (Hz)	Izgara Yüzey Uygulanmış Namlu (Hz)
1	82,807	140,19
2	82,807	140,98

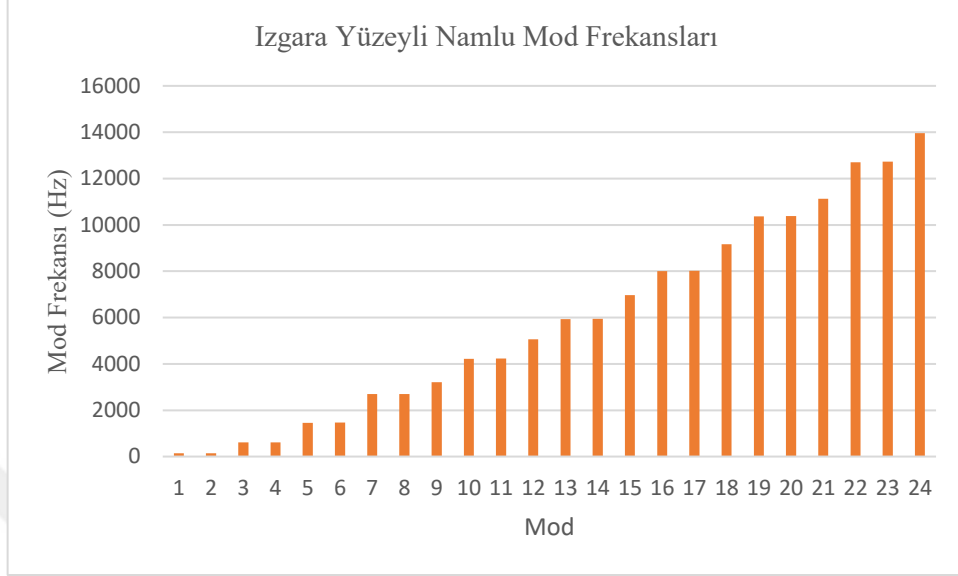
3	566,97	605,68
4	566,97	608,67
5	1541,8	1460,6
6	1541,8	1462,6
7	1934,7	2700,5
8	3002,2	2703,3
9	3002,2	3203,3
10	3172,7	4223,8
11	4692,6	4226,7
12	4692,6	5055,7
13	6199,2	5936
14	6703,8	5941,8
15	6703,8	6971,5
16	9025,5	8009,3
17	9025,5	8013,4
18	9953	9169,3
19	11435	10372
20	11435	10375
21	11583	11131
22	14292	12703
23	14292	12724
24	14390	13965

Şekil 36’da geleneksel namlunun modlarda görülen frekans artışını ve değerlerini ifade eden grafik verilmiştir.



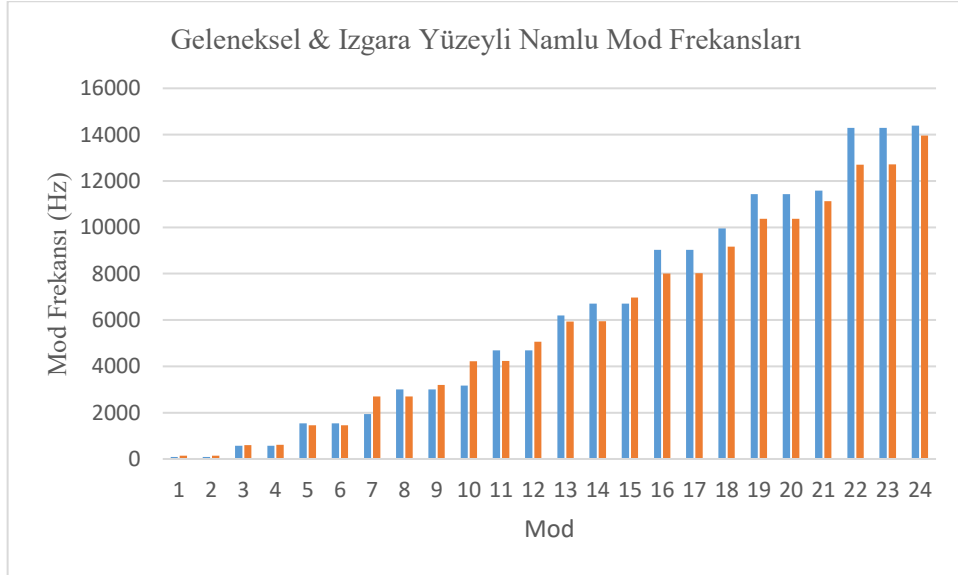
Şekil 36. Geleneksel Namlu Mod Frekansları Grafiği

Şekil 37’de ızgara yüzey uygulanmış namlunun modlarda görülen frekans artışını ve değerlerini ifade eden grafik verilmiştir.



Şekil 37. Izgara Yüzeyle Uygulanmış Namlu Mod Frekans Grafiği

Geleneksel namlu ve ızgara yüzey uygulanmış namlunun modal frekanslarını içeren sütun grafiği ifade edilmiştir (Şekil 38).



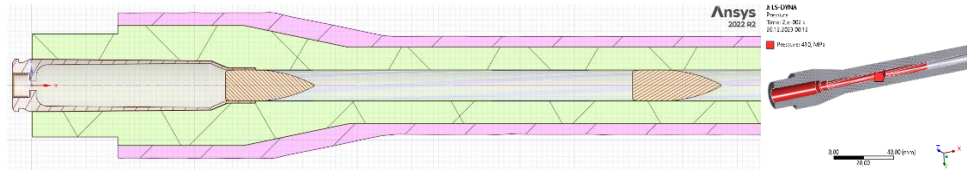
Şekil 38. Geleneksel ve Izgara Yüzeyle Namlunun Mod Frekansları Grafiği

Her modlar kendi içeriğinde kıyaslandığında artış veya azalış yüzdelерinin de farklı olduğu gör÷lmektedir.

4.5. Kritik Patlama Basıncı Altında Geleneksel ve Izgara Yüzey Namlunun Yapısal Dayanımının Karşılaştırılması

Yineleme yöntemiyle oluşturulmuş ızgara yüzey namlunun modal performansı incelendiğinde iyileştirme yönünde gelişme gösterdiği yorumlanmaktadır. Ancak mühimmat patlaması anında, çalışma koşulu ile ilgili durumda, performansının da incelenmesi gerekmektedir. Bu nedenle geleneksel namlu ve ızgara yüzey uygulanmış namlu arasında yapısal dayanım incelemesi yapılmıştır.

İlk olarak iç balistik hesaplamalarının yapıldığı bölümde ifade edildiği gibi 5.56*45mm NATO standardında mühimmatın basınç zaman grafiğinde gör÷len en yüksek basınç 4132 bar dolaylarındadır. En yüksek basıncın gör÷ldüğü anca mermi çekirdeği başlangıç anından 76,3mm deplasman göstermiştir. Mermi çekirdeğinin deplasmanı sonucu arka kısmında kalan tüm iç yüzeyler en yüksek basıncın etki ettiği bölgelerdir. Bu bölgeler sınır şartı olarak sınır şartına girdi olarak verilmiştir. Çözüm Ansys programında Workbench LS-Dyna çözücüsü ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 39'da sınır şartı koşulu ve mermi çekirdeğinin deplasmanı SpaceClaim programında ifade edilmiştir.

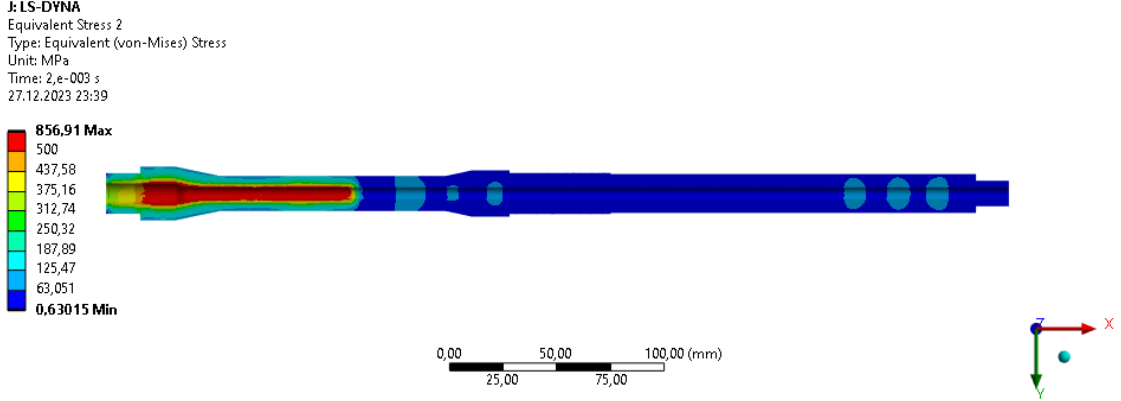


Şekil 39. Namlu İçi Mermi Çekirdek Deplasmanı ve Basınç Sınır Şartı Gösterimi

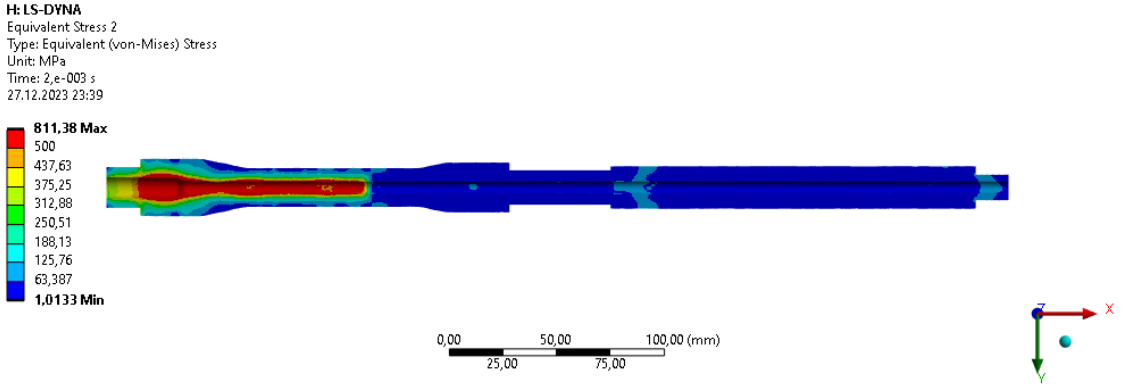
Elde edilen sonuçlar gerilme kriterlerinden olan Von-Mises kriterlerinde geleneksel ve ızgara yüzey uygulanmış namlu üzerinde ki gerilme davranışı incelenmiştir. Bu çalışmada incelenen namluların literatür araştırması sürecinde örnek çapta namlular için yapılan dayanım çalışmalarında incelenen sonuçlar ile paralellik gösterdiği gör÷lmüştür. Zou vd. yaptıkları çalışmada bir namlunun aşınma davranışını belirlemek için geliştirdikleri sonlu elemanlar modelini termo-mekanik etkiler altında incelemiştirlerdir. Çalışma sonucunda tek atış için düğüm noktasından okunan değeri 825

MPa, on atış yapılmış namluda görülen gerilme 913 MPa, yirmi atış yapılmış namluda görülen en yüksek gerilme ise 1013 MPa olarak ifade etmişlerdir (Zou et al., 2020).

Geleneksel namlu üzerinde görülen en yüksek gerilme 856,91 MPa'dır (Şekil 40). Izgara yüzey uygulanmış namluda görülen en yüksek değer ise 811,38 MPa'dır (Şekil 41). Izgara yüzeyde aynı sınır şartlarında yapılmış analiz çalışmasında 45,53 MPa gerilme düşüşü olduğu görülmektedir.



Şekil 40. Geleneksel Namlu Von-Mises Gerilmesi Kontur Görseli



Şekil 41. Izgara Yüzey Uygulanmış Namlunun Von-Mises Gerilmesi Kontur Görseli

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Izgara yüzey uygulanmış namlu iteratif çözümler ile tezde açıklanan son haline gelmiştir. Geleneksel namlunun ağırlığı 763 gramdan 699 grama düşürülmüştür. Geleneksel namlu ve ızgara yüzey uygulanmış namlunun modal analiz karşılaştırmasında birinci ve ikinci mod frekansları 82,8 Hz'den 140,19 Hz'e yükselerek yüzde 40,93 artış göstermiştir. İki modunda birbirine yakın frekanslar göstermesinin nedeni tasarımsal simetriden kaynaklanmaktadır. Modal analizde rezonans etkisi altında ilk mod, olası görülecek ilk frekanstır. İlk frekanslarda görülen yüksek yüzdeli artış, yapısal sertlik için önemli bir katkıdır.

Üçüncü ve dördüncü modlarda geleneksel namluda 566,97 Hz, ızgara yüzey uygulanmış namluda ise 605,68 Hz hesaplanmıştır. Bu modlarda görülen artış yüzde 6,4'dür. Beşinci ve altıncı modlarda geleneksel namlunun mod frekansı 1541,8 Hz, ızgara yüzey uygulanmış namluda ise 1460,6 Hz'dir. Beşinci ve altıncı modların frekansları karşılaştırıldığında yüzde 5,5 düşüş gerçekleştirmiştir. Izgara yüzey uygulanmış namlu beşinci ve altıncı modlara karşılık gelen dış etkiler ile karşılaştığında geleneksel namluya göre daha düşük yapısal sertlik gösterecektir. Bu nedenle ızgara yüzeyin doğru bir şekilde uygulanması önem arz etmektedir.

On birinci moddan sonra frekanslarda düşüş olduğu görülmektedir. Izgara yüzey uygulanmış namlunun on birinci moddan sonra doğal frekansların rezonans oluşturma ihtimali oldukça küçüktür. Bu nedenle önemli modlar ilk karşılaşılan modlardır. Tez başlangıcında modal analiz çalışması ile ilgili amaç gerçekleştirilmiştir.

Modal analiz çalışmasından elde edilen sonuçları doğrulamak amacı ile iki namlu arasında yapısal analiz çalışması yapılmıştır. İç balistik hesaplamalarında görülen en yüksek basınç 413,2 MPa'dır. Bu basınç 0,0036 saniyede görülmektedir. Bu değerler etkisi altında geleneksel namluda görülen en yüksek gerilme 856,91 MPa, ızgara yüzey uygulanmış namluda görülen değer ise 811,38 MPa'dır. Görülen bu gerilmelerden yola çıkarak yüzde 5,31 gerilme azalması görülmüştür.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında modal frekansların artışı ve topolojik olarak uygulanan ızgara yüzeyin (isogrid) yapının modal frekanslarını yükselterek, dayanım sınırını da artırmıştır. Bu durumun aşınma, ömür, ısınma ve soğuma performansı vb. gibi

önemli etkilerde avantaj oluşturmaktadır. Hedef hassasiyeti ve doğruluğunu artırmaktadır. Aynı zamanda maliyet ve üretim konusunda dezavantajlı olduğu söylenebilmektedir.

5.2. Öneriler

Bilgisayar ortamında yapılan bu çalışma doğruluğun ve iyileştirmelerin kesin sonuçlarını görebilmek için deneysel verilere ihtiyaç duymaktadır. Deneysel doğal frekans ölçümü ile frekanslar karşılaştırılabilir. Gerinim ölçerler ile namlular arasında stress karşılaştırması yapılabilir. Yüksek kare çekim yapabilen kameralar ve lazer sistemler ile titreşimin davranışı gözlemlenebilir.



6. KAYNAKLAR

- Andrew. (2012). *5.56 vs .223 – what you know may be wrong*.
<https://www.luckygunner.com/labs/5-56-vs-223/>
- Axiro, G. (n.d.). *An opportunity to evaluate explicit solver performance in quasi-static phenomena*. <https://www.axirogroup.com/show-case/rops-simulation/>
- Balla, J. (2011). Dynamics of mounted automatic cannon on track vehicle. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 5, 423–432.
- Black, J., & Özkan, Y. (2009). *Savaş ve dünya: askeri güç ve kıtaların kaderi 1450-2000*. Dost Kitabevi Yayınları.
- Brad, T. (2023). *The m16 rifle: a military marvel*. <https://military-blog.com/m16-rifle/>
- Britannica, E. (1993). *Encyclopædia britannica*. Chicago: University of Chicago.
- Çağlayan, İ. (2009). Rezonans: Makinaların ve yapıların gizli düşmanı. *Mühendis ve Makina*, 50(598), 55–60.
- Çelik, M., & Aykan, M. (2004). Tank namlusunun operasyonel modal ve deplasman analizi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 6(1), 50–57.
- Chandrupatla, T., & Belegundu, A. (2021). *Introduction to finite elements in engineering*. Cambridge University Press.
- Chase, K., & Chase, K. W. (2003). *Firearms: A global history to 1700*. Cambridge University Press.
- Cleckner, R. (2019). *Ultimate ar-15 barrel guide*. <https://gununiversity.com/ultimate-ar-15-barrel-guide/>
- Deng, S., Sun, H. K., Chiu, C.-J., & Chen, K.-C. (2014). Transient finite element for in-bore analysis of 9mm pistols. *Applied Mathematical Modelling*, 38(9), 2673–2688. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.10.071>
- Depot. (2019). *The complete guide to ar-15 barrels*.
<https://www.gunbuilders.com/blog/the-complete-guide-to-ar15-barrels/>
- Edward Alexander, J. (2012). Advanced gun system gun and projectile dynamic model results and correlation to test data. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 134(4). <https://doi.org/10.1115/1.4006352>
- Esen, İ., & Koç, M. (2015). Optimization of a passive vibration absorber for a barrel using the genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*, 42, 894–905. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.08.038>
- Eymard, R., Thierry, G., & Herbin, R. (2010). Finite volume method. *Scholarpedia*, 5, 9835. <https://doi.org/10.4249/scholarpedia.9835>
- Gimm, H. I., Cha, K. U., & Cho, C. K. (2012). Characterizations of gun barrel vibrations of during firing based on shock response analysis and short-time Fourier transform. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(5), 1463–1470. <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0335-5>
- Granta, A. (2022). *Ansys granta material engineering data*.
- Gündüzer, O. (2011). *Namlucidarı boyutlandırılmasına iç balistik davranışın etkisi*.
- Güngör, D. (2021). *İç balistik hesaplama ve namlu tasarımprogramı geliştirilmesi*. Fen Bilimleri Enstitüsü/Savunma Teknolojileri Ana Bilim Dalı.
- Hall, B. S. (1997). *Weapons and warfare in renaissance Europe: gunpowder, technology, and tactics* (Vol. 22). JHU Press.
- Hall, M. (2015). Effects of breech bolt movement on felt recoil of a gas-operated semi-automatic sporting gun. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 229. <https://doi.org/10.1177/1754337114566664>
- Harris, J. (2019). *5 techniques for lightweighting: Doing more with less*.

- <https://www.ntop.com/resources/blog/5-techniques-for-lightweighting/>
- Hughes, T. J. R. (2012). *The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis*. Courier Corporation.
- Hung, E. (2023). *Best ar-15 barrels & manufacturers (hands-on)*.
<https://www.pewpewtactical.com/best-ar-barrels/>
- Hüseyinoğlu, M., & Tayfun, A. (2019). İki ucu ankastre u çerçeve yapının modal analizi. *Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 657–665.
- Huybrechts, S. M., Hahn, S. E., & Meink, T. E. (1999). Grid stiffened structures: a survey of fabrication, analysis and design methods. *Proceedings of the 12th International Conference on Composite Materials (ICCM/12)*, 1–10.
- Kanou, H., Nabavi, S. M., & Jam, J. E. (2013). Numerical modeling of stresses and buckling loads of isogrid lattice composite structure cylinders. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 5(1), 42–54.
- Keegan, J. (2011). *A history of warfare*. Random House.
- Koç, M. A., Esen, İ., & Çay, Y. (2018). Dynamic analysis of gun barrel vibrations due to effect of an unbalanced projectile considering 2-D transverse displacements of barrel tip using a 3-D element technique. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 15(9). <https://doi.org/10.1590/1679-78254972>
- Kopecki, H., & Świąch, Ł. (2019). Modeling problems of the post-critical states of deformation of isogrid plates in the light of the preliminary experimental investigations. *AIP Conference Proceedings*, 2060(1), 20006.
<https://doi.org/10.1063/1.5086137>
- Kurt, E. (2018). *Türk Savunma Sanayii tarihine mikro yaklaşım: Savunma sanayii işletmelerine dair bir envanter ve dönemselleştirme çalışması (1836-2018)*.
- Lewis, D. (2022, September 2). *Fluted Barrel Guide - A Good Idea Compared to Normal Barrels?* <https://www.ammunitiontogo.com/lodge/fluted-barrel/>
- 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, 12090. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1314/1/012090>
- Lisy, P., & Bridik, L. (2019). Modal analysis of medium calibre barrels. *Problems of Mechatronics Armament Aviation Safety Engineering*, 10, 9–22.
<https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.2113>
- Loiola, B. R., Susantez, Ç., & Caldeira, A. B. (2023). Numerical modelling of heat transfer and simulation of a 5.56 mm rifle barrel. *Journal of Physics: Conference Series*, 2478(11), 112030. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2478/11/112030>
- Mac Donald, B. J. (2007). *Practical stress analysis with finite elements*. Glasnevin publishing.
- Maes, V. K., Pavlov, L., & Sahak, M. (2019). An efficient semi-automated optimisation approach for (grid-stiffened) composite structures: Application to Ariane 6 Interstage. *Composite Structures*, 209, 1042–1049.
- Mata, M. P. M. C. (2022). *Ntopology optimization applied To additive manufactured hydrofoil wing components*.
- Matt. (2021). *Rifle barrels 101: which barrels are best for accuracy and durability?*
<https://www.darkearthtactical.co.za/blog/rifle-barrels-101/>
- Meyer, R. R., Harwood, O. P., Harmon, M. B., & Orlando, J. I. (1973). *Isogrid design handbook*.
- Özcan, B. (2019). *Kısa namlulu ateşli silahlarda iç balistiğe bağlı mukavemet analizi* (Issue Haziran).
- Öztürk, A. R. (1984). *İç balistik*. MKE Yayınevi.

- Prior, A. M. (1994). Applications of implicit and explicit finite element techniques to metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 45(1), 649–656. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)90413-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)90413-8)
- Reddy, J. N. (2019). *Introduction to the finite element method*. McGraw-Hill Education.
- Sabat, L., & Kundu, C. K. (2020). History of finite element method: a review. *Recent Developments in Sustainable Infrastructure: Select Proceedings of ICRDSI 2019*, 395–404.
- Sava, A., Nistoran, D., Cristian-Emil, M., & Piticari, I. (2015). The analysis of the vibratory movement of the gun barrel and its influence on the firing accuracy. In *International conference Knowledge-Based Organisation* (Vol. 21). <https://doi.org/10.1515/kbo-2015-0150>
- Simkins, T. E. (1994). Amplification of flexural waves in gun tubes. *Journal of Sound and Vibration*, 172(2), 145–154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/jsvi.1994.1166>
- Smith, W. H. B., & Smith, J. E. (1973). *Small arms of the world: a basic manual of small arms*. Stackpole Books.
- Smithurst, P. (2015). *The gatling gun*. Bloomsbury Publishing.
- Tim. (n.d.). *Barrel harmonics - hunting in australia*. Retrieved September 2, 2022, from <https://huntinginaustralia.net.au/rifles/factors-affecting-accuracy/barrel-harmonics/>
- Uğur, A. (2019). *Yivsiz av tüfeği namlusu et kalınlığının sonlu elemanlar yöntemi ile optimizasyonu*. Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Westwood, D. (2005). *Rifles: an illustrated history of their impact*. ABC-CLIO.
- Willbanks, J. H. (2004). *Machine guns: an illustrated history of their impact*. ABC-CLIO.
- Wu, B. (2005). Barrel cooling: A key technology for improving gun performance. *Journal of Battlefield Technology*, 8, 1.
- Xu, N., Guan, X., Liu, G. Q., & Xu, C. (2019). Study on barrel vibration characteristics of typical sniper rifle. *Vibroengineering PROCEDIA*.
- Yang, G., Cheng, Q., Yu, C., & Sun, Q. (2017). The modal analysis of three-dimension gun barrel using isogeometric analysis and its application to optimization. *Journal of Vibroengineering*, 19(8), 6277–6287. <https://doi.org/10.21595/jve.2017.18897>
- Zou, L., Yu, C., Feng, G., Zhong, J., Liu, X., & Liang, L. (2020). Finite element analysis of the friction and wear of the barrel bore during the projectile extrusion. *Journal of Physics: Conference Series*, 1507, 82014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1507/8/082014>