



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



ORTA KALİBRE BİR TOPUN İÇ BALİSTİK
PERFORMANSINA NAMLU
PARAMETRELERİNİN ETKİSİNİN
İNCELENMESİ

Mehmet ATMACA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat -2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet ATMACA tarafından hazırlanan “Orta Kalibre Bir Topun İç Balistik Performansına Namlu Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 06/02/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin BİLGİÇ
Necmettin Erbakan Üniversitesi

.....

Danışman

Prof. Dr. Mete KALYONCU
Konya Teknik Üniversitesi

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Arif ŞEN
Konya Teknik Üniversitesi

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü 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.

Mehmet ATMACA

06.02.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ORTA KALİBRE BİR TOPUN İÇ BALİSTİK PERFORMANSINA NAMLU PARAMETRELERİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mehmet ATMACA

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Mete KALYONCU

2024, 91 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mete KALYONCU

Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Arif ŞEN

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin BİLGİÇ

Bu çalışmada; orta kalibre bir topun iç balistik performansına namlu parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Orta kalibre namlularda çok fazla mekanik yapı mevcuttur ve bu yapıların namlu balistik değerlerine olan etkileri incelenerek optimizasyonu çalışmaları yapılmıştır. Öncelikle namlu balistik değerlerini etkileyen faktörler belirlenmiş ve istenilen amaca yönelik olarak optimize edilmiştir. Orta kalibre namlu çeşidinin fazla olması ve kriterlerinin fazla olması nedeniyle optimizasyon uzayını çok büyük bir hale getirmiştir. Bu sebeple Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanarak gerekli deneysel tasarım sayısı belirlenmiştir. Orta kalibre namlu iç balistiğine etki eden faktörler belirlenmiş ve bu girdiler ile namludan çıkan merminin karakteristik değerlerini belirlemek için matematiksel modellemesi yapılmıştır. Namluların yapısında mevcut olan yiv-setin genişliği, derinliği, helis açısı ve yiv-setin geometrisi gibi iç balistiğe etki eden değerlerdeki değişimlerin namludan çıkan merminin, çıkması için geçen süre, doğrusal hızı ve açısal hızına etkileri karşılaştırılmıştır. Çıkış değerlerin literatürde belirlenmiş değerleri sağlaması için gerekli olan giriş değerlerine optimize edilmiştir. Yapılan çalışmalara ait sonuçlar grafikler ve tablolar şeklinde verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Orta Kalibre Top, İç Balistik, Namlu Parametreleri, Optimizasyon, Taguchi Metodu, Minitab Yazılımı,

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF BARREL PARAMETERS ON THE INTERNAL BALLISTIC PERFORMANCE OF A MEDIUM CALIBER GUN

Mehmet ATMACA

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Mete KALYONCU

2024, 91 Pages

Jury

**Advisor Prof. Dr. Mete KALYONCU
Asst. Prof. Dr. Muhammed Arif ŞEN
Asst. Prof. Dr. Hasan Hüseyin BİLGİÇ**

In this study; the effect of barrel parameters on the internal ballistics performance of a medium caliber gun has been investigated. There are many mechanical structures in medium caliber barrels, and studies on the optimization by examining the effects of these structures on barrel ballistic values have been carried out. Firstly, the factors affecting barrel ballistic values have been determined and optimized according to the desired purpose. Due to the large number of medium caliber barrel types and criteria, the optimization space has become very large. Therefore, using the Taguchi experimental design method, the necessary number of experimental designs has been determined. Factors affecting the internal ballistics of medium caliber barrels have been determined, and mathematical modeling has been done to determine the characteristic values of the bullet exiting the barrel with these inputs. Changes in values affecting internal ballistics such as the width, depth, helix angle, and geometry of the rifling in the structure of the barrels have been compared for their effects on the time, linear velocity, and angular velocity of the bullet exiting the barrel. The input values necessary to ensure that the output values meet the predetermined values in the literature have been optimized. The results of the studies have been presented in the form of graphs and tables.

Keywords: Medium Caliber Cannon, Internal Ballistic, Barrel Parameters, Optimization, Taguchi Method, Minitab Software

ÖNSÖZ

Savunma Sanayi ülkelerin ulusal güvenliğinin temel taşlarındandır. Ülkelerin savunma yetenekleri, savunma stratejilerinin gelişmişliği ile önem kazanır. Savunma stratejileri ise ülkelerin ürettikleri silah ve ekipmanlar ile şekillenmektedir. Tehditler oluşmadan önce güçlü bir savunma altyapısı oluşturmak, oluşacak tehditlerin, tehdit oluşmadan önlenmesine yardımcı olacaktır. Ayrıca savunma sanayisi, teknolojik ilerleme ve istihdam yaratma, ülke kalkınmasına ekonomik destek oluşturma gibi oldukça önemli bir katkıya sahiptir.

Askeri maksatlı savunma alanında kullanılan hafif top sistemlerinde genellikle orta kalibre namlular tercih edilmektedir. Uzun menzile sahip ve etkili hedef tahribatının yanı sıra yüksek kalibre silahlara göre daha fazla kullanım alanına sahiptir. Ülkemizde yürütülen çalışmaların henüz istenilen olgunluğa ulaşmamış olması ve stratejik önem arz eden savunma sanayine katkı sağlamak amacıyla bu çalışmanın yapılması kaçınılmaz olacaktır.

Ülkeme hizmet etmek motivasyonu ile başladığım yüksek lisans tezimde, uzun soluklu çalışmalar gerçekleştirilmiş ve kapsamlı sonuç ve değerlendirmeler sunulmuştur. Tez çalışmamda, benden heran desteğini esirgemeyen ve birlikte çalışmaktan onur duyduğum danışman hocam Prof. Dr. Mete KALYONCU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Profesyonel çalışma hayatımda önemli bir yeri olan Aselsan Konya Silah Sistemleri A.Ş. Genel Müdürü Sayın Bülent IŞIK Bey'e başta olmak üzere tüm Aselsan Konya ailesine şükranlarımı sunarım.

Eğitimim süresinde ve hayatımdaki tüm değerli projelerde destek ve dualarını hissettiğim hayatımın en değerli anlarında yanımda olan annem, babam, sevgili eşim ve kızıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet ATMACA
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı	3
1.2. Tezin Önemi	4
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	9
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	24
3.1. İç Balistik Hesaplamaları	31
3.1.1. Ortalama Gaz Basınç Hesabı:	35
3.1.2. Basınç maksimumken merminin namlu içindeki konumunun belirlenmesi:	36
3.1.3. Basınç maksimum olması için geçen sürenin hesaplanması:	36
3.1.4. Basınç maksimumken mermi hızının hesaplanması:	37
3.1.5. Namlu içindeki toplam mermi yolu için geçen zamanın hesaplanması:	37
3.1.6. Namlu çıkışındaki gaz basınç değerinin hesaplanması:	38
3.1.7. Sabit yiv-set açılı namlularda açısız hız hesabı	38
3.1.8. Progresif yiv-set açılı namlularda açısız hız hesabı	40
3.1.9. Yiv-Set eğrisinin değerlerinin hesaplanması.....	41
3.1.10. Jiroskopik kararlılık faktörü belirlenmesi	43
3.1.11. Yiv-setli namluların Set'in gelen tork değeri hesaplanması	44
3.2. Namlu Yiv Set Değerlerinin ve Doğrusal Hızın Belirlenmesi	44
3.3. Mermi Çekirdeği Açısız Hız Değerinin Belirlenmesi	47
3.4. Optimizasyon ve Analiz Yöntemleri	48
3.4.1. Taguchi Metodu	48
3.4.2. Taguchi Methodu ile açısız hız optimizasyonu	58
3.5. Regresyon Analizi	59
3.6. Namlu Katı Model Çalışmaları	61
3.7. Namlu İçindeki Anlık Değerlerin Belirlenmesi	64
3.8: Açısız Hızın Anlık Değerlerinin Belirlenmesi	69
4. YİV SET PROFİLLERİNİN BALİSTİK ETKİSİ	72
4.1. Farklı Yiv Set Profillerinin Balistik Etkisi.....	72
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	86
5.1 Sonuçlar	86

5.2 Öneriler	88
KAYNAKLAR	89
EKLER	91



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

mm	: Milimetre
gr	: Gram
Kg	: Kilogram
m/s	: Metre / Saniye
D	: Mermi çapı
L	: Sevk barutu ağırlığı
M	: Mermi kütlesi
m_p	: Sevk barutu kütlesi
V_0	: Merminin namlu ağzından çıkış hızı
S_m	: Namlu içinde basıncın maksimum olduğu andaki mermi çekirdeğinin konumu
t_m	: Ateşlemeden sonra geçen süre
V_m	: Mermi hızı
V_1	: Gaz basıncının maksimum hıza ulaştığı anda merminin hızı
t_0	: Toplam iç balistik zamanı
P_0	: Merminin namlu ağzından çıktığı andaki namlu ağız basıncı
g	: Yer çekimi ivmesi
kg/m^3	: Kilogram / metre küp
cm^2	: Santimetre kare
π	: Pi Sabiti (3,14 kabul edilecektir.)
r	: Yarıçap
X_e	: Namlu boyu
ms	: Milisaniye
η	: Prezometrik verim
S_m	: Maksimum basınç anında mermi çekirdeği konumu
t_m	: Ateşlemeden sonra geçen süre
P_m	: Ortalama gaz basıncı
Q	: Sevk barutunu verdiği ısı değeri
A	: Namlu kesit alanı
φ	: Isı kaybı katsayısı
P_{max}	: Maksimum gaz basıncı
q	: Namlu delik alanı
X_1	: Gaz basıncının maksimum olduğu anda merminin konumu
t_1	: Gaz basıncının maksimum değere ulaşması için geçen süre
P_e	: Namlu çıkışındaki gaz basıncı değeri
t_e	: Merminin namludan çıkması için geçen süre
R	: Mermi yarıçapı
D_z	: Yiv derinliği çap değeri
N_z	: Yiv-set adedi
b	: Yiv genişliği
t	: Yiv derinliği ölçüsü
f	: Set genişliği
α	: Helis açısı derecesi

ω	: Açısal hız
ω_e	: Merminin namlu çıkışındaki açısal hızı
Tan	: Tanjant değeri
n_1	: Merminin saniyedeki devir sayısı
T	: Mermi periyot değeri
Ç	: Mermi çevre hızı
α_o	: Yiv başlangıç helis açısı değeri
α_E	: Yiv namlu bitiş noktasındaki helis açısı değeri
N_z	: Yiv-set adedi
$\Sigma(\eta)$	: Vallier-Heydenreich sabiti
$\theta(\eta)$	: Vallier-Heydenreich sabiti
$\phi(\eta)$	: Vallier-Heydenreich sabiti
$\pi(\eta)$	: Vallier-Heydenreich sabiti
$T(\eta)$	: Vallier-Heydenreich sabiti



Kısaltmalar

ZMA	: Zırhlı Muharebe Aracı
TP-T	: Target Practice Tracer, Hedef takip uygulamalı
FE	: Finite Element
PRODAS	: Projectile Rocket Ordnance Design and Analysis System
Mil	: Kara mili değeri (1609,344 metre)



1. GİRİŞ

Zırhlı araçlarda kullanılan orta kalibre silahların namlularının belirli sürelerde değişimlerinin yapılması gerekmektedir. Değişim sürelerinin mümkün olduğunca uzun tutulabilmesi için namlunun uzun ömürlü olması beklenmektedir. Uzatılan namlu ömürleri ile ülke ekonomisine oldukça ciddi kazançlar sağlanması öngörülmüştür. Zira orta kalibre namluların üretim aşamasında ihtiyaç duyulan birçok girdi yabancı ülkelerin tek elinde olmuştur.

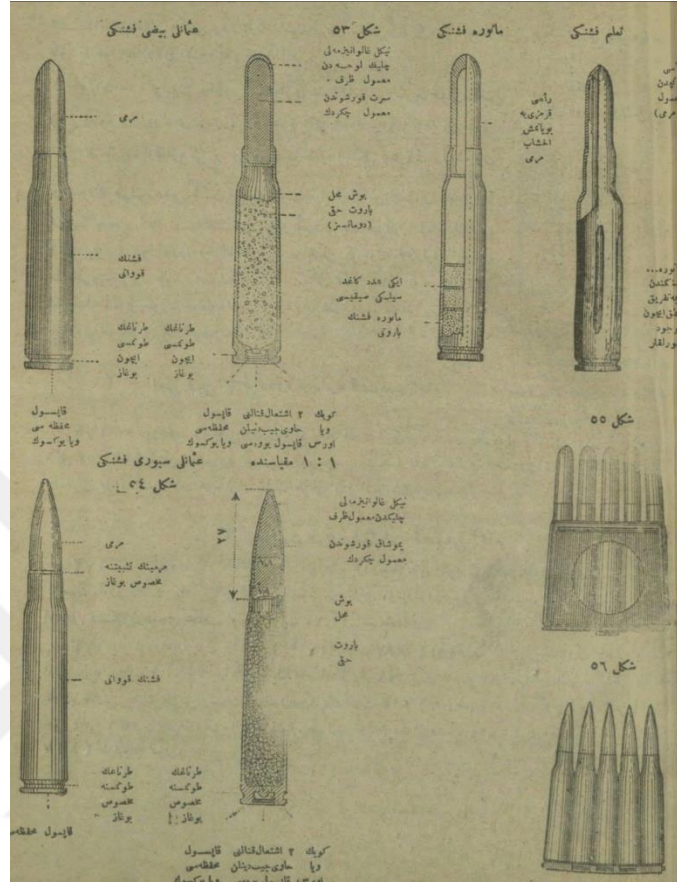
Namlularından beklenen karakteristiklerinden en önemlisi ömrünün uzun olmasıdır. Bunların yanı sıra atım sayısı, merminin namludan çıkış hızı, hedefe ulaşma süresi, hedefte oluşturduğu tahribat ve hafif olması balistik değerlere girdi yapan etmenlerdir. Namludan çıkacak merminin hızı merminin iç yanma odasında oluşturacağı basınç ve namlu boyu ile orantılıdır. Barut yanması ile oluşan basınç sayesinde namlu içinde oluşan tüm fiziksel olayların namlu balistik değerlerine etkileri hesaplanabilir ve öngörülebilir olması çalışmalara yön verecek etkenlerdir.

Ülkemizde istenilen kalitede orta kalibre namlu üretilmesi için yurt dışından temin edilen teknolojiler kullanılmaktadır. Kullanılan kesici takımlar, aşındırıcı honlama taşları, özel maksatlı derin delik delme tezgâhları ve hassas honlama tezgâhları gibi imalat esnasında ihtiyaç duyulacak girdilerin temin süresi ve maliyeti oldukça yüksektir. Orta kalibre namlu imalatına başlanmadan çalışmamızda yapılan analitik ve numerik çalışmalar istenilen parametrelerin belirlenmesine yardımcı olacaktır ve seçilecek kesici takım ve tezgâh yatırımlarında istenmeyen harcamaların önlenmesinde yol göstereceği düşünülmüştür.

Dışa bağımlı olan imalat tekniklerinde en önemli risk, olası ambargolar ve/veya savaş durumlarında ordumuzdaki tüm dışa bağımlı ateşli silahlar için ihtiyaç duyulacak yardımcı elemanların temininde zorluklar yaşanması kaçınılmaz olmuştur. Bu gibi durumlarda ülke savunmasında halen kullanılan tüm yabancı menşeli ateşli silahların etkisiz kalabilmesi istenmeyecek durumlardandır. Çalışmamızda elde edilecek sonuçlar sayesinde savunma sanayisinde gerçekleştirilen çalışmalara destek sağlanması öngörülmüştür.

Osmanlı Hükümdarlığı döneminde de ateşli silahların gelişmesi ve kullanılmaya başlanmasıyla silahlarda kullanılan mühimmatların üretilmesi için çeşitli çalışmalar yapıldığı tarih kitaplarından karşımıza çıkmıştır. Şekil 1.1 de Osmanlı İmparatorluğu'nda yapılan mühimmat çalışmaları görülmektedir. Ülkeler savunma alanında yaptıkları

çalışmalar kadar güçlü ve özgürdür. Bu yaklaşım insanlığın her döneminde kabul görmüştür.



Şekil 1.1: Osmanlı İmparatorluğu'nda yapılan mühimmat çalışmalarıdır.

Orta kalibreli namlular kara, deniz sistemlerinde sıklıkla kullanılmıştır. Kara sistemlerinden en önemli olanlarından bir tanesi ZMA'dır (Zırhlı Muharebe Araçları) ve bu araçlar ile sahada askeri personel intikali gerçekleştirilmiştir. Personelin güvenli bir şekilde taşınması açısından araçlarda kullanılan orta kalibre ateşli silahların uzun menzillere atış yapabilmesi önem kazanmıştır. İstenilen hedef tahribat balistik değerlerini sağlayabilmek için namlu iç balistik değerlerinin belirlenmesi önem kazanmıştır.

Sivil maksatlı kullanılan silahlarda (av tüfekleri vb.) namlu içinde yiv-set oluşturulmazken askeri maksatlı ateşli silahların namlularında yiv-set de denilen helisel boşluklar oluşturulmuştur. Oluşturulan yiv sayısı, yiv derinliği, yiv genişliği ve namlu boyunca uzanan helis açısı değerleri dikkate alınarak farklı karakteristiklere sahip namluların analitik yaklaşımlar kullanılarak karşılaştırılması yapılmıştır.

1.1. Tezin Amacı

Merminin namludan çıkış hızını etkileyen birçok parametre mevcuttur. İç balistik açısından mühimmatın namlu içinde oluşturduğu yüksek basınç, yiv-set değerleri, namlu boyu ve mermi çekirdek ağırlığı merminin namluyu kararlı ve yüksek hızda terk etmesini sağlayan faktörlerdir. Bu çalışmada 30mmx173 TP-T (Target Practice Tracer) hedef takip uygulamalı standart bir mühimmatın 2700mm uzunluğundaki namluyu terk edişi esnasındaki açısal ve doğrusal hızlarının maksimum değerini tespit etmek için namlu balistik parametrelerinin oluşturduğu kombinasyonların analitik metotlar yardımıyla belirlenmesi ve optimum namlu balistik değerlerinin saptanması amaçlanmıştır.

Namlu tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli unsurlardan birisi olan namlu iç balistik parametreleri ve bu parametrelerin tespiti ile tahrip gücü yüksek askeri maksatlı silahların üretilmesi mümkün olmuştur. Seçilen mühimmatın ateşlenmesi esnasında oluşturacağı iç basınç ile mühimmatın, mermi de denilen, çekirdeğinin namluyu terk edişi esnasında açısal ve doğrusal hızını etkileyen yiv-set değerleri, bu değerler ilerleyen bölümlerde detaylı bir şekilde açıklanacaktır, namlu iç çapı değerlerinin optimum değerini Minitab yazılımı kullanılarak ve Taguchi metodu yardımıyla tespit edilmesi sağlanmıştır.

Namluyu terk eden merminin nasıl davranacağını önceden bilmek merminin hedefe vereceği tahribatı da biliyor olmak demektir ve askeri maksatlı silahların kullanım maksatlarını (deniz topu, uzaktan kumandalı silah sistemi, zırhlı araç silahları vb.) belirlemekte yararlı bir yaklaşım olmuştur. Namlu ise silahın ana elemanlarından birisi olarak değerlendirilmiştir. Prensip olarak namlu, bir ucu açık diğer ucu kapalı, değişken basınç ve sıcaklığa maruz kalan bir boru olarak düşünülmüştür (Susantez 2020). Namlunun, içinde barut barındıran mühimmatın namlu atım yatağı da denilen namlu yanma odası kısmına yerleştirilmesi ve yanmanın meydana geleceği bir hacme sahip olması gerekmektedir, mermi çekirdeğinin dönerek stabilize kazanması için gerekli yiv-setlere ve barut gazı enerjisinin mermiye aktarıldığı bir silindirik boya sahiptir (Düzenli ve Neşeli, 2020)

Merminin namluyu terk etme hızını analitik yöntemler yardımıyla çözümlmek için, mühimmattaki barut yapısını, mermi çekirdeği ağırlığı, atım yatağında oluşacak basınç miktarı, yiv-set ölçüleri, yiv-set adedi, yiv-setin sahip olduğu helis açısı değerleri gibi bilgileri belirlemek gerekmiştir. Değişen her bir değer karşılığında yeni bir çözüm kümesi oluşturmak gerekmiştir. Bu şekilde çözüm setlerinin oluşturulmasında kullanılan

yönteme Brute-Force¹ yöntemi denilmiştir. Bu yöntem ile yapılan tekrarlanan hesaplamalarda hata yapma oranı oldukça fazla ve yanlış hesaplama kaynaklı hatalı sonuç elde edilmesi istenmeyen bir durum olmuştur. Analitik yönteme alternatif ve oldukça pratik bir yöntem olan numerik analiz de denilen analiz yazılımları yardımıyla oluşturulan çalışmalardır. Özel yazılımlar kullanılarak hesaplamalar için giriş değerleri değiştirilerek elde edilen sonuçlar da maksimum namlu çıkış hızı değeri elde edilebilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemindeki hesaplamaların bilgisayar yardımıyla yapılıyor olması daha doğru ve kesin sonuçlar elde etmemizi sağlayacağı öngörülmüştür. Sonlu elemanlar analizleri için katı modeli mesh yapılarına ayıran özel bir yazılım kullanılmış ve program üzerinde farklı mesh yapıları tanımlanarak sonuçlar elde edilmiştir. Merminin namludan çıkışı esnasındaki açısal ve doğrusal hız değerlerinin maksimum olduğu andaki yazılıma girilen sınır değerleri belirlenmiştir.

Çalışmalarımızda oluşturulan namlunun boyunun uzun olması ve yiv-set yapısının oldukça kompleks olması sebebiyle oluşturulan mesh yapılarının beklenen değerlerden kat ve kat fazla oluşması numerik yöntemleri dezavantajlı duruma getirmiştir. Elde edilen sınır değerleri, ileriki bölümlerde daha detaylı değinilecek olan, Vallier-Heydenreich yöntemi yardımıyla doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Orta kalibre namlu için yapılacak olan bu çalışmanın ilk olması ve literatüre katkı sağlaması amaçlanmıştır.

1.2. Tezin Önemi

İç Balistik konusu, askeri maksatlı ateşli silah tasarımı ve imalatı için oldukça önem arz eden konulardandır. İç balistik değerlerinin tespit edilmesi ve bu değerlerin genel imal usulleri ile imalatının yapılabilir olması gerekmektedir. Askeri personelimizin kullanacağı silahları ülkemiz sınırlarında üretilebiliyor olması, ülkemiz ekonomisine katkı sağlayacak en önemli girdilerdendir ve ülkemizin dış ülkelere bağımlılığını azaltarak ve hatta tamamen ortadan kaldırarak askeri anlamda bağımsız bir ülke haline gelmesine yardımcı olması beklenmiştir. Savunma sanayi paydaşlarının ve Türkiye Cumhuriyeti yöneticilerin son yıllarda yaptıkları çalışmalarda, yerli ve milli ürünler ön plana çıkartılmıştır. Çalışmamızda elde edilecek bulguların, bu doktrin kapsamında katkı sağlaması öngörülmüştür.

¹ Brute-Force: Bir sorunu çözmek için saf bilgi işlem gücüne dayanan ve verimliliği artırmak için gelişmiş teknikler yerine her olasılığı deneyen basit yöntemlerdir.

İbn-i Haldun² tarafından söylenen “Coğrafya kaderdir” sözü ülkemiz açısından son derece geçerliliği olan bir husustur. Ülkemiz etrafında cereyan eden olaylar, ülkemize yönelik tehditler ve karşı karşıya kaldığımız terör faaliyetlerinin farklı boyutlar kazanması yeni ve farklı tedbirler alınmasını zorunlu kılmıştır. Ancak bu tedbirlerin alınması çalışmalarında zaman zaman bazı zorluklarla karşılaşmakta, yakın tarihimizde ve hâlen yaşadığımız ambargo ve kısıtlamalara maruz kalınmıştır (Uluç, 2021).

Literatürde daha önce yapılan çalışmalarda, 7,62mm tüfek namlusu, 9mm tabanca namlusu gibi ufak kalibre silahlar veya M101 topu namlusu gibi yüksek kalibre ateşli silahlar için çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmada ilk defa 30mm orta kalibre silah namlusu değerlendirmeye alınmıştır. 30mm ateşli silahlar yurt dışından temin etmek durumunda kaldığımız ve yakın zamanda ülkemiz savunma sanayi kuruluşlarının üstende çalıştığı özel bir gruptur. Yukarıda açıklandığı üzere seçtiğimiz kalibre namluda kullanılan mühimmat da yurt dışından temin edilebilmektedir. Optimum namlu parametre değerleri bu çalışma ile belirlenmiştir

Orta kalibre ateşli silahların namlularında meydana gelen anlık basınç değişimi, sürtünme değerleri ve ani sıcaklık artışlarının çok yüksek değerlerde olması sebebi ile namlularının ömürleri oldukça kısadır. Namlunun talaşlı imalatı için gerekli olan donanımların temin edilmesi oldukça maliyetli olduğu için bu çalışmada belirlenecek değerler dikkate alınarak doğru donanımın tespit edilmesi sağlanmıştır. Çalışmamızda göz önünde bulundurulması gereken giriş değerleri;

- Namlu iç çapı (Kalibre)
- Namlu boyu
- Mühimmatın çekirdek ağırlığı
- Yanma odası basınç değeri
- Yiv genişliği
- Yiv derinliği
- Set genişliği (yiv genişliğiyle doğrudan ilişkilidir)

² İbn-i Haldun: (1332-1406) Meşhur tarihçi, sosyolog, filozof, siyaset ve devlet adamı.

- Hatve (helis) açısı.

Giriş değerleri belirlendiğinde elde edilecek çıkış değerleri;

- Merminin namludan çıktığı andaki doğrusal hızı
- Merminin namludan çıktığı andaki açısal hızı

Elde edilmiştir.

Orta kalibre namluda kullanılması muhtemel farklı mühimmat çeşitleri mevcuttur. Çalışmamızda NM219 kodlu (TP-T) Target Practice Tracer merminin katalog değerleri baz alınmıştır. İthal olarak temin edilebilen bu mühimmat, silah kalifikasyon çalışmaları esnasında oldukça yüksek adetlerde kullanılması gerekmekte olduğu için doğrulama çalışmaları çok yüksek maliyetlerle gerçekleştirilebilmektedir. Çalışmamızda kullanılacak olan analitik yöntemler ile orta kalibre ateşli silah namlusunun imalatından sonraki doğrulama, test faaliyetleri, kalifikasyon çalışmaları için oluşacak harcamaların önlenmesi ve/veya azaltılması, bu çalışmada öğrenilen dersler sayesinde bilime katkı sağlayacağı öngörülmüştür.

Silah üretiminde en kritik parça namlu imalatıdır. Namlu imalatında malzeme seçimi, ısıtma işlem şartları, kaplama özellikleri, yiv-set imalatı, yiv-set açıları (helis açıları vb.) halen üzerinde çalışmalar yapılmakta olan araştırma ve geliştirme konularındandır. Namlu imalatında sektörde kabul görmüş malzemeler baktığımızda;

- 32CrMoV12-10 Fransız ve İtalyan menşei çelikler.
- 4140,4150, 4340 Amerikan menşei çelikler.
- EN19 veya EN24 İngiliz menşei çelikler.

Yukarıda listelenmiş ve yabancı menşei özel alaşımlı çelikler olduğunu görülmüştür. Malzeme mühendisliğini ilgilendiren bu alanda da devlet destekli yeni alaşım geliştirme çalışmaları yapıldı bilinmektedir.

Orta kalibre namlu imalatında temin süresi ortalama 12 ay olan ve oldukça yüksek maliyeti olan 32CrMoV12-10 malzeme kullanılmıştır. İç balistik açısından malzemenin mekanik dayanım özelliklerine ihtiyaç duyulmuştur ve çalışmalarımızda 32CrMoV12-10 malzemenin dayanım değerleri kullanılmıştır.

Namlu iç cidarına yiv-set oluşturma operasyonu özel siparişlerle temin edilebilecek olan ve oldukça maliyeti yüksek olan özel tezgâhlar kullanılmaktadır. Yine yurt dışından temin süresi 8-12 ay gibi oldukça uzun olan ve Şekil 1.2.1 de görülen, önceden belirlenmiş ölçülere uygun olarak ürettirilebilen özel kesici takımlar yardımıyla yiv-set formu broş çekme talaşlı imalat tekniği ile oluşturulmaktadır. Özel kesici takımları sipariş verebilmek için yiv-set ölçüleri sipariş esnasında belirlenmiş olması gerekmektedir. Sipariş esnasında tedarikçi firmaya verdiğiniz yiv-set ölçülerine uygun broşlar firma tarafından üretilir ve bu ölçüler sonradan değiştirilmesi ya da hassas ölçülere ayarlanması mümkün değildir. Kesici takımlarda rijit gövde üzerine, sipariş esnasında belirlenen ölçülere uygun oluşturulmuş, kesici ağızlar içermektedir. Namlu yiv-set ölçülerinde en ufak bir değişiklik yapılmak istenmesi halinde de dahi özel kesici takım üreticisine yüksek meblağlar karşılığında tekrardan yeni ölçülere sahip kesici takım siparişi verilmesi gerekmektedir. Bir yiv-set imalatı için kullanılacak olan broş seti en az 64 parça kesici takımdan meydana gelmektedir. Bu çalışmada oluşturulacak öğrenilmiş dersler sayesinde namlu imalatı için gerekli olan alt yapı oluşturulurken ön görülemeyen giderlerin önüne geçilmesi ve ekonomik kayıpların önlenmesi öngörülmüştür.



Şekil 1.2.1: Yiv-Set imalatı için kullanılan broş setleri.

Yiv-set oluşturmak için özel sipariş edilmiş tezgâhlara ihtiyaç olduğuna değinilmişti. Bu tezgâhlar hatve de denilen yiv-set helis açısını istenilen değerlerde oluşturabilecek bilgisayar kontrollü otomasyon içeren makinalardır. Yiv-set hatvesi en fazla 7 derece olacak şekilde broş setleri ürettirilmektedir. Çalışmamızda iki farklı hatve

açısı göz önünde bulundurulmuştur. İlki sabit açılı hatveye sahip yiv-set, namlu boyunca aynı derecede hatvesi olan bir yapı. İkincisi progresif hatveli, mermi atım yatağının bittiği noktadan itibaren başlayan ve belli aralıklarda hatve derecesi artırılarak ilerleyen bir yapıdır. Merminin maksimum hıza ulaşmasında namlu boyunun yanı sıra progresife hatve yapısı da oldukça önem taşımaktadır. Çalışmalarımızda katı modelleri oluşturulacak olan namluların görselleri ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

Detaylı olarak değindiğimiz dışa bağımlılıktan kurtulmak ve özgün savunma doktrini ile düşük maliyetlerde istenilen karakteristiklere sahip orta kalibre namlu üretimi gerçekleştirmek için yön gösterici bir çalışma yapılmıştır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

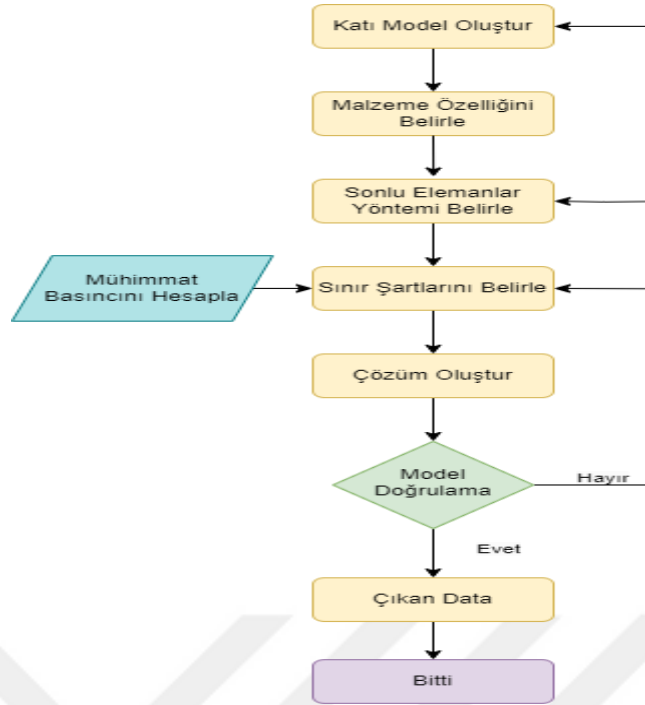
Orta kalibre ateşli silah namluları, mekanik dayanım ömrü olan ve sık sık yenisiyle değiştirilmesi gereken bir yapı parçasıdır. Ülkelerin ekonomisini ve güvenliğini doğrudan etkileyen namlu imalat çalışmaları, bilim adamları ve mühendislerin daha fazla üstünde çalışmasını gerektirecek bir konudur. Balistik parametrelerinin optimum değerine ulaşmak için uzun yıllardır çalışmalar yapılmakta ve farklı yöntemler geliştirilmiştir.

Özyılmaz (2010) yaptığı çalışmada yiv-set açıları ve yiv setin mermiye kazandırdığı açısal ve doğrusal hızı tanımlamıştır. Yivi tanımlarken, ateşli silah namluları içine oluşturulmuş boşluklar olarak belirtmiştir. Açısı, derinliği, genişliği olan bu yapıların iç balistik anlamında, mermiye hız kazandırma rolü olduğunu, dış balistik konusunda ise jiroskop dengesi oluşturan yapı olduğunu vurgulamıştır. Merminin aerodinamik yapısını iyileştirme etkisi olduğunu ve bu sayede hedefe daha isabetli mermi gönderilebildiğini belirtmiştir. Çalışma sayesinde ülkemizde namlular üzerine çalışmaları sürekli olarak ilgi alanı olduğunu görülmüştür.

Deng ve diğ., (2012)'nin yaptıkları çalışmada, 5,56 mm kalibre ateşli silah namlusunda sonlu elemanlar yöntemi ve FE (Finite Element) Analiz yazılımı yardımı ile iç balistik çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında Şekil 2.1. de tanımladıkları sonlu elemanlar yöntemi analiz akış şeması ile çalışma süreç adımlarını belirlemişler ve bu adımlara bağlı kalmışlardır. Vallier-Heydenreich ampirik (deneysel) formülleri kullanarak hesaplamalar yapmışlardır. LS-Dyna analiz yazılımını kullanarak numerik hesaplamalar yapmışlardır.

5.56mm kalibre tabanca namlusunda 6 adet sabit helis açısına sahip yiv-setli bir yapıda, 7.4 gr (gram) çekirdek ağırlığına sahip mühimmatın namlu çıkış hızı 840 m/sn (metre/saniye) olarak tespit edilmiştir. Ölçülen gerçek namlu çıkış hızı ile analiz programının verdiği değer arasındaki fark 1.07% olarak belirlenmiş ve bu değer güvenilir olduğu kabul edilmiştir. (Deng, Sun ve Chiu 2012)

Deng ve diğ., (2014)'nin yaptıkları çalışmada, 9mm kalibre 98mm boyundaki tabanca namlusunda sonlu elemanlar yöntemi ve LS-Dyna programı kullanılarak çözüm aramışlardır. Mesh yapıları üzerinde inceleme yapmışlardır. Çalışmada merminin doğrusal hızı ve açısal hızı grafiklerle desteklenmiştir. Mermi çekirdeğinde oluşan gerilmeler grafikler yardımıyla belirlenmiştir. Çekirdek üzerinde yiv-set izleri ve ölçümleri gösterilmiştir (Deng ve diğ., 2014).



Şekil 2.1: Sonlu elemanlar yöntemi analiz akış şeması (Deng ve diğ., 2014).

Cronemberger ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada, 7,62 namlu iç balistik değerlerini üç farklı teorik yöntem ve deneysel yöntem ile incelemişlerdir. Teorik yaklaşımlarından birincisi ampirik dataların kullanıldığı Vallier-Hydenreich metodudur, ikinci yaklaşım Lumped parametresi yöntemi ve son yaklaşım ise PRODAS (Projectile Rocket Ordnance Design and Analysis System) yazılımı kullanmışlardır. Teorik çözümlerde namlu içi basıncı, namlu içinde çekirdeğin konumu ve hızı, ulaşılan maksimum basınç değeri, çekirdeğin namludan çıkış hızı ve son olarak iç balistik olaylarının gerçekleşme süresi hesaplanmıştır. Cronemberger'in deneysel çalışmalarında zamana bağlı basınç değerleri ve namludan çıkan mermi çekirdeğinin 7 metre ilerideki hızı ölçümlenmiştir. Lumped parametresi metodu ile enerji kaybı ve karşı koyma direnci fonksiyonları modellenmiştir. Teorik ve deneysel çalışmalarda elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Sonuçlar analiz edilmiş ve kullanılan yöntemlerin çalışmaya katkıları vurgulanmıştır.

Deneysel çalışmada yapılan simülasyon, silah namlusu içindeki gazın termodinamik durumunu ve merminin dinamik davranışlarını, mermi çekirdeğinin kendi eksenini etrafındaki dönmesi ve ilerleme hızını ve ayrıca çekirdeğe zuhur eden sürtünme kuvvetinin namludaki yivnin etkisiyle ilişkilendirilmesi yapılarak basınç etkileri incelenmiştir. Tüm yöntemlerde kullanılan veriler aşağıda verilmiştir.

Çizelge 2.1, Çizelge 2.2. ve Çizelge 2.3. de verilen veriler ile uygun hesaplama metotları kullanılarak süre, hız ve basınç sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.1 PRODAS programı giriş verileri (Cronemberger ve diğ., 2014).

PARAMETRELER	DEĞERLER
Namlu Uzunluğu	533 mm
Yanma Odası Hacmi	3209 mm ³
Maksimum Basınç	320.34 MPa
Namlu Çıkış Hızı	840 m/s

Çizelge 2.2 Vallier-Heydenreich yöntemi giriş verileri (Cronemberger ve diğ., 2014).

PARAMETRELER	DEĞERLER
Namlu Uzunluğu	533 mm
Maksimum Basınç	320.34 MPa
Namlu Çıkış Hızı	840 m/s
Barut Ağırlığı	2.6762 gr
Mermi Çekirdek Ağırlığı	9.4873 gr
Mermi Çekirdek Ölçüsü	7.62 mm

Çizelge 2.3 Lumped metodu giriş verileri (Cronemberger ve diğ., 2014).

PARAMETRELER	DEĞERLER
Mermi Çekirdek Ölçüsü	7.62mm
Mermi Çekirdek Ağırlığı	9.4873 gr
Barut ağırlığı	2.6762 gr
Barut Yoğunluğu	1577.8 kg/m ³
Web Kalınlığı	0.28 mm
Barut Yanma Sabiti	$7.87 \cdot 10^{-7} (\text{m/s}) \text{ Pa}^{-a}$
Barut Basınç İndeksi	0.69
Barut Basıncı İtme Gücü	977.4 kJ/kg
Barut Gazı Isı Sabiti	1.24
Yanma Odası Hacmi	3209 mm ³
Form Katsayısı	0
C0-volume	0.001 m ³ /kg
Ateşleme Enerjisi	69J

Vallier-Hydenreich ve Lumped parametresi çalışmalarının çıktıları Çizelge 2.4. te gösterilmiştir. Teorik ve deneysel sonuçlarda görüldüğü üzere bir uyum söz konusudur. Çok küçük tutarsız sonuçların nedeninin deney prosedürü olduğu yönünde görüş bildirmişlerdir. Deneylerde, basınç ölçer kovanın hemen önüne yerleştirilmiştir ve zamanlayıcı ancak basınç 20 MPa ‘ya ulaştığında başladığı belirtilmiştir. Ayrıca deneyde elde edilen basınç namlunun sabit bir noktasında ölçülür ve simüle edilen basınçlar merminin tabanındaki hareketli bir noktadan elde edildiği varsayılmıştır.

Çizelge 2.4 Teorik ve deneysel bir çalışma sonuçları (Cronemberger ve diğ., 2014).

Metot	P_m (MPa)	P_0 (MPa)	t_0 (ms)	V_0 (m/s)
PRODAS Sonuçları	326	63	1.24	842
Vallier-Heydenreich Sonuçları	320	59	1.15	840
Lumped parametresi Sonuçları	326	48	1.16	825
Deneysel Sonuçlar	324	-	-	834

Çalıştıkları tüm yöntemlerin sınırlamalarının var olduğunu, ancak iç balistikle ilgili mühendislik bilgilerini sağladığı kabul edilmiştir. İç balistiğin incelenen yöntemlerle iyi bir şekilde temsil edildiği ve bu yöntemlerin basitlik incelemelerde, mühendislikte ve araştırmalarda hala faydalandığı belirtilmiştir (Cronemberger ve diğ., 2014).

Değirmenci (2015) çalışmasında NATO standardı 7,62 mm ve 5,56 mm çaplarında küçük kalibre namluları kullanarak Çizelge 2.5'te gösterildiği gibi farklı barut ağırlıklarına sahip mühimmatlar ile atış testleri yapmışlardır.

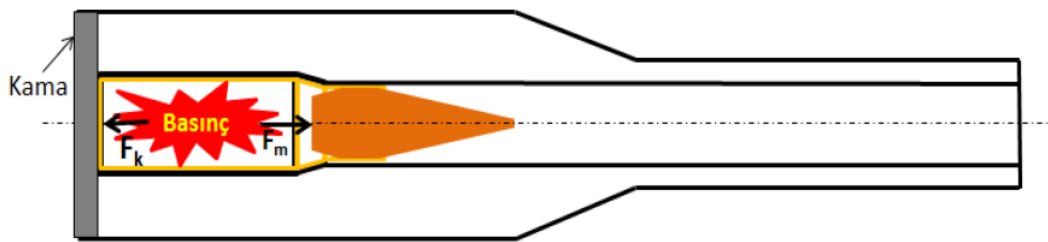
Çizelge 2.5: Laboratuvar ortamında hazırlanmış mühimmatların değerleri (Değirmenci, 2015)

Kalibre – Namlu Uzunluğu	Barut Ağırlığı (gr)	Çekirdek Ağırlığı (gr)	Çekirdek Ağırlığı (gr)	Çekirdek Ağırlığı (gr)
7.62 mm – 580 mm		9	10	11
	2.6	✓	✓	✓
	2.8	✓	✓	✓
	3.0	✓	✓	✓
5.56 mm – 450 mm		3.5	4.0	4.5
	1.5	✓	✓	✓
	1.6	✓	✓	✓
	1.7	✓	✓	✓

85% nitroselüloz ve 15% nitrogliserin içeren iki fazlı barut hassas ölçüm aletleri bulunan laboratuvarında hazırlanmıştır. 21 °C sıcaklıktaki ortamda her atış yapıldıktan sonra 15-20 dakika beklenerek homojen ortam oluşturulmuştur. 3062 deney ve 1440 faydalı veri toplama noktası kullanılarak 24 ay süren deneysel çalışmaları tamamlamışlardır. Çalışmanın sonucunda tek barutlu veya üç farklı barut karışımı ile oluşan itici gazlar kullanıldığında, basınç ve hız profilleri tahmin edilebileceğini savunmuşlardır. Deneylerinden bazılarında silindirik tanecikli tek bazlı itici gazlar

kullanılmış ve sonuçlar gözlemlediklerinde 8% daha az hız ve basınç meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu sapmaların en önemli nedeninin barutun yanma özellikleri ve daha düşük ısı değerlere sahip olmasıyla ilişkili olduğunu savunmuşlardır. Üçlü karışıma sahip barutlar ile denemeler yapamamışlardır fakat tümevarım yöntemiyle oluşacak değerleri tahmin edebileceklerini savundukları gözlemlenmiştir. Farklı namlu çapları için de çalışmalara devam ettiklerini bildirmişlerdir (Değirmenci, 2015).

Işık (2016) yaptığı çalışmada, merminin uzak mesafeye ulaştırılması yüksek basınç üreten barut ve bu basınç değerine dayanacak mekanik özelliklere sahip namlu sayesinde gerçekleşebileceğini savunmuştur. Namlu içinde oluşan basınç, balistik çalışmalarının en önemli girdilerdendir. Kullanılacak sevk barutu yapısının belirlenmesi, namludan çıkacak olan merminin hızına doğrudan etkili olduğunu ve çekirdek hızı açısından oldukça önemli olduğunu vurgulamıştır. Namludan çıkan merminin hızının biliniyor olması, silahın menzilin belirlenmesini sağlar ve atış cetveli oluşturulmasıyla uçuş zamanının bulunması sağlanabilmiştir. Merminin hedefe çarpma hızı belirlenmiş ve hedefteki delme kuvveti hesaplanmıştır. Namlu ömrünün belirlenmesi ile tasarıma girdi sağlayacak mermi geometrisinin belirlenmesi, sevk barutunun miktarının hesaplanması ve fişek kovan tasarımının yapılmasını sağlamıştır. Atışlar esnasında ısınan namlu henüz ateşlenmemiş olan mühimmatın içindeki barutun yanmasına sebep olabileceği ve bu olaya cook-off olayı denildiğine bu yayında karşılaşılmıştır. Cook-off oluşmaması için ısı transfer hesaplarının çok dikkati yapılması gerektiği vurgulanmıştır Şekil 2.2. Işık çalışmasında Noble-Abel denklemi ve Vielle yanma denklemlerini kullanarak ve namlu içinde yanan barutun oluşturduğu sıcaklık değerini elde etmiştir.



Şekil 2.2 Cook-off oluşması (Işık, 2016).

Deneyssel çalışmalar da gerçekleştiren Işık, MKE tarafından üretilen NATO standartlarına uygun 7,62x51mm mühimmatı kullanmıştır. Çift bazlı küresel barut içeren bu mühimmat ile yine NATO standartlarına uygun atış testleri yapılmış ve sonuçlar

karşılaştırılmıştır. Numerik ve analitik sonuçların birbirine oldukça yakın çıkması yapılan çalışmaların doğru olduğunu belirtmiştir (Işık, 2016).

Şentürk ve diğ. (2016) çalışmalarında 7,62x51mm mühimmat kullanan namlu içinde oluşan olayların oldukça karmaşık olduğunu ve kurulacak test düzenekleri, atış denemeleri, iç balistik parametrelerinin doğru ölçülmesi ve hesaplanmasının oldukça tehlikeli, zor ve maliyeti yüksek olduğuna değinmişlerdir. Çalışmalarında namlu boyunca oluşan basınç değişimleri ve namludan ilerleyen merminin hızının hesaplanabilmesi için yeni yöntemler geliştirmişler ve bu yöntemler ile çok hızlı ve doğru sonuç veren basınca bağlı hız dağılımlarını hesaplamışlardır. Lagrange yaklaşımı ile namlu içinde mermi hareket ettiğinde yanmamış gazlar da mermi ile hareket etmekte olduğunu vurgulamışlardır. Barutun yanması ile oluşan gazlar namlu iç yüzeyinde ısı transferi oluşturduğu vurgulanmıştır.

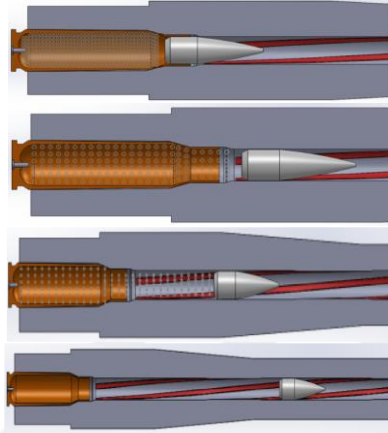
Vallier-Heydenreich metodu yardımıyla analitik hesaplamalar yapılmıştır ve namlu içinde oluşan basınçları, namlu çıkışında merminin hızı belirlenmiştir. Veille yanma kanunu, Noble-Abel denklemi ve karışım gaz kanunu kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Çok sayıda atışlı testler gerçekleştirip ve elde edilen sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada hesaplamalarda elde edilen sonuçlar ve test değerleri birbirine çok yakın çıktığı için çalışmaların doğru olduğu değerlendirilmiştir (Şentürk ve diğ., 2016).

Değirmenci ve diğ., (2016) yaptıkları çalışmada farklı tane boyutlu 2 fazlı barutların art arda ateşlenmesi sebebiyle her atışta barutun maruz kaldığı sıcaklığın farklı olduğunu belirtmişlerdir. Daha önce yapılan çalışmalardan farklı olarak ABAQUS yazılımı ve sonlu elemanlar yöntemleriyle sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada iç balistik parametreleri, termo-mekanik bir yaklaşımla deneysel, sayısal ve analitik yöntemler kullanılarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

NATO standardı 7,62 namlu ile yapılan deneysel çalışmalarda %85 Nitroselüloz ve %15 Nitrogliserin karışımı barutlar kullanılmıştır ve yapılan hesaplamalı ve deneysel çalışmalardan, katı yakıtın başlangıç sıcaklığı arttıkça veya tane boyutu küçüldükçe iç ve dış cidar sıcaklıklarının, iç basıncın ve mermi hızının arttığı görülmüştür Şekil.2.3.

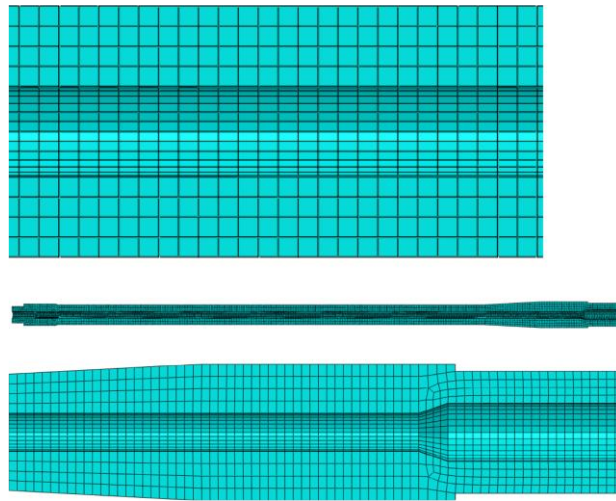
Tüm testlerde, namlu iç duvarındaki gerilimlerin ilk atışta en yüksek değeri ulaştığı, küçük termal stresler nedeniyle dış duvardaki gerilimlerin çok düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ardışık atışlara devam ettikçe, iç duvardaki termal stres azalarak daha düşük gerilimlere neden olurken, dış duvardaki termal stres artarak daha yüksek gerilimlere yol açtığı gözlemlenmiştir. 3 saniye aralıkla yapılan atışlarda oluşan

gerilmelerin namlu üstündeki etkileri deneysel ve hesaplamalı yöntemler ile analiz edilmiştir. Ardışık atışlar arasındaki süre arttıkça namlu iç ve dış duvar sıcaklıklarının birbirine yaklaştığı ancak namlunun daha fazla ısındığı ve namluda kalan gazların malzemeyi ısıtmaya devam ettiği gözlemlenmiştir.



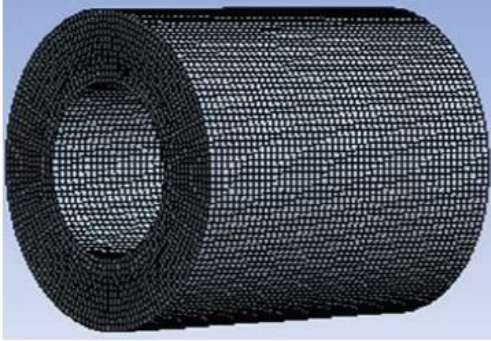
Şekil 2.3: Ateşlenen merminin zaman içindeki hareketleri (Değirmenci ve diğ.,2016).

İç balistik probleminin ısı ve gerilme analizi, hem sonlu elemanlar analiz programı ABAQUS hem de analitik çözüm kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Namlu eksenini boyunca analitik olarak hesaplanan Von-Mises gerilmeleri, sonlu elemanlar çözümüne mükemmel şekilde eşleştiği gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmaların pahalı ve güvenlik açısından tehlikeli olması sebebiyle sonlu elemanlar yönteminin kullanılabileceği belirlenmiştir. Namlu yanma odası ve namlu detayları Şekil 2.4. de görülmektedir.

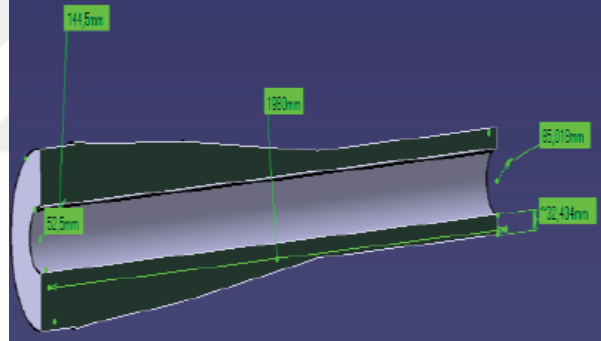


Şekil 2.4: Namlu yanma odası ve namlu detayları (Değirmenci ve diğ.,2016).

Özgüder ve diğ. (2017) M101 top namlusunda, atış esnasında meydana gelen patlamaların namlu cidarına etkisini ve namlu eksenini boyunca oluşan değişimlerin gözlemlenmesi ve optimize edilmesi çalışmaları yapılmıştır. Balistik incelemeleri sonlu elemanlar yöntemi ve güncel yazılımlar kullanımıyla değerlendirilmiştir. Catia tasarım programını kullanarak 3 boyutlu katı model oluşturulmuştur. İç çapı 105mm ve boyu 1980mm olan M101 top namlusunu örneklenmiştir. Patlama esnasında oluşan gerilmelerin hangi noktalarda yığılmalar oluşturduğu belirlenmiş ve buna göre namlu cidar kalınlığı hesabı yapılmıştır. Vallier-Heydenreich balistik çözüm yöntemi ile elde edilen değerler Ansys analiz yazılımında çıkan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ansys programında oluşturulan mesh yapısı Şekil 2.5'te verilmiştir. Namlu 3 boyutlu katı modeli ve geometrisi Şekil 2.6'da verilmiştir. Nümerik çalışmalarda farklı iterasyonlar değerlendirilmiş ve deneysel çalışmalarda faydalanılarak bir literatür haline getirilmiştir. Yapılan optimizasyon çalışmalarının sonucunda namluda oluşan gerilme değerlerinin akma sınırının oldukça altında bir değere sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2.5: M101 Top namlusu mesh yapısı
(Özgüder ve diğ., 2017)



Şekil 2.6: Hafifletilmiş namlu yapısı.
(Özgüder ve diğ., 2017)

Çalışmalarında seri atış yapılamayacağı öngörülmüş ve seri atış yapılacak silahlarda öneri olarak termal ve modal analizlerin yapılması gerektiği de sonuç olarak vurgulanmıştır (Özgüder ve diğ., 2017).

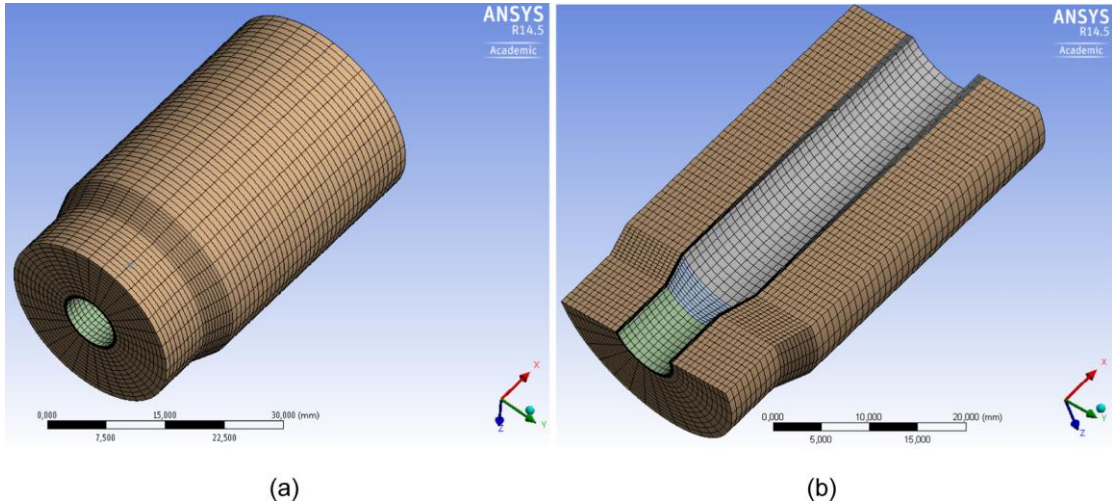
Işık ve Göktaş (2017) çalışmalarında art arda ateşlenen silahlarda mühimmatın namlu atım yatağındaki yüksek sıcaklık sebebiyle kendi kendine ateşlenmesini (Cook-off olayı) deneysel ve nümerik yöntemlerle incelenmiştir. 7,62 mm namlulu bir silahta çok sayıda atışlar gerçekleştirilmiştir. Mühimmatın namluya oturduğu alan olan yanma odasının, Şekil 2.6'da görülmektedir, sıcaklık değişimleri termal kamera ile ölçülmüştür. Sayısal analiz yapabilmek için yanma odası ve mühimmatı modellenmiş ve ANSYS 14.5

programı yardımıyla sonlu elemanlar yöntemleri ile yanma odası iç ve dış cidar sıcaklıklarının dağılımını analiz edilmiştir.

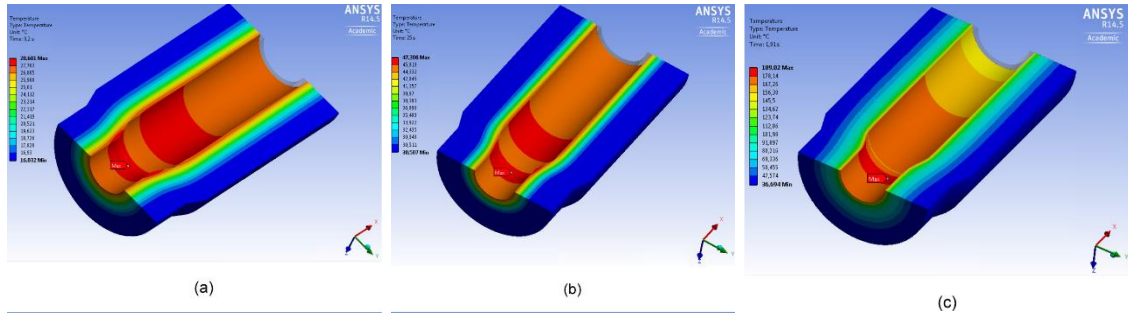


Şekil 2.6: 7.62 NATO mühimmatında Cook-of başlama noktası (Işık ve diğ., 2017)

7,62 x 51mm mühimmat kullanan G3 silahı ile oluşturulan test düzeneğinde 0,1 saniyede bir atış yapılarak art arda 20 atış yapılmıştır. Deneysel çalışmaları doğrulamak için ANSYS programında modellenmiş yanma odasına mesh yapıları atanmıştır ve sonlu elemanlar metodu yardımıyla oluşturulmuş mesh yapıları Şekil 2.7’de görülmektedir. Termal değişiklikler simüle edilmiş hali Şekil 2.8’de termal gerilmeler görsel olarak verilmiştir.



Şekil 2.7: Ansys de mesh yapısı oluşturulması (Işık ve diğ., 2017).

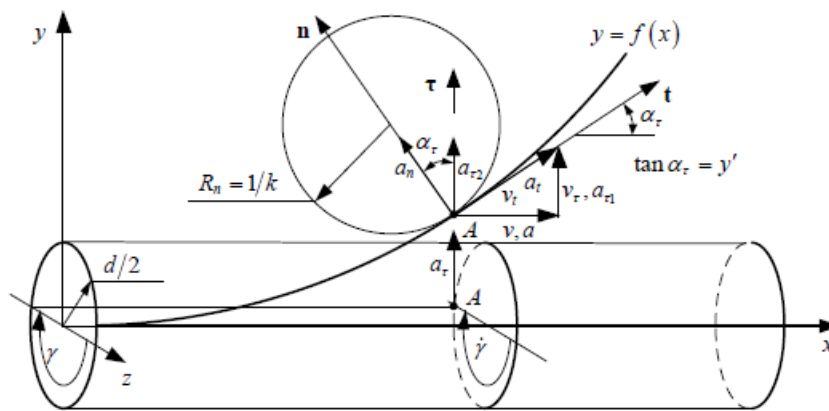


Şekil 2.8: Termal Gerilmeler (Işık ve diğ., 2017).

Susantez (2020) çalışmasında 7,62mm ve 9mm kalibre silah namluları üzerinde, literatürde az yer bulmuş olan Vallier-Heydenreich metodu ile yanma odası basıncı tespit edilmiştir. Namludaki maksimum basınç, namlu çıkış hızı, namlu boyu ve ortalama basıncın tayini için gerekli diğer değerlerin bilinmesi durumunda Vallier-Heydenreich metodu çeşitli silahların iç balistik verilerinin belirlenmesinde kullanılan temel bir metot olarak kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Susantez çalışmasında Sigma Plot ve Matlab programlarını kullanarak ve eğri uydurma yöntemi yardımıyla oldukça hassas sonuçlar elde etmiştir. Merminin namlu içerisindeki konumu, merminin o konumdaki hızı, namlu içi basıncı ve zaman gibi balistik parametreleri Matlab yazılımında geliştirdikleri kod yardımı ile elde etmiştir (Susantez, 2020)

Sun ve diğ., (2012) namluda oluşturulan yiv-set yapıları için teorik incelemeler yapılmıştır. Merminin namludan çıkış anındaki özelliklerine doğrudan etkisi olan yiv-set yapısını ve yiv-set ile olan geometrik ilişkisi Şekil 2.9 detaylı bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.9: Mermi çekirdeği ve yiv-set arasındaki geometrik ilişkinin gösterilişi (Sun ve diğ., 2012)

Sürmeli ve Neşeli (2020), namlu çıkış hızının enerji ile olan ilişkileri değerlendirilmiştir. Taguchi analiz yöntemini kullanarak çok yüksek adetlerde yapılması gereken deneylerin sayısını 9 adet e indirgenmiştir. Elde ettikleri sonuçları ANOVA analizi ile çalışmada önem arz eden çıktıkların üzerine ve deneyler içerisinde kullanılan en önemli parametrelerin etkinliklerinin seviyelerini belirlemek için kullanılmıştır.

Üç farklı namlu boyu, yiv-set twist oranı ve mermi çekirdeği ağırlığı ile Taguchi L9 analizi oluşturulmuştur. Askeri maksatlı çalışmalarda analizlerin maliyet düşürücü etkilerinin olduğunu ve kabul edilebilir doğrulukta olduğunu vurgulanmıştır.

Çalışmada iç balistik enerjisinin fırlattığı merminin namlu çıkış hızı ve çıkış anındaki enerjisinin tespiti amaçlanmış olup paralelde hafif silahların namlu parametrelerini belirlemek hedeflenmiştir. Şekil 2.10 yiv-set ve kalibre kavramları görsel olarak anlatılmıştır.



Şekil 2.10: Yiv-set ve kalibre gösterimi (Sümeli ve Neşeli, 2020)

Yivli namlular merminin namludan ayrıldıktan sonra hedefe ulaşmaya kadar stabil kalmasını sağlayan yapılardır. Merminin namludan çıkış hızının namlu boyu ile doğru orantılı olduğuna değinilmiştir. Namludan çıkış hızının dış balistik değerlerine de doğru orantılı olarak etki ettiği paralelinde merminin çok fazla hızlı olması atış hassasiyeti, güvenliği ve doğruluğuna olumsuz etki ettiği belirtilmiştir.

Merminin namludan çıkış hızı ve belirli bir süre sonraki hızını Şekil 2.11’de gösterilen kronograf cihazları yardımıyla metre/saniye cinsinden ölçülebileceğine değinilmiştir.

Merminin kazanacağı kinetik enerji mermi kütlesi ile mermi hızının karesinin çarpımıyla elde edilebileceği ve merminin namludan çıkış hızının belirleyici rol oynadığı vurgulanmıştır. Tüm bu teorik yaklaşımları doğrulamak üzere deneysel çalışmalar yapılmıştır.



Şekil 2.11: Kronograf görseli (Sümeli ve Neşeli, 2020)

Deneysel çalışmalarında Taguchi ortogonal dizinlerini kullanılmıştır ve 1.594.000 atışlı test yapmak yerine 9 adet deney ile sonuç elde edilmeye çalışılmıştır. Giriş parametresi olarak namlu çıkış hızı ve merminin ateşlenmesiyle oluşan terminal enerjisi alınmış ve çıkış parametreleri Lapua Ballistics programını yardımıyla belirlenmiştir. Lapua yazılımında menzil 1000 metre ve hava sıcaklığı 21 C olarak kabul edilmiştir. Elde edilen veriler Minitab istatistik programı yardımıyla Taguchi metodu ile analiz edilmiştir.

Deneysel sonuçlar ve analiz programları yardımıyla Çizelge 2.12 de verilen değerlerden optimum MVort hızını elde etmek için namlu boyu 710mm, twist oranı 1:11 inch ve çekirdek ağırlığının 150grain olması gerektiği belirlenmiştir.

Deney No	Namlu boyu (mm)	Twist oranı (inch)	Çekirdek ağırlığı (grain)	MVort (m/s)	Eort (Joule)	MVort için S/N (dB)	Eort için S/N (dB)
1	1	1	1	581.333	1845.833	55.2885	65.324
2	1	2	2	564.667	1933.167	55.0358	65.725
3	1	3	3	345.42	397.5	50.7669	51.987
4	2	1	2	439.87	1933.167	52.8665	65.725
5	2	2	3	411.32	462.667	52.2836	53.305
6	2	3	1	621.52	3679.167	55.8691	71.315
7	3	1	3	465.47	466.167	53.3578	53.371
8	3	2	1	673.33	1845.833	56.5646	65.324
9	3	3	2	624.66	1933.167	55.9129	65.725

Çizelge 2.12: Deneysel Sonuçlar (Sümeli ve Neşeli, 2020)

Elde edilen sonuçlara göre yapılan yorumda ağırlığı düşük olan bir mermi ile merminin ortalama hızının en fazla olmasını sağlamak için namlu boyunun maksimum ve twist oranının orta seviyede olması gerektiği belirlenmiştir. Bu çalışmada deneysel çalışmaların ve literatür çalışmalarının uyumlu olduğu sonucu ortaya çıkartılmıştır (Sürmeli ve Neşeli, 2020)

Şahin ve Özdemir (2021), Namlu tasarımı yapılırken mühimmata bağlı kalınması gerektiğini ve tasarım esnasında kullanılacak parametrelerin, namlu kalibre ölçüsü³, yivin genişliği ve derinliği, yivin helis açısı ve yanma odası boyutlarının olduğu belirtilmiştir. Yiv ve set yapısının mermiye dönü hareketi kazandırdığını, bu hareketin jiroskobik kararlılık sağlayacak değere gelebileceği kadar namlu boyunun uzun olması gerektiğine değinilmiştir. Yivlerin derinlik ve genişliklerinin namlu boyunca sabit olması gerektiğini ve sabit açılı yiv-set'e sahip namlularda bu durumun dezavantaj olduğu açıklanmıştır. Sabit açılı yiv setli namlular da mühimmatın ilk patlaması esnasında oluşan yüksek basınç, namlunun yanma odasına yakın bölümlerindeki yiv duvarlarına yüksek tork uyguladığını ve namlu çıkışına doğru azalan basınç değerleri nedeniyle yiv-set yanal duvarlarına gelen tork etkisinin azaldığını bu çalışmada gösterilmiştir.

İç balistik analizlerinde Basınç ve mermi hızı arasında doğrudan bir ilişki olduğuna değinilmiştir ve Şekil 2.13 de Basınç ve Mermi hızı arasındaki ilişki gösterilmiştir. İç balistiği Heydenreich metodu ve formülleri yardımı ile hesaplanmış ve Statik Kararlılık Faktörü de denilen Jiroskopik yarıçap değeri belirlenmiştir. Setlere gelen tork değerleri için namlu iç balistiğinde bilinen değerlere birde Jiroskopik yarıçap değeri eklenmiştir. Bu çalışma ile sabit hatveli namluların ömürlerinin progresif yiv-set yapısına sahip namlulara göre daha kısa olduğu belirlenmiştir.

Projectfirstlight isimli yazılım ile iç balistik değerleri, yiv-set eğrisi ve set'in maruz kaldığı tork değerlerinin hesaplanabileceği değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçlarından bizim için değerli olanı, namlu boyunun kısaltılması ve/veya namlu çıkışında yiv-set eğrisinin eğiminin azaltılmasının set üzerine gelen tork değerini artırdığı belirtilmiştir (Şahin ve Özdemir, 2021)

³ Set üstü çap ölçüsüne kalibre denilmektedir.



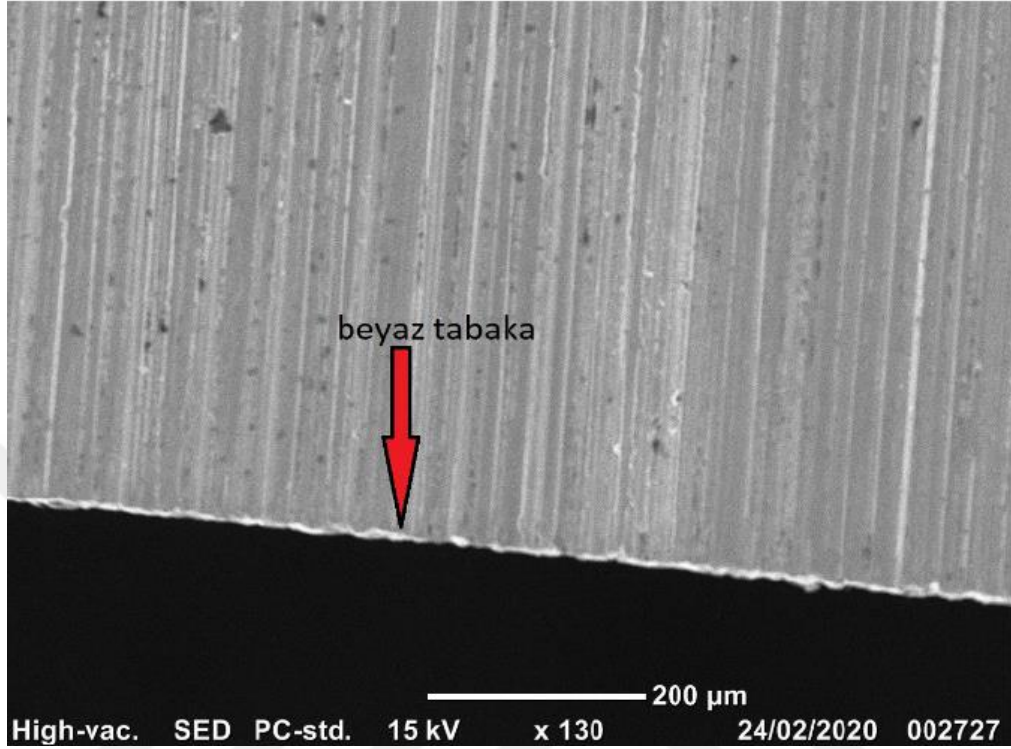
Şekil 2.13. Basınç ve Mermi hızı arasındaki ilişki (Şahin ve Özdemir, 2021).

Karslı ve diğ., (2021) çalışmalarında namlu imalatında kullanılan 32CrMoV12-10 malzemeye uygulanan gaz nitrasyon ve su verme işlemlerinin darbe dayanımına etkileri detaylı olarak incelemiştir. Silah parçalarında kullanılan malzemelerin yüksek gerilimler altında çalışabilmesi ve imalatları esnasında yüksek mukavemetlere dayanım göstermesi gerektiği belirtilmiştir. Silahların kullanımları esnasında şekillerinde değişiklik oluşmaması veya sınır şartlarını aşmayacak kadar şekil değiştirmesini sağlamak yoluyla ömürlerinin uzatılabileceği belirlenmiştir. Silah ömrünün uzatılması için boyutsal kararlı malzemeler seçilmeli ve yüksek darbe direnci ve yüksek mukavemetli hammaddeler tercih edilmesi gerektiğine değinilmiştir.

Yapılan çalışmalarda silah ömürlerine doğrudan etki eden kaplama ve ısıtma işlemi gibi özel prosesler oldukça önem kazanmıştır. Farklı malzemelerde yapılan deneysel çalışmalarda bazı bulgular elde edilmiştir. X40CrMoV51 sıcak iş çeliğine su verme ve iyon nitrürleme (plazma nitrasyon) yöntemleri uygulandığında iyon nitrürlemenin iki kat daha sert yüzey oluşturduğu belirlenmiştir. Isıtılmış malzemelerin soğutma süreleri ve su veya hava soğutma gibi farklı kondisyonlara göre farklı sertlikler ve/veya içyapısı sünek malzemeler oluşmasına neden olduğu belirlenmiştir.

32CrMoV12-10 en bilinen ve çok sıklıkla kullanılan namlu malzemesidir. Farklı çalışmalar ile bu malzemenin yüzey sertliklerine gaz nitrürleme ve su verme işlemleri uygulanmıştır. Gaz nitrürleme su vermeye göre 1,5 kat daha sert fakat malzemenin iç yapısı daha sünek olduğu belirlenmiştir. Şekil 2.14 de gaz nitrasyon uygulanmış namlu

malzemesi 32CrMoV12-10'un taramalı elektron mikroskopundaki görüntüsü görülmektedir. Homojen beyaz tabaka oluşumu detaylı olarak verilmiştir.

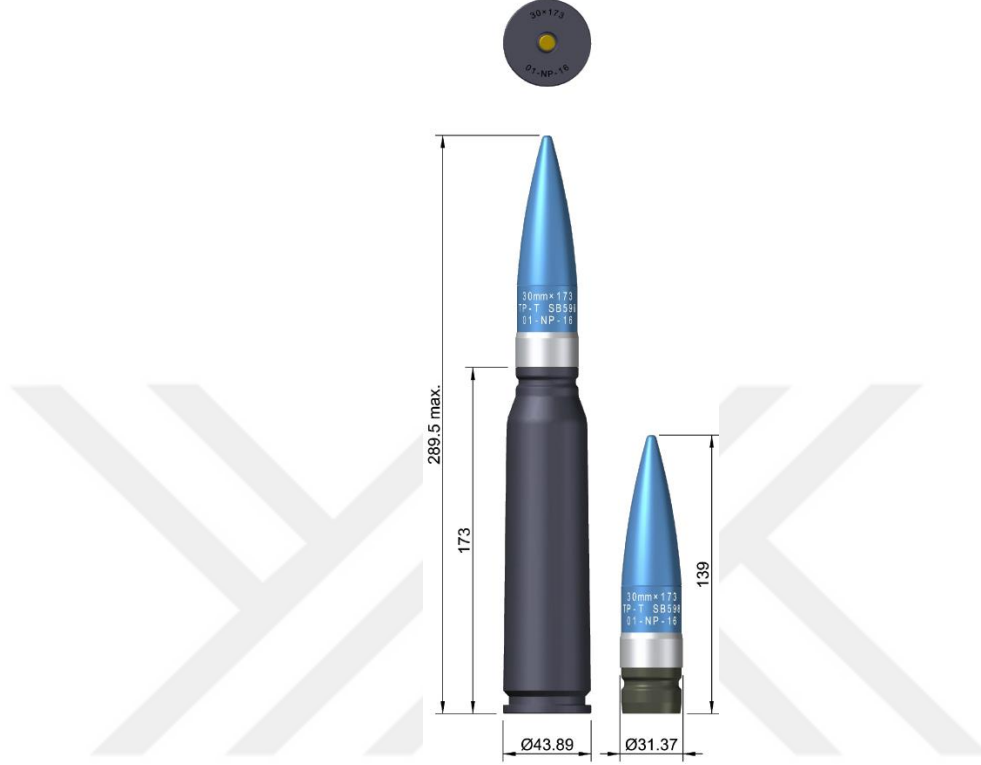


Şekil 2.14: 32CrMoV12-10 Beyaz katman oluşumu (Karslı ve diğ., 2021)

Gaz nitrasyon uygulanmış 32CrMoV12-10 malzemenin yüzeyinin daha sert olması namlunun aşınma dayanımını artırması ve ömrünün uzun olmasına olanak sağlayacağı belirlenmiştir. (Karslı ve diğ., 2021)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Orta kalibre namlu içi balistik değerlerini temin etmek ve namludan çıkan merminin açısal ve doğrusal hızlarını belirlemek için yapılacak çalışmalarda Şekil-3.1 de görülen 30mm x 173 mühimmat NM219 TP-T modeli tercih edilmiştir.



Şekil 3.1: 30mmx173 TP-T Mühimmat (nammo.com, 2023).

Seçilmiş olan mühimmatın teknik dataları mühimmat üretici olan nammo.com web sitesinden elde edilmiştir (Anonymous, 2023). Şekil 3.1 de detay ölçüleri verilen mühimmat MP-T/SD, NM222/Mk264 modelleriyle aynı balistik özelliklere sahiptir ve Bushmaster II Mk44, Mauser Mk30-2 ve DLS CAMGUN 30 GI-30 silahlarında kullanılabilir.

Çizelge 3.1: NM219 (TP-T) Target Practice, Tracer veri tablosu (Anonymous, 2023).

NM219 30mm x 173 (TP-T) Target Practice, Tracer	
Mermi Tanımlaması	Mavi Lake Gövde
Mermi Malzemesi	Çelik + Alüminyum
Kasa Malzemesi	Çelik (Gri Lake)
Kartuş Ağırlığı	840gr
Mermi Ağırlığı	363gr
Ateşleme Sistem Türü	Siyah Pudra
Barut Türü	Tek Fazlı
Barut Ağırlığı	160gr
Namlu Çıkış Hızı (Beklenen)	1100m/s
Yanma Odası Basınç Değeri	Ortalama değeri: 460Mpa

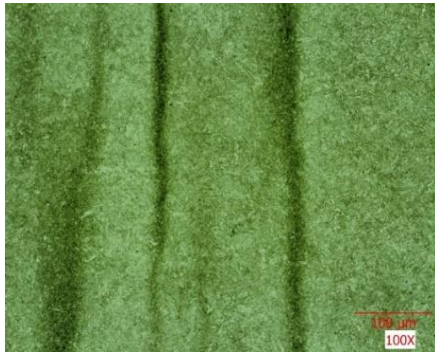
Maksimum Mesafe	8500m
Etkili Mesafe	3000m
Kesinlik	Tipik sapma < 0.5mil
Çalışma Ortamı Sıcaklığı	-46 °C ile +63°C arasında

Analiz programında kullanılmak üzere namlu çeliği olarak 32CrMoV12-10 seçilmiştir ve Çizelge 3.2 de kimyasal bileşenleri verilmiştir.

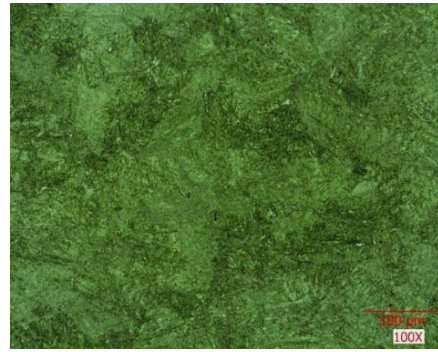
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Al	N2	H2 (ppm)	O2	Sn
0,36	0,25	0,45	0,007	0,001	2,85	0,07	0,87	0,27	0,05	0,008	0,009	2	0,0032	0,004

Çizelge 3.2: 32CrMoV12-10 Kimyasal Özellikleri (Anonymous, 2023).

Namlunun talaşlı imalat yöntemleri yardımıyla elde edilen hassasiyeti, namludan merminin çıkış hızını etkileyen faktörlerden birisidir. Derin delik delme prosesi ile oluşturulan deliklerin eş-merkezli delinebilmesi için seçilen malzemenin iç yapısının homojen olması istenmektedir. Homojen iç yapıya sahip bir malzeme belirlemek için yapılan çalışmalarda 32CrMoV12-10 malzemenin iç yapısı incelenmiştir. Kriyojenik⁴ işlem görmemiş malzeme iç yapısı ve kriyojenik işlem görmüş malzeme iç yapısı sırasıyla Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te verilmiştir. Kriyojenik işlem görmüş olan ham malzeme iç yapısının homojen dağılmış olduğu belirlenmiştir. Mineral yapısı homojen olan kriyojenik işlem görmüş hammaddenin çekirdek sertliği 388HB olarak ölçülmüştür ve talaşlı imalat teknikleriyle namlu haline getirilmesi çok daha rahat olacağı değerlendirilmiştir. Seçilen malzemenin mekanik dayanım diyagramı Şekil 3.4 de verilmiştir ve akma değeri 1144 N/mm^2 olarak belirlenmiştir.



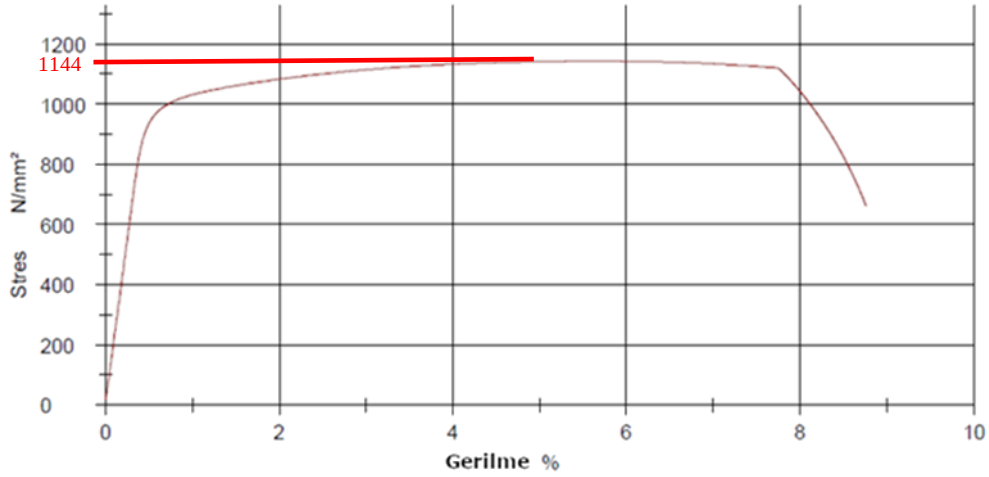
Şekil 3.2: Kriyojenik Uygulanmamış
(Anonymous, 2023)



Şekil 3.3: Kriyojenik Uygulanmış
(Anonymous, 2023).

⁴ Kriyojenik: Metalik malzemeleri çok düşük sıcaklıklara (-196 °C) soğutularak istenilen metalurjik ve mikro yapısal özelliklere kavuşması sağlanması işlemidir.

Çalışmalarımızda kullanılmak üzere 2 farklı yiv-set hatve değerlerine sahip 30mm x 2700mm orta kalibre silah namlusu Solidworks katı model tasarım yazılımını kullanarak oluşturulmuştur. Namludan çıkan merminin maksimum hıza ulaşması için namlu iç balistik değerleri olarak da bilinen namlu iç çap toleransları, yiv-set ölçüleri ve adetleri, hatve (helis) açıları belirlenmiştir.



Şekil 3.4: 32CrMoV12-10 Mekanik Özellikleri (Anonymous, 2023).

Literatürlerde yer almış farklı iç balistik hesaplama ve karşılaştırma metotları mevcuttur. Sevk barutu tane yapısı incelenerek gaz kanunları, hal denklemleri ve enerji yasaları formülleri kullanılarak merminin namludan çıkış anında meydana gelen basınç ve merminin hızı, süreye bağlı olarak incelenmiştir. Bu yaklaşımda istenilen balistik değerlerine ulaşmak için barut tanelerinde iyileştirme çalışmaları yapılabilmektedir. Barut tanelerine açılan delikler ile aynı miktarda barut ile daha fazla basınç üreten yanma halleri oluşturulmak suretiyle merminin namludan çıkış hızlarını artırmak hedeflenmiştir. Çalışmamızda barut tanelerine müdahale etme imkânımız olmadığı için bu yaklaşım kullanılmamıştır.

Prodas programı yardımı ile yapılan çalışmalara da sıklıkla rastlanmıştır. Hedeflenen sonuca iterasyon yöntemleri kullanılarak yaklaşılmaya çalışılmıştır. Programdan elde edilen sonuçlar numerik analiz programları ile doğrulanması sağlanmıştır. Kullanılan numerik analiz programlarında kullanılan yöntemlerini seçmek ve seçilen yöntemler sonucunda elde edilen sonuçların doğru değeri verdiğini belirlemek sadece Prodas programından çıkan sonuca yaklaşılmakla mümkün olabildiği

görülmüştür. Numerik çözümlerde birden fazla analiz ortamı sağlanabilmektedir ve çözülen problem için en doğru yaklaşımı belirlemek oldukça zor olmuştur.

Lagrange yaklaşımı barutun yanmasıyla oluşan gazların balistik etkilerini incelemek için kullanılmıştır. Bu yaklaşımla elde edilen farklı çekirdek ağırlığındaki mermiler için gaz basıncı değişim sonuçları değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım için aynı çapta farklı ağırlıklarda mühimmatlar kullanılmıştır.

Analitik yaklaşımlar kullanılmadan, numerik analiz programları yardımıyla namlu veya mühimmat tasarımları çalışmaları da sıklıkla karşılaşılan çalışmalar olmuştur. Genellikle küçük kalibre silahların tasarım ve analizleri gerçekleştirilerek farklı deney setleri ile numerik analiz programının sonuçları karşılaştırılmıştır. Orta kalibre namluların talaşlı imalatının zor olması nedeniyle bu yöntem benimsenmemiştir.

Çalışmamızda kullanmayı uygun gördüğümüz metod Vallier-Heydenreich metodu olmuştur. Bu yöntem kullanılarak sonuçlandırılmış ve literatüre geçmiş çalışmanın az olduğu (Susantez, 2020) tarafından vurgulanmıştır. Orta kalibre namlu çalışmalarında ilk defa 30mm namlunun farklı tasarımları kullanılacak ve belirlenen bir mühimmat için mermi çekirdeğinin namludan çıkışı esnasındaki doğrusal ve açısız hızını hesaplamada Vallier-Heydenreich metodu kullanılarak sonuca ulaşılmıştır.

Analitik yöntemler kullanılarak yapılacak olan çalışmalarımızda Vallier-Heydenreich metodu formülleri kullanılarak namlu iç basıncını, namlu içerisinde mermi konumunu ve merminin namludan çıkış esnasındaki açısız ve doğrusal hız değerleri hesaplanmıştır.

Prezometrik verim namlu içindeki ortalama basıncın maksimum basınca oranı ile elde edilen bir sabittir. Vallier-Heydenreich metodunda önceden oluşturulmuş sabitlerden oluşan tablolardaki değerlerin prezometrik oran ile belirlenmesiyle, bu sabitlerin formüllerde kullanılması sağlanmıştır. Çalışmalarımızda yiv ve set değerlerindeki oldukça ufak değişimler değerlendirileceği için prezometrik oran tabloda yer almayan değerleri verdiğinde tabloda yer alan sabitler iterasyon yöntemiyle belirlenerek mümkün olmuştur.

Analitik çözümlerde kullanılacak Vallier-Heydenreich formülleri aşağıda verilmiştir ve detaylandırılmıştır (Öztürk, 1984; Pihtili ve Yildirim, 2023).

Namlu içi ortalama basınç değeri P_m değeri için mermi çapını D , namlu boyu X_e , mermi kütlesini G , sevk barutu kütlesini L , merminin namlu ağzından çıkış hızını V_o ile gösterildiğinde, Denklem 3.1 yardımıyla hesaplanmıştır. Namlu boyu bilinmiyor olması durumunda Denklem 3.2 kullanılabilir.

$$P_m = \left(\frac{G+0,5L}{2g.X_e.A} \right) V_0^2 \quad (3.1)$$

$$X_e = \frac{(G+0,5L)}{2g\eta P_{max}q} V_0^2 \quad (3.2)$$

Namlu içi ortalama basıncının maksimum basınç P_{max} 'e oranı η ile gösterilir ve prezometrik verim olarak da adlandırılmaktadır ve Denklem 3.3 ile belirlenmiştir.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{max}} \quad (3.3)$$

φ Merminin namlu içindeki hareketi sırasında merminin arkasında oluşan hacmin yanma odasının net hacmine oranı gösterilmektedir. V_B Yanma odası hacmi değeri ve X_e namlu boyu değeri denklem 3.2'den elde edilirken, φ_e değeri aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır (Pihtili ve Yildirim, 2023).

$$\varphi_e = \frac{A.X_e}{V_B^x} \quad (3.4)$$

$X_1 = X_e$ olduğu anda,

$$\varphi = \varphi_e.m^x = m_p + 0,5m_c \quad (3.5)$$

X_1 Namlu içinde basıncın maksimum olduğu andaki mermi çekirdeğinin konumu göstermektedir. Vallier-Heydenreich tablolarından faydalanılarak belirlenen $\Sigma(\eta)$ sabiti yardımıyla Denklem 3.6 ile hesaplanmıştır.

$$X_1 = X_e \Sigma(\eta) \quad (3.6)$$

Ateşlenen merminin oluşturduğu basıncın maksimum değere ulaşması için geçen süre t_1 ile gösterilmiştir ve Denklem 3.7. yardımıyla hesaplanmıştır. Vallier-Heydenreich tablolarından faydalanılarak belirlenen $\theta(\eta)$ sabiti ve V_0 ilk hız değeri ile belirlenmiştir.

$$t_1 = \frac{2X_e}{V_0} \theta(\eta) \quad (3.7)$$

Gaz basıncının maksimum değere ulaştığı andaki mermi hızı V_1 ile gösterilmiş ve Denklem 3.8 ile hesaplanmıştır. Vallier-Heydenreich tablolarından faydalanılarak belirlenen $\Phi(\eta)$ sabitini göstermektedir.

$$V_1 = V_0 \Phi(\eta) \quad (3.8)$$

Toplam iç balistik zamanı t_e ile gösterilir ve ateşlenen merminin namludan çıktığı ana kadar geçen süreyi belirtmiştir. Denklem 3.9'dan faydalanılarak hesaplanmıştır. Vallier-Heydenreich tablolarından faydalanılarak belirlenen $T(\eta)$ sabitini göstermektedir.

$$t_e = \frac{2X_e}{V_0} T(\eta) \quad (3.9)$$

Merminin namlu ağzından çıktığı andaki namlu ağız kısmındaki basınç değeri P_e ile gösterilmiştir. Denklem 3.10'den faydalanılarak hesaplanmıştır. Vallier-Heydenreich tablolarından faydalanılarak belirlenen $\Pi(\eta)$ sabiti göstermektedir.

$$P_e = P_m \Pi(\eta) \quad (3.10)$$

Merminin namlu ucundan çıkarken edindiği ilk hız değeri V_0 ile gösterilmiştir ve Denklem 3.11 ile hesaplanmıştır. Burada g yerçekimi ivmesini, Q sevk barutunun verdiği ısı değerini, A namlu kesit alanı, φ ısı kaybı katsayısını, G mermi ağırlığını ve son olarak L sevk barutu ağırlığını göstermektedir.

$$V_0 = \sqrt[2]{\frac{2 \cdot g \cdot Q \cdot A \cdot \varphi}{(G/L) + 0,5}} \quad (3.11)$$

Mermi arkasında barutun tamamen yanması ile denklem 3.12 de θ_b sabiti elde edilmiştir.

$$\theta_b = \frac{P_o^2 \cdot A^2}{2B_a^2 m^x m_c Q_{ex}} \quad (3.12)$$

Namlu içindeki mermi hızı denklem 3.13 ile belirlenmiştir,

$$X' = V = \frac{2 \cdot B_a \cdot m_c \cdot Q_{ex}}{P_o \cdot A} \cdot \theta \quad (3.13)$$

$$\theta = 1 - \frac{1}{(1+\varphi)^{\frac{K-1}{2}}} = 1 - \frac{1}{(1+\varphi)^{0,15}} \quad (3.14)$$

Mermi yanma odasında oluşan basın oranı Z ile gösterilmiş ve değeri denklem 3.15 ile belirlenmiştir.

$$Z = \frac{B_a \cdot m^x}{P_o \cdot A} v \quad (3.15)$$

Maksimum gaz basıncını denklem 3.16 ve 3.17 ile hesaplanmıştır.

$$\theta_{P_{max}} = \frac{k-1}{2k} \quad (3.16)$$

$$P_{max} = \frac{2(k-1)m^x \beta_a m_c Q_{ex}}{V_B^x P_o^2 A^2} \cdot \left(\frac{\theta - \theta^2}{1+\varphi} \right)_{P_{max}} \quad (3.17)$$

Merminin namlu içindeki hız değerleri için denklem 3.18 kullanılmıştır.

$$V_e = \sqrt{\frac{2m_c Q_{ex} \varphi_a}{m^x}} \quad (3.18)$$

Gaz basıncı maksimum olduğu anda patlama katsayısını 3.19 denkleminde belirlenmiştir.

$$\frac{V_B^x p_o^2 A^2 p_{max}}{2(k-1)m^x m_c^2 Q_{ex}^2} \left(\frac{1+\varphi}{\theta - \theta^2} \right)_{P_{max}} \quad (3.19)$$

Barutun tamamen yanmasından sonra hesaplamalar da kullanılacak olan formüller sırasıyla verilmiştir.

$$X = \frac{V_B^x}{A} \varphi \quad (3.20)$$

$$C = \frac{1}{1-\theta_b} \quad (3.21)$$

$$\psi = \frac{1}{(1+\varphi)^{k-1}} \quad (3.22)$$

$$\varphi_a = 1 - C \cdot \psi \quad (3.23)$$

$$V = \sqrt{\frac{2m_c \cdot Q_{ex}}{m^x} \cdot \varphi_a} \quad (3.24)$$

$$P = \frac{(k-1) \cdot (m_c \cdot Q_{ex} - \frac{1}{2} m^x v^2)}{V_V^x + A_x} \quad (3.25)$$

$$C \cdot \psi = \frac{1}{(1-\theta_b)(1+\varphi)^{(k-1)}} \quad (3.26)$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} + N_Z \cdot b \cdot t \quad (3.27)$$

Vallier-Heydenreich metodunda yukarıda verilen formüller ve gerekli tablolar kullanılarak sonuca ulaşılmıştır. Analitik hesaplamalara girdi sağlayacak değerler ve sınır şartları belirlenmiştir. Çözümde namlu iç çapı 30mm ve namlu uzunluğu 2700mm olarak belirlenmişti ve sabit hatveli ve progresif hatveli yiv-set yapıları için yukarıda detay bilgileri Çizelge 3.1’de verilen 30x173mm TP-T mühimmat verileri kullanılmıştır.

Verilen denklemler yardımıyla iç balistik hesaplamaları yapılmış ve çizelgelerde detayları paylaşılmıştır.

3.1. İç Balistik Hesaplamaları

Yukarıdaki hesaplama yöntemleri ve denklemleri verilen iç balistik kavramları için seçilen namlu ve mühimmat bilgileri Çizelge 3.1.1 de verilmiştir.

Çizelge 3.1.1: Balistik hesaplamalar için giriş değerleri tablosu

Simge	Açıklama	Birim	Değer
D	Namlu İç Çapı	mm	30
g	Yer çekimi İvmesi	m/s^2	9,81
G	Mermi Çekirdek Ağırlığı	Kg	0,363
L	Barut Ağırlığı	Kg	0,160
Vo	Mermi İlk Hız değeri	m/s	1100

P _{max}	Maksimum Gaz Basıncı Değeri	Kg/cm^2	4690,69
A	Namlu Kesit Alanı	cm^2	7,065
X_e	Merminin Namlu İçinde toplam ilerlemesi	Mm	2700

Tablodaki giriş değerleri kullanılarak öncelikle merminin namludan çıkışı esnasındaki ilk hızı V_0 değerini Denklem 3.11 yardımıyla $V_0 = 1098,93$ m/s değeri hesaplanmıştır. Nammo firması katalogunda merminin namludan çıkış hız değerini 1100 mm/s olarak belirlenmiştir. Vallier-Heydenreich denklemleri ile hesaplanan hız ile çok küçük bir sapma görülmüştür. Analitik yöntemler ile yapılan hesaplamalar da 3% oranında doğru sonuca yaklaşmak çözümün doğru kabul edilebileceği genel kabul görmüştür (Düzenli ve Neşeli, 2020). Farkın oluşmasında ısı kaybı katsayısı ϕ değerinin 0,4 olarak seçilmiş olabileceği öngörülmüştür. Kullanılan mühimmat için ısı kaybı katsayısı verisi mevcut değildir ve farkın oldukça küçük bir değer olması sebebiyle hesaplamaların doğru olduğu kabul edilmiştir.

Vallier-Heydenreich metoduyla yapılan hesaplamalarda namlu kesit alanının denklemlere dahil edilmediği görülmektedir. Namluda oluşturulan yiv-set boşlukları her bir namluda farklı kesit alanı oluşturmaktadır ve mermi çekirdeğinin ilk hız değerini belirlemek için hesaplarımıza kesit alanının dahil edilmesi gerekmektedir. 3.1.1 de verilen denklem ile kesit alanında meydana gelen değişimlerin hıza etkisi hesaplanmıştır. Denklem (Anonymous, 2012)'de verilmiştir. Buna göre denklemde düzenleme yapıldığında, cf düzeltme faktörü katsayısı değeri küçük kalibreler de 0.25 seçilirken orta kalibre silahlar da 0.35 seçilmesinin uygun olacağı belirlenmiştir.

Namludan çıkan merminin doğrusal çıkış hızı yiv-set helis açılarının daha hızlı veya daha yavaş olmasına göre değişir mi? Kesinlikle ama düşündüğünüzden çok daha az. Daha hızlı helis bükülme oranları mermileri bir miktar yavaşlatır, ancak hız kaybı o kadar da önemli değildir ve göz ardı edilebilir. Namlu yiv set helis bükülme hızları göz önüne alındığında, daha hızlı helis bükülme oranlarının namlu çıkış hızını azaltacağı yaygın bir inançtır. Buradaki düşünce, daha hızlı bükülme oranının merminin ileri hareketine direneceği ve onu yavaşlatacağıdır (Anonymous, 2023).

$$V_0 = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot P_{max} \cdot A \cdot X_e}{(cf) \cdot G}\right)} / 12 \text{ ft/sec} \quad (3.1.1)$$

$$V_0 = V_0 / 3,281 \text{ m/s} \quad (3.1.2)$$

Mühimmat kataloğunda verilen mermi çekirdeği ilk hız değeri 1100m/s değerini sağlayabilecek optimum namlu balistik özelliklerinin belirlenmesi için bir dizi analitik yöntem kullanılmıştır. Bir adet 16 adet yiv-set içeren ve sabit helis açısına sahip namlu ve sırasıyla 4, 16 ve 20 adet yiv-set içeren progresif helis açılmış 3 adet farklı namlu için çalışmalar yapılmıştır. Tablolarda kullanılacak kısaltmalar Çizelge 3.1.1’de verilmiştir. 16 adet yiv-set içeren ve sabit helis açısına sahip bir namluda 3 farklı yiv-set değeri Çizelge 3.1.2’de belirlenmiştir.

Çizelge 3.1.1: Kısaltmalar ve açıklamaları

Sembol	Birim	Açıklama
V_o	m/s	Merminin namludan çıkış hızı
X_1	mm	Namlu içinde basıncın maksimum olduğu andaki mermi çekirdeği konumu
t_1	ms	Namlu içinde basıncın maksimum olduğu andaki süre
V_1	m/s	Gaz basıncının maksimum değere ulaştığı andaki mermi hızı
P_e	kg/cm ²	Namlu çıkışındaki gaz basıncı
t_e	ms	Merminin namludan çıkış hızı
ω_e	rad/s	Merminin namlu çıkışındaki açısal hızı
A	cm ²	Namlu kesit alanı

Çizelge 3.1.2: 16 Adet Yiv-set içeren namlu değerleri

Namlu	Yiv-Set Adet	Yiv Genişliği (mm)	Yiv Derinliği (mm)	Helis Açısı
SH-1	16	1	0,5	4°
SH-2	16	3	3	4°
SH-3	16	4	6	4°

16 adet yiv-set içeren sabit helis açılı namlu için Çizelge 3.1.2 de verilen değerler yardımıyla hesaplamalar yapılmıştır ve sonuçlar Çizelge 3.1.3 de verilmiştir.

Çizelge 3.1.3: Sabit hatveli namlu değerleri

	V_o	A	X_1	t_1	V_1	P_e	t_e	ω_e
SH-1	1108,991	7,549	199,800	1,743	424,743	544,993	4,606	5169,879
SH-2	1273,139	9,949	199,800	1,518	487,612	544,993	4,012	5935,103
SH-3	1097,175	7,389	199,800	1,762	420,218	544,993	4,656	5114,795

Tabloda verilen değerleri incelediğimizde merminin namlu çıkış hızı namlu kesit alanına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Açısal hız değerleri merminin çıkış hızı ile doğru orantılı arttığı gözlemlenmiştir.

Progresif helis açılı namlular için seçilen değerler Çizelge 3.1.4'te belirlenmiştir.

Çizelge 3.1.4: Progresif helis açılı namlu değerleri

Namlu	Yiv-Set Adet	Yiv Genişliği (mm)	Yiv Derinliği (mm)	Helis Açısı
PH-1	4	1	0,5	4° - 7°
PH-2	4	3	3	4° - 7°
PH-3	4	4	6	4° - 7°
PH-4	16	1	3	4° - 7°
PH-5	16	3	6	4° - 7°
PH-6	16	4	0,5	4° - 7°
PH-7	20	1	6	4° - 7°
PH-8	20	3	0,5	4° - 7°
PH-9	20	4	3	4° - 7°

Belirlenen namlu türleri için denklem 3.27 kullanılmış ve her bir namlunun kesit alanı belirlenmiştir. Kesit alanı belirlenmiş namlular denklem 3.1.1 ve 3.1.2 kullanılarak namlu çıkış hız değerleri belirlenmiştir ve Çizelge 3.1.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.1.5: Namlu kesit alanlarına göre ilk hız değerleri

Namlu Çeşidi	Kesit Alanı (A)	Mermi Çıkış Hızı (V_0)
PH-1	7,089	1074,669
PH-2	7,429	1100,141
PH-3	8,029	1143,707
PH-4	7,549	1108,991
PH-5	9,949	1273,139
PH-6	7,389	1097,175
PH-7	8,269	1160,675
PH-8	7,369	1095,689
PH-9	9,469	1242,046

İç balistik çalışmalarında analitik çözümler oluşturmak için belirlenmesi gereken değerler:

- Ortalama Gaz Basıncı
- Basınç Oranı
- Gaz basıncının maksimum değere ulaştığı andaki merminin namlu içindeki konumu
- Gaz basıncının maksimum değere ulaşması için geçen süre
- Gaz basıncının maksimum değere ulaştığı andaki mermi hızı
- Namlu çıkışındaki gaz basınç değeri
- Namlu içindeki toplam mermi yolu için geçen zaman.

Hesaplamalar da kullanılmak üzere Faktörler tablosu Çizelge 3.1.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.1.6: Vallier-Heydenreich faktörler tablosu

η	$\sum(\eta)$	$\theta(\eta)$	$\Phi(\eta)$	$\pi(\eta)$	$T(\eta)$
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

3.1.1. Ortalama Gaz Basınç Hesabı:

Namlu yanma odasında oluşan patlama esnasında oluşan basınç, mermi namlu boyunca ilerledikçe enerjini kaybedecektir. Denklem 3.1 kullanılarak elde edilen namlu içindeki basınç hareketlerinin ortalama değeri Çizelge 3.1.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.1.7: Ortalama gaz basıncı değerleri

Namlular	Namlu Boyu	Mermi Ağırlığı	Sevk Barutu Ağırlığı	Yerçekimi İvmesi	Namlu Çıkış Hızı	Ortalama Basınç
	Xe - (mm)	G - (kg)	L - (kg)	G - m/s ²	V ₀ - m/s	kg/cm ²
PH-1	2700	0,363	0,160	9,81	1074,669	1907,180
PH-2	2700	0,363	0,160	9,81	1100,141	1907,180
PH-3	2700	0,363	0,160	9,81	1143,707	1907,180
PH-4	2700	0,363	0,160	9,81	1108,991	1907,180
PH-5	2700	0,363	0,160	9,81	1273,139	1907,180
PH-6	2700	0,363	0,160	9,81	1097,175	1907,180
PH-7	2700	0,363	0,160	9,81	1160,675	1907,180
PH-8	2700	0,363	0,160	9,81	1095,689	1907,180
PH-9	2700	0,363	0,160	9,81	1242,046	1907,180

Yukarıda verilen tabloda görüldüğü üzere her namluda ortalama basınç değeri 1907,180 olarak bulunmuştur. Denklem 3.1 ortalama basınç için ve Denklem 3.1.1 namlu çıkış hızı hesaplamaları için verilmiştir. Ortalama basınç denkleminde namlu kesit alanı ve namlu çıkış hızı denkleminde de namlu kesit alanı kullanılmaktadır. Bu denklemler sadeleştirildiğinde namlu kesit alanı etkisiz eleman durumuna düştüğü gözlemlenmiştir. Bu tespit neticesinde namlularda kesit alanından bağımsız olarak namlu içindeki ortalama basınç değeri sabit kalmıştır.

Namlu içindeki ortalama basınç değeri belirlenmiştir, seçilen mühimmat için Çizelge 3.1'den patlamada oluşacak maksimum basınç değeri belirlenmiştir. Ortalama basınç değerinin maksimum basınç değerine oranının prezometrik verimi vermektedir ve η ile gösterilmektedir. Vallier-Heydenreich sabitler tablosunda kullanılmak üzere basınç oranı sabiti Denklem 3.3 ile belirlenmiştir. Belirlediğimiz değerler her namlu için değerler tablosu Çizelge 3.1.8 de verilmiştir.

Çizelge 3.1.8: Namluların ortalama basınç değerleri tablosu

Açıklama	Simge	Birim	Sabit Hatveli Helis - 16 yiv-set
Maksimum Basınç	P_{max}	Kg/cm ²	4690,69
Ortalama Basınç	P_m	Kg/cm ²	1907,18
Namlu İç Basınç Oranı	η	birimsiz	0,40

3.1.2. Basınç maksimumken merminin namlu içindeki konumunun belirlenmesi:

Ateşlenen mühimmatın oluşturduğu gaz basıncının maksimum değerine ulaştığı anda mermi çekirdeğinin namlu içerisinde ilerlediği mesafenin belirlenmesi için Denklem 3.6 ile belirlenmiştir. Belirlediğimiz değerler her namlu için değerleri Çizelge 3.1.9'da verilmiştir. Seçilen tüm namlular için bu değer aynı kalmıştır.

Çizelge 3.1.9: Gaz basıncının maksimum değere ulaştığı anda merminin namlu içindeki konumu

Namlu Boyu(Toplam Yol)	X_e	mm	2700
Faktör	$\Sigma(\eta)$	birimsiz	0,074
Basınç Max olduğu andaki Mermi Konumu	X_1	mm	199,8

Çizelgedeki değerlerden de görüleceği üzere sürtünme değerleri göz önünde bulundurulmadan ve/veya değeri çok düşük olduğu için etkisiz kabul edilerek devam edilmiştir.

3.1.3. Basınç maksimum olması için geçen sürenin hesaplanması:

Ateşlenen mühimmatın oluşturduğu gaz basıncının maksimum değerine ulaştığı anda mermi çekirdeğinin namlu içerisinde ilerlediği mesafe Çizelge 3.1.9 da gösterilmiştir. Çekirdeğin bu mesafeye gelmesi için geçen süreyi bulabilmek için

Denklem 3.7 kullanılmıştır. Belirlediğimiz değerler her namlu için değerler tablosu Çizelge 3.1.10’da verilmiştir.

Çizelge 3.1.10: Gaz basıncının maksimum değere ulaşması için geçen süre

	Xe (mm)	Vo (m/s)	$\theta(\eta)$	t_1
PH-1	2700	1074,669	0,358	1,799
PH-2	2700	1100,141	0,358	1,757
PH-3	2700	1143,707	0,358	1,690
PH-4	2700	1108,991	0,358	1,743
PH-5	2700	1273,139	0,358	1,518
PH-6	2700	1097,175	0,358	1,762
PH-7	2700	1160,675	0,358	1,666
PH-8	2700	1095,689	0,358	1,764
PH-9	2700	1242,046	0,358	1,556

3.1.4. Basınç maksimumken mermi hızının hesaplanması:

Ateşlenen mühimmatın oluşturduğu gaz basıncının maksimum değerine ulaştığı anda mermi çekirdeğinin namlu içerisindeki hız değerini bulabilmek için Denklem 3.8 kullanılmıştır. Belirlediğimiz değerler her namlu için değerler tablosu Çizelge 3.1.11’de verilmiştir.

Çizelge 3.1.11: Gaz basıncının maksimum değere ulaştığında çekirdeğin hızı

	V_o (m/s)	$\theta(\eta)$	V_1 (m/s)
PH-1	1074,669	0,352	411,598
PH-2	1100,141	0,352	421,354
PH-3	1143,707	0,352	438,040
PH-4	1108,991	0,352	424,743
PH-5	1273,139	0,352	487,612
PH-6	1097,175	0,352	420,218
PH-7	1160,675	0,352	444,539
PH-8	1095,689	0,352	419,649
PH-9	1242,046	0,352	475,704

3.1.5. Namlu içindeki toplam mermi yolu için geçen zamanın hesaplanması:

Ateşlenen merminin namludan çıkması için geçen sürenin hesaplanması için Denklem 3.9 kullanılmıştır. Sonuçlar her namlu için Çizelge 3.1.12’de verilmiştir.

Çizelge 3.1.12: Ateşlenen merminin namludan çıkması için geçen süreler

	Xe (mm)	Vo (m/s)	$T(\eta)$	t_e
PH-1	2700	1074,669	0,946	4,753
PH-2	2700	1100,141	0,946	4,643
PH-3	2700	1143,707	0,946	4,467
PH-4	2700	1108,991	0,946	4,606
PH-5	2700	1273,139	0,946	4,012
PH-6	2700	1097,175	0,946	4,656
PH-7	2700	1160,675	0,946	4,401
PH-8	2700	1095,689	0,946	4,662
PH-9	2700	1242,046	0,946	4,113

3.1.6. Namlu çıkışındaki gaz basınç değerinin hesaplanması:

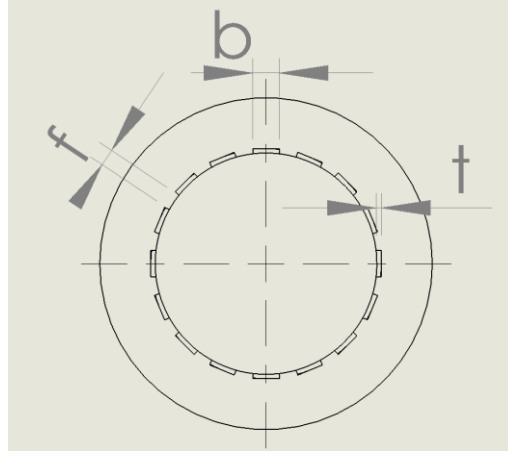
Ateşlenen merminin namludan çıkışı esnasında sahip olduğu basınç değeri için Denklem 3.10 kullanılmıştır. Hesaplanan değerler her namlu için aynı olması sebebiyle Çizelge 3.1.13'te ortak değer verilmiştir.

Çizelge 3.1.13: Ateşlenen merminin namludan çıkışı esnasında sahip olduğu basınç değeri

Ortalama Pasıncı	Pm	Kg/cm ²	1907,180
Faktör	$\pi(\eta)$	birimsiz	0,4
Namlu Çıkışındaki Gaz Basıncı	Pe	Kg/cm ²	544,993

3.1.7. Sabit yiv-set açılı namlularda açısal hız hesabı

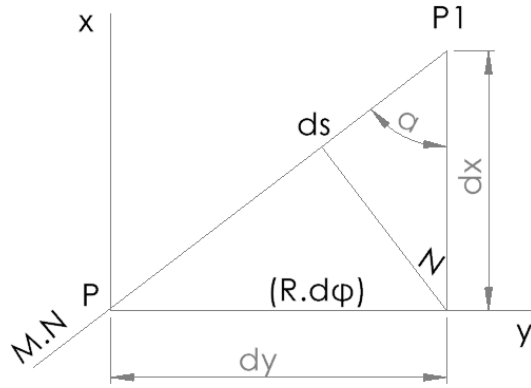
Çalışmalarımızda iki farklı namlu incelediğimizi belirtmiştik. Bu namlulardan ilki sabit yiv-set açısına sahiptir. Kullanılan yiv-set değerleri Şekil 3.1.7.1 de detaylandırılmıştır ve Çizelge 3.1.7.1 de değerleri verilmiştir. Sabit helis açısına sahip namluların açısal hız hesabı için Şekil 3.1.7.2 de verilen Öztürk (1984) tarafından ortaya koyulmuş grafik yardımıyla α açısının tanjant değeri hesaplanmıştır.



Şekil 3.1.7.1: 16 adet yiv-set, detaylı ölçülendirilmesi.

Çizelge 3.1.7.1: Sabit helis açılı yiv set değerleri tablosu

Simge	Açıklama	Birim	Değer
Nz	Yiv Set Adedi	Adet	16
D	Namlu İç Çapı	mm	30
Dz	Yiv Derinlik Çapı	mm	31 - 36 - 42
b	Yiv Genişliği	mm	1 - 3 - 4
t	Yiv Derinliği	mm	0,5 - 3 - 6
f	Set Genişliği	mm	4,89 - 2,89 - 1,89
α	Helis Açısı	Derece	4



Şekil 3.1.7.2: Açısal Hız grafiği. (Öztürk, 1984)

Sabit yiv-set helis açısına sahip namlularda, ω açısal hızı, n mermi çekirdeği devir sayısını, T periyot değerini ve $\dot{\phi}$ çevre hızını göstermektedir.

$$\tan \alpha = \frac{dy}{dx} = \frac{R d\phi}{dx} \quad (3.1.7.1)$$

Geometrik bağıntıdan 3.1.7.2 denklemi elde edilmiştir. Bu denklem ile açısal hız ω değeri hesaplanmıştır

$$\omega = \frac{\tan \alpha}{R} \times v \quad (3.1.7.2)$$

Namlu çıkışında merminin kazanacağı hız $v = v_e$ ise o andaki açısal hız değeri;

$$\omega_e = \frac{\tan \alpha}{R} \cdot v_e \quad (3.1.7.3)$$

$$n = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3.1.7.4)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{n} \quad (3.1.7.5)$$

$$\zeta = R \cdot \omega = \omega \cdot \frac{D}{2} \quad (3.1.7.6)$$

Denklemler yardımıyla Çizelge 3.1.2 de seçilmiş sabit hatveli namlular için açısal hız, devir, periyot ve çevre hızı değerleri hesaplanmış ve Çizelge 3.1.7.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1.7.2: Sabit hatveli namlularda açısal hız, devir, periyot ve çevre hızı

	V_o	ω_e (rad/s)	n (d/s)	T (ms)	ζ (m/s)
SH-1	1108,991	5169,879	822,819	1,215	77,548
SH-2	1273,139	5935,103	944,601	1,059	89,027
SH-3	1097,175	5114,795	814,045	1,228	76,722

3.1.8 Progresif yiv-set açılı namlularda açısal hız hesabı

Progresif helis hatvesine sahip namlularda açısal hız hesabı yapılması için yiv-set helisinin namluya girişindeki açısı α_0 ve namluyu terk ederken ki açısını α_E ile gösterilmiştir. Mermi devir sayısı Denklem 3.1.7.4 kullanılarak hesaplanmıştır. Periyot değeri Denklem 3.1.7.5 kullanılarak hesaplanmış ve son olarak mermi çekirdeğinin kazanmış olduğu çevresel hızı Denklem 3.1.7.6 yardımıyla hesaplanmıştır. Ayrıca açısal hız değeri Denklem 3.1.8.1 ile çözümlenmiştir.

$$\omega = \frac{v}{r} \left[\tan \alpha_0 + \frac{x}{x_e} (\tan \alpha_E - \tan \alpha_0) \right] \quad (3.1.8.1)$$

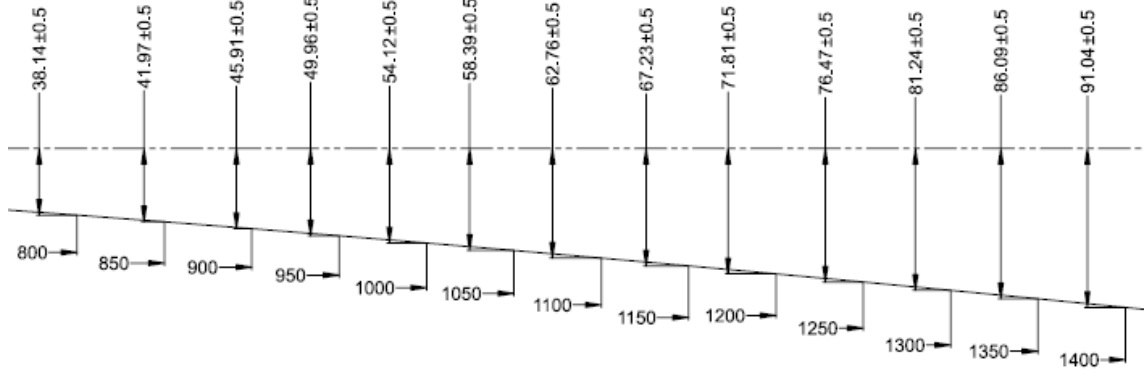
Çizelge 3.1.4'te progresif açılı namlular için belirlenmiş yiv-set değerleri verilmiştir ve bu değerler ile her bir namlu için açısal hız, devir, periyot ve çevre hızı değerleri hesaplanmış ve Çizelge 3.1.8.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1.8.1: Progresif helis açılı namlularda açısal hız, devir, periyot ve çevre hızı

	V_o	ω_e (rad/s)	n (d/s)	T (ms)	Ç (m/s)
PH-1	1074,669	5290,117	841,948	0,001	79,352
PH-2	1100,141	5415,499	861,904	0,001	81,232
PH-3	1143,707	5629,956	896,035	0,001	84,449
PH-4	1108,991	5459,065	868,837	0,001	81,886
PH-5	1273,139	6267,093	997,439	0,001	94,006
PH-6	1097,175	5400,900	859,580	0,001	81,013
PH-7	1160,675	5713,485	909,329	0,001	85,702
PH-8	1095,689	5393,585	858,416	0,001	80,904
PH-9	1242,046	6114,036	973,079	0,001	91,711

3.1.9 Yiv-Set eğrisinin değerlerinin hesaplanması

Yiv set eğrisi namlu ekseninde oluşturulan ark çizgisinin namlu iç cidarına sarılması ile elde edilen eğrilerdir. Sabit hatveli olanlarda bu ark eğrisi eşit aralıklarda eşit değerlerde ilerlemesi ile oluşturulurken, artan hatveli namlu eğrisi belirli oranlarda artarak oluşturulmuştur. Şekil 3.1.9.1 de progresif hatveli bir namlu için belirlenen açı değerlerine örnek olarak verilmiştir. Şekildeki eğrilerde namlunun 800mm noktasından 1400mm noktasına kadar olan eğri değişimleri örneklenmiştir. Her 50mm de değişen eğriler gözlemlendiğinde 800mm – 850mm arasındaki değişim 3,83mm iken, 1350mm – 1400mm arasındaki değişimin 4,95mm olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda eğrinin namlu içine daha fazla açı ile sarılacağını göstermektedir. Progresif hatveli namlularda çıkış açısı hesapları için Şahin ve Özdemir (2021)'in verdikleri denklemler kullanılmıştır.



Şekil 3.1.9.1: Progresif açılı namlu açış değişimleri

$$y = px^n \quad (3.1.9.1)$$

Denklem 3.1.9.1 de p çıkış açısına göre bir sabit değerdir. n yiv-set eğrisi için birimsiz sabittir. x mermi yolu simgesi ve x_e toplam mermi yolu (namlu uzunluğu) sembolü olarak verilmiştir. α Yiv-set eğimi iken α_E namlu çıkışındaki yiv-set eğimini derece cinsinden verilmiştir. y ile namlu içerisindeki yiv-set in çevresel mesafesi mm cinsinden verilmiştir. Denklem 3.1.9.1 in türevi alınarak p sabiti değerini denklem 3.1.9.2’de belirlenmiştir.

$$\frac{dy}{dx} = pnx^{n-1} = \tan\alpha \quad (3.1.9.2)$$

Sabit hatveli namlularda n değeri 1 seçilir ve p sabiti $\tan\alpha$ değerine eşittir. Progresif hatveli namlularda ise aşağıdaki denklemler kullanılmıştır.

$$pnx_E^{n-1} = \tan\alpha_E \quad (3.1.9.3)$$

$$p = \frac{\tan\alpha_E}{nx_E^{n-1}} \quad (3.1.9.4)$$

$$y = \frac{\tan\alpha_E}{nx_E^{n-1}} x^n \quad (3.1.9.5)$$

Denklem 3.1.9.5’in türevi alınmıştır;

$$\frac{dy}{dx} = \tan\alpha = \frac{\tan\alpha_E}{x_E^{n-1}} x^{n-1} \quad (3.1.9.6)$$

$$\frac{dy^2}{dx^2} = \frac{d \tan \alpha}{dx} = \frac{(n-1) \tan \alpha_E}{x_E} x^{n-2} \quad (3.1.9.7)$$

Namlu içine eğri sarılması ile elde edilen yiv-set hatvesi, namlu içindeki dönü türünden yazılmıştır,

$$\tan \alpha_E = \frac{\pi}{n_c} \quad (3.1.9.8)$$

$$\tan \alpha_E = \frac{\pi}{n_c x_E^{n-1}} x^{n-1} \quad (3.1.9.9)$$

$$\frac{d}{dx} \tan \alpha = \frac{\pi(n-1)}{n_c x_E^{n-1}} x^{n-2} \quad (3.1.9.10)$$

3.1.10 Jirooskopik kararlılık faktörü belirlenmesi

Jirooskopik etki, dönen her nesnenin oluşturduğu bir etkidir. Balistik anlamda jirooskop ise mermilerin namludan ayrıldığı esnada bir açısal hıza sahip olması sebebiyle oluşan etki sayesinde merminin kararlı bir şekilde hedefe ulaşmasını sağlayan etki olarak tanımlanmıştır. Mermi tasarımlarında merminin ağırlık merkezi, dış kuvvetlerin etkisi olan basınç merkezinin önünde oluşacak şekilde değerlendirilmiştir. Jirooskopik kararlılık faktörü denklem 3.1.10.1 de S_g olarak verilmiş ve sembollerin açıklamaları Çizelge 3.1.10.1’de verilmiştir.

$$S_g = \frac{I_x^2 \omega^2}{2 \rho I_y S d V^2 C_{MA}} \quad (3.1.10.1)$$

Çizelge 3.1.10.1: Denklem sembolleri tablosu

Sembol	Açıklama	Birim
C_{MA}	Yunuslama Momenti Katsayısı	Birimsiz
I_x	Merminin eksenel atalet momenti	kgm^2
I_y	Merminin enine atalet momenti	kgm^2
S	Mermi referans alanı	m^2
ρ	Atmosfer yoğunluğu	kg/m^3
ω	Mermi açısal hızı	rad/s
d	Mermi çapı	m
V	Mermi hızı	m/s

Jirooskopik kararlılık faktörü mermi geometrisine göre şekil faktörü, dönü hızının karesinin eksenel hızın karesine oranı, magnus efekti değişimi ve atmosferik model

yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Bu değerlere göre denklem 3.1.10.1 yeniden şekillendirildiğinde denklem 3.1.10.2 elde edilmiştir.

$$S_g = \left(\frac{2I_x^2}{I_y \pi d^3} \right) \left(\frac{\omega^2}{V^2} \right) \left(\frac{1}{C_{MA}} \right) \left(\frac{1}{\rho} \right) \quad (3.1.10.2)$$

3.1.11 Yiv-setli namluların Set'in gelen tork değeri hesaplanması

Set üzerine gelen tork değeri T, mermi arkasında oluşan basınç, namlu kesit alanı, namlu çapı, yiv-set eğrisi değeri, mermi doğrusal hızı, mermi çekirdek ağırlığı ve jiroskopik yarıçap değerleri ile belirlenmiştir.

$$T = I_x \ddot{\theta} \quad (3.1.11.1)$$

$$I_x = M_m i^2 \quad (3.1.11.2)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{r} \left(a_1 \tan \alpha + V^2 \frac{d}{dx} \tan \alpha \right) \quad (3.1.11.3)$$

$$T = M_m \frac{i^2}{R} \left(\frac{A_n P}{M_m} \tan \alpha + V^2 \frac{d}{dx} \tan \alpha \right) \quad (3.1.11.4)$$

Denklemlerde kullanılan sembollerin açıklamaları Çizelge 3.1.11.1 de verilmiştir

Çizelge 3.1.11.1: Semboller ve açıklamaları

Sembol	Açıklama	Birim
I_x	Merminin eksenel atalet momenti	kgm^2
$\ddot{\theta}$	Merminin açısal ivmesi	rad/s^2
a_1	Merminin çizgisel ivmesi	m/s^2
R	Merminin yarıçapı	m
α	Yiv-set eğrisi eğimi	Derece
M_m	Mermi kütlesi	Kg
A_n	Namlu kesit alanı	m^2
P	Namlu içindeki anlık basınç	Pa
V	Namlu içindeki anlık mermi hızı	m/s
i	Mermi jirasyon yarıçapı	M

3.2. Namlu Yiv Set Değerlerinin ve Doğrusal Hızın Belirlenmesi

Çalışmalarımızda sabit helis açısıyla oluşturulmuş yiv-set içeren ve progresif helis açılarıyla oluşturulmuş yiv-sete sahip 4 farklı orta kalibre namlu değerlendirilmiştir.

Seçilen namlu değerlerine ulaşabilmek için farklı varyasyonlar irdelenmiş ve izlenen yollar dikkate alındığında final değerlerin çalışmada kullanılmaya uygun olduğu değerlendirilmiştir. Çizelge 3.2.1’de dikkate alınan farklı varyasyonlardaki namlu değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.2.1: Orta kalibre namlu varyasyonları

Namlu	Yiv-Set Adet	Yiv Genişlik	Yiv Derinlik	Set Genişlik	Giriş helis açısı	Çıkış helis açısı	Durum
SH-1	16	1	0,5	4,89	4°	4°	Uygun
SH-2	16	3	3	2,89	4°	4°	Uygun
SH-3	16	4	6	1,89	4°	4°	Uygun
SH-4	16	6	6	-0,11	4°	4°	Uygun değil
PH-1	4	1	0,5	5,64	4°	7°	Uygun
PH-2	4	3	3	5,14	4°	7°	Uygun
PH-3	4	4	6	4,39	4°	7°	Uygun
PH-4	16	1	3	4,89	4°	7°	Uygun
PH-5	16	3	6	2,89	4°	7°	Uygun
PH-6	16	4	0,5	1,89	4°	7°	Uygun
PH-7	20	1	6	4,64	4°	7°	Uygun
PH-8	20	3	0,5	2,14	4°	7°	Uygun
PH-9	20	4	3	0,89	4°	7°	Uygun
PH-10	20	5	5	-0,36	4°	7°	Uygun değil

Yiv ve set genişliklerinin mühimmat patlamasıyla oluşacak basınçları karşılayacak dayanıma sahip olması beklenmektedir.

Set genişliğinin hesaplanmasından namlu iç çapının çevresinden yiv adetlerinin ölçülerinin çıkartılmasıyla ve kalan değerinde set adedine eşit miktarlarda paylaştırılması yöntemiyle Denklem 3.2.2 elde edilmiştir.

$$\text{İç Çap çevresi} = 2\pi R \quad (3.2.1)$$

$$\text{Set genişliği} = \frac{2\pi R - \text{yiv adedi} \cdot \text{yiv-genişliği}}{\text{set adedi}} \quad (3.2.2)$$

Bu varyasyon çalışmasıyla yiv-set değerleri belirlemek için sınırların olduğu belirlenmiş ve set genişliği en az yiv genişliğinin yarısı kadar olması beklenmiştir.

Namlu yiv-set geometrileri belirlenirken kabul görmüş genel beklenti yiv ve set arasındaki oranın $\frac{1}{2}$ olmasıdır. Çalışmamızda yiv ve set değerlerini belirlerken bu genel kabul göz önünde bulundurulmuştur. Namlu kesit alanları namluya etki eden basınç ile orantılı olması beklenmektedir. Tabloda görüleceği üzere şayet 30mm namlu içine gereğinden fazla yiv-set oluşturmak istediğimizde $\frac{1}{2}$ oranı da göz önünde bulundurulduğunda 2 farklı durum oluşabilmektedir.

- Set genişliği ölçüsünün tork değerlerini karşılayacak kadar kalın olmaması

- Yiv genişliğinin oldukça kısa kalması

Her iki durumda namlunun taşıyacağı basınca direk etki etmesi beklenmektedir. Çalışmamızda yukarıda saydığımız olumsuzluklar nedeniyle en fazla 20 adet yiv-set oluşturulması planlanmıştır. Yiv-set için tek sayı rakamlardan oluşan (17,19 vb.) adetleri tercih edilmeme sebebi, Öztürk (1984)'ün de belirttiği üzere, yiv-set adetleri 4 ve katları şeklinde olması beklenmektedir.

Optimum namlu yiv-set karakteristiklerinin belirlenmesi için yapılan çalışmalarda Çizelge 3.2.1'de belirlenmiş olan namlular için seçilen yiv-set ölçüleri ve bu değerler neticesinde namlu kesit alanları Çizelge 3.2.2 de verilmiştir.

Çizelge 3.2.2: Yiv-set adetleri ve kesit alanı

Namlu	Yiv-Set Adet	Yiv Genişlik	Yiv Derinlik	Set Genişlik	Giriş helis açısı	Çıkış helis açısı	Kesit Alanı (A)
SH-1	16	1	0,5	4,89	4°	4°	7,549
SH-2	16	3	3	2,89	4°	4°	9,949
SH-3	16	4	6	1,89	4°	4°	7,389
PH-1	4	1	0,5	5,64	4°	7°	7,089
PH-2	4	3	3	5,14	4°	7°	7,429
PH-3	4	4	6	4,39	4°	7°	8,029
PH-4	16	1	3	4,89	4°	7°	7,549
PH-5	16	3	6	2,89	4°	7°	9,949
PH-6	16	4	0,5	1,89	4°	7°	7,389
PH-7	20	1	6	4,64	4°	7°	8,269
PH-8	20	3	0,5	2,14	4°	7°	7,369
PH-9	20	4	3	0,89	4°	7°	9,469

Namlu kesit alanı belirlendikten sonraki adımda her bir namludan çıkan merminin doğrusal hız değeri olan V_0 belirlenmiş ve Çizelge 3.2.3 de verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde sabit helis açılı namlulardan çıkan mermi ile aynı yiv-set e sahip ve bitiş helis açısı değerleri, sabit helis açısının ölçüleriyle aynı değere sahip olması durumunda çıkan mermilerin hızları eşit olması teorik olarak beklenmektedir. Sabit helis açısına sahip yiv-setli namlularda merminin ateşlenmesi esnasında oluşan basınç set duvarlarına yüksek torklar uygulaması nedeniyle namlu ömrü açısından istenmeyen bir durum olduğu için bu tarz yüksek basınç oluşturan mühimmat kullanan orta kalibre silahlarda genellikle progresif helis açısına sahip yiv-setler oluşturulmaktadır.

Çizelge 3.2.3: Merminin namludan çıkış hızı değerleri

Namlu	Yiv-Set Adet	Yiv Genişlik	Yiv Derinlik	Set Genişlik	Giriş helis açısı	Çıkış helis açısı	Kesit Alanı (A)	Doğrusal Hız
SH-1	16	1	0,5	4,89	4°	4°	7,549	1108,991
SH-2	16	3	3	2,89	4°	4°	9,949	1273,139
SH-3	16	4	6	1,89	4°	4°	7,389	1097,175
PH-1	4	1	0,5	5,64	4°	7°	7,089	1074,669
PH-2	4	3	3	5,14	4°	7°	7,429	1100,141
PH-3	4	4	6	4,39	4°	7°	8,029	1143,707
PH-4	16	1	3	4,89	4°	7°	7,549	1108,991
PH-5	16	3	6	2,89	4°	7°	9,949	1273,139
PH-6	16	4	0,5	1,89	4°	7°	7,389	1097,175
PH-7	20	1	6	4,64	4°	7°	8,269	1160,675
PH-8	20	3	0,5	2,14	4°	7°	7,369	1095,689
PH-9	20	4	3	0,89	4°	7°	9,469	1242,046

3.3. Mermi Çekirdeği Açısal Hız Değerinin Belirlenmesi

Progresif helis açılı yiv-sete sahip namlu veya sabit helis açılı yiv-sete sahip namlularda açısal hızı yiv-set helis açıları etki etmektedir. Açısal hız değerleri Çizelge 3.3.1 de verilmiştir. Namlulardan beklenen en önemli özelliklerinden birisi de merminin çıkış anında kazandığı açısal hız değerinin yüksek olmasıdır. Bu beklentiyi karşılamak için yiv açıları ve yiv-set kalınlıkları istenilen torklara dayanacak şekilde dizayn edilmelidir.

Çizelge 3.3.1: Açısal hız değerleri

Namlu	Yiv-Set Adet	Yiv Genişlik	Yiv Derinlik	Set Genişlik	Giriş helis açısı	Çıkış helis açısı	Kesit Alanı (A)	Doğrusal Hız	Açısal Hız
SH-1	16	1	0,5	4,89	4°	4°	7,549	1108,991	5169,879
SH-2	16	3	3	2,89	4°	4°	9,949	1273,139	5935,103
SH-3	16	4	6	1,89	4°	4°	7,389	1097,175	5114,795
PH-1	4	1	0,5	5,64	4°	7°	7,089	1074,669	5290,117
PH-2	4	3	3	5,14	4°	7°	7,429	1100,141	5415,499
PH-3	4	4	6	4,39	4°	7°	8,029	1143,707	5629,956
PH-4	16	1	3	4,89	4°	7°	7,549	1108,991	5459,065
PH-5	16	3	6	2,89	4°	7°	9,949	1273,139	6267,093
PH-6	16	4	0,5	1,89	4°	7°	7,389	1097,175	5400,900
PH-7	20	1	6	4,64	4°	7°	8,269	1160,675	5713,485
PH-8	20	3	0,5	2,14	4°	7°	7,369	1095,689	5393,585
PH-9	20	4	3	0,89	4°	7°	9,469	1242,046	6115,036

Edinilen bu bilgiler ışığında orta kalibre bir namluda olması gereken optimum değerlerin analiz edilmesi gerekmektedir.

3.4. Optimizasyon ve Analiz Yöntemleri

Silah sistemlerinin ömürlü parçalarında olan namluların tasarım ve imalat aşamalarında dikkat edilmesi gereken unsurlardan birisidir namlu ömrü. İç balistik değerlerini belirleyen tüm etmenler bir şekilde namlu ömrünü doğrudan etkilemektedir. Namlu değerlerinin optimum değerini belirlemek için Taguchi metodu ve Minitab yazılımı kullanılmıştır. Bölüm 3 itibarıyla yapılan çalışmaların sonuçları tablolar halinde verilmiştir. Bu tablolardan alınan değerleri Minitab gibi özel yazılımlara girdi olarak eklemek suretiyle olasılık çözümleri sayesinde en uygun namlunun seçimi gerçekleştirilmiştir.

Çalışmamızda seçilen mühimmat için optimum namlu çıkışındaki doğrusal hız değeri 1100 m/s olarak belirlenmiştir. Optimum değeri elde edebilmek için yiv-set adedi, yiv-set genişliği, yiv-set derinliği ve yiv helis açısı değerleri belirlenmiştir.

3.4.1. Taguchi Metodu

Taguchi metodu, Japonya da hayat bulmuş bir deneysel yaklaşım sistemidir. Japon Bilim İnsanı Genichi Taguchi tarafından öne sürülen yöntemde bilimsel çalışmalarda yapılması gereken deneylere ikili, üçlü veya karma düzeyli faktöriyel tasarımların kullanılmasıyla daha az deneyler yapılması ve daha hızlı sonuçlar elde edilmesi sağlanmıştır.

Taguchi metodu ile Ortogonal Dizilerden L9, L18, L25 ve L27 gibi yöntemler kullanmak istediğimiz süreçlere en uygun dizi ile süreçleri veya ürünleri henüz tasarım aşamasında doğrulama ve kalite kontrol mekanizmasını çalıştırma imkânı sağlamıştır.

Bölüm 3.1, 3.2 ve 3.3'ten elde edilen değerler doğru namlu iç balistik parametrelerinin belirlenmesinde kullanılması için gerekli optimizasyonun sağlanması gerekmektedir. Canıyılmaz ve Kutay (2003) yaptıkları çalışmada, Taguchi metodunun ortogonal dizileri kullanarak kontrol edilemeyen faktörlerin etkilerini minimize etmeye çalışan bir deneysel tasarım tekniği olduğunu belirtmişleridir. Taguchi ortogonal tasarımına bağlı kalarak $L_9(3^3)$ analizleri ile 9 adet farklı seviyede sonuçların karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir.

Taguchi metodunda denklem 3.4.1.1 kullanılmıştır (Canılıymaz ve Kutay, 2003)

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3.4.1.1)$$

S/N oranı sinyal gürültü oranı en büyük değerin en iyi olduğu koşullardaki hesaplanması Denklem 3.4.1.1. den gerçekleştirilebilir.

Taguchi metodu ile elde edilen L9 ortogonal deney dizilimi için girdiler belirlenmiş ve Çizelge 3.4.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.4.1: Taguchi metodu girdi verileri

Yiv Set Adedi	Yiv Genişliği	Yiv Derinliği
4	1	0,5
16	3	3
20	4	6

L9 yönteminde tablodaki değerler ile 9 farklı deney seti oluşturulmuştur ve Çizelge 3.4.2 de verilmiştir. Verilen deney setleri için Merminin namludan çıkışı esnasındaki hızları yukarıdaki formüller ve tablolardan belirlenmiş ve tabloda sonuç kolonuna eklenmiştir.

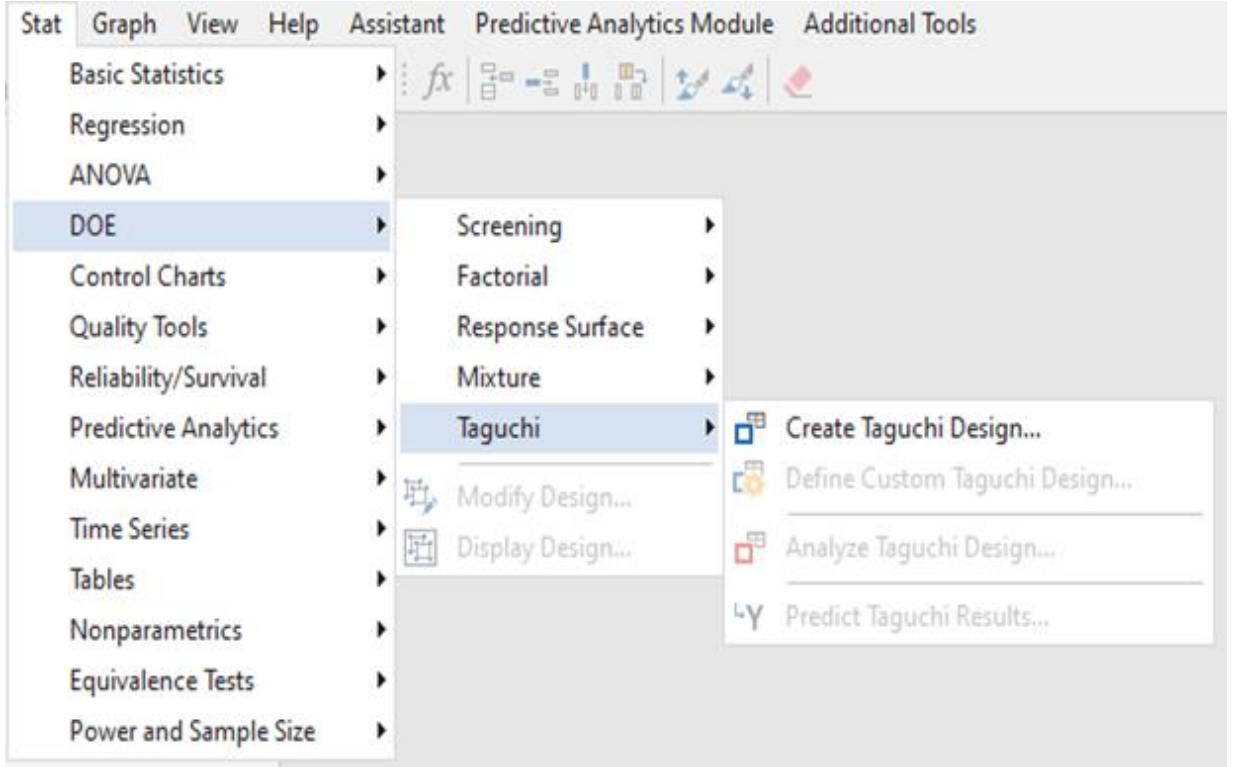
Çizelge 3.4.2: Minitab giriş değerleri

Yiv Set Adedi	Yiv Genişliği	Yiv Derinliği	Çıkış Hızı
4	1	0,5	1074,6694
4	3	3	1100,1405
4	4	6	1143,7066
16	1	3	1108,9907
16	3	6	1273,1389
16	4	0,5	1097,1746
20	1	6	1160,6753
20	3	0,5	1095,6887
20	4	3	1242,0460

Minitab istatistiksel analiz programı ilk kez 1972 yılında Pennsylvania Üniversitesi’nde geliştirilmiş olan istatistiksel analizler ve veri analitiğinde kullanılan bir yazılımdır. Minitab programı içinde Taguchi metodu kullanılmıştır. Özellikle üretim sektöründe kullanılan Minitab ile süreçlerin doğruluğunu ve kalitesini kontrol etmek için

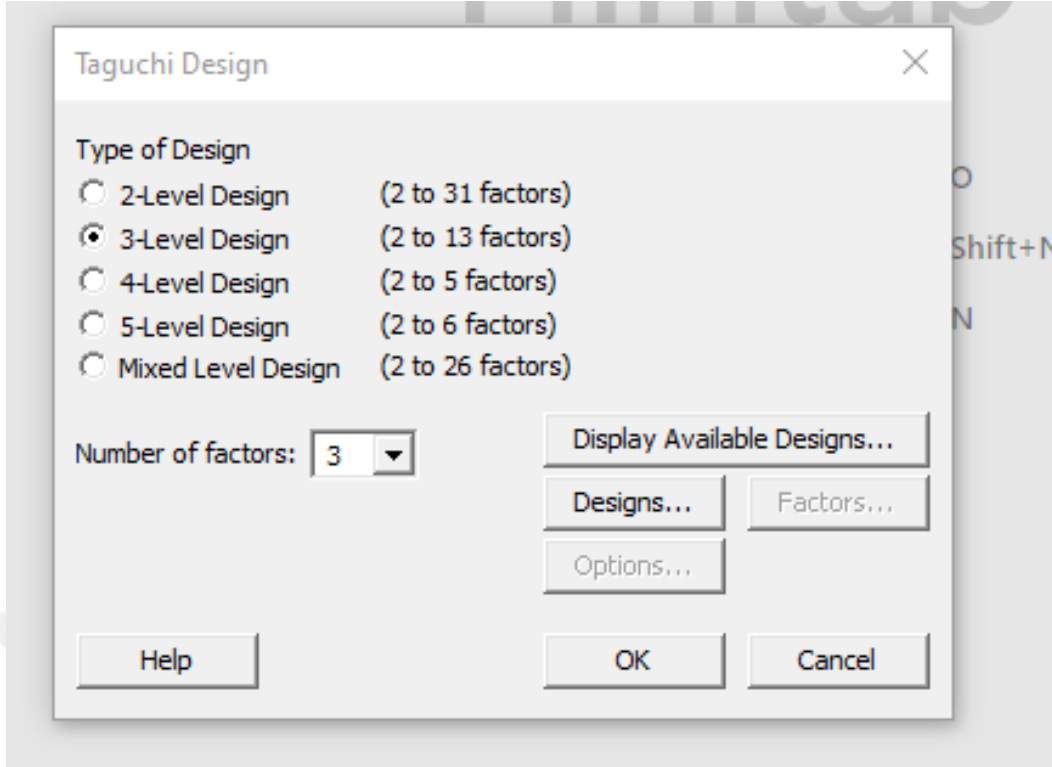
çok kullanışlı bir programdır. Doğrulama ve kalite kontrol süreçlerinde kontrol grafikleri üretebilen bir yazılım olması sayesinde çalışmalarımızda görsel içerikler üretilmiştir. Minitab yazılımında kullanılmak üzere hazırlanan değerler Çizelge 3.4.1 de derlenmiştir. L9 ortagonal deneyler tablosu Çizelge 3.4.2 de verilmiştir.

Minitab programı çalıştırıldığında Stat -> DOE -> Taguchi -> Create Taguchi Design butonları sırasıyla tıklanmıştır Şekil 3.4.1.



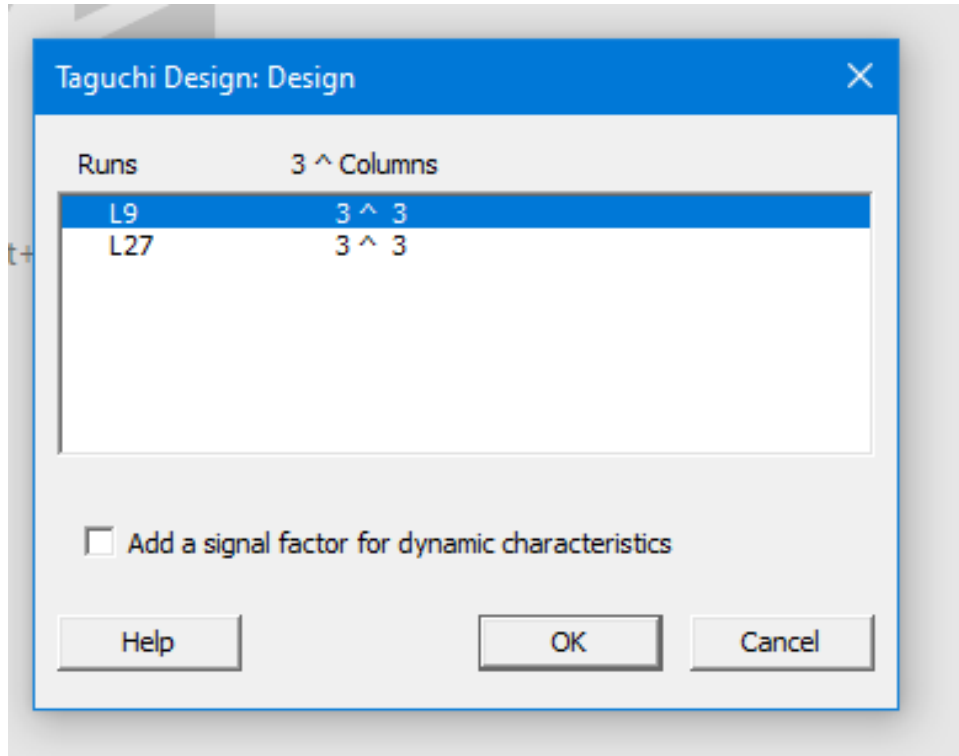
Şekil 3.4.1: Minitab programında Taguchi Analizi oluşturulması

Create Taguchi Design butonuna tıklandığında Şekil 3.4.2 Taguchi Design ekranına ulaşılmıştır. Bu ekranda Type of Design seçeneklerinden 3-Level Design sekmesi seçilmiştir ve Number of factors açılır menüsünden 3 seçilmiştir. Designs ... butonuna tıklanmış ve Şekil 3.4.3 ekranına ulaşılmıştır.



Şekil 3.4.2: Taguchi Design ekranı

Ulaşılan ekrandan $L_9 3^3$ seçeneği işaretlenmiştir. Bu ekranda 9 adet deney verisi girileceği belirlenmiştir.



Şekil 3.4.3: Taguchi Design: Design ekranı

L9 satırı mavi ile işaretlenmiş ve OK butonuna basılarak bir önceki ekrana dönmüştür Şekil 3.4.2. Bu ekranda daha önce pasif olan butonların aktif hale geldiği görülmüştür. Mevcut ekranda Factors... butonuna tıklanmıştır ve Şekil 3.4.4 ekranına ulaşılmıştır.

Açılan ekranda Fac A satırına Yiv adedi, Fac B satırına Yiv genişliği, Fac C satırına Yiv derinliği bilgileri boşluk ile ayrılarak girilmiştir.

Facto	Name	Level Values	Column	Level
A	Yiv Adedi	4 16 20	1	3
B	Yiv Genişli	1 3 4	2	3
C	Yiv Derinli	0,5 3 6	3	3

Şekil 3.4.4: Taguchi faktörleri giriş ekranı

Ekranda Çizelge 3.4.1’de verilen değerler ilgili alanlara girilmiş ve OK butonuna tıklanarak bir önceki ekran olan Şekil 3.4.2’ye dönmüş ve bu ekranda da tekrar OK butonuna tıklanmıştır. Şekil 3.4.5 de görülen Taguchi analiz ekranına geçilmiştir.

Design Summary

Taguchi Array L9(3³)
 Factors: 3
 Runs: 9

Columns of L9(3⁴) array: 1 2 3

↓	C1	C2	C3	C4	C5
	Yiv Adedi	Yiv Genişlik	Yiv Derinlik		
1	4	1	0,5		
2	4	3	3,0		
3	4	4	6,0		
4	16	1	3,0		
5	16	3	6,0		
6	16	4	0,5		
7	20	1	6,0		
8	20	3	0,5		
9	20	4	3,0		
10					

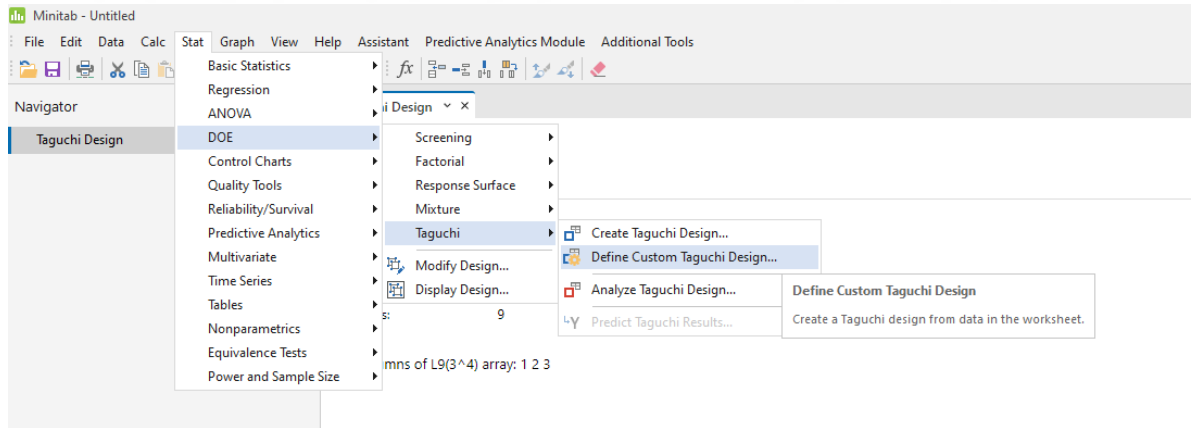
Şekil 3.4.5: Taguchi Analiz ekranı

Turuncu kare içinde gösterilen Taguchi Array L9(3³) çalışmamızdaki deney adetlerini göstermiştir. Mavi kare içinde gördüğümüz C4 koluna ise C1, C2, C3 kolonlarındaki değerlerin oluşturduğu doğrusal hız bilgileri girilen alandır. Girilen mermi doğrusal hız değerleri Şekil 3.4.6. da verilmiştir.

↓	C1	C2	C3	C4	
	Yiv Adedi	Yiv Genişlik	Yiv Derinlik	Hız	
1	4	1	0,5	1074,669	
2	4	3	3,0	1100,141	
3	4	4	6,0	1143,707	
4	16	1	3,0	1108,991	
5	16	3	6,0	1273,139	
6	16	4	0,5	1097,175	
7	20	1	6,0	1160,675	
8	20	3	0,5	1095,689	
9	20	4	3,0	1242,046	
10					

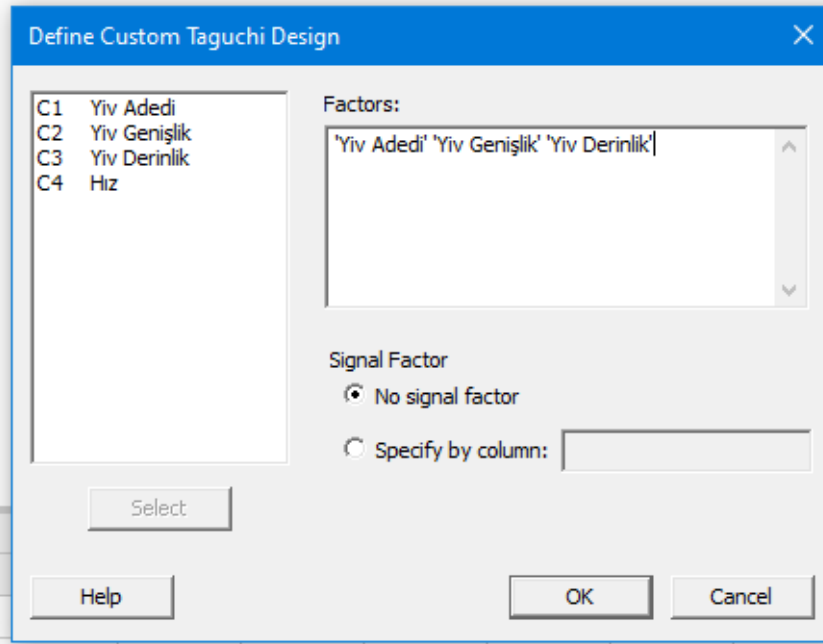
Şekil 3.4.6: Hız değerleri kolonu

Analizler için yöntemlerin belirlenmesi için Şekil 3.4.7 ekranında görülen Define Custom Taguchi Design butonuna tıklanmıştır.



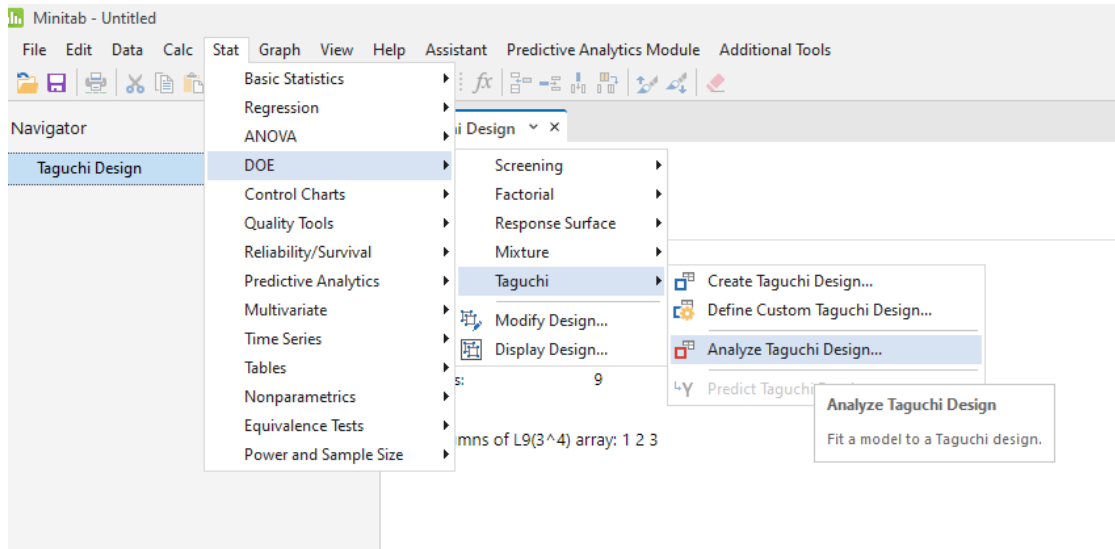
Şekil 3.4.7: Define Custom Taguchi Design ekranı

Şekil 3.4.8 de açılan ekrandan yiv adedi, yiv genişliği ve yiv derinliği değerleri seçilmiştir.



Şekil 3.4.8: Seçilen faktörler ekranı

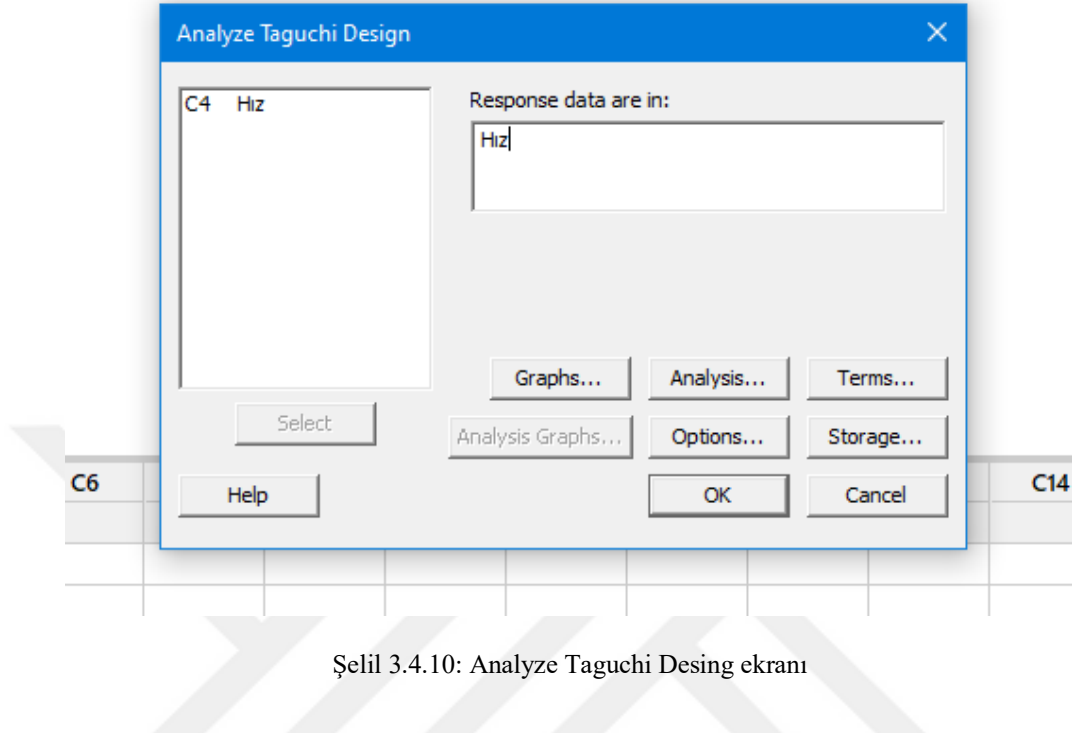
Ekranı OK butonuna basılmış ve ekran kapatılmıştır. Minitab ana ekranından Stat->DOE->Taguchi->Analyze Taguchi Design sekmesine tıklanmıştır Şekil 3.4.9.



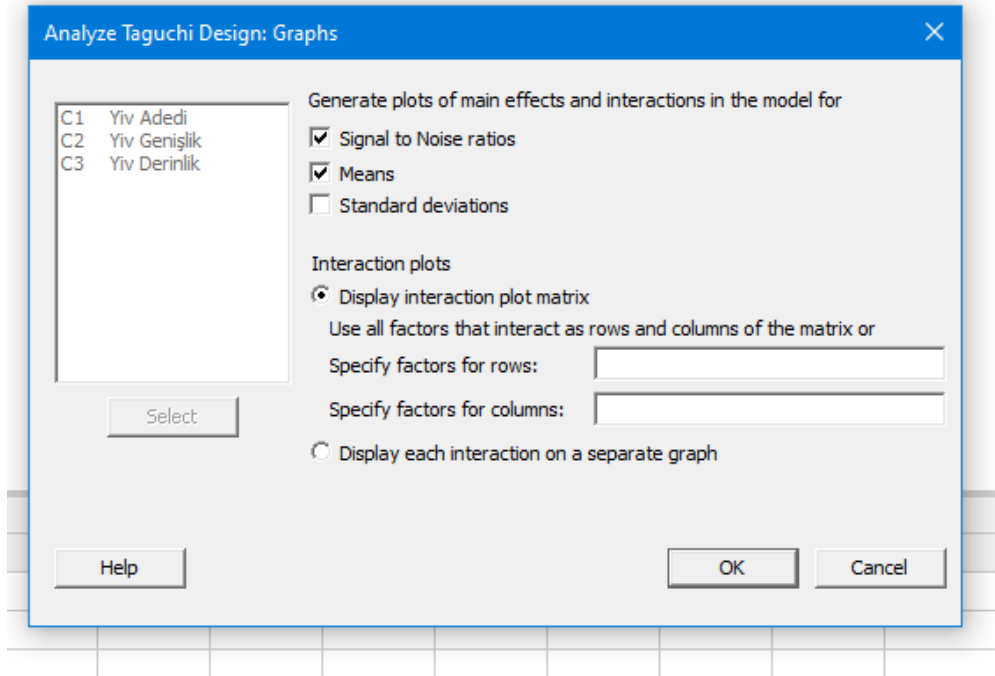
Şekil 3.4.9: Analyze Taguchi Design ekranı

Açılan ekrandan analizin Hız verileri için yapılması gerektiği seçilmiştir Şekil 3.4.10. Aynı ekrandan Graph butonu tıklanmış ve açılan ekrandan Signal to Noise ratio

ve Means sekmeleri işaretlenmiş Şekil 3.4.11 ve OK butonu tıklanarak bir önceki ekrana dönmüştür.

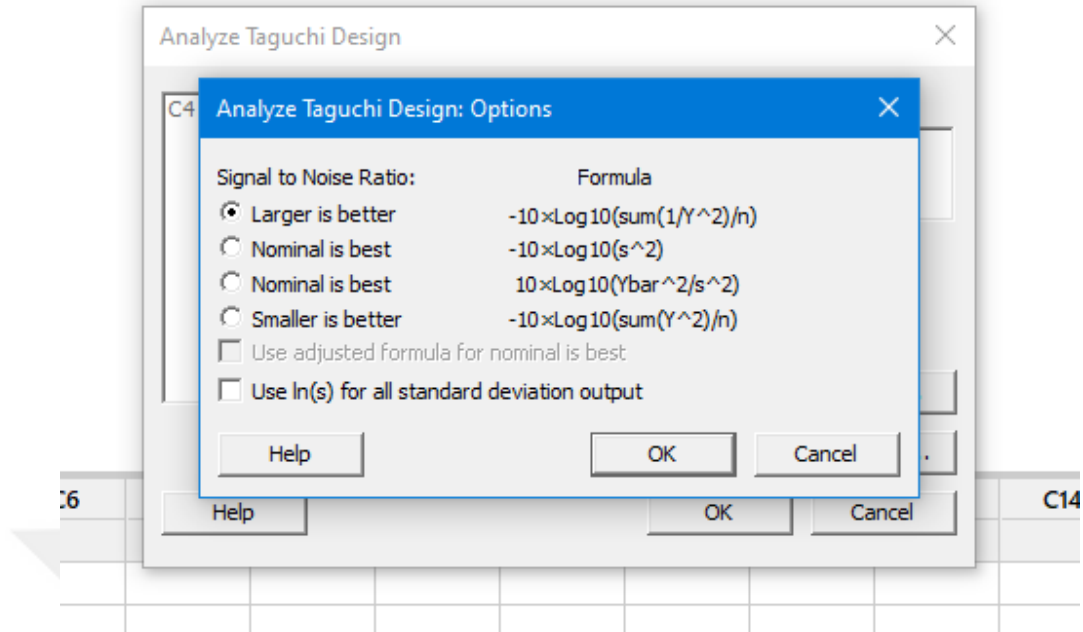


Şekil 3.4.10: Analyze Taguchi Desing ekranı



Şekil 3.4.11: Analyze Taguchi Desing: Graphs ekranı

Şekil 3.4.10 ekranından Options butonuna tıklanmıştır ve Şekil 3.4.12 ekranı açılmıştır. Açılan ekrandan Larger is Better seçeneği işaretlenmiştir.



Şekil 3.4.12: Analiz opsiyonları ekranı

Bu ekrandan OK butonu tıklanmıştır. Minitab yazılımında analizi gerçekleştirilen Taguchi metodu sonuçları Signal to Noise Ratios ve Response Table for Measn değerleri elde edilmiştir Şekil 3.4.13 ve Şekil 3.4.14'te sırasıyla verilmiştir.

Response Table for Signal to Noise Ratios

Smaller is better

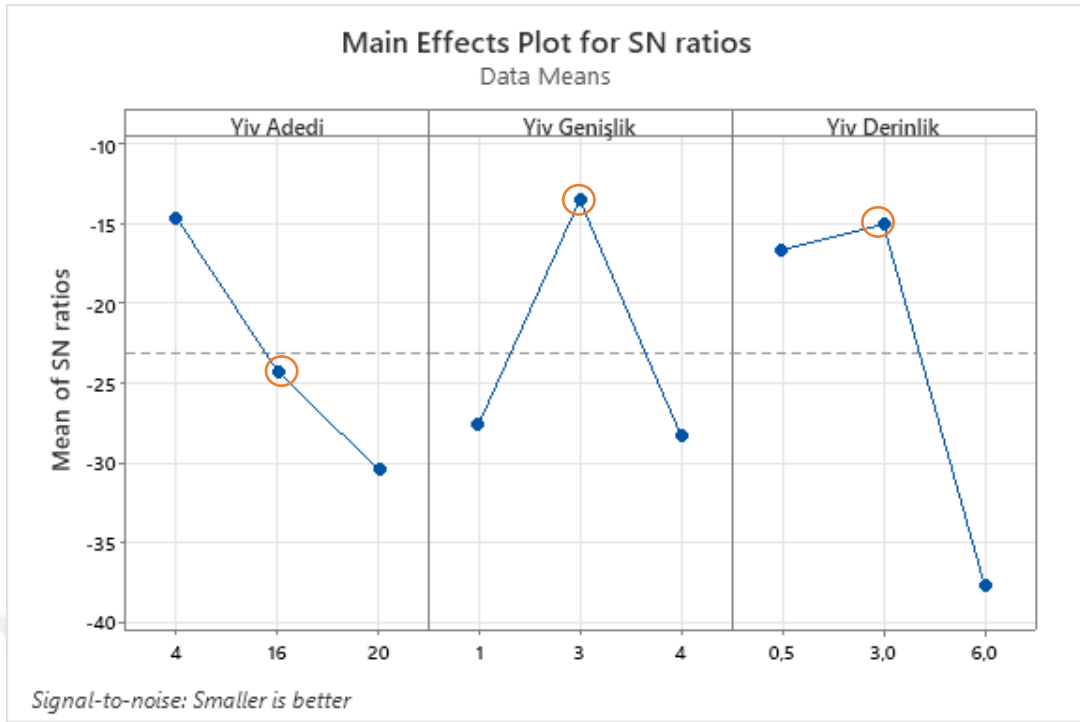
Level	Yiv Adedi	Yiv Genişlik	Yiv Derinlik
1	-14,61	-27,60	-16,60
2	-24,29	-13,47	-15,03
3	-30,47	-28,29	-37,75
Delta	15,85	14,82	22,72
Rank	2	3	1

Şekil 3.4.13: Sonuç tablosu

Response Table for Means

Level	Yiv Adedi	Yiv Genişlik	Yiv Derinlik
1	23,06	31,67	10,82
2	61,65	59,20	50,39
3	69,01	62,86	92,51
Delta	45,95	31,19	81,68
Rank	2	3	1

Şekil 3.4.14: Means tablosu



Şekil 3.4.15: Taguchi Analiz Means Sonuçları

Taguchi metodu yardımıyla belirlenen optimum doğrusal hıza ulaşmak için 16 adet yiv-setli bir namluda yiv derinliğini 3mm ve yiv derinliğini 3mm seçilmiştir.

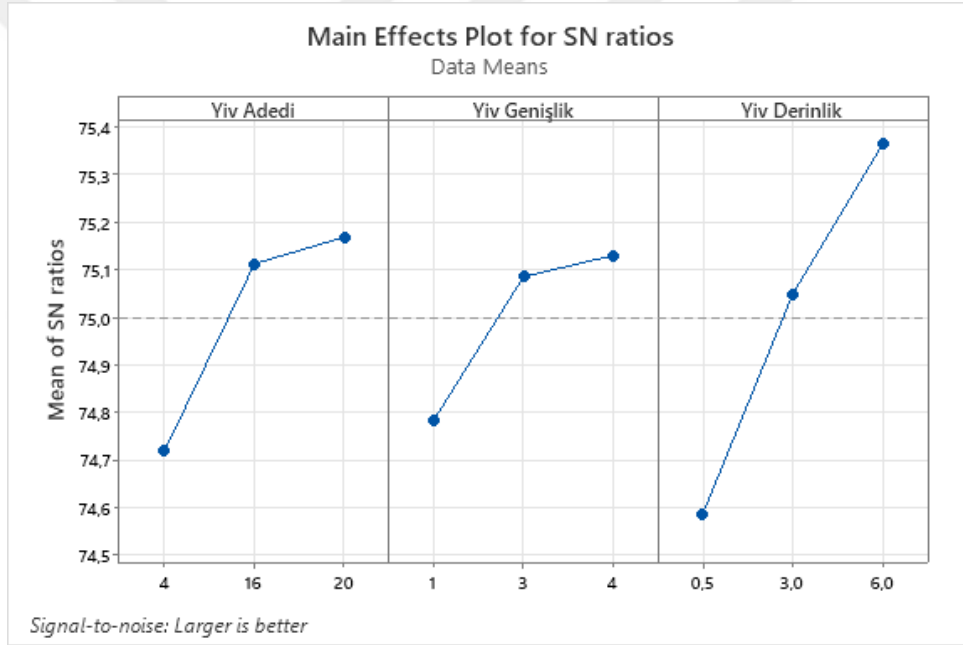
3.4.2 Taguchi Methodu ile açısal hız optimizasyonu

Optimum namlu seçimlerinde oldukça önemli bir faktör olan açısal hız değeri için Taguchi methodu kullanılmıştır. Progresif helis açılı namlularda belirlenen açısal hız değerleri Çizelge 3.4.2.1 de verilmiştir. Bu değerleri Minitab yazılımı yardımıyla L9 methodu kullanılarak incelenmiştir.

Bölüm 3.4.1 de detayları verilmiş olan Taguchi metodu adımları takip edilmiştir. Açısal hız SN grafiği Şekil 3.4.2.2 de verilmiştir.

Çizelge 3.4.2.1: Açısal Hız değerleri

Yiv Set Adedi	Yiv Genişliği	Yiv Derinliği	Açısal Hızı
4	1	0,5	5290,117
4	3	3	5415,499
4	4	6	5629,956
16	1	3	5459,065
16	3	6	6267,093
16	4	0,5	5400,900
20	1	6	5713,485
20	3	0,5	5393,585
20	4	3	6114,036



Şekil 3.4.2.2: Açısal Hız Means grafiği

Taguchi ile elde edilen sonuçlar Bölüm 3.5 da eğri uydurma yöntemiyle optimum değerlere ulaşılmıştır.

3.5 Regresyon Analizi

Regresyon analizi, iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi belirlemek ve bu ilişkiyi kullanarak o konu ile ilgili tahminler ya da kestirmeler değerler oluşturmak amacıyla kullanılan bir metottur. Regresyon analiziyle, hedeflenen doğrusal hız ve açısal

hız değerleri için oluşturulması gereken optimum namı parametrelerini belirlemek hedeflenmiştir.

Doğrusal hızın optimum değerini belirlemek için yapılan çalışmada Denklem 3.5.1 elde edilmiştir. Aynı yöntemle açısal hızın optimum değerini belirlemek için yapılan çalışmada Denklem 3.5.2 elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Hız} = & 1220,5 - 14,78 \text{ Yiv Adedi} - 81,92 \text{ Yiv Genişlik} \\ & + 43,80 \text{ Yiv Derinlik} \\ & - 0,08601 \text{ Yiv Adedi} * \text{Yiv Adedi} - 3,368 \text{ Yiv Genişlik} * \text{Yiv Genişlik} \\ & - 0,3254 \text{ Yiv Derinlik} * \text{Yiv Derinlik} + 7,906 \text{ Yiv Adedi} * \text{Yiv Genişlik} \\ & - 0,4309 \text{ Yiv Adedi} * \text{Yiv Derinlik} \end{aligned} \quad (3.5.1)$$

$$\begin{aligned} \text{Açısal Hız} = & 4631 + 40 \text{ Yiv Adedi} + 208 \text{ Yiv Genişlik} \\ & + 153 \text{ Yiv Derinlik} \\ & - 0,88 \text{ Yiv Adedi} * \text{Yiv Adedi} - 26 \text{ Yiv Genişlik} * \text{Yiv Genişlik} \\ & - 9,4 \text{ Yiv Derinlik} * \text{Yiv Derinlik} \end{aligned} \quad (3.5.2)$$

Farklı varyasyonlar denenmiş ve doğrusal hız ve açısal hız için en uygun değerler Çizelge 3.5.1 de verilmiştir.

Çizelge 3.5.1: Optimum iç balistik değerleri

Yiv Set Adedi	Yiv Genişlik (mm)	Yiv Derinliği (mm)	Helis Giriş Açısı (derece)	Helis Çıkış Açısı (derece)	Doğrusal Hız (m/s)	Açısal Hız (rad/s)
16	3,6	0,6	4	7	1099,07	5410

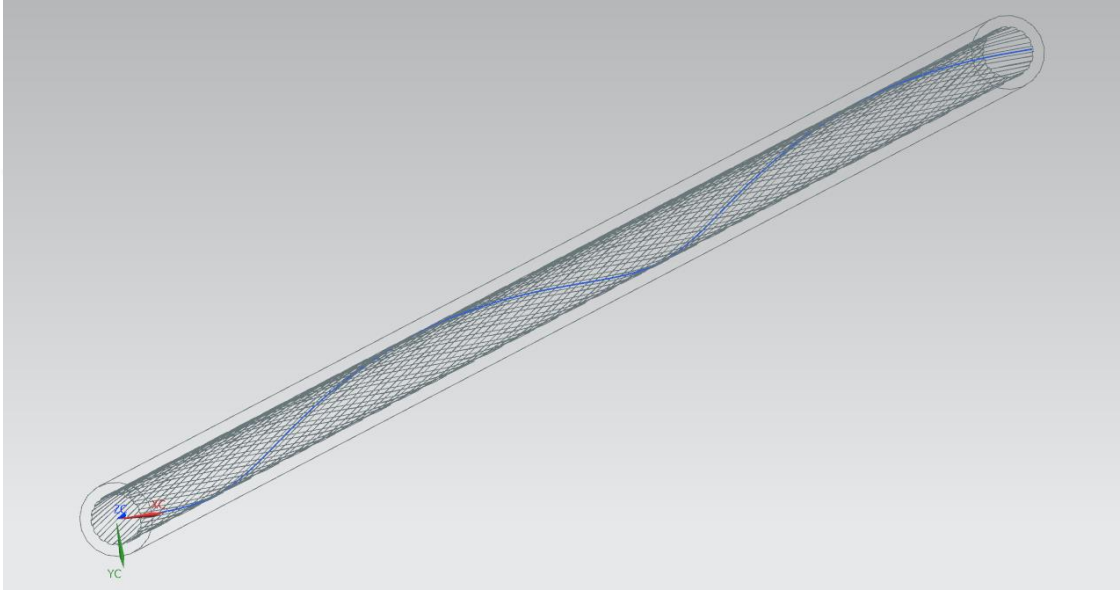
Değerler regresyon formüllerinde yerine koyuldu ve Çizelge 3.5.2 de hedeflenen değerlere ulaşıldığı görülmüştür.

Çizelge 3.5.2: Regresyon Sonuçları

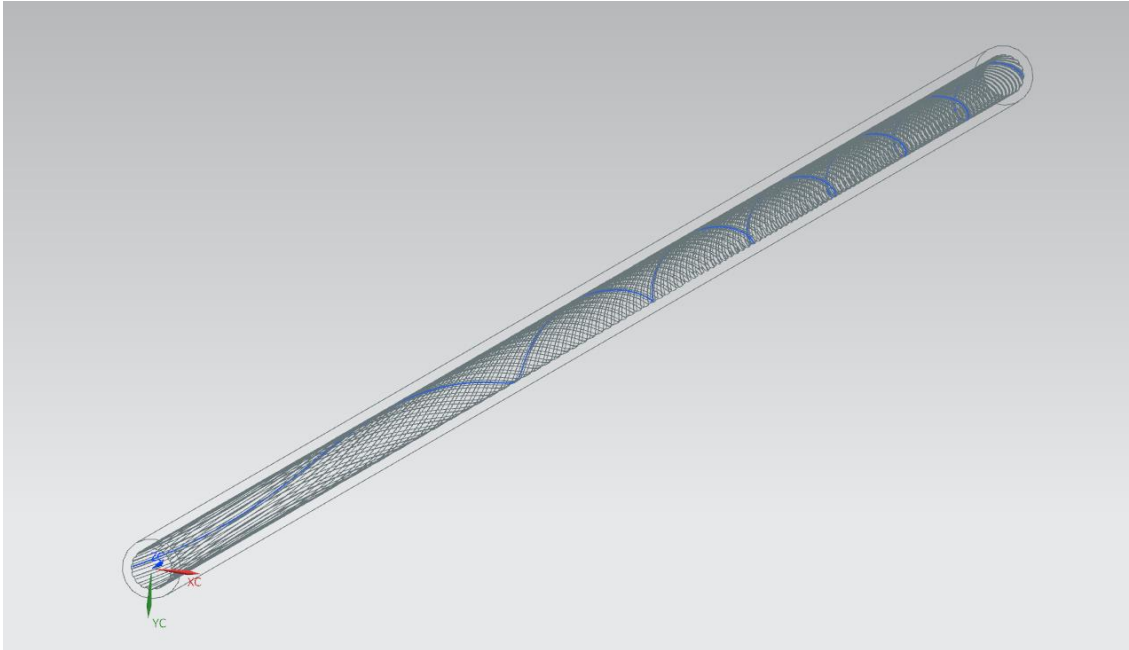
Doğrusal Hız	1100,8519	m/s
Açısal Hız	5548,98	Rad/s

3.6 Namlu Katı Model Çalışmaları

3D tasarım programları yardımı ile verilen değerlere uygun namlu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Siemens NX.11 tasarım yazılımı ve SolidWork Student Edition yazılımında çalışmalar yapılmıştır. Düz açılı helise sahip namlu Şekil 3.6.1 de, progresif açılı helise sahip namlu Şekil 3.6.2 de verilmiştir. Şekillerde görülen mavi renkli çizgiler yiv-set hatvelerini göstermek amacıyla oluşturulmuştur.

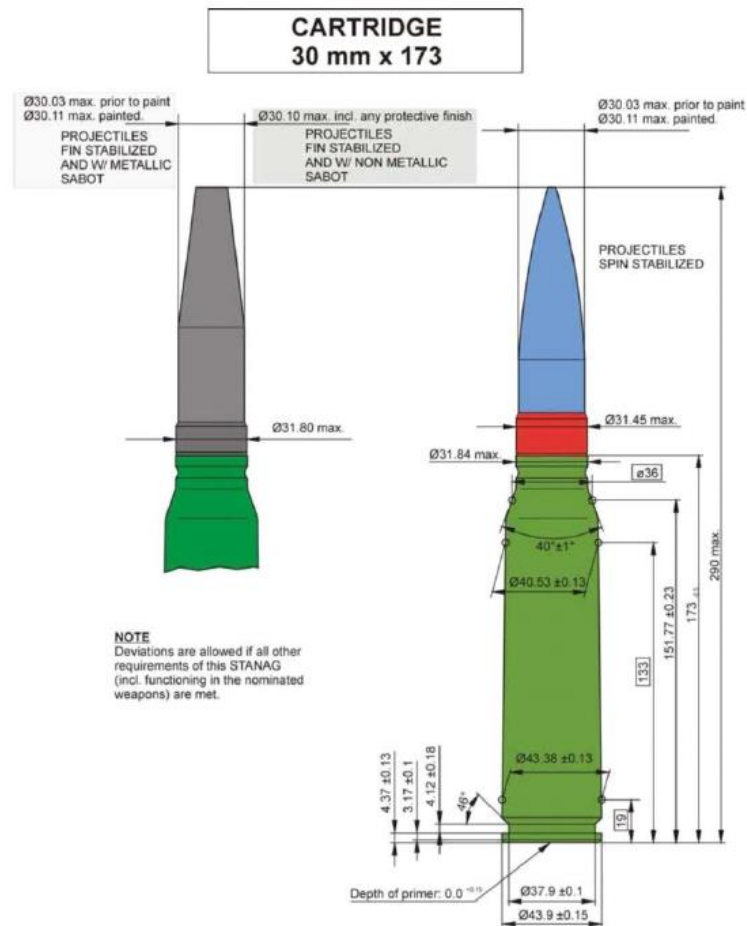


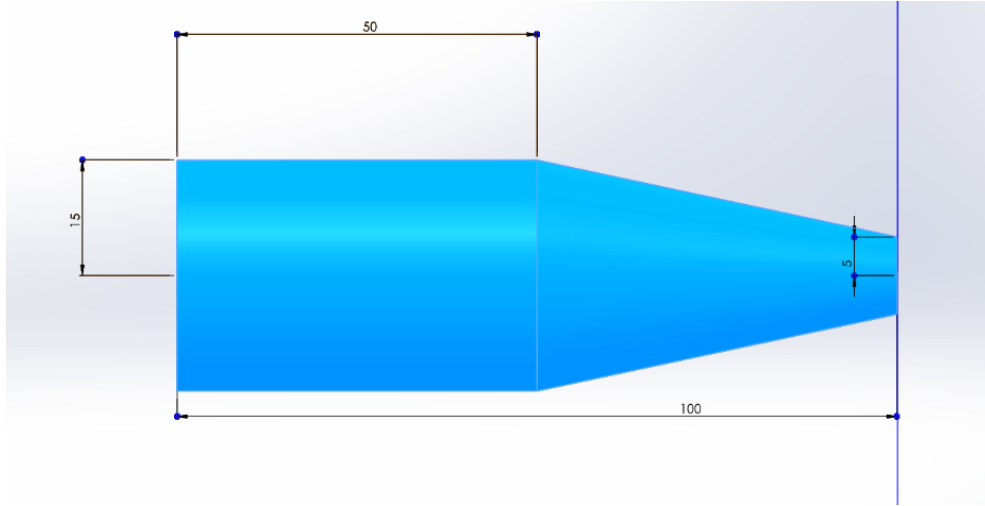
Şekil 3.6.1: Düz Helis Açılı Namlu, helis açısı 4 derece



Şekil 3.6.2: Progresif Helis Açılı Namlu, helis açısı 4 ve 7 derece

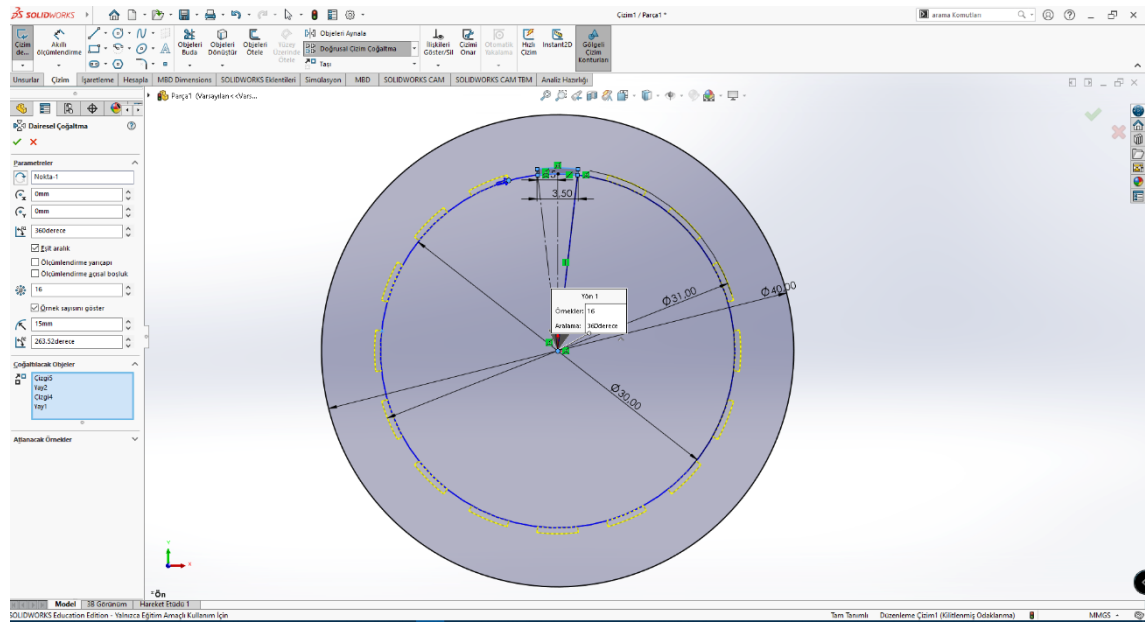
30x173mm mühimmat için NATO standartlarında üretimi yapılan ve Şekil 3.6.3 de ölçüleri görülen STANAG 4624'ten temin edilmiş mermi çekirdeği kullanılacaktır. Çalışmalarımızda kullanmak için Siemens NX.11 tasarım yazılımında oluşturduğumuz mühimmat çekirdeği Şekil 3.6.4 de görülmektedir.





Şekil 3.6.4: 30mm x 173 mühimmat NM219 TP-T Çekirdeği tasarımı

İç balistik değerlerine doğrudan etkisi olduğunu vurguladığımız ve namlu imalatının en önemli yapılarından olan yiv ve set ölçüleri, SolidWorks programında hazırladığımız katı modeli Şekil 3.6.5'te gösterilmiştir. Seçtiğimiz namluda 16 adet yiv-set oluşturulmuştur. Yiv derinliği 0,6mm seçilirken, yiv genişliği 3.60mm seçilmiştir. 30mm çaptaki çemberin çevresinde açılan set genişlikleri yiv setlerden kalan ölçüler sonucunda belirlenmiştir.



Şekil 3.6.5: 16 adet Yiv-Set katı model oluşturulması

Analitik çözümleri tamamlanan çalışmamızda, katı modellerin tasarımı tamamlanmıştır. Balistik değerler doğrudan ve dolaylı birçok noktasında temas eden yiv-set yapılarının farklı profillere sahip olması durumu incelenmiştir.

3.7 Namlu İçindeki Anlık Değerlerin Belirlenmesi

Yukarıdaki bölümlerden bilenenler, gaz basıncının maksimum (P_{max}) olduğu andaki konumu (X_1), hızı (V_1) ve geçen süre (t_1). Bu değerlerden faydalanılarak merminin namlu içindeki bir X konumun aşağıdaki denklemler yardımıyla basınç, hız ve zaman değerleri elde edilmiştir (Pihtili ve Yildirim 2023).

$$\lambda = \frac{X}{X_1} \quad (3.7.1)$$

$$P = P_{max} \cdot \psi(\lambda) \quad (3.7.2)$$

$$V = V_1 \cdot \varphi(\lambda) \quad (3.7.3)$$

$$t = t_1 \cdot \delta(\lambda) \quad (3.7.4)$$

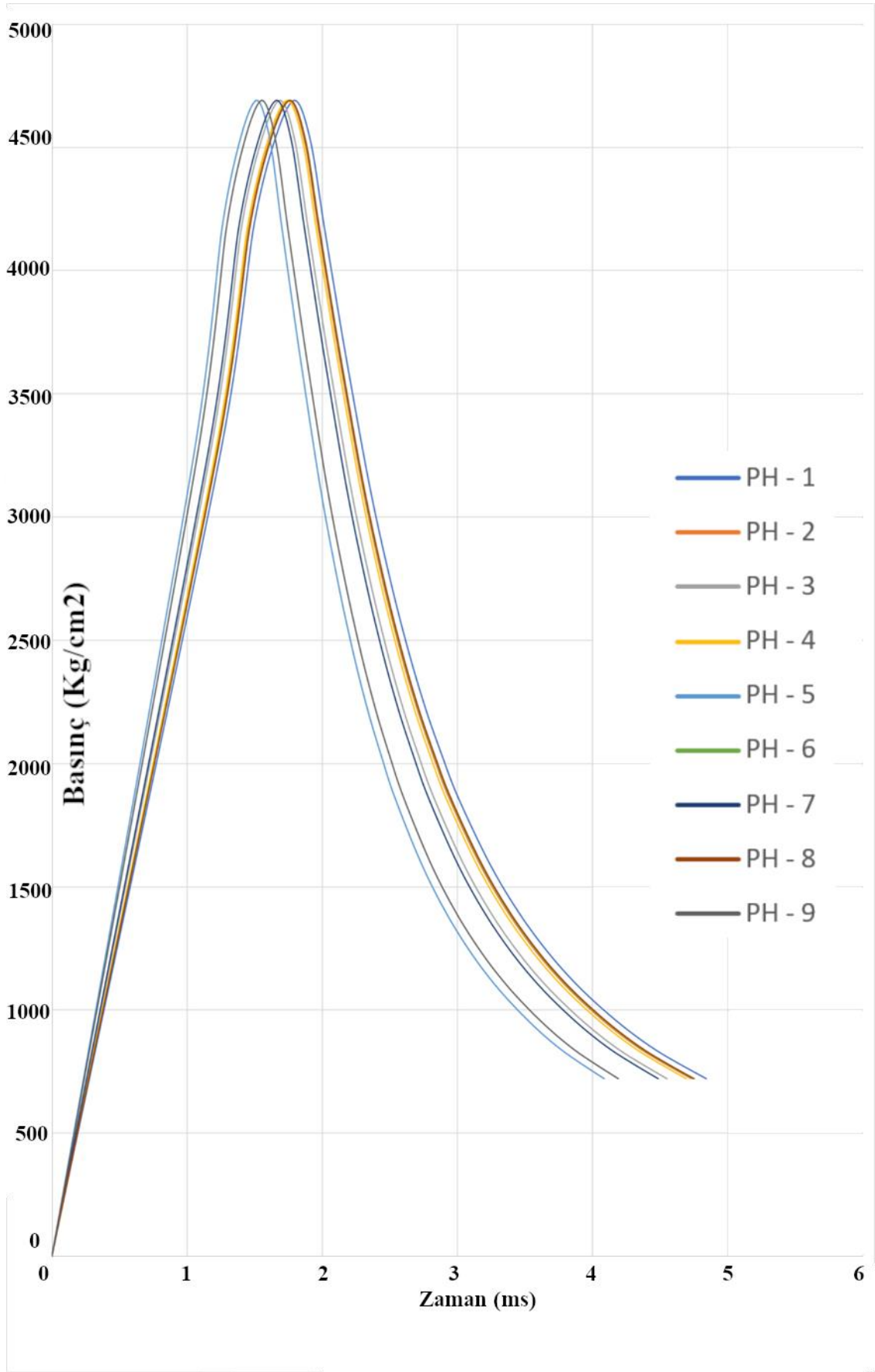
Çizelge 3.7.1: Namlu içindeki konuma göre sabitler (Öztürk, İç Balistik 1984)

$\lambda = \frac{X}{X_1}$	$\psi(\lambda)$	$\varphi(\lambda)$	$\delta(\lambda)$		$\lambda = \frac{X}{X_1}$	$\psi(\lambda)$	$\varphi(\lambda)$	$\delta(\lambda)$
0,25	0,690	0,375	0,689		11	0,195	2,505	2,376
0,50	0,890	0,624	0,830		12	0,179	2,551	2,483
0,75	0,970	0,828	0,924		13	0,166	2,592	2,588
1,00	1,000	1,000	1,000		14	0,154	2,630	2,692
1,25	0,966	1,145	1,063		15	0,144	2,665	2,794
1,50	0,893	1,268	1,119		16	0,135	2,698	2,895
1,75	0,828	1,372	1,170		17	0,127	2,730	2,994
2,00	0,769	1,460	1,218		18	0,120	2,760	3,092
2,50	0,668	1,609	1,306		19	0,114	2,787	3,189
3,00	0,590	1,726	1,387		20	0,108	2,812	3,286
3,50	0,527	1,824	1,463		23	0,0948	2,8774	3,5692
4,00	0,475	1,909	1,536		25	0,860	2,921	3,758
4,50	0,433	1,981	1,606		30	0,710	3,004	4,214
5,00	0,397	2,046	1,672		35	0,600	3,070	4,659
6	0,340	2,158	1,801		40	0,520	3,132	5,095
7	0,297	2,250	1,923		45	0,460	3,182	5,523
8	0,263	2,328	2,042		50	0,041	3,220	5,946
9	0,236	2,395	2,156		75	0,027	3,373	7,995
10	0,214	2,453	2,267		100	0,020	3,480	9,966

Çizelge 3.7.1 kullanılarak namlu içinde her 50mm aralıkta gerçekleşen Basınç-Hız-Zaman değerleri belirlenmiş ve Çizelge 3.7.2’de örnek çalışma verilmiştir. Seçilmiş olan her bir namlu için aynı çalışmalar yapılmıştır. Sonuçlar grafiklere aktarılmış ve şekillerde verilmiştir. Şekil 3.7.1. de görülen Basınç- Zaman grafiği tüm namlular için verilmiştir.

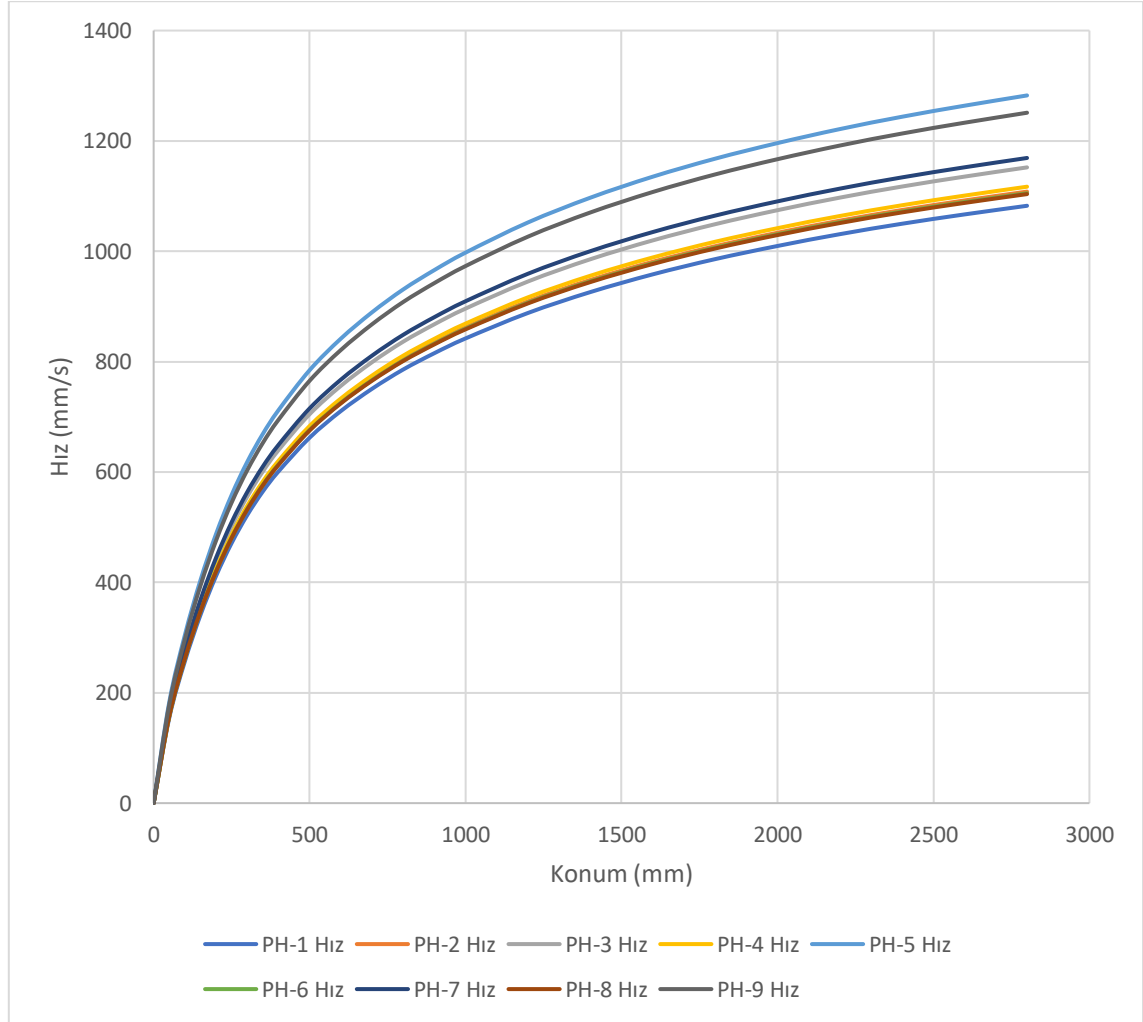
Çizelge 3.7.2: Namlu içindeki Basınç-Hız-Zaman değerleri

x	$\lambda = \frac{X}{X_1}$	$\psi(\lambda)$	P	$\varphi(\lambda)$	V	$\delta(\lambda)$	tx10-3
0			0,000		0,000		0,000
50	0,25	0,69	3236,576	0,375	182,855	0,689	1,046
100	0,50	0,89	4174,714	0,624	304,270	0,83	1,260
150	0,75	0,97	4549,969	0,828	403,743	0,924	1,403
200	1,00	1	4690,690	1	487,612	1	1,518
250	1,25	0,966	4531,207	1,145	558,316	1,063	1,614
300	1,50	0,893	4188,786	1,268	618,292	1,119	1,699
350	1,75	0,828	3883,891	1,372	669,004	1,17	1,777
400	2,00	0,769	3607,141	1,46	711,914	1,218	1,849
500	2,50	0,668	3133,381	1,609	784,568	1,306	1,983
600	3,00	0,59	2767,507	1,726	841,619	1,387	2,106
700	3,50	0,527	2471,994	1,824	889,405	1,463	2,221
800	4,00	0,475	2228,078	1,909	930,852	1,536	2,332
900	4,50	0,433	2031,069	1,981	965,960	1,606	2,439
1000	5,00	0,397	1862,204	2,046	997,655	1,672	2,539
1200	6,00	0,34	1594,835	2,158	1052,267	1,801	2,735
1400	7,00	0,297	1393,135	2,25	1097,127	1,923	2,920
1600	8,00	0,263	1233,651	2,328	1135,161	2,042	3,101
1800	9,00	0,236	1107,003	2,395	1167,831	2,156	3,274
2000	10,00	0,214	1003,808	2,453	1196,113	2,267	3,442
2200	11,00	0,195	914,685	2,505	1221,469	2,376	3,608
2400	12,00	0,179	839,634	2,551	1243,899	2,483	3,770
2600	13,00	0,166	778,655	2,592	1263,891	2,588	3,930
2800	14,00	0,154	722,366	2,63	1282,420	2,692	4,088



Şekil 3.7.1: 16 Yiv-setli Yiv Genişliği 3,60 Yiv Derinliği 0,6 olan namluda Basınç-Hız-Zaman grafiği

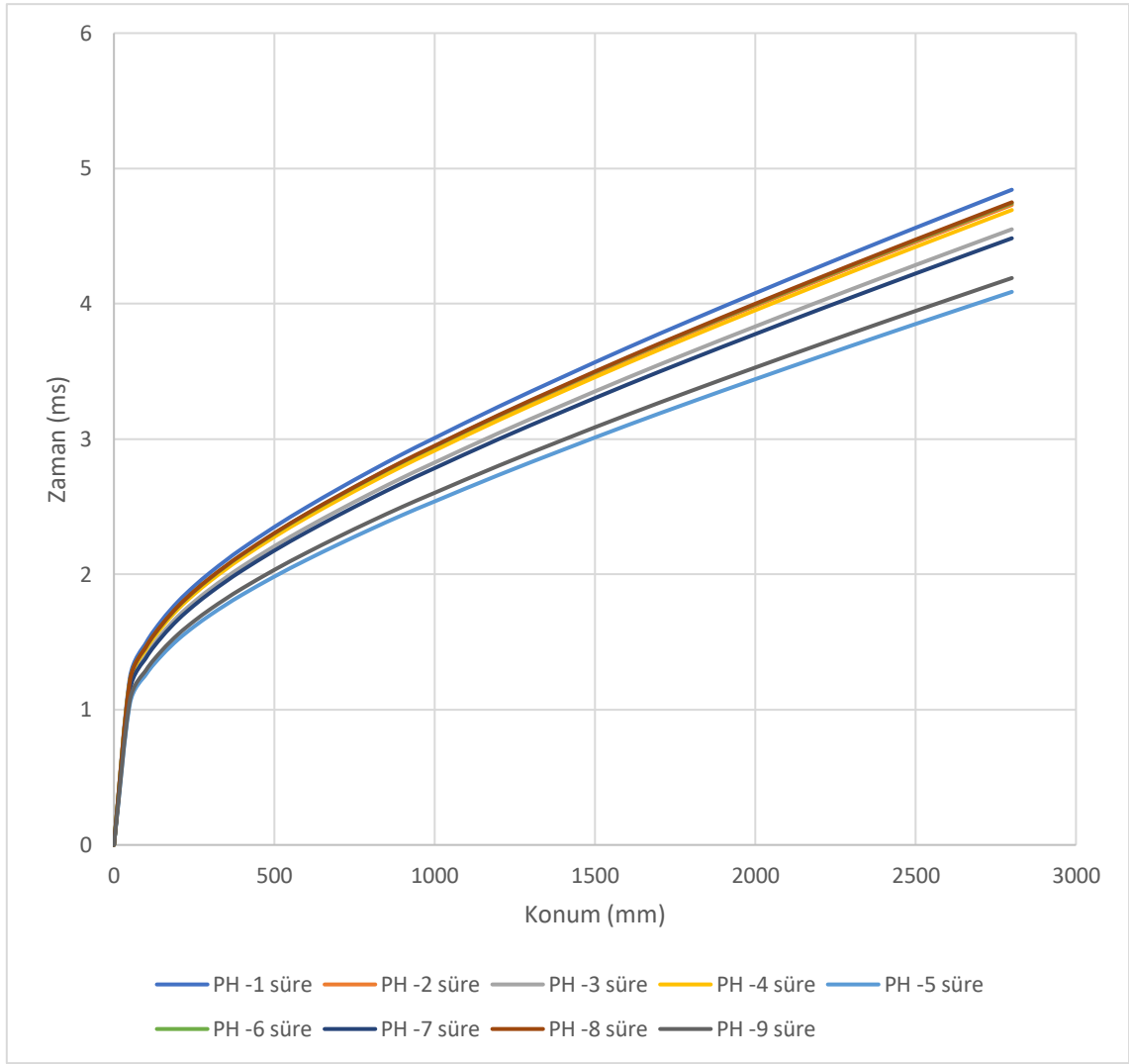
Belirlediğimiz namlularda basınç değerleri namlu çapından bağımsız olarak sabit kalmıştır. Basınç maksimum değere her bir namluda farklı sürelerde erişmiştir. Basınç maksimum değerine en kısa sürede PH-5 namluda erişmiştir.



Şekil 3.7.2: Progresif hatveli namlularda Konum – Hız grafiği

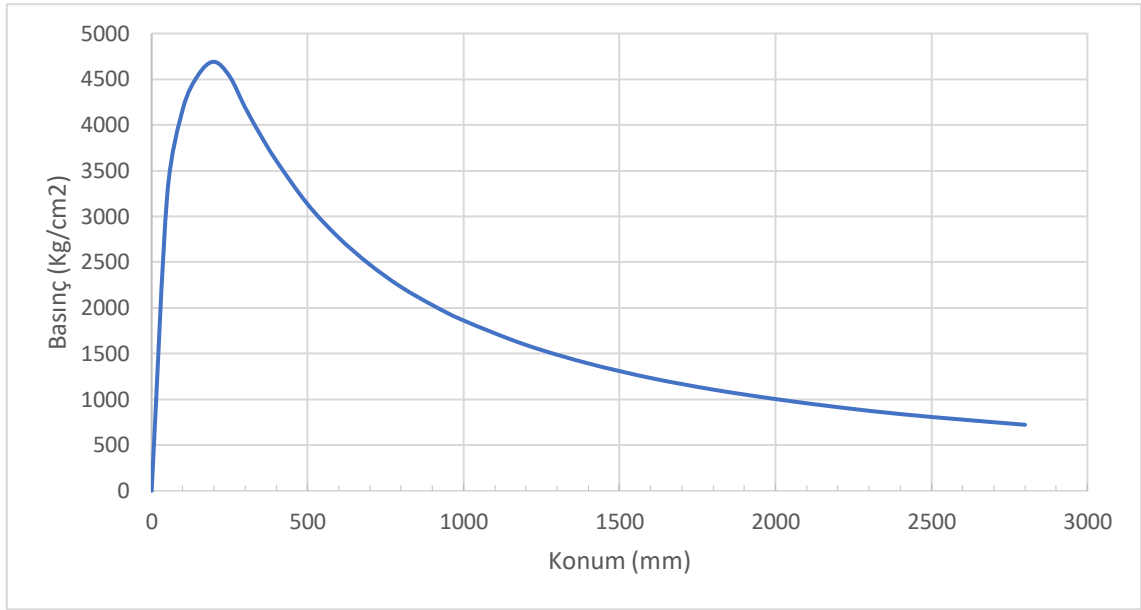
Şekil 3.7.2 Konum – hız grafiğinde merminin en yüksek çıkış hızına sahip olduğu değerleri göz önünde bulundurulduğunda PH-5 Hız değeri seçilmiştir. PH-5 namlu için 16 adet yiv içeren, 3mm yiv genişliğine sahip ve 6mm yiv derinliği olan namlu olarak belirlenmiştir.

Şekil 3.7.3 Konum – zaman grafiğinde namlu boyu 2700 mm mesafeyi tamamlayan mermi çekirdeği PH-5 namlu da gerçekleşmiştir. Namluların içinde gerçekleşen basınç değişimleri Şekil 3.7.4'te verilmiştir.



Şekil 3.7.3: Konum – Zaman grafiği

Silahın ateşlenmesiyle mermi çekirdeğinin namludan çıkış süresi en kısa olan seçilmiştir. Grafikte görülen değerlerden en kısa sürede 2700mm ye ulaşan çekirdek PH-5'te görülmüştür. Namlu boyu sabit olduğu bilinmektedir, namluyu terk etme süresinin düşük olması merminin çıkış hızının yüksek olmasıyla gerçekleşebilmektedir. Bu durumda optimum değere sahip olan namlu PH-5 ile eğri uydurma yöntemi ile belirlenen namlu iç balistik parametreleri belirlenecektir.



Şekil 3.7.4: Konum Basınç grafiği

Grafikte basınç değerinin maksimum olması için gereken yolun 200mm olduğu görülmektedir. Bu mesafede mermi çekirdeği üzerine yiv-set'in iz oluşturması beklenmektedir. Çekirdek basınç maksimum olduktan sonra serbest hızlanmaya başlar ve namluyu terk ettiği anda maksimum hıza ulaşır.

3.8: Açısal Hızın Anlık Değerlerinin Belirlenmesi

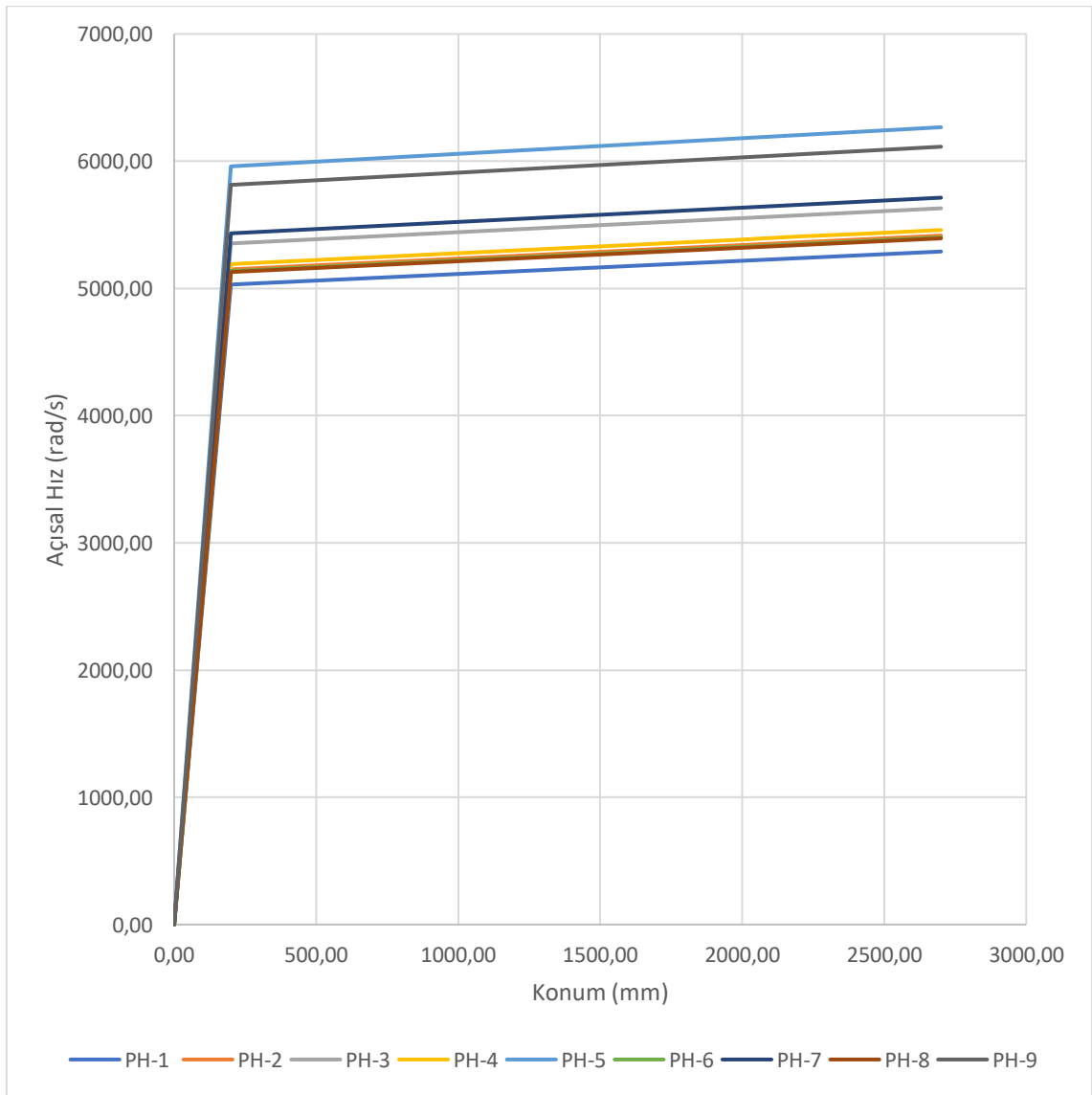
Merminin namlu içinde ilerlemesi esnasında basıncın maksimum olduğu andan itibaren kazandığı açısal hız değerleri Çizelge 3.8.1 de verilmiştir.

Çizelge 3.8.1: Anlık Açısal hız değerleri

Konum	PH-1	PH-2	PH-3	PH-4	PH-5	PH-6	PH-7	PH-8	PH-9
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
199,80	5030,61	5149,85	5353,79	5191,28	5959,67	5135,96	5433,21	5129,01	5814,12
200,00	5030,64	5149,87	5353,81	5191,30	5959,69	5138,98	5433,24	5129,03	5814,14
250,00	5035,83	5155,18	5359,33	5196,65	5965,84	5141,29	5438,84	5134,32	5820,14
300,00	5041,02	5160,49	5364,85	5202,01	5971,99	5146,58	5444,45	5139,61	5826,14
350,00	5046,21	5165,80	5370,37	5207,37	5978,13	5151,88	5450,06	5144,90	5832,13
400,00	5051,40	5171,12	5375,90	5212,72	5984,28	5157,18	5455,66	5150,19	5838,13
500,00	5061,78	5181,74	5386,95	5223,43	5996,58	5167,77	5466,87	5160,77	5850,13
600,00	5072,16	5192,37	5397,99	5234,14	6008,87	5178,37	5478,08	5171,36	5862,12
700,00	5082,53	5202,99	5409,03	5244,85	6021,17	5188,98	5489,29	5181,95	5874,12
800,00	5092,91	5213,62	5420,08	5255,56	6033,47	5199,56	5500,49	5192,52	5886,12
900,00	5103,29	5224,24	5431,13	5266,27	6045,76	5210,16	5511,70	5203,10	5898,11
1000,00	5113,67	5234,87	5442,17	5276,98	6058,06	5220,76	5522,91	5213,689	5910,11

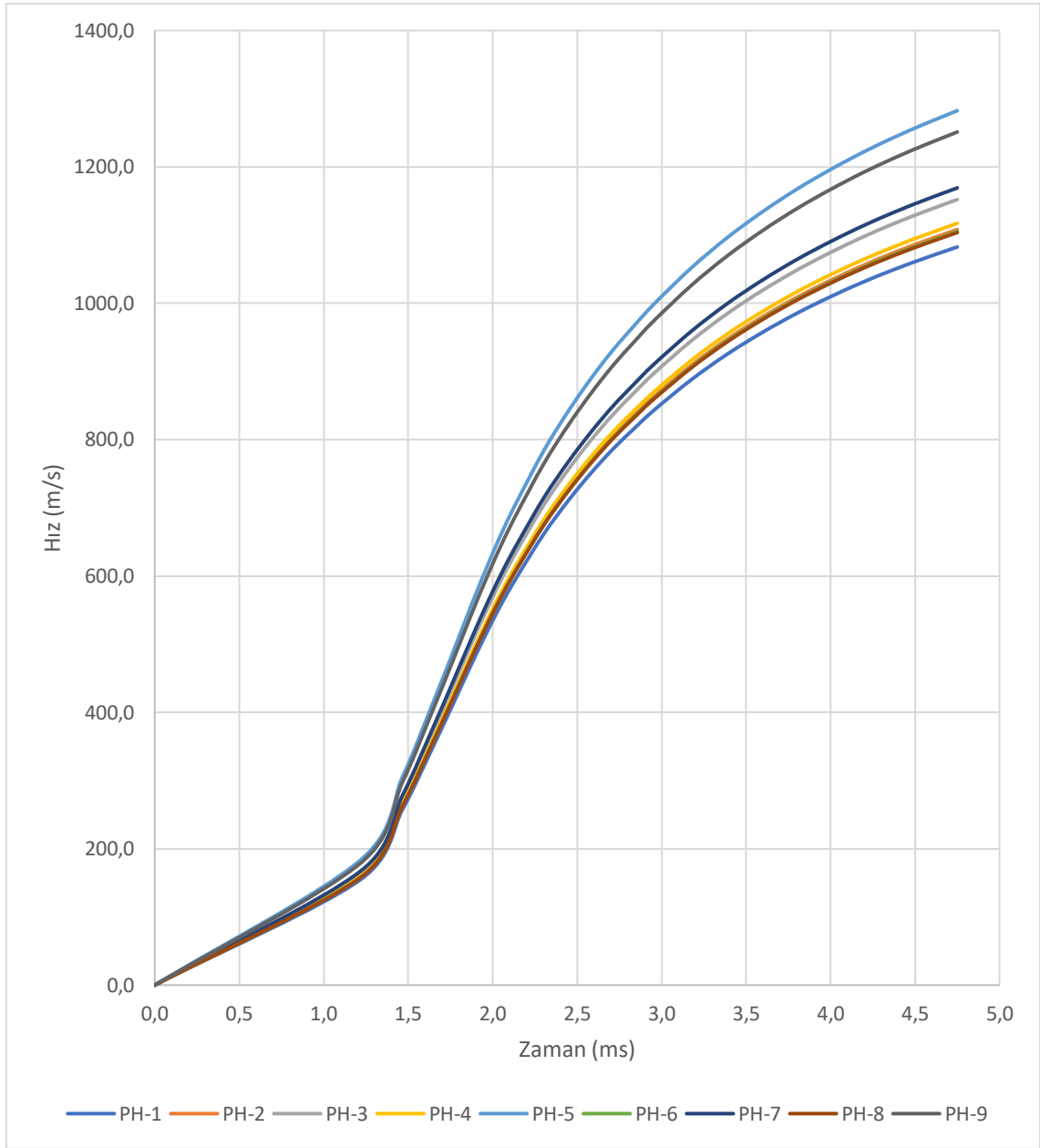
1200,00	5134,43	5256,12	5464,27	5298,40	6082,65	5241,95	5545,33	5234,85	5934,10
1400,00	5155,19	5277,37	5486,36	5319,82	6107,24	5263,14	5567,75	5256,01	5958,09
1600,00	5175,95	5298,62	5508,43	5341,24	6131,83	5284,33	5590,18	5277,18	5982,08
1800,00	5196,70	5319,87	5530,54	5362,66	6156,43	5305,53	5612,60	5298,35	6006,07
2000,00	5217,46	5341,12	5552,63	5384,09	6181,02	5326,72	5635,01	5319,51	6030,06
2200,00	5238,22	5362,37	5574,73	5408,51	6205,61	5347,91	5657,43	5340,67	6054,05
2400,00	5258,98	5383,62	5596,81	5426,93	6230,20	5369,11	5679,86	5361,83	6078,04
2600,00	5279,74	5404,87	5618,91	5448,35	6254,79	5390,30	5702,27	5383,00	6102,04
2700,00	5290,11	5415,50	5629,95	5459,06	6267,09	5400,90	5713,48	5393,58	6114,04

Değerler yardımıyla konum açısal hız grafiği Şekil 3.8.1 de verilmiştir.



Şekil 3.8.1: Konum Açısal hız grafiği

Açısal hızın yüksek olması jiroskopik etkiyi artırmaktadır. Bu durum göz önüne alındığında PH-5 namluda açısal hızın değerinin 6297 rad/sn olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.8.2: Hız-Zaman grafiği

Hız – Zaman grafiğinde edin görüldüğü üzere mermi çekirdeğinin namlu içindeki hız değerleri gaz basıncı maksimum değerine ulaştığı noktaya kadar doğrusal ilerlemiştir. Maksimum basınç değerinin gerçekleşmesinden itibaren parabol oluşturduğu gözlemlenmiştir.

4. YİV SET PROFİLLERİNİN BALİSTİK ETKİSİ

4.1. Farklı Yiv Set Profillerinin Balistik Etkisi

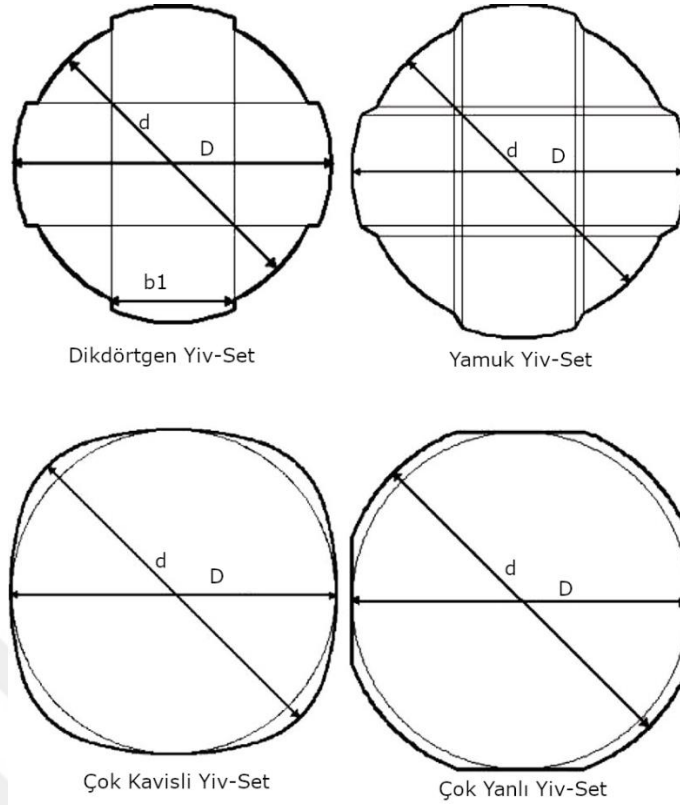
Orta kalibre silahların namlu delikleri, yüksek sıcaklıklar, basınçlar ve dinamik yükler altında aşınarak hasara ve gerilim yoğunlaşmasına eğilimli yapılardır ve bu durum namlu ömrüne olumsuz etki etmektedir. Yiv set tasarımı sırasında dinamik stres analizi, namlu ömrü analizi ve tasarımı için bir önkoşuldur. Namlu ömrünü uzatmak için farklı yiv-set profilleri incelenmiştir.

Silah namlusunun ve mermisinin dinamik performansları arasındaki uyumu artırmak ve namlu servis ömrünü etkili bir şekilde uzatmak amacıyla yiv-set profil yapıları ve aralarındaki ilişkiler değerlendirilmiştir.

Namlu yapısı gereği yanma odası, zorlanma konisi ve namlu boyunca uzanan yiv-setlerden oluşmaktadır. Namluda yapılan atış esnasında mühimmattan gelen barut tozları ve patlama gazları namlu cidarlarına ve namludaki yiv-set yapılarında istenmeyen basınç, yüksek sıcaklık uygular. Bu durum yiv setlerde kırılma veya kopmalara sebep olabilmektedir.

Namluların tasarımları esnasında ömürlerini uzatacak iyileştirmeler birçok bilim adamının ilgilendiği ve tasarım esnasında göz önünde bulundurduğu bir durumdur. Çalışmamızın bu kısmında Şekil 4.1’de görülen dikdörtgen, yamuk, çok kavisli ve çok yanlı yiv-set profillerinin namlu balistiğine katkıları açısından değerlendirilecektir.

Merminin namluda ateşlenmesi sırasındaki atım yatağı basıncı, silahın sürekli ateşlenmesi sırasında namluda oluşan sıcaklığı dağılımı ve mermi ile namlu arasındaki sürtünmeye ilişkin teorik analiz modelleri gözden geçirilerek farklı silah yapıları dikkate alınarak teorik modeller oluşturmak için kullanılmıştır. Atım yatağı basıncı hesaplama modeli, namlu cidarında oluşan ısı transferi modeli ve namlu ile mermi arasında oluşan sürtünmeyi hesaplama modelleri oluşturulmuştur.



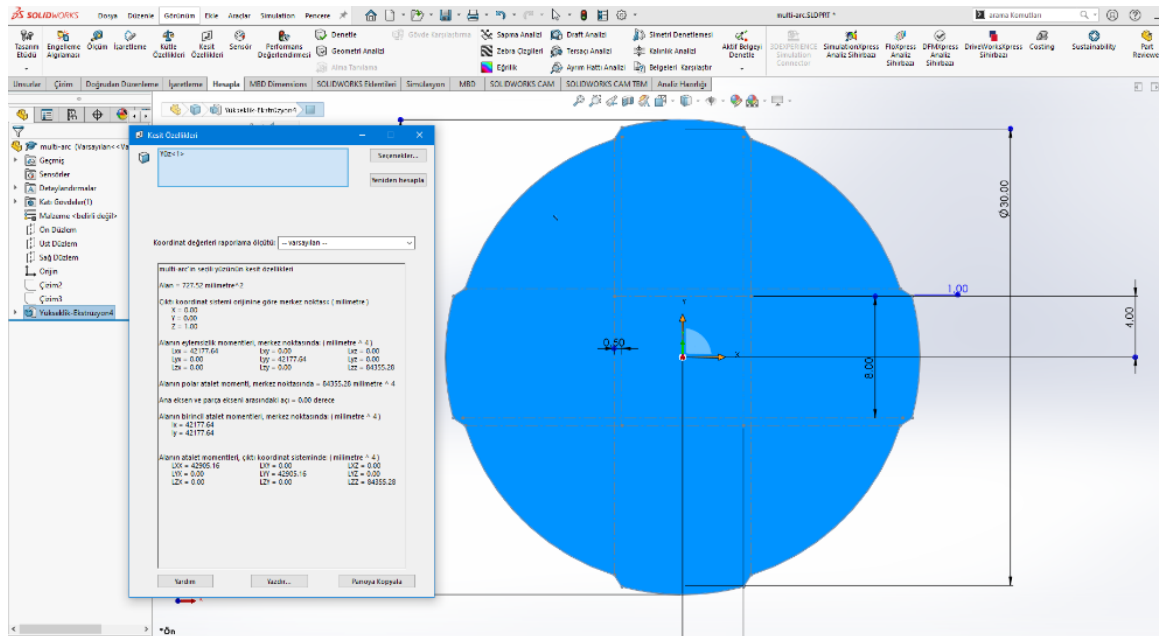
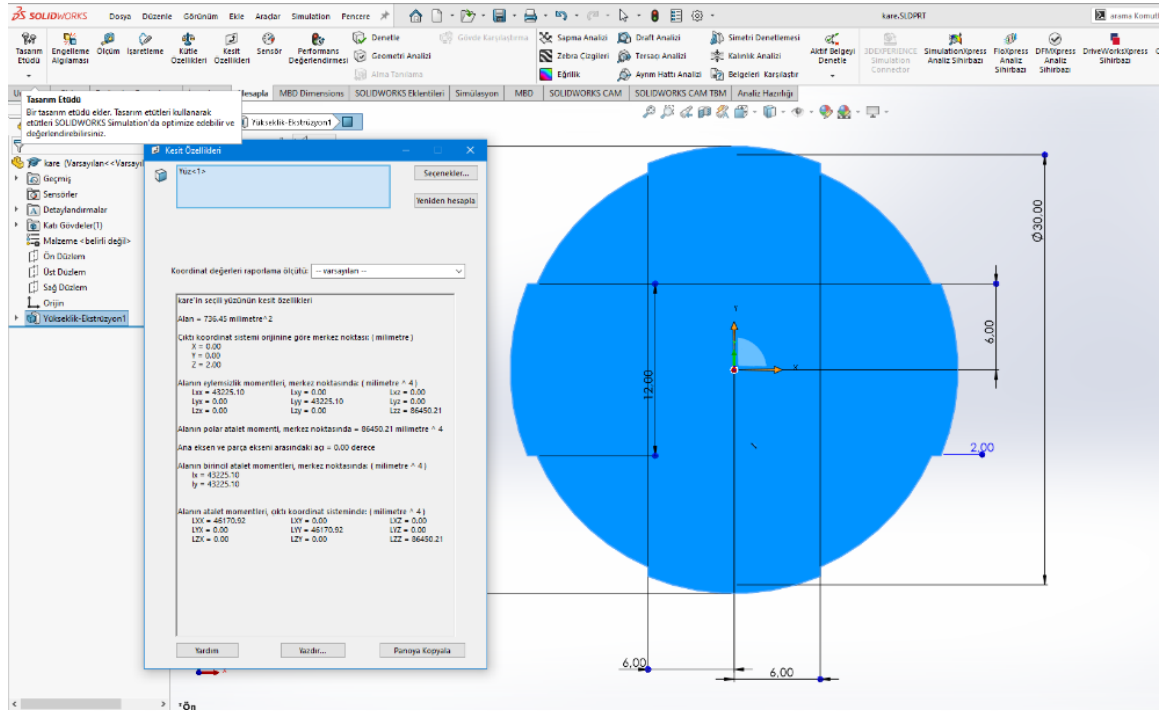
Şekil 4.1: Farklı profil yapıları ile oluşturulmuş yiv-set kesitleri (Wei ve diğ., 2022).

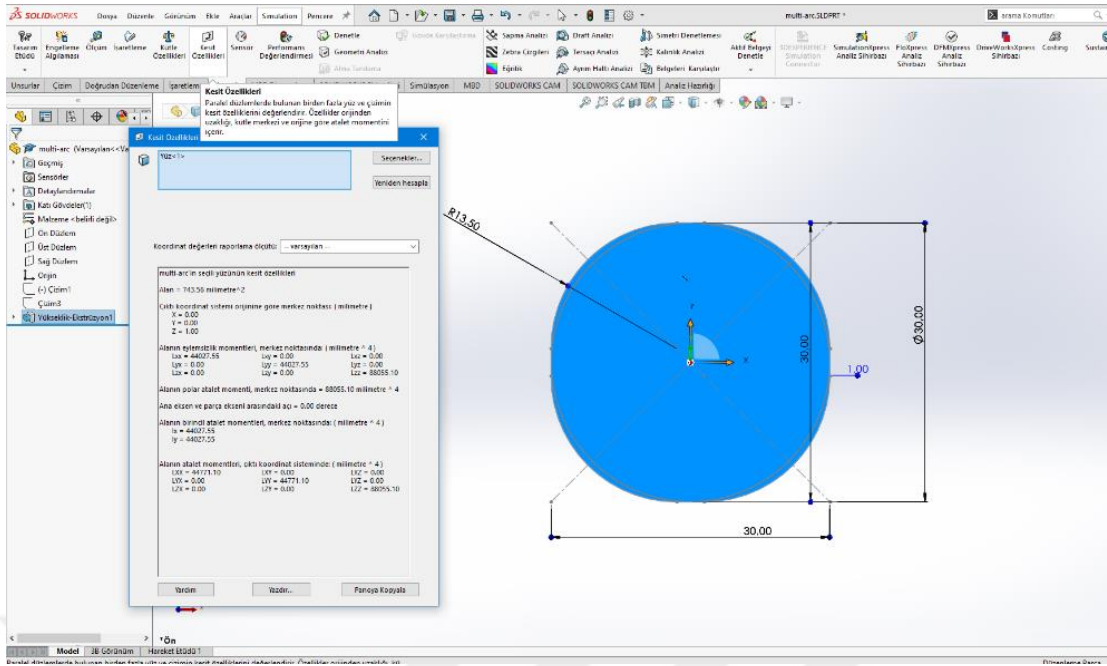
Bu çalışmada orta kalibreli tüfek namluları için farklı yiv-set profili yapısının etkileri incelenmesi ön planda olması sebebiyle tüm namlularda 4 adet yiv oluşturulacaktır. Silah mermisi ve namlusu arasındaki ilişkide mermi kesit alanı S_z ile yivli namlu kesit alanı S arasındaki orana bağlıdır. S_z/S oranı genellikle 1,01 ile 1,03 değerleri arasında olması beklenmektedir. S_z değeri S değerinden küçük olması gerekmektedir. Dikdörtgen ve Yamuk yiv-setli namlularda S_z/S oranını bir miktar büyük tutmak gerekebilir çünkü keskin köşelere sahip yiv-set yapıları mevcuttur. Çok kavisli ve Çok Yanlı namlularda S_z/S oranını mümkün olduğu kadar küçük tutmak uygun olacaktır.

Analitik çözümlerlerde kullanılmak üzere 4 farklı yiv-set yapısı için kesit alanlarını aşağıdaki denklemler ile hesaplanabilmektedir (Wei ve diğ., 2022).

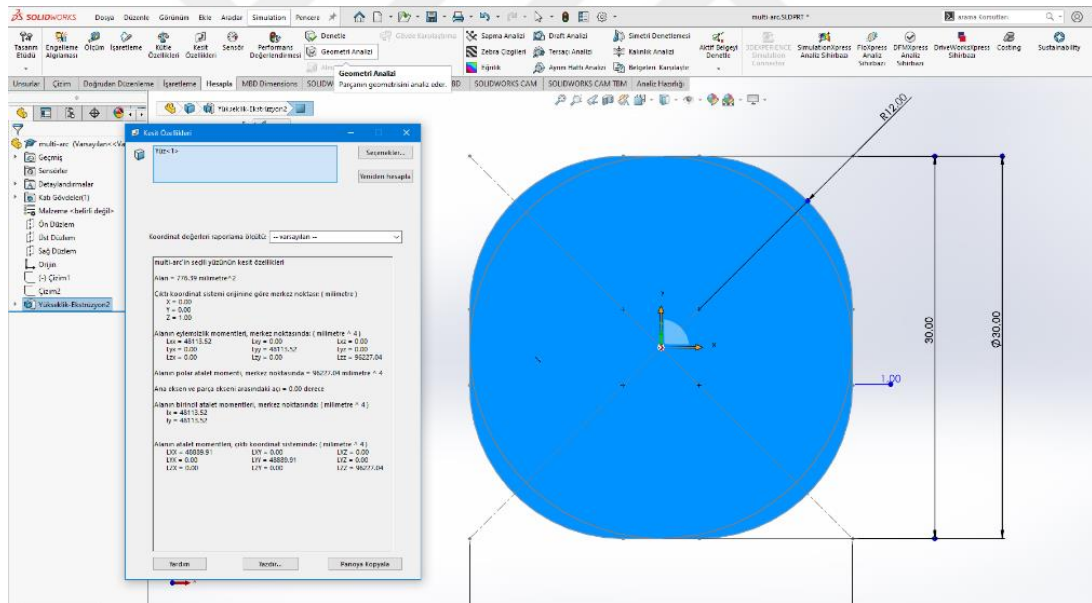
$$S \cong \begin{cases} \frac{\pi d^2}{4} + nb_1 h, & \text{Dikdörtgen} \\ \frac{\pi d^2}{4} + nb_1 h, & \text{Yamuk} \\ n \left[\frac{\pi}{180^\circ} \alpha R^2 + \frac{\pi}{180^\circ} \beta R^2 - \left(R - \frac{d}{2} \right) \left(\frac{D}{2} - r \right) \sin \frac{180^\circ}{n} \right], & \text{Çok Kavisli} \\ \pi r^2 + \pi \left(\frac{d^2}{5} - r^2 \right) \tan \frac{180^\circ}{n}, & \text{Çok Yanlı} \end{cases} \quad (4.1)$$

Tasarım programı yardımıyla dört farklı namlu için kesit alanları belirlenmiştir. Şekil 4.2 de Dikdörtgen Yiv-Set kesit alanı verilmiştir. Şekil 4.3 de Yamuk Yiv-set kesit alanı verilmiştir. Şekil 4.4 Çok Kavisli yiv-set kesit alanı verilmiştir. Şekil 4.5'te Çok yanlı Yiv-set kesit alanı verilmiştir.





Şekil 4.4: Çok kavslı Yiv-set kesit alanı 743,56mm²



Şekil 4.5: Çok Yanlı yiv-set kesit alanı: 776,39mm²

Her üç boyutlu namlu modelinde yivli kısım, atım yatağı, namlu ağız baskısı gibi farklı özellikler yer almaktadır. Her bir özellik için çeşitli modeller dikkate alınmıştır. Örneğin yiv-set bölümü için dikdörtgen, yamuk, çok kavslı ve çok yanlı profiller incelemeye alınmıştır. Geleneksel parametrik modelleme yöntemleri, yüksek hesaplama maliyetlerini ve çok sayıda şablonun depolanmasını ve yönetimini içermektedir. Çok sayıda şablonun modellenmesini ve yönetimini basitleştirmek için

birden fazla yapı türü tek bir modelde birleştirilmiştir. Model boyut parametreleri arasındaki fonksiyon ilişkisi ve kısıtlama ilişkisi analiz edilmiştir. Bir namlunun temel boyut parametrelerini (örneğin namlu uzunluğu, yiv set boyutu ve dış namlu çapı) tanımlamak için şablon kullanılacak olup tüm ilgili fonksiyonel ilişkiler kurulmuştur. Namluların çeşitli yapılara (yiv set, atım yatağı, namlu ağzı ve dış hat) sahip özelliklerin fiziksel modellerini oluşturmak için kullanılmıştır.

Farklı silah profillerine sahip namluların oda basıncının hesaplanmasına yönelik model oluşturulmuştur. Barutun yanması sırasında oluşan büyük miktardaki gaz, son derece karmaşık bir işlemle mermiyi namlu haznesinden dışarı iter. Yer değiştirme ve zamanla birlikte atım yatağı basıncı ve mermi hızındaki değişim, barutun yanması kuralı, ateşleme sırasında enerji dönüşümü kuralı ve mermi hareketi modeli analiz edilerek ve bu kısıtlamaları yansıtacak bir denklem sistemi oluşturularak belirlenmiştir. Yivli namlunun kesit profili de bu süreci etkileyebilir. Farklı yiv profillerine sahip namlularda ateşleme sırasında fişek yatağı basıncının değişim modeli, denklem 4.2 gösterildiği gibi bu namlular için iç balistik hesaplama modelleri oluşturularak belirlenmiştir. Simgeler Çizelge 4.1 de açıklanmıştır.

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi = \begin{cases} \chi Z(1 + \lambda Z + \mu Z^2), \\ \chi_s \frac{Z}{Z_k} \left(1 + \lambda_s \frac{Z}{Z_k} \right), \\ 1, \end{cases} \\ \frac{dZ}{dt} = \frac{u_1 p^n}{e_1}, \\ \varphi m \frac{dv}{dt} = Sp, \\ Sp(l_\psi + l) = f\omega\psi - \frac{\theta}{2}\varphi mv^2, \\ l_\psi = l_0 \left[1 - \frac{\Delta}{\rho}(1 - \psi) - \alpha\Delta\psi \right]. \end{array} \right. \quad (4.2)$$

Çizelge 4.1: Kısaltmalar ve açıklamaları

Simge	Açıklaması
ψ	Yanan barut oranı
χ, λ, χ_s , ve λ_s	Barut şekline özel karakteristik sabitler
Z_k	Yanan barutun için sabit
ω	<i>Barut miktarı</i>
u_1	Barut Yanma katsayısı
s	Barut yanma katsayısı sabiti
n	<i>Basınç indeksi</i>

P	<i>Barut patlama basıncı</i>
e_1	Barut tanecik et kalınlığının yarısı
m	Çekirdek kütlesi
φ	<i>Katsayı sürtünme</i>
S	<i>Namlu kesit alanı</i>
l	<i>Mermi yolu, meafe</i>
l_ψ	<i>Katsayı</i>
f	<i>Barut itme kuvveti</i>
v	<i>Mermi hızı</i>
$\theta = k - 1,$	Sabit
k	Adyabatik katsayı
l_0	Atım yatağının yivli kısma oranı
Δ	<i>Barut yükleme yoğunluğu</i>
ρ	Barut yoğunluğu
α	Barut ortak hacmi

Namlu Isı Transfer Modeli ile ateşleme sırasında ısı, barut yanma gazı ile namlu arasında ve namlu ile ortam havası arasında iletim, konveksiyon ve radyasyon yoluyla aktarılır. Isı, namlunun iç duvarından dış duvarına iletim yoluyla ve namlunun iç ve dış duvarlarından çevredeki ortama konveksiyon ve radyasyon yoluyla aktarılır. Işıma ile ısı transferi, konvektif ısı transferinin 1%'inden azdır ve bu nedenle bu çalışmada ihmal edilmiştir. Matematiksel ısı transfer modeli, ısı iletimi ve ısı taşınımı teorilerine dayanarak oluşturulmuş ve Denklem 4.3'te gösterilmiştir.

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q. \quad (4.3)$$

Yukarıda sunulan denklemde ρ ve $c(T)$ sırasıyla namlu malzemesinin yoğunluğu ve özgül ısı kapasitesidir. T namlu malzemesi sıcaklığını temsil eder, k_x , k_y ve k_z sırasıyla üç koordinat yönündeki termal iletkenliklerdir ve Q ise normal olarak plastik işten dönüştürülen ısı olarak adlandırılan dahili ısı kaynağını belirtmiştir.

Mermi ile iç namlu duvarı arasındaki sürtünme, merminin silahta ateşlenmesi sırasında, merminin silindirik kısmı yiv ile kesişir ve mermi kılıfı yüzeyi plastik deformasyon oluşurken yiv-setlerde sürtünmeye maruz kalır. Denklem 4.4'te gösterildiği gibi, mermi ile namlu deliği arasındaki sürtünmeye yönelik bir model formüle etmek için kesme kayması sürtünme teorisi kullanılmıştır.

$$f = \begin{cases} \mu_d \sigma_n, & \mu_d \sigma_n \leq \tau_s, \\ \tau_s, & \mu_d \sigma_n > \tau_s, \end{cases} \quad (4.4)$$

Burada f , temas arayüzü üzerindeki sürtünmenin neden olduğu kayma gerilimini temsil eder. σ_n ise mermi ile namlunun iç duvarı arasındaki normal pozitif temas gerilimini belirtilmiştir. τ_s malzemenin maksimum kayma gerilimini belirtirken ve μ_d ise mermi ile namlu iç duvarı arasındaki dinamik sürtünme katsayısını belirtmiştir.

Mermi ile namlunun iç duvarı arasındaki kayma gerilimi, Denklem 4.5 gösterildiği gibi aynı zamanda namlunun iç duvarının sıcaklığına da bağlıdır ve a_1 ve b_1 tasarım parametrelerine bağlı verilmiştir.

$$\tau_{\max} = \left\{ a_1 \exp \left[- \left(\frac{T - 500}{b_1} \right)^2 \right] \right\}, \quad (4.5)$$

Zorev sürtünme denklemi için (4.3), (4.4) ve (4.5) denklemleri birleştirilmiş ve Denklem 4.6 elde edilmiştir.

$$\begin{cases} \mu(T) = 2 \times 10^{-11} T^4 - 2.963 \times 10^{-8} T^3 + 1.323 \times 10^{-5} T^2 - 0.002 T + 0.384, \\ \tau_{\max} = a_1 \exp \left[- \left(\frac{T - 500}{b_1} \right)^2 \right], \\ \tau = \min (\mu \sigma_n, \tau_{\max}). \end{cases} \quad (4.6)$$

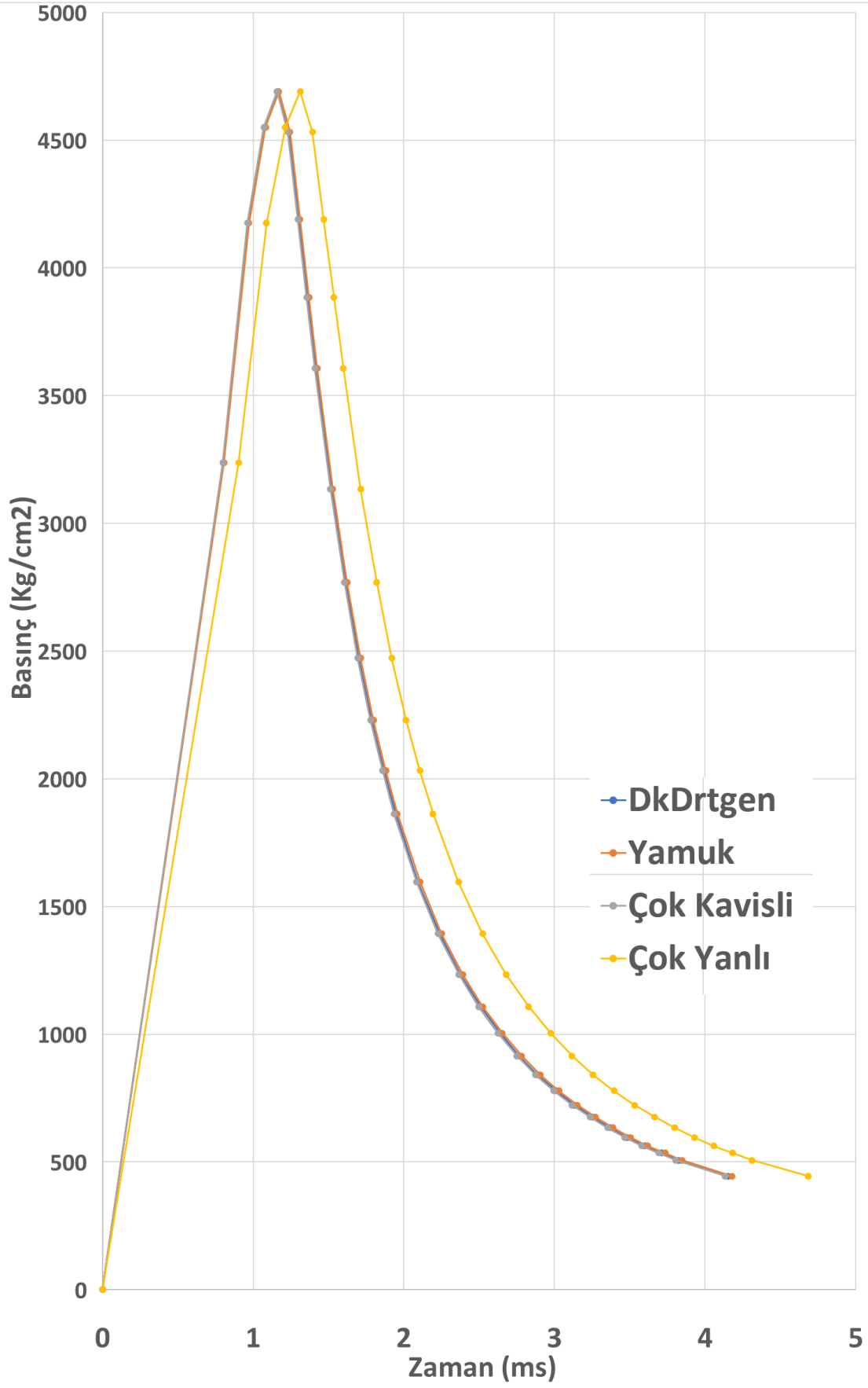
Farklı yiv set profilleri için yapılan çalışmalar için Çizelge 4.2’de farklı namluların karakteristikleri verilmiştir. Çizelgede görülen değerler için Zaman-Basınç grafiği Şekil 4.6 de verilmiştir.

Çizelge 4.2: Farklı yiv-set geometrileri için hesaplanan değerler.

	Dikdörtgen	Yamuk	Çok Kavisli	Çok Yanlı
Yiv Adedi	4	4	4	4
Yiv Genişliği	12	8	19	17
Yiv Derinliği	0,6	0,6	0,6	1,2

Helis Açısı	7	7	7	7
Dogrusal Hız	1095,42	1087,58	1107	1124,63
Açısal Hız	8966,72	8902,58	9063,35	9205,81
Basınç ort	1362,48	1343,05	1392	1436,11
gaz basıncı max olması için geçen süre	1,71	1,77	1,76	1,76
Gaz Basıncının Max Değere Ulaştığı Andaki Mermi Hızı	385,58	382,83	389,74	395,87
namlu çıkışındaki gaz basıncı	460,51	453,95	470,49	485,4
namludan çıkış süresi	4,15	4,18	4,10	4,04

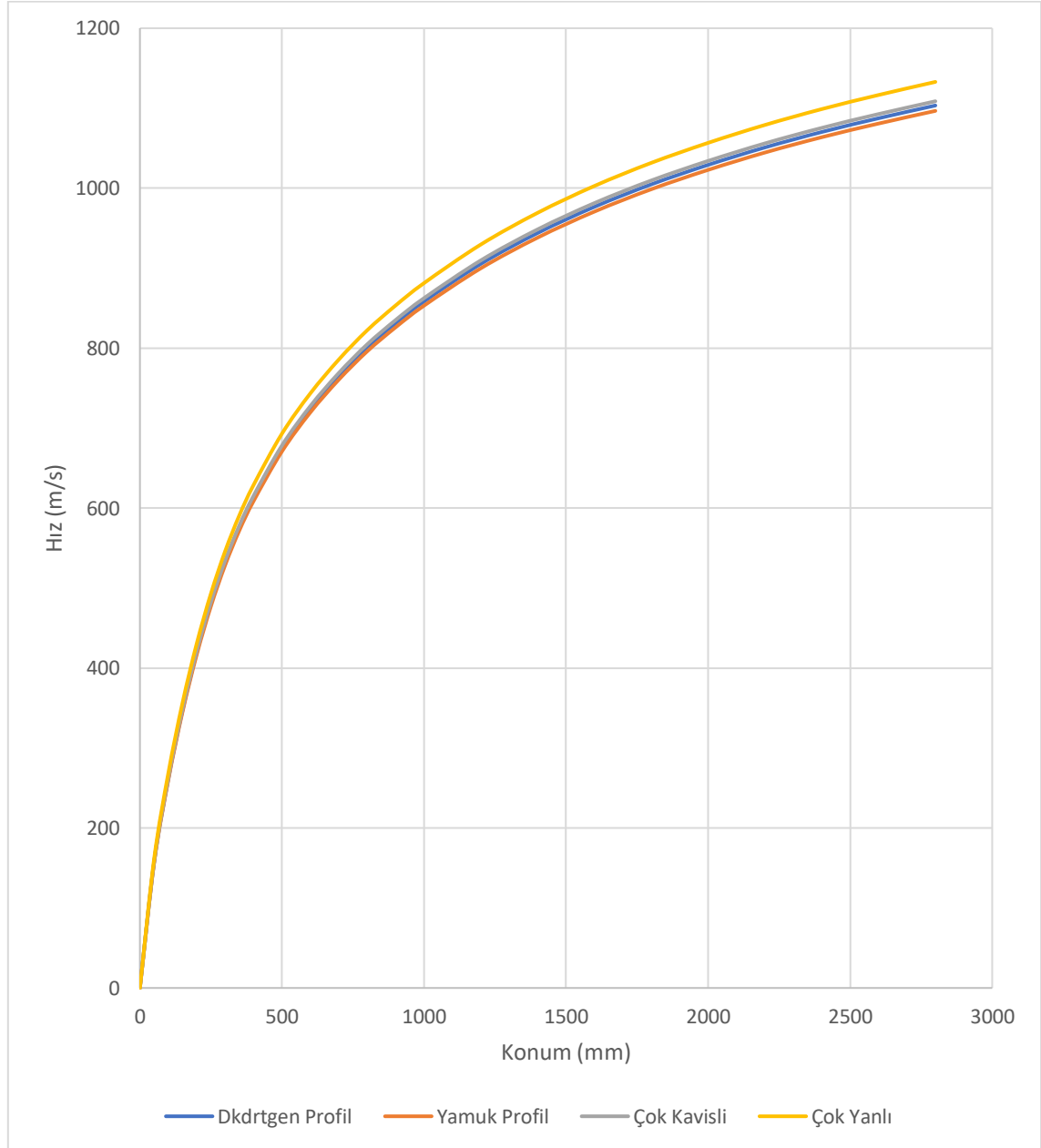




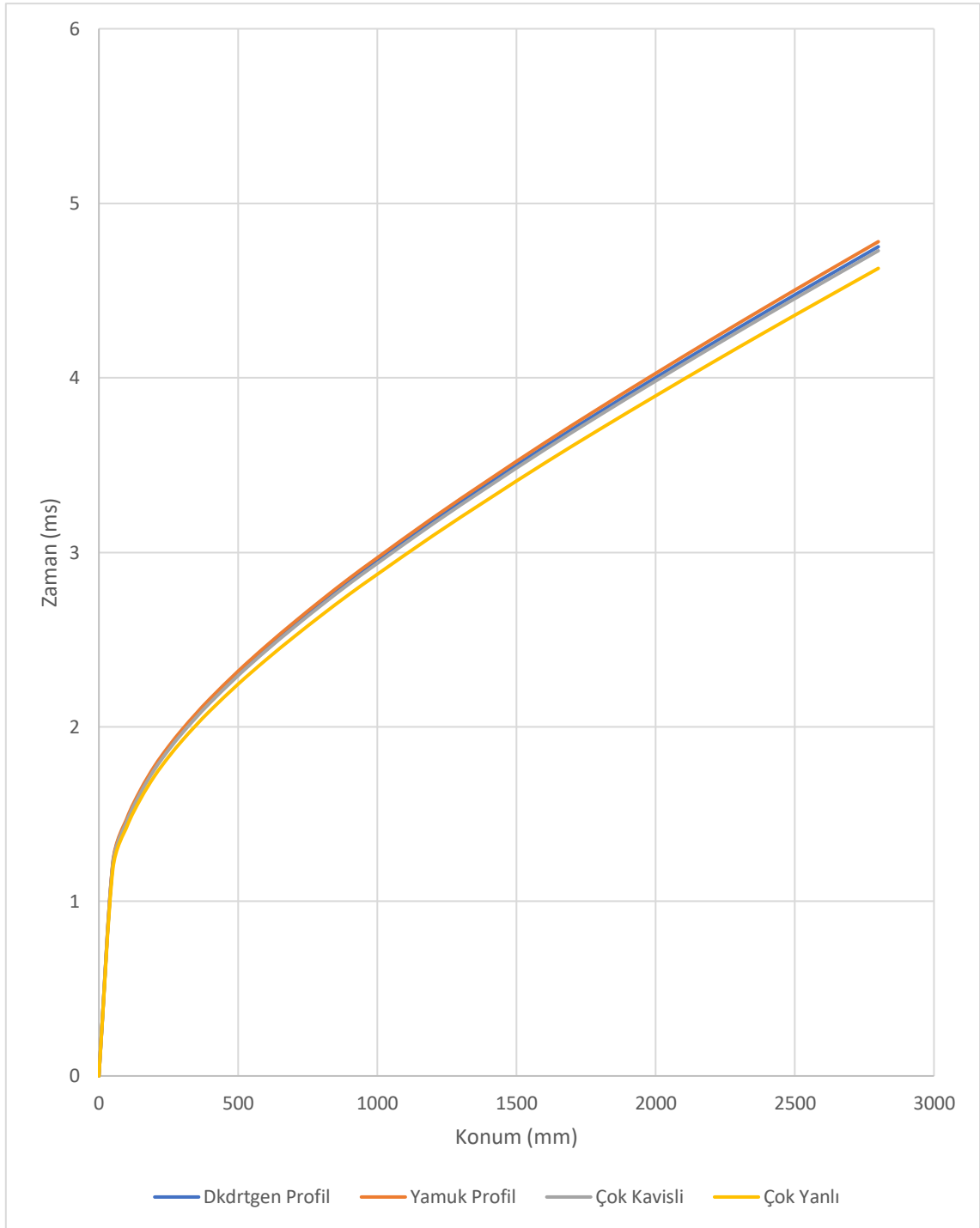
Şekil 4.6: Farklı yiv-set profilinde namlularda Zaman – Basınç grafiği

Basınç zaman grafiğinde çok yanlı yiv-set ile basınç değeri maksimuma ulaşması için geçen sürenin daha uzun olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda setlere gelen basıncın yıprandırıcı etkisinin daha az olması beklenmektedir. Setlerin daha az yıpranması namlu ömrü açısından istenilen bir durumdur.

Çalışmalarda elde edilen değerler yardımıyla Şekil 4.7’de görülen Konum-Hız grafiği verilmiştir. Konum – Zaman grafiği de Şekil 4.8 de verilmiştir.



Şekil 4.7: Farklı profilli namlularda konum – hız grafiği



Şekil 4.8: Farklı profilli namlularda konum – zaman grafiği

Farklı profilde oluşturulan yiv-setler ile hesaplanan değerler sonucunda çok kavisli veya çok yanlı profillerde açısal hız ve namlu ilk çıkış hızı değerleri bakımında oldukça verimli olduğu belirlenmiştir. Dikdörtgen profilde basınç değerinin çok daha kısa sürede maksimum değere ulaştığı gözlemlenmiştir.

Denklemler ile elde edilen değerler grafiklerde de görüldüğü üzere, Çok Yanlı profile sahip namlular kısa sürede yüksek hıza ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca namlu

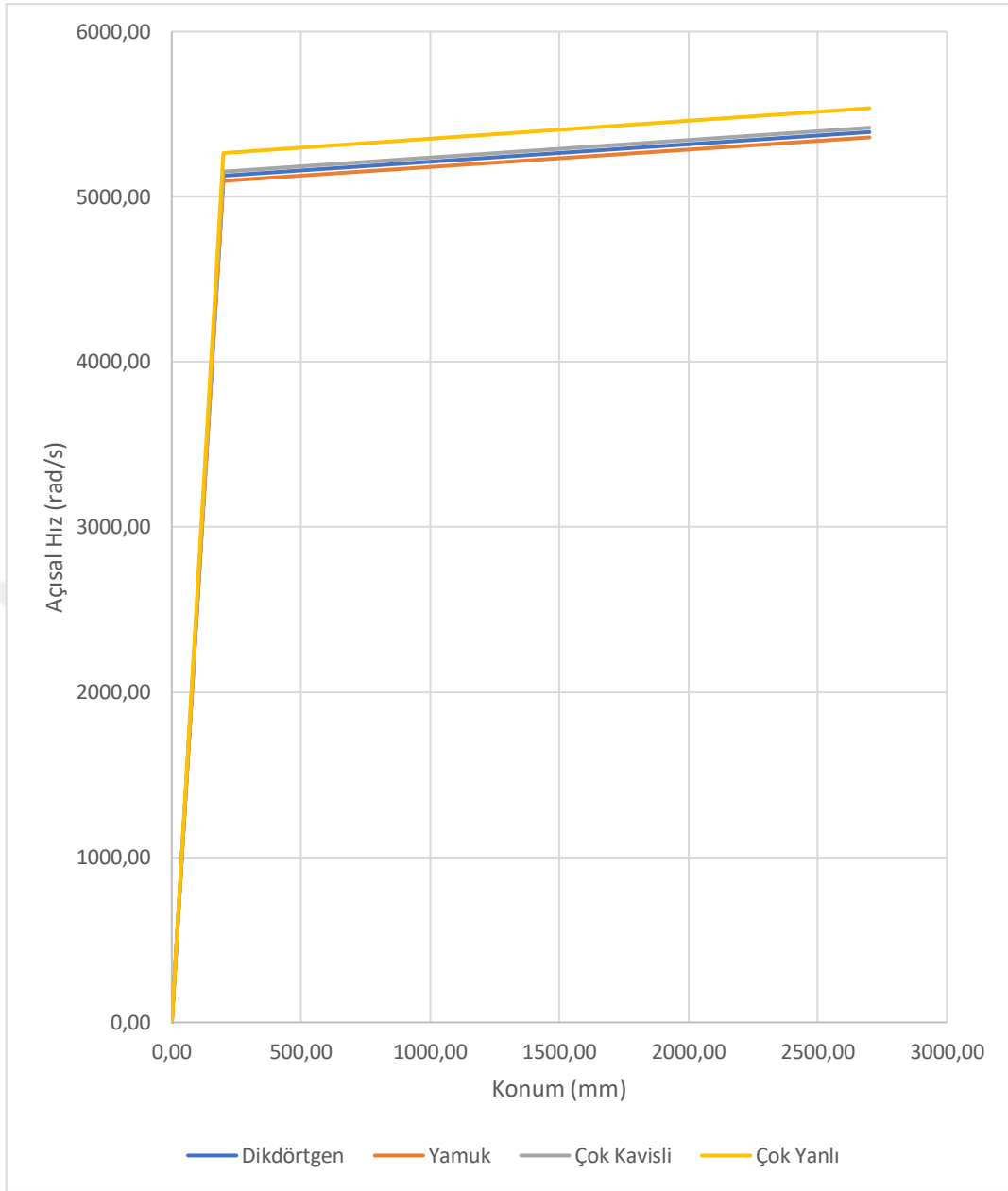
çıkışı esnasında merminin kazandığı açısal hız değeri de diğer namlulara göre oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Farklı profiller için elde edilen anlık açısal hız değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3: Farklı profiller için konum- açısal hız değerleri

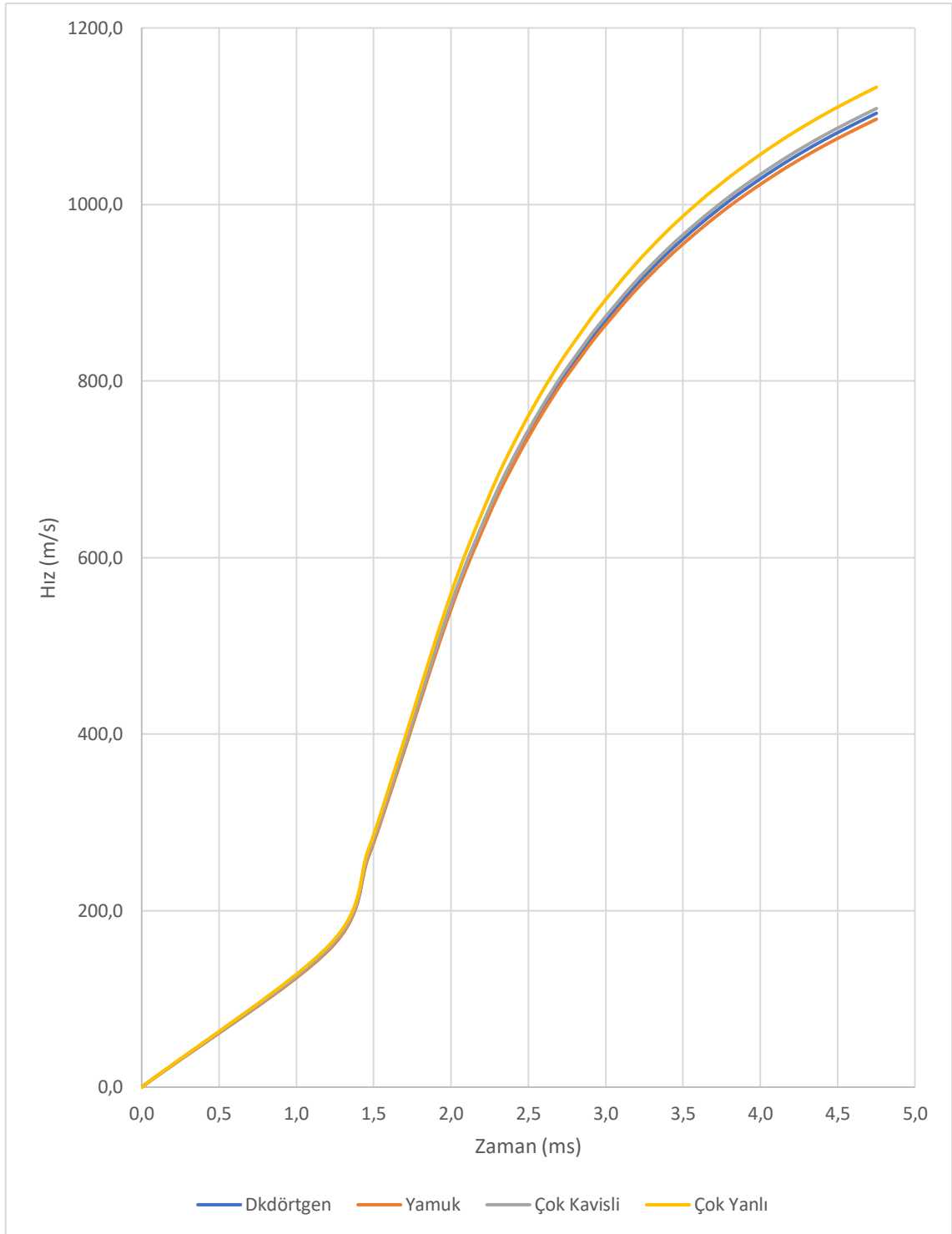
Dikdörtgen	Yamuk	Çok Kavisli	Çok Yanlı
0,00	0,00	0,00	0,00
5127,58	5096,40	5152,25	5264,79
5127,61	5096,42	5152,30	5264,81
5132,90	5101,68	5157,61	5270,24
5138,19	5106,94	5162,93	5275,68
5143,47	5112,20	5168,24	5281,11
5148,76	5117,45	5173,56	5286,54
5159,34	5127,97	5184,19	5297,40
5169,92	5138,48	5194,82	5308,27
5180,51	5149,00	5205,45	5319,13
5191,08	5159,51	5216,08	5329,99
5201,66	5170,00	5226,71	5340,85
5212,24	5180,54	5237,34	5351,71
5233,40	5201,57	5258,60	5373,44
5254,56	5222,60	5279,86	5395,16
5275,71	5243,63	5301,12	5416,89
5296,87	5264,66	5322,38	5438,61
5318,03	5285,69	5343,65	5460,33
5339,19	5306,72	5364,90	5482,06
5360,35	5327,75	5386,16	5503,78
5381,51	5348,78	5407,42	5525,51
5392,00	5359,29	5418,05	5536,37

Belirlenen değerler için konum – açısal hız grafiği Şekil 4.9 verilmiştir.



Şekil 4.9: Farklı profiller için Konum – Açısal Hız grafiği

Açısal hızın jiroskopik etkiye doğrudan katkı sağladığına değinilmiştir. Konum - açısal hız grafiğinde görüldüğü üzere en yüksek açısal hıza sahip olan namlu Çok Yanlı yiv-setli namlu olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.10 da farklı profiller için hız – zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 4.10: Farklı yiv-set profilili namlular için hız-zaman grafiği

Hız-zaman grafiğinde farklı yiv-set yapıları namlularda merminin namlu içindeki hız değişimleri görülmüştür. Çok yanlı yiv-setli namluda istenilen hız değerine diğer namlulara göre daha hızlı ulaşıldığı belirlenmiştir.

Uzun ömürlü doğrusal ve açısal hız değerleri optimum olan namlu olarak Çok Yanlı yiv-setli namlu olduğu değerlendirilmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Orta kalibre silah namlularında yiv-set karakteristiklerinin mermi çekirdeğinin doğrusal ve açısal hızına olan etkileri 30mm namluda değerlendirilmiştir. Çalışmamızda farklı ölçülerde yiv-set ölçülerinin mermi hızlarına etkileri yorumlanmıştır. Ayrıca dört farklı yiv-set profili geliştirilmiştir. Farklı profillerdeki namlularda sürekli ateşleme sırasında mermilerin üzerine yiv profillerinin etkileri Vallier-Heydenreich metodu ile belirlenmiştir.

5.1 Sonuçlar

Kullanılacak olan mühimmat çalışmamızın yönlendiren ilk unsur olmuştur. Mühimmatın basınç değeri, çekirdek ağırlığı, barut miktarı gibi girdileri başlangıç değeri olarak alınmıştır. Bu değerler doğrultusunda orta kalibre namlu tasarlanmıştır. Tasarlanan namluda sabit helis açısı ve progresif helis açısı değerleri kullanılmıştır. Progresif helis açısına sahip namlular da farklı adetlerde yiv-setler oluşturulmuştur. Oluşturulan yiv-set adetleri ve ölçüleri mühimmatın ilk ateşlenmesi esnasında oluşacak basınç değerlerini karşılayacak yaklaşımlar göz önünde bulundurularak belirlenmiştir.

Çalışmamızda 12 adet, 16 adet, 20 adet yiv-sete sahip namlular için 3 farklı yiv-set genişlik ve derinlik değerleri belirlenmiştir. Bu girdiler ile optimum namlu karakteristiklerinin belirlenmesi çalışmasında Taguchi L9 metodu kullanılarak çok sayıda değer hesaplanmasının önüne geçilmesi hedeflenmiştir.

Minitab yazılımında eğri uydurma (regression) yöntemi ile optimum parametlerin belirlenmesi için denklemler elde edilmiştir. Çekirdeğin namludan çıkış hızı 1100m/s olması beklenmektedir ve bunun için elde edilen denklem yardımıyla optimum değer Çizelge 5.1.1'deki değerler olduğu belirlenmiştir.

Yiv Adedi	Yiv derinliği	Yiv genişliği
16	0,6	3,6

Çizelge 5.1.1: Optimum namlu yiv-set değerleri

Namlu tasarımı yapılmadan önce belirlenen kalibre ve mühimmat çap değerlerine göre, namlu iç çapı çevresine oluşturulacak yiv ve set değerleri arasında $\frac{1}{2}$ oranına bağlı kalacak şekilde optimum ölçülerin belirlenmesi gerekmektedir. 20 adet yiv-set içeren namluda maksimum yiv genişliğinin 4mm olabileceği belirlenmiştir. 30mm çaplı bir çemberin çevresi hesaplandığında 20 adet 4mm genişlikteki yiv çevre ölçüsünden çıkartılıp 20 adet set için 20'ye bölündüğünde set genişliği 0,89mm belirlenmiştir. Bu değer altındaki set değerlerinin yüksek basınç altında deforme olacağı öngörülmüştür.

Namlu kesit alanı ortalama basınç ve namludan çıkan çekirdeğin doğrusal hızına etkili olduğu belirlenmiştir. Namlu kesit alanı yiv-set değerleri ile değişmektedir. Kesit alanında yapılan 4% oranında bir artış mermi çıkış hızında 1,8% oranında artış oluşturmaktadır.

Hız değerinin 1100m/s olabilmesi için 2700mm boyundaki namlunun kesit alanının $7,41cm^2$ olması beklenmektedir. Bu kesit alanının Taguchi eğri uydurma denklemleriyle belirlenen yiv-set ölçüleri, 3,6mm genişlik ve 0,6mm derinlik değeri, için hesaplandığında elde edildiği gözlemlenmiştir.

Orta kalibre iç balistik parametreleri çalışması literatürde ilk defa yiv-set adetlerinin namlu kesitine olan etkisi ve bu etkinin basınç değişimindeki faktörler sayesinde merminin açısal ve doğrusal hızına etkilerini optimize etme imkânı sağlamıştır.

Birçok çalışmada helis açısının oranları değerlendirilmiştir fakat yiv-set yapısı da balistik anlamda oldukça kritik öneme sahip ve uzun ömürlü namlu tasarımlarının en önemli girdilerinden olduğu bu çalışmada vurgulanmıştır. Seçilen yiv-set açıları namlu atım yatağında 4° ve namlu ağzında 7° olarak belirlenmiştir. Bu değerler için yapılan açısal hız belirleme çalışmalarında maksimum açısal hıza sahip optimum namlu belirlenmiştir. Açısal hıza doğrusal hızında etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Doğrusal hızın 1100m/s olduğu namlu yiv-set değerlerinden helis açıları da belirlendiğinde açısal hız değerinin 5410 rad/s olduğu belirlenmiştir.

Dört farklı yiv-set profili ile oluşturulmuş namlular için, mermi atım yatağı basıncı artmaya devam ettikçe mermi namluya girmeye devam eder ve namlunun iç duvarındaki gerilim artmaya devam eder ve mermi namluya tamamen girdiğinde yivli bölümün girişinde zirveye ulaşır. Daha sonra stres aşağıya doğru düşme eğilim gösterir. Çalışmalarımızda farklı yivli namlulardaki tüm ciddi hasarın yivli bölümün girişine yakın bir yerde meydana geleceği desteklenmiştir.

Mermi ateşlenmesi sırasında namlunun dinamik tepki gerilimi ve bunun sonucunda ortaya çıkan yorulma hasarı göz önüne alındığında, çok kavisli ve çok yanlı

yiv-setli namlulara sahip silahlarda, namlu silahın dinamik stresini azaltmaya ve namlu yorulma ömrünü artırmaya yardımcı olduğu gözlemlenmiştir.

5.2 Öneriler

Orta kalibre namlular yüksek basınca maruz ömürlü yapılardır ve sıklıkla değiştirilmesi gerekmektedir. Optimum balistik değerlerinin belirlendiği orta kalibre top namlusu imalatına yön vermesi beklenen bu çalışmanın devamında, çalışmalarımızda belirlenmiş değerler ile LS-Dyna yazılımında sonlu elemanlar metotları kullanılarak numerik analiz çalışmaları gerçekleştirilebilir. Analiz çalışmalarında elde edilen sonuçlar ile bu çalışmada elde edilmiş olan sonuçlar karşılaştırılması literatüre katlı sağlayacağı öngörülmüştür.

Çalışmalarımızda belirlediğimiz değerler göz önünde bulundurularak farklı balistik değerlerine sahip orta kalibre namlular ile atışlı testler gerçekleştirilebilir. Atışlar esnasında ölçümlenen değerler ve bu çalışmada edinilen sonuçlar karşılaştırılmak suretiyle doğrulama faaliyetleri gerçekleştirilebileceği değerlendirilmiştir.

KAYNAKLAR

- Abdullah Şentürk, Halil Işık, Celal Evci. «Thermo-mechanically coupled thermal and stress analysis of interior ballistics problem.» *International Journal of Thermal Sciences*, 2016: 39-53.
- Annonymous. *accurateshooter.com*. 1 Aralık 2023. <https://bulletin accurateshooter.com/?s=muzzle+velocity&submit=Search> (erişildi: Aralık 15, 2023).
- Anonymous. *Close Focus Research*. 13 Şubat 2012. <http://closefocusresearch.com/calculating-barrel-pressure-and-projectile-velocity-gun-systems> (erişildi: Ocak 4, 2024).
- . *nammo.com*. 2023. <https://www.nammo.com/product/our-products/ammunition/medium-caliber-ammunition/30-mm-series/30-mm-x-173-tp-t/> (erişildi: Kasım 1, 2023).
- . *steelnavigator.ovako.com*. 02 Ocak 2024. <https://steelnavigator.ovako.com/steel-grades/32crmov12-10/> (erişildi: Ocak 02, 2024).
- Babu, Ramesh G, ve Damodara A. Reddy. «Use Of L27 Orthogonal Array With Grey Taguchi Technique To Optimize MRR And SR In EDM Machining For Al -6082, Al -6061, Al -2014 And Mild Steel.» *Int. Journal of Engineering Research and Application*, November 2017.
- Canıyılmaz, Erdal, ve Fevzi Kutay. «Taguchi Metodunda Varyans Analizine Alternatif Bir Yaklaşım.» *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2003: 51-63.
- Cronemberger, P. O., E. P. Lima Junior, J. A. M. Gois, ve A. B. Caldeira. «Theoretical and Experimental Study of The Interior Ballistics of a Rifle 7.62 .» *Instituto Militar de Engenharia*, Aralık 2014.
- Çep, Hasan, Halim Kovacı, Hüseyin Çimenoglu, ve Ayhan Çelik. *Improving ballistic performance of DIN 32CrMoV12-10 steel with different surface treatment*. İstanbul Technical University, tarih yok.
- Degirmenci, Ercan. «Semi-empirical prediction of internal pressure distribution and muzzle velocity in the rifled barrel of a light weapon.» *Measurement*, 2015: 123-128.
- Değirmenci, Ercan, Celal Evci, Halil Işık, Mehmet Macar, Nadir Yılmaz, ve Hüsnü M. Dirikolu. «Thermo-mechanical analysis of double base propellant combustion in a barrel.» *Applied Thermal Engineering*, 2016: 1287 - 1299.
- Deng, S., H. K. Sun, ve Chung-Jung Chiu. «Rifles in-bore finite element transient analysis.» *International Conference on Mechanical, Production and Materials Engineering*. Bangkok, 2012.
- Dixit, Vishvesh, Ishbir Singh, ve Vijender Rajora. «Design and analysis of a gun barrel chamber.» *3rd National Conference on Advancements in Simulation & Experimental Techniques in Mechanical Engineering*. tarih yok.
- Düzenli, Dilara, ve Süleyman Neşeli. «Mermi namlu çıkış hızı ve enerjisini etkileyen parametrelerin optimizasyonu.» *Selçuk-Teknik Dergisi*, 2020.
- Işık, Halil. «Namlu içerisindeki balistik parametrelerin modellenmesi.» *Savunma Bilimleri Dergisi*, Kasım 2016: 157-177.
- Işık, Halil, ve Fatih Göktaş. «Cook-off analysis of a propellant in a 7.62 mm barrel by experimental and numerical methods.» *Applied Thermal Engineering*, 2017: 484-496.
- Jedlicka, Ludek, ve Stanislav Beer. «Pressure Distribution in The Space Behind a Projectile.» tarih yok.

- Karşlı, Mahmutcan, Uğur Kemiklioğlu, ve Samet Yavuz. «Tabanca namlu malzemesi 32CrMoV12-10 alaşımına uygulanan gaz nitrasyon ve su verme işlemlerinin darbe dayanımına etkilerinin incelenmesi.» *GÜFBED*, 2021.
- Mahmutcan Karşlı, Uğur Kemiklioğlu, Samet Yavuz. «Tabanca namlu malzemesi 32CrMoV12-10 alaşımına uygulanan gaz nitrasyon ve su verme işlemlerinin darbe dayanımına etkilerinin incelenmesi.» *GÜFBED/GUSTIJ (2021) 11 (4)*, 2021: 1198 - 1207.
- Öner, Özyılmaz. «HAFİF SİLAH TASARIMININ BALİSTİK AÇIDAN İNCELENMESİ.» *Kocaeli Üniversitesi*. 2010.
- Özgüder, Onur, Mahmut Özbay, ve Hamit Adin. «Namlu içi balistik davranışın sonlu elemanlar yöntemiyle analizi.» *Mühendislik Dergisi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, Temmuz 2017: 609-620.
- Öztürk, Ali Rıza. *İç Balistik*. Ankara: T.C. SANAYİ VE TİCARET BAKANLIĞI MAKİNA VE KİMYA ENDÜSTRİSİ KURUMU GENEL MÜDÜRLÜĞÜ ÖZEL YAYINLARI, 1984.
- . *İç Balistik*. Ankara: T.C. Sanayi ve Ticaret Bakanlığı Makina ve Kimya Endüstrisi Kurumu Genel Müdürlüğü Özel Yayınları, 1984.
- P.O.Cronemberger, E.P. Lima Junior, J.A.M. Gois, A.B. Caldeira. «Theoretical and Experimental Study of the Interior Ballistics of A Rifle 7.62.» *Therman Engineering*, 2014: 20-27.
- Pihtili, Haşim, ve Ramazan Yildirim. «Investigation of the Effect of Various Types and Features of Grooved Barrels on the Range of Firearms.» *Defence Science Journal*, Ocak 2023: 11-19.
- S. Deng, H.K. Sun, Chung-Jung Chiu, Kuei-Chi Chen. «Transient finite element for in-bore analysis of 9mm pistols.» *Applied Mathematical Modelling* 38, 2014.
- Sun, Jia, Guangsong Chen, Linfang Qian, ve Taisu Liu. «Analysis of Gun Barrel Rifling Twist.» School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 2014.
- Sung, Jianfeng, Yonggiang Yang, ve Di Wang. «Parametric optimization of selective laser melting for forming Ti6Al4V samples by Taguchi method.» *Optic & Laser Technology*, 2013: 118 - 124.
- Susantez, Çiğdem. «Vallier-Heydenreich Metodu ile Silahların Namlu İç Balistiğinin İncelenmesi.» *Savunma Bilimleri Dergisi*, Mayıs 2020.
- Sürmeli, Dilara, ve Süleyman Neşeli. «Mermi Namlu Çıkış Hızı ve Enerjisini Etkileyen Parametrelerin Optimizasyonu.» *Selçuk-Teknik Dergisi*, 2020.
- Şahin, Çağrı, ve Ahmet Özdemir. «Namlularda Değişken Yiv-Set Eğrisinin Kararlılık Faktörü ve Set Torkuna Etkisi.» *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 2021: 1-13.
- Şentürk, Abdullah, Halil Işık, ve Celal Evci. «Thermo-mechanically coupled thermal and stress analysis of interior ballistics proble.» *International Journal of Thermal Sciences*, 2016: 39-53.
- Uluç, Özülker. «Savunma sanayinde kısıtlamalar ve ambargolar çerçevesinde yerlileşme ve millileşme.» Düzenleyen: STM ThinkTech. 2021. 5-14.
- Uzun, İbrahim, Serhat Sözeri, Selen Salihoğulları, Dilek Durak, ve Zühtü Onur Pehlivanlı. «Aluminyum Al 7075-T6 için Balistik Davranışın Sayısal Analizi.» *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, Aralık 2022.
- Wei, Zhifang, Yangyang Cheng, Zhiwei Wang, ve Yanpeng Lin. «Simulation Study on the Impact Response of Barrels with Different Rifling Profiles during Bullet Engraving.» *Modelling and Simulation in Engineering*, 2022.

EKLER