KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAFİF SİLAH TASARIMININ BALİSTİK AÇIDAN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Öner ÖZYILMAZ

Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Cenk Çelik

KOCAELİ, 2010

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAFİF SİLAH TASARIMININ BALİSTİK AÇIDAN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Öner ÖZYILMAZ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 29 ARALIK 2009

Tezin Savunulduğu Tarih: 25 OCAK 2010

Tez Danışmanı
Yrd.Doç.Dr. Cenk ÇELİK

(.....)

Üye
Prof.Dr. H.İbrahim SARAÇ

(.....)

Üye
Prof.Dr. Hasan Rıza GÜVEN

(.....)

KOCAELİ, 2010

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Yerli savunma sanayinin gelişimi için atılacak her adım, dışa bağımlılığı azaltacağından, önem arz eder. Savunma sanayi için bugün bir katkım oluyor ise, beni bu yola taşıyan kişi Sayın emekli Albay Hasan Dağlı ‘dır.

2000–2004 arasında Türkiye Cumhuriyeti ordusu için ürettiğimiz plastik şarjör projesi sonrasında, 2008 yılında tekrar bu sektöre dönmeme vesile olmuştur. Bu tezi hazırlamamda, orta- uzun vadede ülke savunmasına yararı olacak birçok projenin fikir babası olan Sayın Hasan Dağlıya ve bize düşündüklerimizi yapabilmemiz için her imkânı sağlayan şirketimiz Sarsılmaz Silah Sanayi A.Ş.’ne ve her zaman yanımda olduğunu bildiğim değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Cenk Çelik’e ve desteği için çalışma arkadaşım Ali Eren’ e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tüm bu süreçte bana destek olan değerli eşim Ayşegül ve oğlum Yavuz’a teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER LİSTESİ v
TABLOLAR DİZİNİ vii
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR viii
ÖZET x
ABSTRACT xi
1. GİRİŞ 1
2. HAFİF SİLAHLAR 2
2.1. Tanım 2
2.2. Sınıflandırma 2
2.3. Beklenen Vasıflar 2
2.4. Tasarım Problemi 3
2.5. Mühimmat 3
2.5.1. Fişek kovanı 3
2.5.2. Tutuşturma sistemi (Kapsül) 4
2.5.3. Mermi 5
2.5.4. Sevk barutu 8
2.6. Namlu 8
2.6.1. Kama boşluğu 9
2.6.2. Atım yatağı 9
2.6.3. Zorlama konisi 10
2.6.4. Yiv-set 10
2.7. Hafif Silahlarda Operasyon Biçimleri 11
2.7.1. Çalışma çevrimi 12
2.7.2. Basınç zaman ilişkisi 12
2.7.3. Ani geri tepmeli operasyon 14
2.7.3.1. Basit ani geri tepme 15
2.7.3.2. Erken kapsül ateşlemeli ani geri tepme 15
2.7.3.3. Gecikmeli ani geri tepme 16
2.7.3.4. Mekanizması kilitli ani geri tepme 17
2.7.3.5. Ani geri tepmeli sistem uygulamaları 18
2.7.4. Geri tepmeli operasyon 18
2.7.4.1. Uzun kurslu geri tepme 19
2.7.4.2. Kısa kurslu geri tepme 20
2.7.5. Gazlı operasyon 22
2.7.5.1. Uzun kurslu piston 23
2.7.5.2. Kısa kurslu piston 23
2.7.5.3. Direkt gaz doldurma 24
3. SİLAH TASARIMININ TERMODİNAMİK AÇIDAN İNCELENMESİ 25
3.1. Sevk Barutunun Yanmasının Termodinamiği 25
3.1.1. Dumansız barut çeşitleri ve kimyasal kompozisyonları 26
3.1.1.1. Tek bazlı dumansız barut 26
3.1.1.2. Çift bazlı ve üç bazlı dumansız barutlar 27

3.1.2. Sevk barutunun enerjisi 27
3.1.3. Yanma hızı, Piobert ve Vieille kanunları 28
3.1.4. Sevk barutunun hareketliliği 29
3.1.5. Form faktörü 29
3.1.6. Yanma denklemi 31
3.1.7. Noble - Abel durum denklemi 32
3.2. İç Balistik Termodinamiği 34
3.2.1. İç balistikte basınç mermi hızı ilişkisi 36
3.2.2. Piezometrik verim 38
3.2.3. Balistik verim 39
3.2.4. Sevk barutunun mermi kütlesine oranı ile verim ilişkisi 40
3.3. İç Balistikte Enerji Kayıpları ve Enerji Dengesi 42
3.3.1. Yanma gazlarının ataleti 42
3.3.2. Isı transferi 43
3.3.3. Sürtünme kaynaklı enerji kaybı 46
3.3.4. Geri tepme enerjisi 48
3.3.5. Rotasyonel kinetik enerji 49
3.3.6. Enerji dengesi 50
4. BALİSTİK TEST VE ENSTRÜMENTASYON 52
4.1. Balistikte Yüksek Hızlı Görüntüleme 52
4.1.1. Mikro flaş fotoğraflama 53
4.1.2. Kıvılcım fotoğraflama 54
4.1.3. Schlieren görüntüleme 55
4.1.4 Yüksek hızlı sinema fotoğraflama 56
4.1.4.1. Düşük hızlı sinema 56
4.1.4.2. Orta hızlı sinema 56
4.1.4.3. Yüksek hızlı sinema 57
4.1.5. Resim dönüştürücü kamera 58
4.1.6. Flaş radyografi 59
4.2. Dış Balistik Ölçümleri 60
4.2.1. Foto - detektör sayaç - kronometre 60
4.2.2. Radyo doppler (Doppler radarı) 61
4.2.3. Sapma sondası 63
4.2.4. Elektronik hedef (Vuruş noktası belirleyici) 64
4.3. İç Balistik Ölçümleri 66
4.3.1. Gaz basıncının ölçümü 66
4.3.2. Merminin namlu içi hareketinin ölçümü 67
4.3.2.1. Mikrodalga girişimölçer 67
4.3.2.2. Lazer interferometri 68
4.3.2.3. Direkt optik metot 69
4.3.2.4. Namlu üzerine strain-gauge metodu 69
4.3.2.5. Namlu kontakları metodu 70
4.3.3. Mermi ivmelenmesi 70
4.3.4. Merminin namlu içindeki spini 70
4.3.5. Termal ölçümler 70
5. DENEYSEL ÇALIŞMA 71
5.1. NATO EPVAT Testi 71
5.2. Deneylerde Kullanılan Cihazlar 71
5.2.1. Test namluları 71

5.2.2. Üniversal mekanizma sistemi 72
5.2.3. Balistik test masası 72
5.2.4. Balistik analiz ünitesi 73
5.2.5. İlk hız ölçüm sistemi 73
5.2.6. Elektronik hedef 74
5.2.7. Piezo-elektrik basınç sensörü 74
5.2.8. Kroşe basınçölçer 75
5.2.9. Piezo-elektrik ivmeölçer 75
5.2.10. Flaş dedektörü 76
5.2.11. Programlanabilir tetikleme ünitesi 76
5.2.12. Yüksek hızlı kamera 77
5.3. Deneyin Yapılışı 77
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 83
KAYNAKLAR 85
ÖZGEÇMİŞ 87

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Hafif silah fişeklerinin tipik yapısı 4
Şekil 2.2: Hafif silah fişeklerinde tutuşturma sistemlerini tipik yapısı 4
Şekil 2.3: 7,62mm NATO normal ve izli mermileri 5
Şekil 2.4: 5,56mm SS109 ve 5,45mm AK-74 mermileri 6
Şekil 2.5: Zırh delici mermi örnekleri 6
Şekil 2.6: Av tüfeği fişeğinin iç yapısı 7
Şekil 2.7: Bir namlunun basit gösterimi 8
Şekil 2.8: Atım yatağının yapısı 10
Şekil 2.9: Yiv-set profil şekilleri 10
Şekil 2.10: Basınç - zaman eğrisi 13
Şekil 2.11: Ani geri tepmeli operasyonun şematiği 14
Şekil 2.12: Gecikmeli ani geri tepmeli operasyonun şematiği 16
Şekil 2.13: Geri tepmeli operasyonun şematiği 19
Şekil 2.14: Yarı-otomatik bir tabancada kısa kurslu geri tepme 21
Şekil 2.15: Gazlı operasyonun şematiği 22
Şekil 2.16: Kısa kurslu piston sisteminin şematiği 23
Şekil 2.17: Direkt gaz doldurma sisteminin şematiği 24
Şekil 3.1: Sabit kontrol hacimli yanma odası 25
Şekil 3.2: Nitroselülozun elde edilişi 26
Şekil 3.3: Silindirik bir barut granülün katmanlar halinde yanması 28
Şekil 3.4: Lineer yanma hızının şematik ifadesi 29
Şekil 3.5: Yaygın kullanılan barut granül geometrileri 30
Şekil 3.6: Çoklu-tüp bir barut granülünün yanması 30
Şekil 3.7: Atış sırasında yanma gazlarının basıncı ve mermi hızının zaman ile değişimleri 35
Şekil 3.8: Atış sırasında yanma gazlarının basıncı ve mermi hızının, merminin namlu içindeki konumu ile değişimleri 35
Şekil 3.9: Üst üste çizdirilmiş yanma gazları basınç - zaman ve mermi hız – zaman diyagramları 37
Şekil 3.10 Üst üste çizdirilmiş, yanma gazlarının basınç – mermi yolu ve merminin hız – mermi yolu diyagramları 38
Şekil 3.11: Piezometrik verimde kullanılan ortalama basınç 39
Şekil 3.12: Sevk barutu kütlesinin mermi kütlesine oranının değişimi ile namlu çıkış hızı ilişkisi 41
Şekil 3.13: Sevk barutu kütlesinin mermi kütlesine oranının değişimi ile balistik verim ilişkisi 41
Şekil 3.14: C_0/m değerinin değişmesiyle kinetik enerji kaybı ve kimyasal enerji kayıplarının değişimi 43
Şekil 3.15: Merminin namlu içerisindeki hareketine göre sürtünme direnç kuvvetinin değişimi 46
Şekil 3.16: İç balistikte enerji kayıplarının büyüklükleri yönünden karşılaştırılması 50
Şekil 4.1: Değişik aydınlatma kaynakları için zaman ölçeği 52
Şekil 4.2: Çoklu kıvılcımla tek bir film karesi üzerine çekilmiş bir fotoğraf 53

Şekil 4.3: 105mm bir merminin mikro flaşla çekilmiş bir fotoğrafı 54
Şekil 4.4: Kıvılcımla fotoğraflama için deney düzeneği 54
Şekil 4.5: Sclieren görüntüleme için deney düzeneği 55
Şekil 4.6: Bir bilyenin Schlieren fotoğrafı 55
Şekil 4.7: Dönen bir optik prizma ile film hareketinin kompanzasyonu 56
Şekil 4.8: Balistik senkron metodunun şematiği 57
Şekil 4.9: Sabit filmli, döner aynalı yüksek hızlı kamera ilkesi 58
Şekil 4.10: Bir resim dönüştürücü kameranın şematiği 58
Şekil 4.11: Resim dönüştürücü ile çekilmiş bir kurşunun sıralı fotoğrafları 59
Şekil 4.12: 45cal. bir tabancanın ateşleme anının X-ışını radyografisi 60
Şekil 4.13: Foto - detektör sayaç - kronometre ekipmanı 61
Şekil 4.14: Radyo dopplerin çalışma ilkesi 62
Şekil 4.15: Sapma sondası ve sağında çalışma ilkesi 63
Şekil 4.16: V şekilli solar hücrenin çalışma ilkesi 64
Şekil 4.17: V hücresi darbe kaydının grafiği 64
Şekil 4.18: Elektronik hedef 65
Şekil 4.19: Elektronik hedeften alınan sonuçların grafik gösterimi 65
Şekil 4.20: Kroşe tipi basınç-ölçer 66
Şekil 4.21: Piezo-elektrik basınç sensörü 67
Şekil 4.22: Lazer interferometri sistemi 68
Şekil 4.23: Direkt optik metot 69
Şekil 5.1: Test namluları 71
Şekil 5.2: Üniversal mekanizma sistemi 72
Şekil 5.3: Balistik test masası 72
Şekil 5.4: Balistik analiz ünitesi 73
Şekil 5.5: İlk hız ölçüm sistemi 73
Şekil 5.6: Elektronik hedef sistemi 74
Şekil 5.7: Piezo-elektrik basıç sensörü 74
Şekil 5.8: Kroşe tipi basınçölçer 75
Şekil 5.9: Piezo-elektrik ivmeölçer 75
Şekil 5.10: Flaş detektörü 76
Şekil 5.11: Programlanabilir tetikleme ünitesi 76
Şekil 5.12: Redlake motionmeter kamera 77
Şekil 5.13: EPVAT test ekipmanı kurulum şeması 78
Şekil 5.14: Namlu içi basıncın zamana göre değişimi 80
Şekil 5.15: Namlu içi basıncın merminin konumuna göre değişimi 80
Şekil 5.16: Merminin konumunun zamana göre değişimi 81
Şekil 5.17: Mermi hızının zamana göre değişimi 81
Şekil 5.18: Mermi hızının mermi konumuna göre değişimi 82

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1: Ani geri tepmeli operasyon biçimlerinin karakteristikleri ve kullanım alanları 18
Tablo 3.1: Bazı silah tiplerinin atım yatağı hacimleri, barut dolgu miktarları ve doldurma yoğunluğu değerleri 33
Tablo 3.2: Yaygın bilinen bazı silah sistemlerinin sevk barutu ve mermi özellikleri ile balistik verimleri 40
Tablo 3.3: Bazı silah sistemlerine ait balistik verim, namlu çıkış hızı, sevk barutu ve mermi kütleleri 40
Tablo 3.4: Örnek silah sistemlerinin mermi ve sevk barutu özellikleri, kinetik enerji kaybı ve kimyasal enerji kaybı oranları 43
Tablo 3.5: Örnek silah sistemlerinin namlu ve sevk barutu özellikleri, ısı transferiyle enerji kaybı miktarı ve kimyasal enerji kaybı oranları 45
Tablo 3.6: Örnek silahların mermi kinetik enerjileri, sevk barutu kimyasal enerjileri ile sürtünmesel enerji ve kayıp oranları 47
Tablo 3.7: Örnek silah sistemlerinin namlu boyu, mermi ilk hızı, sevk barutu kimyasal enerjisi, hava direnç enerjisi ve enerji kaybı oranları 48
Tablo 3.8: Örnek silah tipleri için iç balistik enerji kayıpları, mermiye aktarılan ve yanma gazları içerisinde kalan enerjilerin miktarları 50
Tablo 5.1: Deney sonuçlarına göre her bir test atışının maksimum namlu içi basınç, mermi ilk hızı ve aksiyon zamanı değerleri 79
Tablo 5.2: Basınç, ilk hız ve aksiyon zamanı standart sapmaları, %95 güvenirliğe göre düzeltme ve ortalama değerleri 79

SEMBOLLER

a : yanan barut granülünün ağ uzunluğu (m)
A : namlu kesit alanı (m^2)
b : eş hacim (Kg/m^3)
c : özgül ısı (J/KgK)
C : sevk barutunun kütlesi (Kg)
e : yanan barut tabakası kalınlığı (m)
E : enerji (J)
f : frekans (s^{-1})
F : kuvvet (N)
G : yerçekimi kuvveti (g veya 9,80665 N/Kg)
h : ısı transfer katsayısı (W/m^2K)
I : impuls (Nm/s)
I : atalet momenti (Kgm^2)
m : kütle (Kg)
n : mol miktarı
p : basınç (bar)
r : lineer yanma hızı (m/s)
R : üniversal gaz sabiti (J/molK)
S : yüzey alanı (m^2)
t : zaman (s)
T : sıcaklık (K)
v : hız (m/s)
V : hacim (m^3)
w : yanma hızı katsayısı
W : iş (W)
x : merminin namlu içindeki hareket miktarı (mm)
Z : sevk barutunun yanma oranı

α : gaz molekülleri arasındaki çekim kuvveti katsayısı
β : basınç indeksi
γ : politropik indeks
Δ : barut doldurma yoğunluğu (Kg/m^3)
η : verim
λ : dalga boyu (m)
ξ : sevk barutunun hareketliliği (m^{-1})
ρ : özgül kütle (Kg/m^3)
υ : özgül hacim (m^3/ Kg)
φ : form faktörü
ω : açısal hız (rad/s)

Alt indisler

0	: başlangıç
a	: atmosfer
b	: namlu
c	: atım yatağı
f	: sürtünme
g	: yanma gazları
h	: ısı
hv	: hava
k	: kimyasal
p	: mermi
R	: geri tepme
v	: sabit hacim
w	: rotasyonel

Kısaltmalar

EPVAT	: Estimation of Pressure, Velocity and Action Time
FSK	: Foto-detektör Sayaç Kronometre
ICW	: Individual Combat Weapon
ISSF	: International Shooting Sports Federation
MSW	: Medium Support Weapon
PDW	: Personal Defense Weapon

HAFİF SİLAH TASARIMININ BALİSTİK AÇIDAN İNCELENMESİ

Öner ÖZYILMAZ

Anahtar Kelimeler: Balistik inceleme, hafif silah tasarımı, mühimmat seçimi, namlu tipi.

Özet: Hafif silah tasarımına ait değişkenler doğru tanımlanmalıdır. Bu nedenle merminin patlama anı ile hedefe ulaşması arasında geçen sürede gerçekleşen olayları araştırarak değişkenleri belirlemek, daha etkili bir hafif silah tasarımı yapmak için gereklidir.

Bu tez içerisinde, hafif silah tasarımına etki eden mühimmat tipinin seçimi, namlu tipi, mekanizmalar ve patlama anında gerçekleşen termodinamik etkiler incelenerek, bu değişkenlerin etkinliği deneysel çalışmalar sonucu elde edilen veriler yardımıyla doğrulanmıştır.

Elde edilen sonuçlar, silah tasarımında en önemli değişkenin mühimmat seçimi olduğunu göstermiştir.

BALLISTIC INVESTIGATION OF SMALL ARMS DESIGN

Öner ÖZYILMAZ

Keywords: Ballistic investigation, small arms design, ammunition decision, barrel type.

Abstract: Small arms design variables should be defined correctly. Because of this reason, inspecting things happening from firing a bullet, until it reaches the target, is a requirement for a more effective small arms design.
In this thesis, things that affect small arms design such as barrel type, mechanisms and thermodynamics effects during firing has been inspected and straighten up with the help of the experimental data.
Obtained results showed that the major criterion for small arms design is the decision of the ammunition.

1. GİRİŞ

Ülkemizin savunma sanayi hafif silah ihtiyaçları yurtdışından hazır alım yoluyla veya lisanslı bir üretim anlaşması ile yapılmakta olup, bu durum yurt dışına çok büyük miktarda kaynak aktarımına yol açmaktadır. Ayrıca bu tedarik yöntemleri yerli savunma sanayi açısından hedeflenen özgün silah tasarım ve imalat yeteneğinin kazanılmasını engellemektedir.

Teknoloji ömür döngüsünün, hızlı gelişime paralel olarak azaldığı günümüzde savunma sanayi alanında da silah sistemleri ve teçhizatlardaki değişim ve gelişimin ivmesi artmaktadır. Daha etkin, modüler ve hafif sistemlerin muharebe alanında sağlamış olduğu üstünlüğün göz ardı edilmesi mümkün değildir. Sonuca ulaşmada kesin çözümü sağlamak için kullanılan hafif silahların etkinliği bu alandaki en önemli unsurdur. Her türlü arazi şartında, her iklim koşulunda, gece ve gündüz etkin, hafif ve modüler ilk atımda yüksek isabet yüzdesine sahip yeni silahların tasarlanması ülke savunması için gereklidir.

2. HAFİF SİLAHLAR

2.1. Tanım

Hafif silahların birçok fakat birbirine yakın tanımı vardır. En genel halde, hafif silahlar, kullanıcısı tarafından taşınabilen, görece düz bir yörüngeye atış yapan, birçok tipi omuz destekli, 12,7mm'ye kadar kalibrede, esas kullanım amacı düşmanı mermi veya parçacık atmak suretiyle etkisiz hale getirmek veya baskı altına almak olan silahlardır [1].

Kötü şöhreti silah alsa da sonucu sağlayan mühimmattır. Bir hafif silah yalnızca mühimmatı ateşlemek için vardır. Hafif silahların temel görevi; baskı altına almak, etkisiz hale getirmek suretiyle bir canlı üzerinde kontrolü ele geçirmektir.

2.2. Sınıflandırma

NATO Panel III, 2000 yılında, hafif silah ailesini aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır [2]. Bunlara, keskin nişancı tüfeği ve muharebe av tüfeği maddelerini de eklemek mümkündür.

- Kişisel savunma silahı (Personal Defense Weapon, PDW)
- Bireysel muharebe silahı (An Individual Combat Weapon, ICW)
- Orta büyüklükte destek silahı (A Medium Support Weapon, MSW)

2.3. Beklenen Vasıflar

Bir hafif silahın sağlaması beklenen vasıfları şöyledir:

- Hedef üzerinde kati ve şiddetli etki
- Tüm hava koşullarında, gündüz ve gece, kısa süreli veya yaylım ateşine tutulan hedeflerde yüksek isabet

- En az ateşlenen mermi ile en fazla yıkıcı etki
- Silah hafifliği ve mühimmat hafifliği
- Menzilinin tümü boyunca etkinlik
- Basitlik, dayanıklılık ve kolay bakım

2.4. Tasarım Problemi

Bir hafif silah tasarımına başlanmadan evvel tasarımcının cevaplaması gereken sorular şunlardır:

- Hedef nedir? Boyutları nedir?
- Hedef nasıl korunuyor?
- Hedef üzerinde hangi mesafede nasıl bir etki arzu ediliyor?
- Düşmanı etkisiz hale getirme veya baskı altına alma kriterleri ne olacak?
- Menzil ne olacak?
- Hangi mühimmat kullanılacak?
- Silahın üzerinde hangi emniyet sistemleri yer alacak?
- Kolay kullanım için silah kontrolleri nasıl yerleştirilmeli
- Kolay söküm ve bakım için ana parçalar ne olmalı ve birbirlerine nasıl bağlanmalı?

2.5. Mühimmat

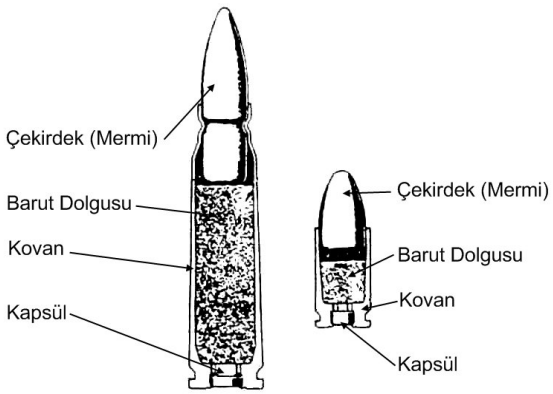
Bir hafif silah mühimmatı (fişek) dört ana parçadan meydana gelir. Bunlar; fişek kovanı, tutuşturma sistemi, sevk barutu (barut dolgusu) ve mermidir (Şekil 2.1).

2.5.1. Fişek kovanı

Fişek kovanı, barut dolgusunu ve tutuşturma sistemini barındırır; mermiyi tutar, atış anında, sevk barutunu namlunun ısısından korur.

Fişek kovanının bir diğer görevi de, mekanizma tarafında sızdırmazlığı sağlamak ve yanma gazlarının kaçmasını engellemektir. Fişek kovanları genelde 70/30 oranında

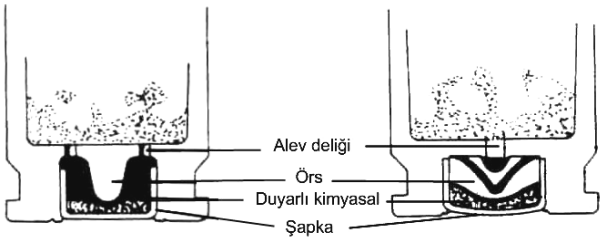
bakır ve çinko alaşımından meydana gelen "kovan pirinci" isimli pirinç malzemeden imal edilirler [3,4]. 80/20 oranlarında bakır ve nikel alaşımı olan "Cupro Nickel" kullanılan bir diğer malzemedir. Doğu Avrupa'da çelik de kullanılır. Alüminyum alaşımları, hafiflik avantajından dolayı bazen uçaklara monte edilen silah fişeklerinin kovan imalinde kullanılır. Av tüfeği fişeği, kuru sıkı fişekler ve düşük basınçlı fişeklerin kovanlarının imalinde plastik de yaygın olarak kullanılır.



Şekil 2.1: Hafif silah fişeklerinin tipik yapısı [2]

2.5.2. Tutuşturma sistemi (Kapsül)

Hafif silah mühimmatlarında kullanılan tutuşturma sistemlerinin yapısı, genellikle darbeye duyarlı bir kimyasal bileşiğin (örn. tnt) kullanımına dayanır. Mekanizmanın içinde yer alan iğne, kovanın arkasında yer alan kapsüle vurur ve içe doğru göçmesine neden olur. Böylece, duyarlı kimyasal bileşik, kapsül şapkası ile örs arasında sıkıştırılarak parlaması sağlanır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2: Hafif silah fişeklerinde tutuşturma sistemlerini tipik yapısı [2]

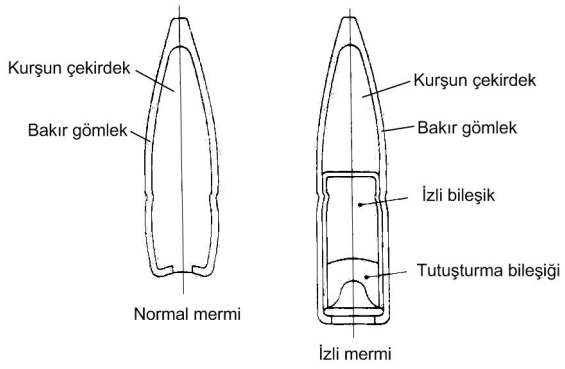
Parlama sonucu ortaya çıkan alev, örsün ortasında veya çevresinde konumlanmış alev deliklerinden geçerek sevk barutunun olduğu odaya geçer ve barutu ateşler.

Kapsül malzemesi olarak kovan pirinci, cupro nickel ve bakır alaşımları çok yoğun bir biçimde kullanılır. Kapsül kovana yerleştirildikten sonra sızdırmazlık sağlaması için şapkanın kenarlarına metal folyo veya kâğıt bir disk yerleştirilir.

2.5.3. Mermi

Mermi, yıkıcı etkiyi oluşturmak üzere hedefe enerji taşır. Hafif silahlar, kullanıcı için emniyetli bir biçimde, mermiyi hedefe doğru ve yeterli enerjiye sahip bir biçimde göndermek için vardır [3]. Aerodinamik sürükleme etkisini azaltmak için yüksek hızlı (süpersonik) mermilerin burunları iyice sivriltilmiştir. Ayrıca, uçuşu sırasında merminin hızı ses hızının altına düştüğünde taban sürüklenmesini azaltmak için merminin tabanı konikleştirilmiştir (kayık kuyruk) [5]. Uçuş kararlılığını artırmak için merminin burun kısmı görece hafif bir malzeme ile doldurularak ağırlık merkezinin tabana doğru kaydırılmıştır [4,5].

Tüm harp mermileri kompozit yapıdadır. Tek başına kurşun çekirdek kullanılmaz çünkü yumuşak ve dayanımı düşüktür ve yüksek atım yatağı basınçlarında ve yüksek çıkış hızlarında namlu içine sıvanma eğilimi vardır. Bu sıvanma sonucunda her seferinde bir kurşun katmanı yiv-setin yivlerinde kalmakta ve sonuçta yivleri doldurarak hem isabeti hem de namlu ömrünü düşürmektedir. En çok kullanılan mermi yapısı kurşun antimon alaşımı çekirdek üzerine bakır bir gömlek geçirmektir (Şekil 2.3). Çelik gömlekler de dayanımı artırmak üzere kullanılır.

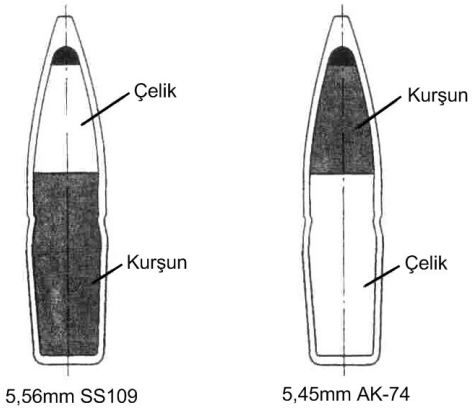


Şekil 2.3: 7,62mm NATO normal ve izli mermileri [2]

Şekil 2.3'deki sağ tarafta görülen izli mermiler otomatik silahlarda kullanılır. Şarjör içerisinde en alta iki veya üç adet izli mermi taşıyan fişek konulur. Böylece şarjörün

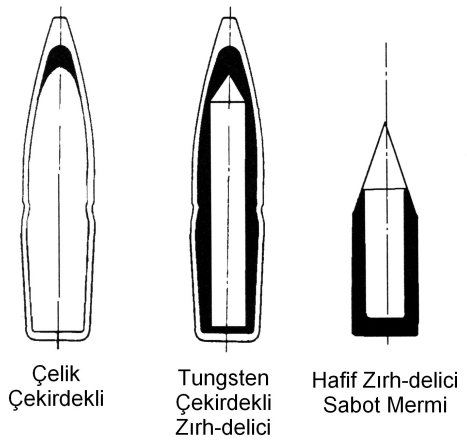
boşaldığını belirten bir nevi uyarı vazifesi görürler. Bu mermiler içlerindeki izli bileşiğin yanması neticesinde oluşan parlak izden dolayı bu ismi almışlardır.

Mermilerin hedefe nüfuz etmesini artırmak için kurşun antimon alaşımı ile beraber çelik bir çekirdek de kullanılabilir. Şekil 2.4'de bu tipte olan 5,56mm SS109 ve 5,45mm AK-74 mermileri görülmektedir.



Şekil 2.4: 5,56mm SS109 ve 5,45mm AK-74 mermileri [2]

Günümüzde hedefler artan seviyelerde zırh koruması altındadırlar. Böyle hedefleri etkisiz hale getirmek için özel zırh delici mermiler geliştirilmiştir (Şekil 2.5). Zırh delici mermilerin en basit şekli sertleştirilmiş çelik çekirdeğe sahip mermilerdir.

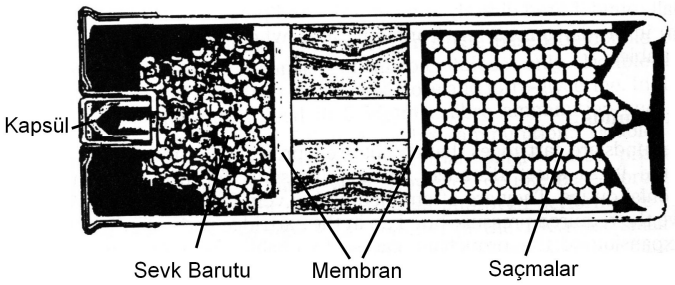


Şekil 2.5: Zırh delici mermi örnekleri [2]

Çeliğin özgül ağırlığı kurşundan daha düşük olsa bile hedefe nüfuz kabiliyeti kurşundan fazladır çünkü hedefe çarptığında daha az deforme olur ve kesit

yoğunluğunu muhafaza eder. Zırhlara daha ileri bir nüfuz sağlamak için tungsten çekirdekler kullanılır. Tungstenin özgül ağırlığı çelik ve kurşundan yüksektir, ayrıca çok sert bir metaldir. Bu nedenle nüfuz kabiliyeti çok iyidir [3]. Dezavantajı ise tungstenin çeliğe göre iki ila üç kat maliyetli olmasıdır.

Nüfuzu daha da artırmak için mermi çapı küçültülüp 1200 m/s mertebesinde yüksek hızlarla atış yapılan sabot mermiler mevcuttur. Sabot, silahın kalibresine uygun olması için iki veya daha çok parçalı bir zarf içindedir. Sabot ve zarf namluyu terk ettikten sonra zarf ayrılır ve yalnızca sabot kalır. Bu tip mermiler de genellikle tungsten malzeme tercih edilir.



Şekil 2.6: Av tüfeği fişeğinin iç yapısı [2]

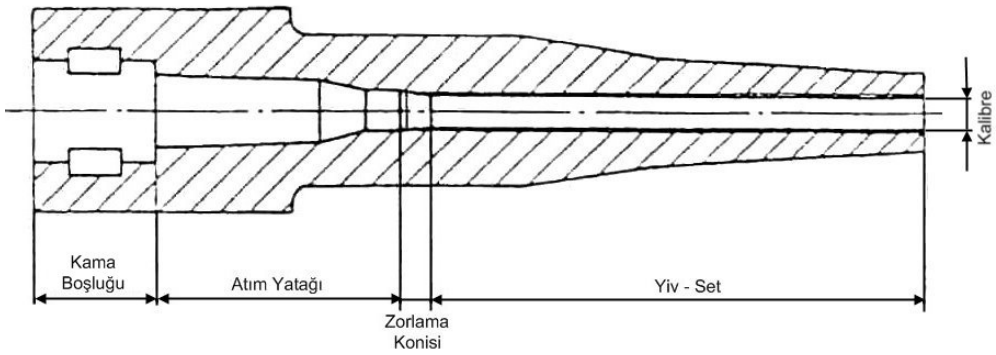
Av tüfekleri yıllardır harp amaçlı olarak da kullanılmaktadır. Av tüfekleri boru tipi namluya sahiptirler; namlularında yiv-set bulunmamaktadır. Bir atış çevriminde bir mermi atmak yerine, çok sayıda ve ufak parçacıklar (saçma) atarlar. Şekil 2.6'da bir av tüfeği fişeğinin iç yapısı verilmiştir. Membran, sızdırmazlık ve saçmalara azami itiş kuvvetinin uygulanmasını sağlar. Membran olmadan gazların büyük bir kısmı saçmaların aralarından akıp gider. Kapsül ve fişek tablası (kovanın mekanizmaya yaslanan arka tarafı) pirinç malzemeden, kovanın yan duvarları ise plastik veya kâğıttan mamuldür [2].

2.5.4. Sevk barutu

Modern hafif silahların mühimmatlarında kullanılan barut dumansız baruttur [6-9]. Dumansız barutlar; tek bazlı, çift bazlı veya üç bazlı olabilir. Tek bazlı barut yalnızca nitroselüloz ihtiva etmektedir. Çift bazlı barut, nitroselüloz ve nitrogliserinden; üç bazlı barut ise nitroselüloz ve nitrogliserinin yanında nitroguadinden müteşekkildir. Çift bazlı ve üç bazlı dumansız barutlar, daha yüksek sıcaklıklarda ve yanma hızlarında yanarlar. Bu açıdan namlu ömrünün kısalmasına yol açarlar [8]. Öte yandan bu barutlar, tek bazlı baruta nazaran daha yüksek birim kütle başına açığa çıkan enerjiye sahiptirler. Böylece aynı kovan hacminde daha fazla enerji elde edilebilmesi mümkün olmaktadır [8,9]. Sevk barutu hakkında daha detaylı bilgi 3. Bölüm'de verilmiştir.

2.6. Namlu

Namlunun (Şekil 2.7) görevi mermiye hız kazandırmak ve hedefe doğru yön vermektir. Silah her ateşlendiğinde oluşan yüksek basınç ve sıcaklıklara karşı mukavim olmalıdır. Namlu ayrıca iç yüzeyine helisel formda açılmış yivler sayesinde mermiye spin hareketi de verir. Merminin bu şekilde kendi etrafında dönüşü ona uçuş kararlılığı sağlar [3-5,10,11]. Namlunun temel ölçüsü kalibresidir. Kalibre, yivler açılmadan evvel namlunun sahip olduğu iç çap ölçüsüdür. Bir diğer önemli ölçü de merminin namludan çıkış hızını etkileyen namlu boyudur. Kabaca, daha uzun namlu ile daha yüksek hız sağlanır [2,11].



Şekil 2.7: Bir namlunun basit gösterimi [2]

Namlunun tüm silahın konstrüksiyonu üzerinde büyük etkisi vardır. Bir namlunun karşılaması gereken temel beklentiler:

- Azami çalışma yüklerine karşı dayanım
- Titreşimleri en aza indirmek için yüksek rijitlik
- Namlu ekseninde azami düzgünlük
- İç ve dış çaplarda eşmerkezlik
- Yeterli hizmet ömrü
- Dayanım ve katılık açısından optimum kütle
- Düşük imalat maliyeti

Bir namluda genel olarak şu bölümler yer alır (Şekil 2.7): Kama boşluğu, atım yatağı, zorlama konisi ve yiv-set.

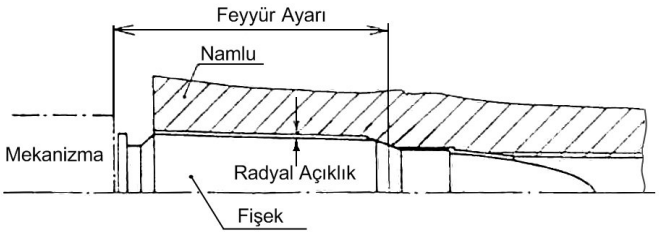
2.6.1. Kama boşluğu

Namlunun arka kısmında, mekanizmanın (kamanın) oturduğu bölümdür. Böylece mekanizma, namlunun arkasını kapatarak fişek kovanını destekler. Yanma gazları serbest kalan tek yön olan mermi yönünde mermiyi de önüne katarak genişlerler ve gazların enerjisinden en fazla şekilde mermi itkisi elde edilir.

2.6.2. Atım yatağı

Atım yatağı namlunun fişeğe ev sahipliği yapan bölümüdür. Kovan arkadan mekanizmaca desteklenirken yanlardan ve ön kısmından (boyun) atım yatağı tarafından desteklenir. Atım yatağının yerleşimi ve şekli kovanın tasarımına bağlıdır; şekli kovanın geometrisini takip eder.

Fişek kovanı ve atım yatağı, kolay doldurma ve atıştan sonra kolay boş kovanın kolay çıkarılması için daralan şekilde koni biçimindedirler. Ayrıca kovan ile atım yatağı arasında radyal bir boşluk bulunmaktadır. Yine kolay doldurma ve boşaltma avantajının yanında radyal boşluk, kovanın atış sırasında genişleyerek atım yatağının duvarlarına yaslanmasına ve sızdırmazlık sağlamasına da imkan tanır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8: Atım yatağının yapısı [2]

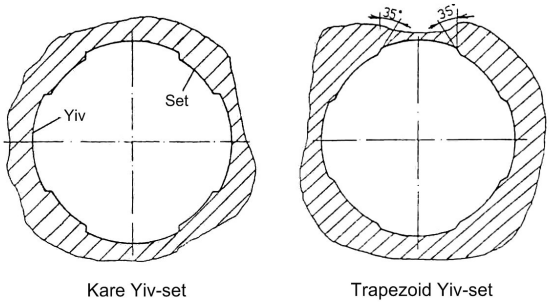
Mekanizma alın yüzeyi ile fişeğin atım yatağına oturduğu nokta arasındaki mesafeye Feyyür Ayarı denir. Silahın doğru çalışabilmesi için bu ayar önemlidir. Eğer feyyür ayarı kısa olursa mekanizma tam olarak yerine oturmaz. Eğer uzun olursa; bu kez mekanizma fişeği tam olarak destekleyemez [2,11].

2.6.3. Zorlama konisi

Zorlama konisi (Şekil 2.7) mermi gömleğinin yiv-setin yivleri tarafından daha düzgün bir biçimde oyulmasına (engraving) yardımcı olur. Mermi, yiv-sete tamamen oturduğu için hem sızdırmazlık sağlanır hem de merminin yivleri daha rahat takip etmesini ve düzgün bir spin kazanmasını sağlar.

2.6.4. Yiv-set

Av tüfeklerinin haricinde tüm hafif silahların namlularında yiv-set bulunur. Yiv-set (Şekil 2.7), mermiye spin kazandırarak uçuşu sırasında jiroskopik kararlılığa sahip olmasını sağlar [3-5,10,11]. Yiv-setli bir namlunun kesitine bakıldığında Şekil 2.9'daki gibi yiv-set profili görülür. Çoğunlukla kare profil kullanılsa da trapezoid profile sahip olanları da mevcuttur.



Şekil 2.9: Yiv-set profil şekilleri

Yivlerin genişlik ve derinlikleri genellikle tüm namlu uzunluğu boyunca sabittir. Sarım açısı veya yiv-setin hatvesi de çoğu kez sabittir. Sarım açısı, bir yivin bir tam turu attığı mesafe cinsinden verilir (Örn: 1/250mm veya 1/8"). Sarım açısı, merminin namlu çıkış hızı ve spin hızı üzerinde etkilidir.

2.7. Hafif Silahlarda Operasyon Biçimleri

Hafif silahlar, sevk barutunun sağladığı enerjiyle, bir çıkrıkla veya elektrik motoru ile tahrik edilebilir. Bir hafif silah, yapısı bakımından tek silindirli içten yanmalı bir motordur. Tek farkı her çevrimde bir piston (mermi) harcanır ve yerine yeni bir piston alınır. Bu açıdan, bir atış çevrimi içerisinde, bir fişekten elde edilen enerjinin nasıl dağıldığı (hangi tür enerjilere dönüştüğü) mekanik ve termodinamik yasaları kullanarak belirlenebilir.

- Bir mermi tartılarak ağırlığı bulunur. Namlu çıkış hızı ölçülür. Böylece kinetik enerjisi hesaplanabilir. Merminin kendi etrafında dönüşünden dolayı da taşıdığı bir kinetik enerji vardır fakat çoğu kez ihmal edilebilir mertebededir.
- Yüksek sıcaklıkta yanma gazlarından ve merminin namlu içerisine sürtünmesinden namluya ısı geçişi olur. Sıcaklıkta yükselme ölçülürse, namlu ve diğer ısınan parçaların kütleleri ve özgül ısıları yardımıyla toplam ısı kaybı hesaplanabilir.
- Silahın üzerinde serbestçe salınabildiği bir balistik sarkaç sistemi kullanılarak geri tepme enerjisi ölçülebilir. Bir fişek ateşlendiğinde, sarkaçtaki yükselme silahın geri tepme enerjisi ile doğru orantılıdır.
- Her bir fişekten silah sistemine sokulan enerji miktarı, fişeğin içerdiği sevk barutunun miktarı (dolgu miktarı) ve barutun özgül ısısı ile doğru orantılıdır (Bkz. Bölüm 3.1.2).
- Yanma gazlarının namlu ağzından çıktıktan sonra çevreye patlama ve ısı enerjisi halinde saldığı enerji direkt olarak ölçülemez. Fakat bu enerji, sevk barutunun kimyasal enerjisi ve toplam enerji kaybı için enerji dengesi yazılmak suretiyle bulunabilir (Bkz. Bölüm 3.3).

2.7.1. Çalışma çevrimi

Bir hafif silah; manuel, yarı otomatik veya otomatik çalışmasından bağımsız olarak, bazı belli fonksiyonları her bir fişeğin ateşlenmesi ve merminin atılması süreci içerisinde yerine getirmelidir. Bunlar bir çalışma çevrimini veya Atış Çevrimini oluşturup kısaca ve sırasıyla şöyledir:

- Bir fişek, silaha beslenmelidir (elle, şarjörden veya mayon şeridinden)
- Fişek atım yatağına sürülür.
- Ateşleme tertibatı kurulur.
- Mekanizma kilitlenir.
- Ateşleme tertibatı fişeği ateşler.
- Mekanizma çözülür.
- Mekanizma geriye hareketlenir, boş kovan namludan çekilir.
- Boş kovan dışarıya fırlatılır.

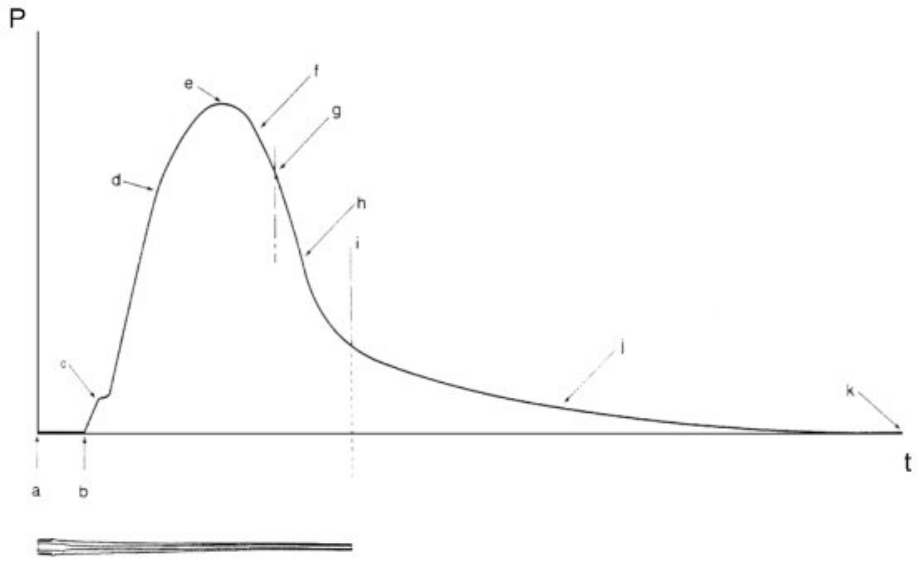
Atış çevriminde özel durumlar için değişiklik olabilir. Örneğin, ani geri tepmeli sistemlerde mekanizma kilitlenmez. Bu sistemler, ağır mekanizmanın yüksek ataletine dayanırlar. Yaygın kullanılmayan özel kovansız mühimmatların kullanıldığı sistemlerde, boş kovanın namludan çekilmesi ve fırlatılması gibi bir durum söz konusu değildir.

Hafif silahlarda, ateşlenen fişekler çok kısa süreler için çok yüksek basınçlar yaratırlar. Bu mertebelerde basınçlar, eğer kontrol altına alınmazsa silaha ve hatta atıcıya zarar verebilir. Bu yüzden kilitleme kullanılır. Sistemin, mekanizmanın, namlu içi basınç emniyetli değerlere düşünceye kadar, atım yatağının arkasına dayalı kalması ve hemen ardından geri çekilmesi şeklinde tasarlanması gerekir [2,12].

2.7.2. Basınç zaman ilişkisi

Gücünü, yanan gazların meydana getirdiği basınçtan alan yarı otomatik veya otomatik hafif silahlarda, bu güçten güvenle yararlanılabilecek süre sınırlıdır. Bu yüzden, namlu içi basıncın zamana bağlı değişiminin incelenmesi önem arz eder.

Namlu içinde yanma gazlarının basıncının zamana göre değişimini incelemek için basınç - zaman eğrisi (Şekil 2.10) kullanılır [13-16]. Bu eğri, piezo-elektrik basınç sensörleri, sinyal işleme tertibatı ve bir bilgisayar yardımı ile elde edilir.



Şekil 2.10: Basınç - zaman eğrisi [2]

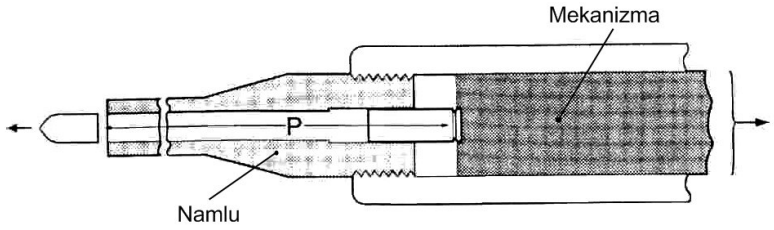
Şekil 2.10'da verilen basınç zaman grafiğinde olayların sıralaması şu şekildedir:

a. İğne kapsüle vurur.
b. Tutuşma başlamadan önce bir gecikme olur. Çok küçük miktarda fakat çok yüksek hassaslığa sahip bir patlayıcı patlar ve barut granüllerinin dış yüzeyini tutuşturacak bir alev oluşturur.
c. Mermiyi, bağlı bulunduğu kovanın ağzından dışarıya itecek mertebeye erişinceye kadar kovanın içindeki basınç yükselir.
d. Mermi harekete başlamıştır. Sevk barutu, mermimin arkasında kalan hacmin artışından daha hızlı bir biçimde gaz üretmeye devam ettiğinden basınç hızla yükselmeye devam eder.
e. Bu noktada basınç maksimum seviyesine ulaşmıştır.
f. Merminin hızı öyle yükselmiştir ki, merminin arkasında kalan hacmin artışı yanma gazlarının doldurabileceğinden daha hızlıdır; bu yüzden basınç düşmeye başlar.
g. Sevk barutunun tamamı yanmıştır.

h. Merminin arkasında kalan hacmin tamamı adyabatik olarak genişleyen sıcak gazlarla doludur.
i. Mermi, namlu ağzından dışarıya atılır. Namlunun içindeki basınç hala görece yüksektir.
j. Namlu içindeki basınç düşmeye devam etmektedir. Bu aşamada, namluda kalan basınçlı gazların kovan tabanına yaptığı basınçtan faydalanmak için mekanizmanın kilidinin çözülmesi güvenlidir.
k. Namlu içi basınç ortam basıncına düşer.

2.7.3. Ani geri tepmeli operasyon

Ani geri tepmeli metotta silahın atış çevrimini yürütebilmesi için gerekli olan enerji, yanma gazlarının basıncı etkisinde fişek kovanının geriye doğru hareketi vasıtasıyla mekanizmaya aktarılır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11: Ani geri tepmeli operasyonun şematiği [2]

Ani geri tepmeli operasyon prensibine göre tasarlanacak bir hafif silahta iki temel koşul sağlanmalıdır. Birincisi; kovan atım yatağı içerisinde hareket serbestliğine sahip olmalıdır. Böylece, bu sistemin dayandığı prensip olan gazların basıncını mekanizmaya hareket olarak aktarabilme görevini yerine getirebilsin. İkinci şart; namlu içindeki basıncın yüksek olduğu süre boyunca kovanın atım yatağının içinde zapt edilmesidir. Aksi takdirde, ya kovan henüz atım yatağı içersinde iken en zayıf yerinde yarılır ya da kovanın arkası yeterince desteklenmediği için atım yatağından dışarı çıkarak patlamaya neden olur. Bu iki şart gerçekte birbirleriyle ihtilaflıdır. Her iki şartında silahın atışı esnasında sağlanması için gecikmeli ani geri tepme veya kilitli ani geri tepme gibi daha karmaşık sistemlerin tasarımı gerekli olmuştur [2]. Ani geri tepme prensibi dört kategoriye bölünebilir.

- Basit veya yalın ani geri tepme
- Erken kapsül ateşlemeli ani geri tepme
- Gecikmeli ani geri tepme
- Mekanizması kilitli ani geri tepme

2.7.3.1. Basit ani geri tepme

Basit ani geri tepmeli operasyonda, kovanın zapt altında tutulması ve çevrim boyunca hareketinin kontrollü bir biçimde olması görece ağır bir mekanizmanın kütlesi ve ataleti ile saplanır. Ayrıca ağır olan mekanizmanın çevrim sonunda ilk konumuna dönebilmesi için sert bir yerine getiren yay kullanılır. Basit ani geri tepme prensibine göre çalışan hafif silahların karakteristikleri:

- Mekanizma kilitlenmez sadece atım yatağının arkasına dayanmak suretiyle onu örter.
- Ağır, yani yüksek atalete sahip mekanizma bulunur.
- Basitlik esastır.
- Sert yerine getiren yaya sahiptir.
- Genellikle omuzsuz, paralel kenarlı kovana (Şekil 2.11) sahip fişekler kullanılır.
- Ağır olan mekanizmanın hareketi ve oluşan titreşimler sebeplerinden dolayı elde otomatik atışta isabet oranı düşüktür.

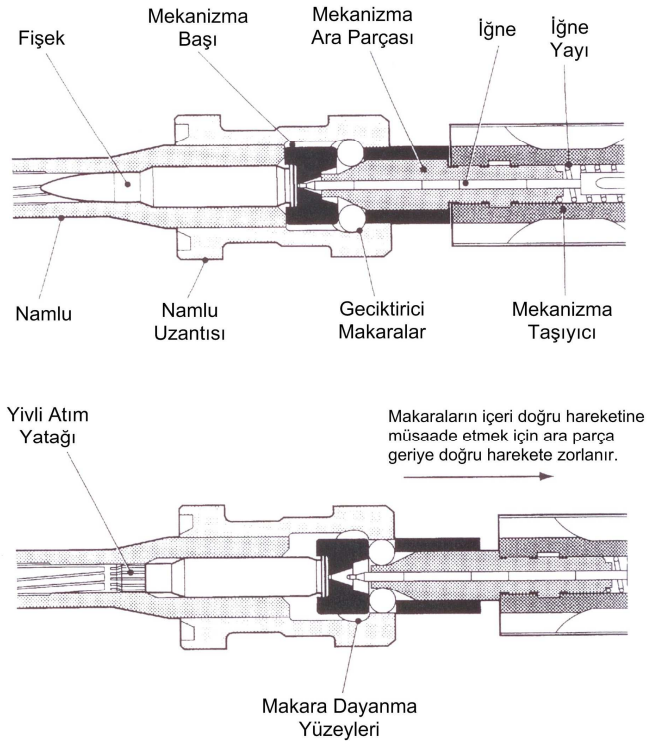
2.7.3.2. Erken kapsül ateşlemeli ani geri tepme

Bu sistemde, basit ani geri tepmeli sistemdekine göre daha hafif bir fakat yine de görece ağır bir mekanizma kullanılır. Mekanizma geriye doğru olan kursunu tamamlayıp yerine getiren yayda depolanan enerji vasıtası ile yerine geri gelirken ağırlığından kaynaklanan yüksek bir atalete yani kinetik enerjiye sahiptir. Bu kinetik enerji, mekanizma, yeni fişeği namluya sürüp, ileri doğru hareketini tamamlayarak sükunete ermeden hemen önce fişeği ateşlemek suretiyle yararlı bir amaç için kullanılır. Böyle bir durumda, sevk barutunun yanması ile oluşan yanma gazlarının iki görevi olur: birincisi ileriye doğru hareket eden mekanizmayı yavaşlatarak durdurmak; ikincisi sükunete eren mekanizmayı geriye doğru hareket ettirmek. Bu

şekilde, namlu içinde basıncın yüksek olduğu süre zarfında gazların enerjisi mekanizmaya hareket kazandırmaya ek olarak mekanizmanın ters yönde olan hareketini de engellemek için harcanır. Bu sistemde mekanizmayı %50'sine kadar hafifletmek mümkündür.

2.7.3.3. Gecikmeli ani geri tepme

Gecikmeli ani geri tepme prensibinde, mekanizmanın, fişek ateşlendikten sonraki geriye doğru hareketi, namlu içindeki basınç, mekanizmayı açmak için emniyetli seviyeye düşünceye kadar geciktirilir. Bunun için hafif parçaların kullanıldığı bazı mekanik düzenekler kullanılır. Böylece bilinçli olarak mekanizmanın ataletinin yenilmesi ve harekete geçişine belli bir süre mekanik bir engel konulur ardından bu engel mekanizmaya sürekli artan bir serbestlik tanıyacak şekilde kararlı bir biçimde kaldırılır. Bu mekanik düzeneklerde genelde mafsal kolları, bilyeler veya makaralar gibi elemanlar kullanılır. Mekanizma genelde, mekanizma başı ve mekanizma taşıyıcısı olmak üzere iki parçadan meydana gelir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12: Gecikmeli ani geri tepmeli operasyonun şematiği [2]

Şekil 2.12'de gecikmeli ani geri tepme operasyonu ile çalışan bir piyade tüfeğinin atıştan önce ve atıştan hemen sonraki temsili resimleri verilmiştir. Mekanizma başı, silah dolu ve atışa hazır halde iken namluya bağlı bulunan namlu uzantısı parçasının içindeki oyuklara oturan iki adet makaraya sahiptir. Atış gerçekleştiğinde, gaz basıncının mekanizma alnına dayalı bulunan kovan içerisinde oluşturduğu kuvvet mekanizmayı geriye doğru hareket etmeye zorlar. Fakat mekanizma başının hareket edebilmesi için önce makaraların içinde bulundukları oyukları terk etmeleri gerekir. Bu da aslında bu oyukların kendi yüzey geometrileri marifetiyle olur. Gazların yarattığı kuvvet makaraları oyukların mekanizma tarafındaki yüzeylerine bastırır; yüzey geometrisini takip eden makaralar mecburi hareket olarak mekanizma başı içerisine çekilirler. Bu çekilme esnasında, mekanizma başı ile mekanizma taşıyıcısını birbirine bağlayan ara parça üzerindeki eğik yüzeylere dayanan makaralar, aynı anda ara parçayı ve dolayısıyla mekanizma taşıyıcısını geriye doğru hareketlenmeye zorlar. Bu şekilde, mekanizma başının geriye gelme hızı yavaşlar. Makaralar, namlu uzantısındaki oyuklardan tamamıyla kurtulduğunda, mekanizma başı da hareketine başlar ve bir sonraki fişeğin atım yatağına alınmasına kadar taşıyıcı ile birbirlerine olan bağıl pozisyonları bozulmaz. Yeni fişek atım yatağına sürülürken, mekanizma başı namluya dayanarak durur fakat yerine getiren yayın etkisi devam etmektedir ve mekanizma taşıyıcısı ileri hareketine devam eder. Yine ara parçadaki eğik yüzeyler vasıtasıyla makaralar bu kez dışarıya doğru itilir ve namlu uzantısındaki oyuklara girer. Böylece silah bir sonraki atış çevrimine hazır olur.

2.7.3.4. Mekanizması kilitli ani geri tepme

Bu sistemde, mekanizmanın ağırlığı, çevrimi yürütebilecek minimum enerjiyi sağlayacak mertebeye kadar düşürülmüştür. Mekanizma, namlu içi basınç yüksekken kilitlidir ve maksimum basınç noktası geçildiğinde mekanizmanın kilidi çözülür ve namluda kalan gaz basıncı mekanizmayı aynı basit ani geri tepmeli sistemde olduğu gibi sürer. Mekanizmanın kilidini çözecek kuvvet ya gazların basıncı ya da namlunun geri tepmesinden sağlanır. Fakat kilit çözüldükten sonra atış çevrimini yürütmek üzere mekanizmaya verilecek enerji yalnızca gazların basıncından sağlanır, bu nedenle bu tip bir silaha operasyon tiplerinin bir kombinasyonu ile çalışır denemez. Sistem, ani geri tepmeli operasyon sistemidir.

2.7.3.5. Ani geri tepmeli sistem uygulamaları

Ani geri tepmeli sistemlerinin temel uygulamaları kabaca şöyledir: Basit ani geri tepme, düşük güçlü fişekler atan spor tüfekleri ve küçük kalibreli tabancalar; erken kapsül ateşleme, hafif makineli tüfekler ve makineli tabancalar; gecikmeli ani geri tepme, piyade tüfekleri ve hafif makineli tüfekler; mekanizması kilitli ani geri tepme sistemleri ise ağır makineli tüfeklerde kullanılır. Dört ani geri tepme operasyon biçimlerinin karakteristikleri ve kullanım sahaları özet halinde Tablo 2.1'de verilmiştir [2].

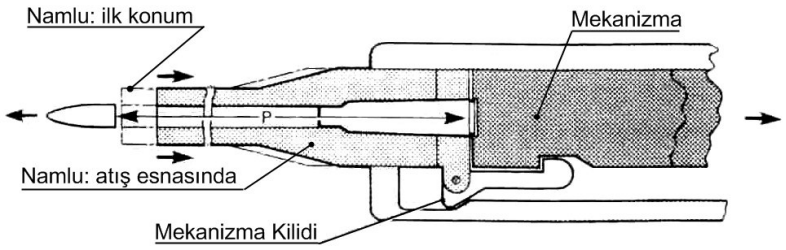
Tablo 2.1: Ani geri tepmeli operasyon biçimlerinin karakteristikleri ve kullanım alanları

	Basit Ani Geri Tepme	Erken Kapsül Ateşleme	Gecikmeli Ani Geri Tepme	Kilitli Mekanizma
Karmaşıklık	Basit	Basit	Daha az basit, zamanlama önemli	Kısmen karmaşık
Maliyet	Ucuz	Ucuz	Kısmen ucuz	Kısmen pahalı
Mekanizma	Ağır	Daha hafif	Çoğu kez iki parçalı	Hafif
Fişek Kovanı	Paralel kenarlı	Paralel kenarlı	Birçok tip uygundur, yivli atım yatağı kullanılır.	Birçok tip uygundur
Silah Tipi	Çok düşük güçlü, genelde tabanca veya hafif makineliler	Hafif makineli ve birkaç ağır makineliler	Genellikle tüfekler olmak üzere hepsi	Ağır makineli tüfekler

2.7.4. Geri tepmeli operasyon

Bu operasyon biçiminde, namlu, silah gövdesinde açılmış yatağında geri tepmeye serbesttir. Mekanizma namluya kilitlenir. Fişek ateşlendiğinde, mermi namlu içerisinde momentum kazanarak ileriye doğru itildiğinde namluda tepki olarak ters yönde bir momentum kazanır. Ayrıca, sevk barutunun oluşturduğu yanma gazları mermiyi iterken aynı anda kovanı dolayısıyla mekanizmayı ters yönde itmektedir. Mekanizma ve namlu sıkı sıkıya birbirlerine bağlı olduklarından beraber geri teperler (Şekil 2.13).

Operasyonun ilerleyen safhalarında, namlu ve mekanizma arasındaki kilit çözülür ve mekanizma yoluna devam ederken boş kovanın namludan çekilmesi ve dışarıya fırlatılması aşamaları gerçekleşir. Bunu mekanizmanın geriye gidişini tamamlayıp yerine getiren yay vasıtasıyla ilk konumuna dönmeye başlaması, yeni bir fişeğin atım yatağına alınması ve mekanizmanın namluya tekrar kilitlenmesi takip eder.



Şekil 2.13: Geri tepmeli operasyonun şematiği [2]

Namlunun ve mekanizmanın bu beraber hareketi bu operasyon biçiminde çevrimin gerçekleşmesi için gereken enerjinin kaynağıdır. Bu ikilinin hareketi, silahın gövdesine rölatif olarak gerçekleşmektedir. Tüm ateşli silahlarda geri tepme olmaktadır. Fakat mekanizmanın gövdeye kilitlendiği silahlarda silahın tüm gövdesi geri tepeceği için namlu mekanizma ikilisinin silah gövdesine rölatif bir hareketi söz konusu değildir; böyle silahlarda geri tepmeli operasyon biçimini kullanmak mümkün değildir [2,12].

Geri tepme prensibi ile çalışan çok sayıda silah örneği mevcuttur ve uygulanmasında çok sayıda değişik mekanik düzenlemeler kullanılır. Bu farklı uygulamalar bir kenara bırakılırsa tüm geri tepme ile çalışan silahlar, uzun kurslu geri tepme ve kısa kurslu geri tepme olmak üzere iki temel kategoriye ayrılır. Eğer namlu ve mekanizma, ateşlenmemiş bir fişeğin uzunluğundan daha fazla bir mesafeyi kilitli olarak kat ediyorsa buna uzun kurslu, etmiyorsa kısa kurslu geri tepme denir [2,12].

2.7.4.1. Uzun kurslu geri tepme

Uzun kurslu geri tepmeli sistemlerde, namlu ve mekanizma genellikle tüm geri tepme süreci boyunca kilitli kalırlar. Geriye hareket tamamlanınca, mafsallı kol veya bir kam yardımıyla kilit çözülür; mekanizma bir mandal vasıtasıyla geri noktada

sabit tutulurken, namlu kendine ait olan yerine getiren yay etkisi altında ileriye hareketlenir. Bu esnada boş kovanı mekanizma alnında bırakır. Böylece kovan tahliyesi gerçekleşir. Namlu ilk konumuna geri geldiğinde , mekanizmayı tutan mandalı serbest bırakır; mekanizma yeni fişeği namluya sürüp, kilitlenerek atış çevrimini tamamlar ve bir sonraki çevrim için silah hazır olur.

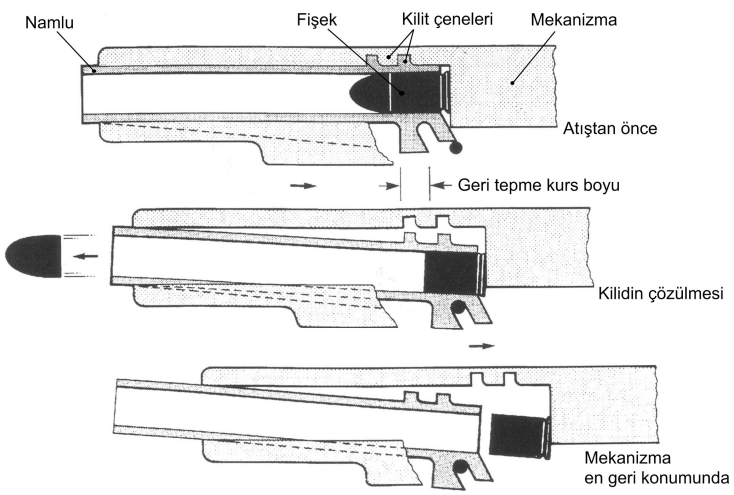
Bu sistemi kullanan silahlarda; boş kovanın tahliyesi geri tepme esnasında başlayamadığından, otomatik atış hızı oldukça düşüktür; mekanizma karmaşık ve pahalıdır. Atış esnasında, namlu uzun bir mesafeyi kat ettiği için silahın ağırlık merkezinin konumunda büyük bir değişme olur; bu da isabet başarısını kötü yönde etkiler. Tüm bu sebeplerle, bu sistem, özellikle küçük kalibreli hafif silahlarda uzun yıllardan beri kullanılmamıştır.

2.7.4.2. Kısa kurslu geri tepme

Kısa kurslu geri tepme ile çalışan bir silahta, namlu ve mekanizma çok kısa bir mesafe için beraber hareket ederler. Bu mesafe, yeni bir fişek beslemek için çok kısa fakat, namlu içindeki basıncın emniyetli değere indiğini garanti edebilecek kadar uzundur. Kilit çözüldüğünde, namlu çok kısa bir mesafe daha gittikten sonra ya durur ya da ilk konumuna geri gider. Mekanizma, sahip olduğu momentum ile geriye doğru hareketine devam eder. Mekanizmanın yol aldığı mesafe boş kovanı namludan çekip, fırlatmak ve yeni bir fişeği sürmek için kafi miktarda uzatılmıştır. Geriye doğru hareketini tamamlayan mekanizma yerine getiren yay tarafından eski konumuna geri döner; bu esnada da yeni bir fişeği atım yatağına sürerek namluya kilitlenir.

Kısa kurslu geri tepme prensibi çok yoğun bir biçimde yarı-otomatik tabancalarda kullanılır. Namlu kısa olduğu için hafiftir, merminin namlunun kütlesine oranı tüfek gibi diğer hafif silahlardan daha yüksek olduğundan namlunun kazandığı momentum yüksektir. Buna göre, geri tepme hızının yüksek olduğu ve çevrimin gerçekleşmesi için bol miktarda enerji bulunduğu söylenebilir. Buradan, yarı-otomatik tabancaların kısa kurslu geri tepme sisteminin uygulanması için çok elverişli olduğu sonucu çıkar.

Yarı-otomatik tabancalar için yaygın olan tasarım tipinde mekanizma, namluyu çevreleyip saracak şekilde öne doğru uzatılmıştır . Namlu için yatak görevi de gören mekanizma aynı zamanda kızak olarak isimlendirilir. Kızak sayesinde birçok ayrı geri tepen parça, yatak ve dolayısıyla işçilik elimine edilir ve tasarım basitleşir.



Şekil 2.14: Yarı-otomatik bir tabancada kısa kurslu geri tepme [2]

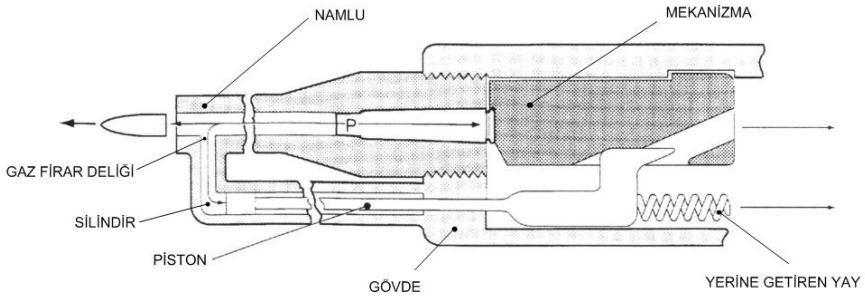
Şekil 2.14'de kısa kurslu geri tepme sistemini kullanan bir yarı-otomatik tabancanın atış çevrim aşamaları gösterilmiştir. Silah atışa hazır olduğunda; bir fişek atım yatağına alınmış ve mekanizma namluya kilitli vaziyettedir. Kilitleme namlunun üzerinde açılan çenelerin mekanizmanın (kızak) iç yüzeyindeki oyuklara yerleşmesi şeklinde olur. Fişek ateşlendiğinde mermi namlu içerisinde harekete geçer. Namlu ve kızak ise geri teper. Geri tepme kurs boyu aşıldığında, mermi namluyu terk etmiş ve namlu içindeki basınç emniyetli seviyeye düşmüştür. Namlunun altına açılmış olan kam kanalı silahın gövdesindeki pime geçerek namlunun arka kısmının aşağıya çekilmesini sağlar. Böylece kızak ile namlu arasındaki kilitlenmeyi sağlayan çeneler ayrılır; namlu sükunete erer. Kızak ise kazandığı momentumla, silahın gövde geometrisince tespit edilmiş gelebileceği en geri noktaya kadar, geri gelmeye devam eder. Bu aşamada boş kovanın namludan çekilmesi ve dışarıya fırlatılması olayları gerçekleşir. Yerine getiren yay vasıtasıyla kızak ileriye hareketine başlar, yeni bir fişeği atım yatağına sürer, namluyu iterek arka kısmının yeniden yükselmesini sağlar ve kilit çeneleri yeniden buluşarak kilitlenme sağlanır. Yeni bir fişek yüklenmiş ve silah bir sonraki atış çevrimine hazır hale gelmiştir.

2.7.5. Gazlı operasyon

Dışarıdan bir kuvvetle çalıştırılan silahlar dışında tüm otomatik silahlarda çevrimi gerçekleştirecek enerji, genişleyen yanma gazlarının basıncından kaynaklanır. Silah, ani geri tepmeli, geri tepmeli veya gazlı operasyonla işlesin bu böyledir. Fakat gazlı operasyon veya gaz etkili terimi yalnızca belirli bir operasyon biçimine aittir.

Namlu bir genişleme odası şeklinde davranır ve mermi ilerledikçe içerisindeki basınç atım yatağından namlu ağzına kadar değişir. Yanma gazlarının enerjisinin tümünü mermi üzerinde işe çevirmek termodinamik yasalarınca mümkün değildir. Enerjinin büyük bir bölümü yanma gazları ile birlikte atmosfere salınır (Bkz. Bölüm 3.3.6). Bu enerjinin bir kısmı silahın yarı-otomatik ve otomatik çalıştırılması için kullanılabilir.

Namlu üzerinde herhangi bir noktadan bir gaz firar deliği açılmak suretiyle namlu içindeki gazların basıncından yaralanılabilir. Namlu ağzına yakın yerlerde açılan firar deliği durumunda, balistik parametrelere minimum etki fakat operasyonu gerçekleştirebilmek için düşük bir gaz basıncı mevcuttur. Firar deliğinin atım yatağına yakın bir konumda açılması durumunda ise, parçaların daha mukavim olmasını gerektirecek yüksek basınç buna karşılık gazın firar deliğine daha çabuk beslenmesi ve beraberinde yüksek dakikada atım miktarı mümkündür [12] .



Şekil 2.15: Gazlı operasyonun şematiği [2]

Şekil 2.15'de gazlı operasyon kullanan bir silahın temel parçaları verilmiştir. Gaz firar deliğinden yanma gazlarının bir kısmı bir silindir içerisine alınır. Silindir içerisindeki bir piston, mekanizmaya hareket vererek gövdedeki kilidin çözülmesini sağlamakla görevlidir. Bir yerine getiren yay ise hem pistonu hem de ona bağlı

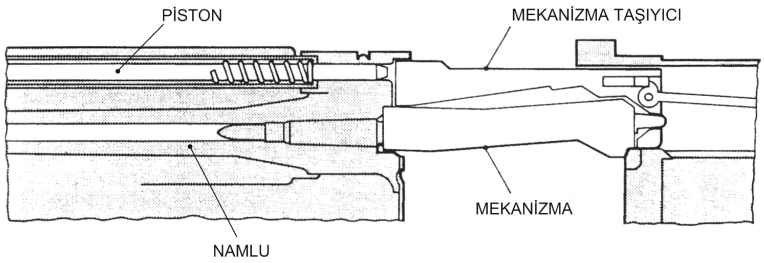
olarak mekanizmayı yerine getirme görevini üstlenmiştir. Gazlı operasyon prensibi özellikle piyade tüfekleri ve hafif makineli tüfeklerde kullanılmaktadır. Yıllar içinde gaz etkili tüfeklerin tasarımı üç ana kategoride farklılaşmıştır. Bunlar sırasıyla, uzun kurslu piston, kısa kurslu piston ve direkt gaz doldurma sistemleridir.

2.7.5.1. Uzun kurslu piston

Uzun kurslu piston sisteminde, piston mekanizmaya sabitlenmiştir; atış çevrimi boyunca mekanizmanın konumunu ve pozisyonunu kontrol eder. Mermi, gaz firar deliğini geçtiği anda, gaz silindire dolar ve piston geriye doğru sürülür. Piston, mekanizmayı kilidinden kurtararak harekete geçirir. Mekanizma, geriye doğru hareketi boyunca piston tarafından kontrol edilir. Bu esnada boş kovanın tahliye işlemleri gerçekleşir. Mekanizma en geri konumuna getirildiğinde, namlu dolayısıyla silindir içerisindeki basınç atmosfer basıncına düşmüştür. Böylece yerine getiren yay devreye giren ve pistonu ve bağlı bulunduğu mekanizmayı ileriye hareketlendirir. Yeni bir fişeğin namluya sürülmesi ve kilitlenmenin gerçekleştirilmesi ile atış çevrimi tamamlanmış olur.

2.7.5.2. Kısa kurslu piston

Kısa kurslu piston sisteminde, piston mekanizmaya sabitlenmemiştir; atış çevriminde sadece kısa bir süre mekanizma ile temasa geçer ve bu temasta mekanizmaya impuls verir. Bu sistemde de gaz, firar deliğinden geçerek bir silindir içerisine dolar ve pistonu sürer. Piston bir çekiç gibi mekanizmaya çarparak ona hareket verir; daha sonra kendine ait bir yerine getiren yay ile ilk konumuna geri döner.

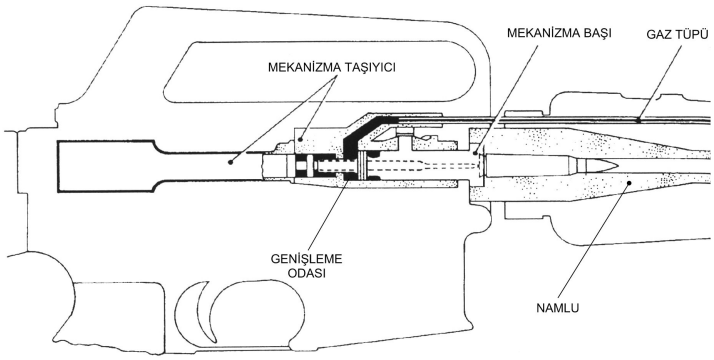


Şekil 2.16: Kısa kurslu piston sisteminin şematiği [2]

Mekanizma aldığı bu enerji ile atış çevrimini sürdürür. Genelde kısa kurslu piston sistemi ağırlık tasarrufu sağladığından avantajlıdır, fakat kısa bir temas süresince gerekli enerjiyi elde edebilmek için gaz firar deliği mekanizmaya yakın bir konumda açılmalıdır.

2.7.5.3. Direkt gaz doldurma

Bu sistemde, silindir ve piston bulunmaz. Bunun yerine gaz firar deliğinden alınan gaz bir tüp vasıtasıyla direkt olarak mekanizma tarafına aktarılır. Mekanizma genellikle iki parçalıdır ve bir mekanizma başı ve bir de mekanizma taşıyıcısından meydana gelir. Mekanizma başı namluya kilitlenmiştir. Gaz tüpünden gelen gaz, mekanizma başı ile mekanizma taşıyıcısı arasındaki genişleme odasına doldurulur. Bu odada genişleyen gaz mekanizma taşıyıcısı geriye doğru hareketlendirir. Mekanizma taşıyıcısı geriye doğru ilerlerken gövdesinde açılan bir kam yuvası vasıtasıyla mekanizma başını çevirerek namlu ile olan kilidini çözer. Bu andan sonra mekanizma başı ve taşıyıcısı beraber hareket ederler; taşıyıcı kazandığı momentum ile atış çevriminin geri kalanını gerçekleştirir.



Şekil 2.17: Direkt gaz doldurma sisteminin şematiği [2]

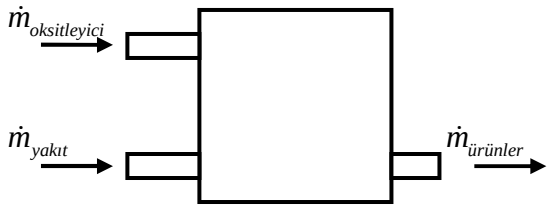
Bu sistem hafif, basit ve ucuzdur. Dezavantajları ise, sıcak gazların gövde içerisine alınması neticesi çabuk ısınma, yanma gazları içindeki partiküllerin mekanizma başı ve taşıyıcısında birikmesi ve kurum oluşturması, sıcak gazların mekanizmada ve gaz tüpünde korozyona yol açması olarak sayılabilir. Kurumun önüne geçmek için çok sık temizlik yapılmalıdır. Korozyon ise krom kaplama veya paslanmaz çelik kullanımı ile engellenebilir.

3. SİLAH TASARIMININ TERMODİNAMİK AÇIDAN İNCELENMESİ

Bir silahın bütününe ait iç balistiğinin matematik modelini üretmek için balistik bileşenlerin her birinin dinamiğinin modellenmesine ihtiyaç vardır. Buradaki yaklaşım, gerçek silahın basitleştirilmesi ve temel iç balistik bileşenlerinin değerlendirilmeye alınmasıdır. Bu temel bileşenler; sevk barutu, barutun oluşturduğu yanma gazları ve mermidir. Bu bölüm içerisinde, sevk barutunun yanma modeli, gazların davranışı ve bunun etkileri altında merminin hareketi ile ilgili matematiksel temeller verilmiş ve modeli oluşturan denklemler türetilmiştir.

3.1. Sevk Barutunun Yanmasının Termodinamiği

Sevk barutunun yanması, içindeki kimyasal enerjinin yararlı işe dönüşmesi işlemidir. Basitçe bir oksitlenme sürecidir. Sevk barutunun yanma işleyişini modellemek için sabit kontrol hacmi konseptinden yararlanılır [8,9,15] (Şekil 3.1). Buna göre, belli miktarda katı yakıt kütlesi ve belli miktarda oksijen kütlesi yanma odası içine alınıp tepkimeye sokulur. Yanma işlemi sonunda gaz halinde yanma ürünleri dışarı çıkar.



Şekil 3.1: Sabit kontrol hacimli yanma odası [15]

Sevk barutları yanmaları için gerekli olan oksijeni ihtiva ederler ve atmosferden oksijen almaya ihtiyaç duymazlar [8]. Bu sebeple, Şekil 3.1'de gösterilen matematik modelin kontrol hacmine giren oksitleyici kütlesi aslında yakıt kütlesinin bir bölümünü oluşturur. Fakat çoğu sevk barut dolgusu negatif oksijen dengesine sahiptir; yani tamamen yanması için gereken oksijenden azını ihtiva ederler. Dolayısıyla reaksiyon sonunda karbon monoksit ve hidrojen gazı gibi tam veya hiç oksitlenmemiş ürünler bulunur [9].

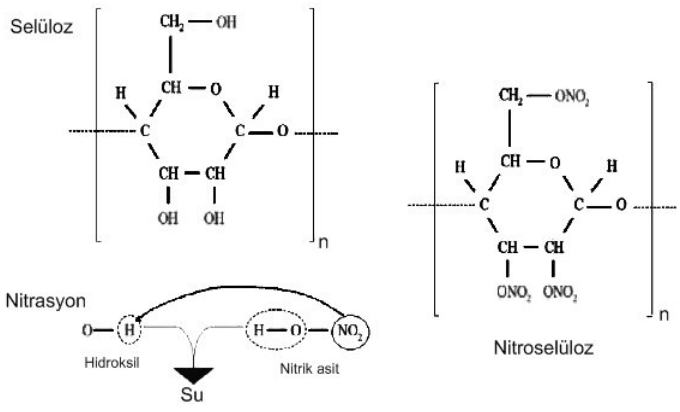
Namludan dışarıya akan gazlar atmosfer ile buluştuğunda atmosferdeki oksijen ile temas ederler. Tamamen yanmamış ürünler bulunan sıcak bir gaza oksijen akışı sağlanmış olacağından bu gazlar tekrar tutuşabilir ve namlu alevi denilen fenomenin gerçekleşmesine yol açar.

3.1.1. Dumansız barut çeşitleri ve kimyasal kompozisyonları

Mermiler hafif silahlardan dumansız barut kullanılarak atılırlar. Bu barutlar temel olarak karbon (C), hidrojen (H), oksijen (O)ve nitrojen (N) içerirler. Yanma ürünlerinin tamamına yakını gaz biçiminde olur.
Karbon dioksit (CO_2), su buharı (H_2O), nitrojen gazı (N_2), karbon monoksit (CO) ve hidrojen gazı (H_2) en önemi reaksiyon ürünleridir. Kara barutla karşılaştırıldığında dumansız barutlar daha güçlüdür; çok az duman çıkarırlar ve namlu içinde daha az kalıntı bırakırlar. Dumansız barutlar tek, iki veya üç bazlı olabilir.

3.1.1.1. Tek bazlı dumansız barut

Tek bazlı dumansız barutlar aktif bileşen olarak nitroselüloz içerirler. Nitroselüloz, ($C_6H_7(NO_2)_3O_5$) selülozun nitrasyonu ile elde edilir. Pamuk lifleri, nitrik asit (HNO_3) çözeltisine batırılır; selüloz $(C_6H_{10}O_5)_n$ zincirlerinde bulunan hidroksil (OH) grupları esterlenerek O-ON_2 grupları ile yer değiştirler (Şekil 3.2). Nitrasyondan sonra nitroselüloz jelatinize edilir. Böylece, nitroselüloz çeşitli tanecik geometrilerinde üretim için uygun hale gelir. Nitroselülozun tutuşma sıcaklığı 315 ºC'dir.



Şekil 3.2: Nitroselülozun elde edilişi [15]

3.1.1.2. Çift bazlı ve üç bazlı dumansız barutlar

Çift bazlı dumansız barut nitroselüloz ve nitrogliserin ($C_3H_5(NO_3)_3$) olmak üzere iki aktif bileşen içerir. Nitrogliserin, gliserol ($CH_2OH\text{-}CHOH\text{-}CH_2OH$) ile %50 nitrik asit ($HNO_3$) ve %50 sülfürik asit ($H_2SO_4$) karışımının esterlenmesi ile elde edilir. Daha sonra nitroselüloz ve nitrogliserin belli oranlarda karıştırılıp jelatinize edilerek çift bazlı dumansız barut istenen tane geometrisinde imal edilir. Çift bazlı barutların tutuşma sıcaklıkları 150 - 170 ºC arasında değişmektedir.

Üç bazlı dumansız barut nitroselüloz, nitrogliserin ve nitroguadin olmak üzere üç aktif bileşenden meydana gelmiştir. Nitroguadin ($C\text{-}NH\text{-}NH_2\text{-}NHNO_2$) bir ester değil bir nitramindir. Tüm bunların yanında üretici firmalar özel amaçlar için barut bileşikleri içine değişik miktarlarda kimyasal katkılar ekleyebilirler.

3.1.2. Sevk barutunun enerjisi

Bir hafif silahın amacı bir mermiyi atıcı için güvenli bir şekilde belli bir hızda belli bir yöne doğru göndermektir. Mermi kinetik enerjisini üzerine etkiyen yanma gazlarının yaptığı iş ile kazanır. Yanma gazlarının yaptığı iş sevk barutunun yanması ile meydana gelen enerjiden kaynaklanır.

Sevk barutu içinde mevcut olan toplam kimyasal enerji E_k olsun. Sevk barutunun izokorik patlama ısısı, sabit bir hacim içerisindeki barutun çevre ile ısı alışverişi olmaksızın (adyabatik) yanması sonucu açığa çıkan enerjidir [15]. Patlama ısısı E_k/C_0 olarak gösterilir. C_0 barutun toplam kütlesidir. Yanma sırasında ulaşılan sıcaklığa adyabatik izokorik alev sıcaklığı veya kısaca patlama sıcaklığı denir ve T_0 ile gösterilir.

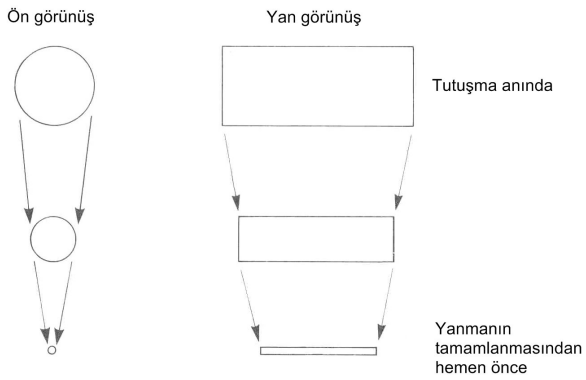
$$\frac{E_k}{C_0} = c_v' T_0 = \left(\frac{R'}{\gamma - 1} \right) T_0 = \frac{F}{\gamma - 1} \tag{3.1}$$

Patlama ısısı ve patlama sıcaklığı arasındaki ilişki (3.1) denkleminde verilmiştir. c'_v, R' ve γ sırasıyla sabit hacimde özgül ısı, özgül gaz sabiti ve politropik indekstir. Özgül gaz sabiti R' ile patlama ısısı T_0 'ın çarpımı; F, sevk barutunun kuvveti olarak

adlandırılır. Birimi (J/kg) joule/kilogram'dır. Özgül gaz sabiti R', üniversal gaz sabiti R (=8,31 J/molK)'nin gazın molar kütlesine (kg/mol) oranıdır.

3.1.3. Yanma hızı, Piobert ve Vieille kanunları

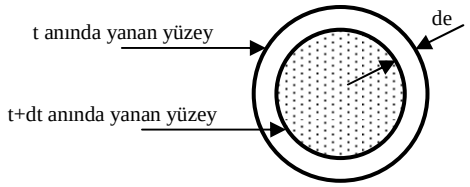
Piobert kanunu, 18. yüzyılda Fransız bilim adamı Piobert'in deneylerinde yaptığı gözlemlerine dayandırdığı bir kanundur. Buna göre, yanma esnasında bir barut granülünün tüm yüzeyi neredeyse aynı ayda tutuşur ve tüm yüzeylerde eşit derecede incelme meydana gelir [1]. Buna göre, granüllerin paralel katmanlar halinde yandığı söylenir. Örneğin, silindirik şekilli bir granül yanma süreci boyunca silindirikliğini koruyacak ve çapı ile uzunluğu eşit mertebede küçülecektir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3: Silindirik bir barut granülün katmanlar halinde yanması [1]

Piobert bu gözleminin üzerine lineer yanma hızı kavramını tanımlamıştır. Lineer yanma hızı (r) birim zamanda yanan barut tabakası (de) kalınlığıdır (Şekil 3.4). 19. yüzyıl sonlarına doğru yine bir Fransız bilim adamı olan Vieille, yanma hızının çevredeki gazların basıncından oldukça etkilendiğini farketti. Yanma hızı katsayısı (w) ve basınç indeksi (β) olmak üzere iki katsayı tanımlayarak kendi adıyla anılan (3.2) formülünü yanma hızının hesabı için önerdi. Katsayıları deney sonucuna göre belirlenmiş olduğundan bu aslında amprik bir formüldür. Basınç indeksi çoğu barut çeşidi için genellikle bire yakın değerlerdir.

$$r = \frac{de}{dt} = wp^{\beta} \tag{3.2}$$



Şekil 3.4: Lineer yanma hızının şematik ifadesi [1]

3.1.4. Sevk barutunun hareketliliği

Hareketlilik, barutun yandığı zaman ne kadar hızlı gaz ürettiğini karakterize bir özelliğidir [1,8,9]. Hareketlilik ξ ile gösterilir ve (3.3) formülü ile verilir. *w*, S_0 ve V_0 sırasıyla yanma hızı katsayısı, barut granülün başlangıçtaki yanma yüzeyi ve barut granülünün başlangıç hacmidir.

$$\xi = w\frac{S_0}{V_0} \tag{3.3}$$

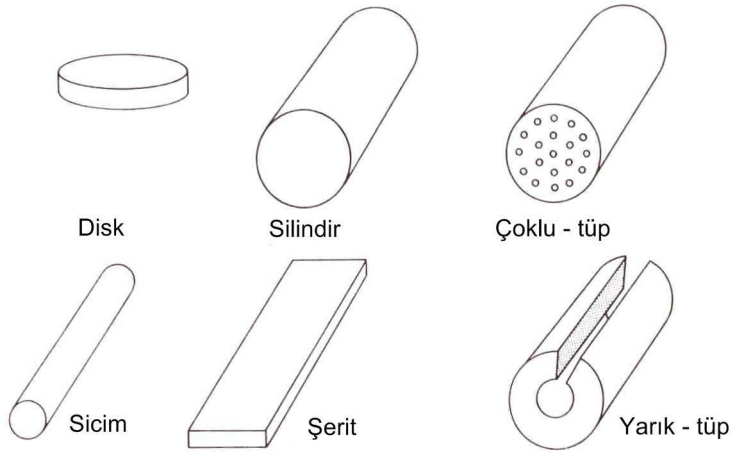
Hareketlilik, barutun; granül büyüklüğüne, kimyasal kompozisyonuna ve başlangıç sıcaklığa bağlıdır. Granüllerin başlangıç sıcaklığı yükseldikçe hareketlilikleri artar. Granül boyutları küçüldükçe hareketlilikleri artar.

3.1.5. Form faktörü

Form faktörü, barutun yandığı zaman ne kadar hızlı gaz ürettiğini karakterize bir diğer özelliğidir. Form faktörü ϕ ile gösterilir ve anlık toplam yanma yüzeyinin (S) başlangıçtaki granülün yüzeyine (S_0) oranı şeklinde ifade edilir [1,8,15]. Silindirik bir granül ele alınırsa, başlangıçta granülün sahip olduğu yüzey geniştir. Yanma hızı bu granül için yüksek seviyededir. Yanma devam ettikçe granülün çapı dolayısıyla yüzey alanı azalacağından yanma hızı da düşecektir. Bu da yanma gazlarının oluşum hızını düşürecektir. Bu sebeple bu tip geometride olan granüllere azalan granül denir.

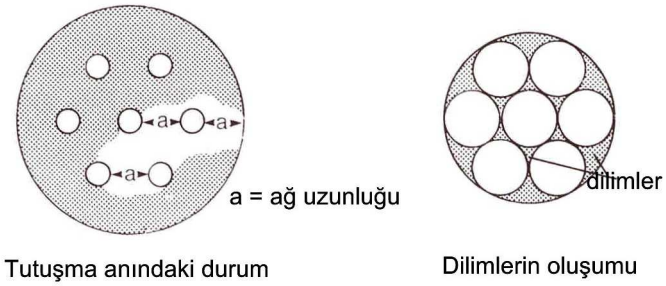
Tüp şeklinde olan granüller silindirik olanlardan daha az azalan tiptir, çünkü yanma sırasında dış yüzey azaldığı halde iç yüzeyi genişlemektedir. Dış yüzeydeki yanmayı yavaşlatmak için bu yüzey yanmayı belli bir süre geciktiren kimyasallarla kaplanır.

Uzun tüp biçimleri kullanıldığında yanma sırasında iç yüzeyden etkiyen basıncın granülü parçalamaması için silindire boy tarafında bir yarık açılır. Yanmayı geciktiren kaplama sayesinde, bu granüller, yanmanın sonuna doğru kaplamanın etkisini yitirmesi ile geniş olan dış yüzeyden yanmaya başladığından daha hızlı gaz üretmeye başlarlar. Bu yüzden bu tip granüllere ilerleyen tip de denir. Şekil 3.5'de yaygın olan barut granülü geometrileri verilmiştir.



Şekil 3.5: Yaygın kullanılan barut granül geometrileri [1]

Alternatif olarak, silindir granüllerin azalan tip olan dış yüzeyleri, silindir içine çok sayıda ilerleyen tip olan tüpler açılarak kompanze edilebilir. Bu tiplere nötr tip granül denilir. Şekil 3.6'da bu tip bir granülün yanma başlangıcındaki ve yanma sonuna doğru andaki biçimleri gösterilmiştir. Granüller, ağ uzunluğu olarak adlandırılan "a" boyutu sıfıra doğru yaklaştığında meydana gelen dilimlerden parçalanarak tükenene kadar yanmaya devam ederler.



Şekil 3.6: Çoklu-tüp bir barut granülünün yanması [1]

3.1.6. Yanma denklemi

Yanma süreci boyunca barut gaza dönüşmektedir. Barut kütlesindeki değişim (dC) negatifken, gaz kütlesindeki değişim (dm_{gaz}) pozitiftir. Kütle korunduğuna göre, gaz kütlesindeki artış barut kütlesindeki azalmaya eşittir (3.4).

$$dm_{gaz} = -dC \tag{3.4}$$

Gaz kütlesinin akış hızı kütlesindeki değişimin zamana oranıdır (dm_{gaz}/ d_t). Akış hızı (3.5) denklemine göre hesaplanır. ρ, *r* ve S sırasıyla; barutun yoğunluğu, lineer yanma hızı ve barut granüllerinin yanma yüzeyleri toplamıdır.

$$\frac{dm_{gaz}}{dt} = \rho.r.S \tag{3.5}$$

Barutun başlangıçtaki ve anlık kütleleri sırasıyla C_0 ve C olmak üzere, herhangi bir andaki yanma oranı Z, yanmış olan barut kütlesinin başlangıçtaki barut kütlesine oranı şeklinde tanımlanır (3.6) [1,8,9].

$$Z = \frac{C_0 - C}{C} \tag{3.6}$$

Yanmış olan barut gaza dönüştüğüne göre oluşan gaz kütlesi (3.7) eşitliği ile de ifade edilebilir.

$$m_{gaz} = C_0.Z \tag{3.7}$$

(3.7) eşitliğinde verilen m_{gaz} ifadesi (3.5) eşitliğinde yerine konulursa (3.8) denklemi elde edilir.

$$\frac{dm_{gaz}}{dt} = C_0 \frac{dZ}{dt} = \rho.r.S \tag{3.8}$$

(3.8) denkleminde ani yanma oranı dZ/dt yanlız bırakılarak denklem düzenlenirse balistik hesaplamalarda kullanılan (3.9) Yanma Denklemi elde edilmiş olur. V_0 barutun başlangıçtaki hacmidir.

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{\rho\, r\, S}{C_0} = \frac{w\, p^{\beta} S}{C_0 / \rho} = \frac{w\, p^{\beta} S}{V_0} \tag{3.9}$$

(3.9) denklemi biraz daha düzenlenme yapılarak Yanma Denklemi, barutun hareketliliği ve form faktörü cinsinden (3.10) denklemindeki şekilde de yazılabilir [8].

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{w\, p^{\beta} S}{V_0} = \left(w \frac{S_0}{V_0} \right) \times \left(\frac{S}{S_0} \right) \times p^{\beta} = \xi \times \phi \times p^{\beta} \tag{3.10}$$

3.1.7. Noble - Abel durum denklemi

Noble - Abel durum denklemi, iç balistik hesaplamalarda sıklıkla kullanılan ve yanma gazlarının basınç, hacim ve sıcaklık termodinamik koordinatları arasındaki ilişkiyi formülleştiren denklemdir [1]. İdeal gaz yasasından türemiştir; van der Waals durum denklemin (3.12) özel bir halidir.

İdeal gaz yasası, ideal gazların durum denklemidir (3.11). İdeal bir gazın basınç, sıcaklık ve hacmi arasındaki ilişkiyi düzenler. Bazı sınırlamalar olsa da birçok gazın değişik durumlar altındaki davranışları için iyi bir yaklaşım sağlar. Denklemde *p* gazın basıncı; *V* gazın hacmi; n mol cinsinden gazın miktarını; *T* ise mutlak sıcaklığı belirtir. *R*, üniversal gaz sabitidir, değeri 8,314 J/K.mol'dür.

$$pV = nRT \tag{3.11}$$

İdeal gaz yasası, moleküler büyüklüğü ve moleküller arası etkileşimleri ihmal ettiği için, çoğunlukla tek atomlu gazların yüksek sıcaklık ve düşük basınç değerleri için daha doğru sonuçlar verir. Bu ihmaller, basıncın düşük olduğu çok geniş hacimlerde veya moleküllerin termal kinetik enerjilerinin oldukça arttığı yüksek sıcaklık durumlarında oldukça önemsizdirler.

İç balistiğe dönülürse: Yanma sonucu fişek kovanı içerisinde yüksek yoğunluklu yanma gazları hâsıl olur. Başlangıçta, kovanın içerisinde yer alan barut dolgusunun yoğunluğu 500–1000 kg/m^3 civarında olabilmektedir. (Tablo 3.1). Mermi kovanı terk edip hareketine başladığında barut neredeyse tamamen yanmış olur. Hemen hemen aynı hacimde, barut ile denk kütleye sahip gazlar oluşmuştur, dolayısıyla gazların

yoğunluğu da katı haldeki barutun mertebesindedir. Böyle yüksek bir youğunlukta ideal gaz yasasının kullanımı doğru sonuçlar vermeyecektir.

Van der Waals durum denklemi (3.12) yüksek yoğunluklu gazların söz konusu olduğu bu gibi durumlarda daha doğru sonuçlar vermektedir. Denklemde, υ özgül hacmi (*1/ρ*); *b* gaz moleküllerinin birbirleri ile sıkı sıkıya temas edecek şekilde kapladığı sonlu hacim olan "eş-hacim"; α/υ^2 ise moleküller arası çekim kuvvetlerinin ölçüsüdür.

Eş hacmin fiziksel bir anlamı olmamakla beraber deney verilerine daha iyi bir uyumu sağlayan gözlemsel bir sayıdır [8,15,16]. Literatürde değişik gazlar için eş hacim değerleri bulunabilir. Eş hacmin birimi, birim kütle başına kübik uzunluktur (özgül kütle gibi).

$$\left(p+\frac{\alpha}{\upsilon^2}\right)(\upsilon-b)=R'T \tag{3.12}$$

Özgül hacim yerine yoğunluk yazılarak denklem şu halde de verilebilir (3.13).

$$\left(p+\alpha\rho^2\right)(\upsilon-b)=R'T \tag{3.13}$$

Tablo 3.1'de çeşitli silahların mühimmatlarının atım yatağı hacimleri, barut miktarları ve buradan hesaplanan doldurma yoğunluğu Δ değerleri verilmiştir. Yanma sonucu oluşan gazların yoğunluğu ilk başta Δ değerine yakındır; mermi namlu içinde ilerlerken, mermi ile mekanizma alnı arasındaki hacim genişlediğinden bu değer giderek düşer.

Tablo 3.1: Bazı silah tiplerinin atım yatağı hacimleri, barut dolgu miktarları ve doldurma yoğunluğu değerleri

Silah Türü	V_0: Atım Yatağı Hacmi [m^3]	C_0: Barut Miktarı [kg]	Doldurma Yoğunluğu $\Delta = C_0/V_0$ [kg/m^3]
7,62mm Tüfek	$3{,}1 \times 10^{-6}$	0,003	968
9mm Tabanca	$2{,}0 \times 10^{-6}$	0,0005	250
20mm Top	$4{,}4 \times 10^{-5}$	0,039	886
81mm Havan	$1{,}0 \times 10^{-3}$	0,109	109
120mm Tank	$1{,}0 \times 10^{-2}$	8,12	812
155mm Ağır Top	$2{,}0 \times 10^{-2}$	11,76	588

Balistik uygulamalarında, yanma gazlarının yüksek sıcaklığından dolayı moleküllerin kinetik enerjileri yüksektir. Bu durumda ideal gaz yasasında olduğu gibi moleküller arası çekim ihmal edilebilir. Buna göre van der Waals denkleminden α/v^2 ifadesinin kaldırılması ile Noble-Abel durum denklemi (3.13) elde edilir.

$$p(\upsilon - b) = R'T \tag{3.13}$$

Noble-Abel durum denklemi yüksek yoğunluklu ve sıcaklıkta yanma gazlarının termodinamiğinde oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Bu yüzden iç balistikte ve mühimmat performansının değerlendirilmesinde çoğu zaman tercih edilir [8,9,14,16].

3.2. İç Balistik Termodinamiği

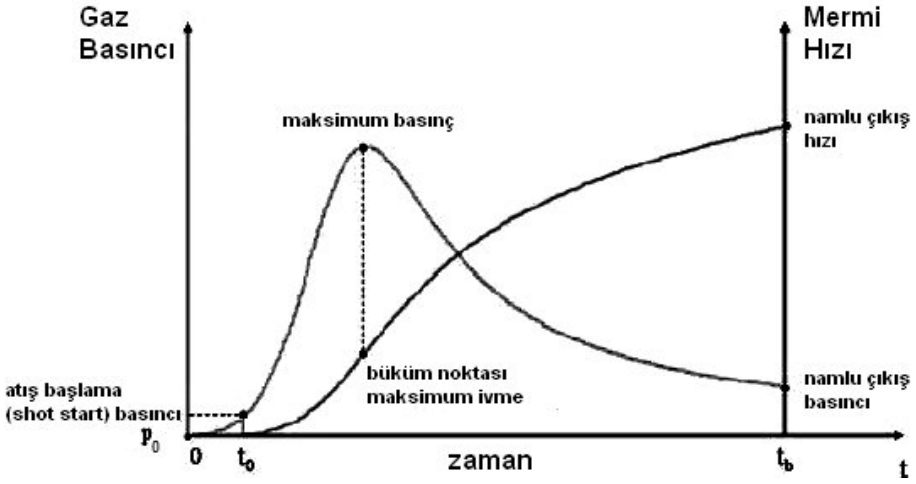
İç balistik, merminin, silahın namlusu boyunca hareketine dair her fenomenle ilgilenir. Mühimmatın kapsülünün ateşlenmesi ile başlar. Kapsül içindeki tutuşturucu madde parlar ve kovanın barut bulunan kısmına açılan bir borudan tutuşturucu maddenin alevi, sıcak gazları ve bazı partiküller geçerek barut granüllerine ulaşırlar. Bu anda barut granüllerinin sıcaklıkları; kondüksiyon, konveksiyon ve hatta alev kaynaklı radyasyon ile artmaya başlar. Barutun tutuşma sıcaklığına ulaşıldığında tüm granüller yanmaya başlar. Burada kolaylık sağlaması yönünden; tüm barut granüllerinin aynı anda tutuştuğu kabulü yapılır [1,14,15].

Tutuşmayı yanma takip eder. Bu süreçte katı halde bulunan sevk barutu yanma gazlarına dönüşür. Başlangıçta, yanma işlemi silahın yanma odası olarak kabul edilebilecek atım yatağında gelişir. Yanma odasının hacmi bu sırada sabittir ve bir taraftan mekanizma alnı diğer taraftan mermi ile kapatılmıştır. Gaz basıncı hızla yükselir. Barutun yanma hızlı basınçla doğru orantılı olarak arttığından gaz oluşumunun hızı da sürekli artmaktadır. Eğer herhangi bir sebeple mermi hareketine başlamazsa, gaz basıncı emniyet sınırını aşarak silahın patlamasına sebep olabilir.

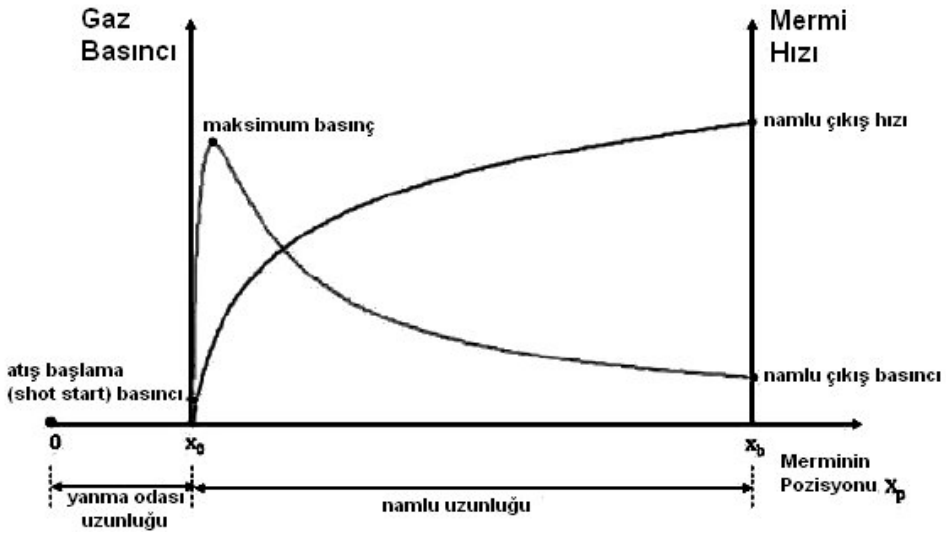
Artan basınçla beraber, yanma gazlarının merminin taban yüzeyine uyguladıkları kuvvet de artar. Belirli bir noktada atış başlama (shot-start) basıncına ulaşılır (Şekil 3.7 ve Şekil 3.8). Bu anda, mermi tabanına etkiyen kuvvet; onu kovandan ayıracak ve eğer namlu yivli-setli ise mermi gömleğinin, namlunun yivlerince oyularak sevk

çemberinin oluşturmasına yetecek mertebededir. Mermi bu andan sonra namlu içerisindeki hareketine başlar.

Merminin öne doğru hareketi, yanma gazlarınca doldurulacak ve böylece basıncın düşmesine imkan verecek bir hacim artışı meydana getirse de basınç bir süre daha yükselmeye devam eder, çünkü granüllerin yanması devam etmekte ve daha çok gaz açığa çıkmaktadır. Yine belli bir andan sonra, hacimdeki artış yanma gazlarının artışına galip gelir ve basınç düşme eğilimine geçer. Genelde mermi namlu uzunluğunun onda birini kat etmeden önce maksimum basınca ulaşılmış olur.



Şekil 3.7: Atış sırasında yanma gazlarının basıncı ve mermi hızının zaman ile değişimleri [14]



Şekil 3.8: Atış sırasında yanma gazlarının basıncı ve mermi hızının, merminin namlu içindeki konumu ile değişimleri [14]

Takip eden genişleme fazında, gaz basıncı düşmeye devam eder fakat mermi namlu ağzına erişinceye kadar hızlanmaya devam eder. Mermi namluyu terk etmeden hemen önce, gaz basıncı maksimum basıncın yaklaşık altına birine düşmüştür. Yine de bu basınç atmosfer basıncının çok üzerindedir.

Yanma gazlarının genişlemesi esnasında, silahın ve mühimmatın durumu ve düzgün tasarlanmış olmalarına göre barut dolgusu belli bir anda tamamen yanmış olacaktır. Tercihen bunun mermi namluyu terk etmeden önce olması istenir aksi taktirde balistik verim düşecektir. İdeal halde ise durum mermi kovandan ayrılıp hareketine başlamadan önce tüm barut dolgusunun yanmasıdır çünkü en iyi verimi alabilmek için sabit hacimde ısı giriş prosesi arzulanır [15,16].

3.2.1. İç balistikte basınç mermi hızı ilişkisi

Yanma gazlarının basıncı ile merminin hızı nicel olarak ilişkilidir. Bunlar, iç balistikte en çok kullanılan iki grafik tipi olan zamana bağlı veya mermi hareketine bağlı grafikler üzerinde üst üste çizilerek ifade edilebileceği gibi bağımsız olarak da çizilebilirler. Zamana bağlı grafikte (Şekil 3.9) gaz basıncı ve mermi hızı zamanın bir fonksiyonu olarak tanımlanır. Basınç grafiği çok fazla miktarda bilgi taşır. Maksimum basıncı göstermesinin yanı sıra, nicel ilişkide olduğu mermi hızının elde edilmesinde de kullanılabilir.

Namlunun kesit alanı A olsun. Basınç (p), birim alana etkiyen kuvvet (F) (3.14) ve impuls (I), kuvvetin zamana (t) göre integralidir; Newton'un ikinci yasası uyarınca impuls aynı zamanda kütlenin lineer momentumundaki değişime de eşittir (3.15).

$$p = F/A \tag{3.14}$$

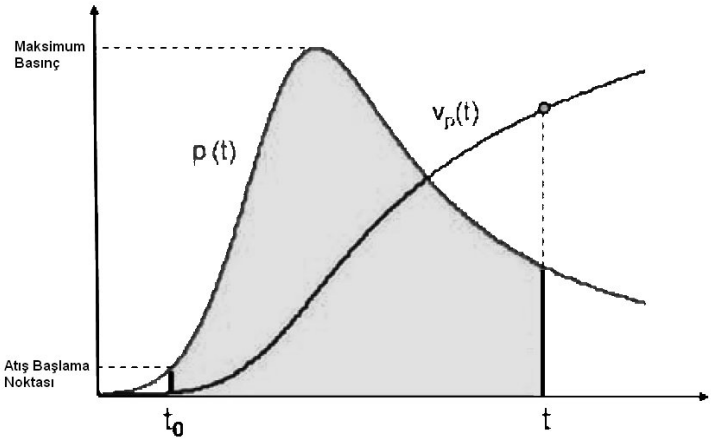
$$I = \int F\,dt = \Delta\left(m v_p\right) \tag{3.15}$$

(3.15) denkleminde F yerine (3.14) denkleminden çekilen değer yazılır ve eşitliğin bir tarafında momentum diğer tarafında impuls ifadeleri yer alacak şekilde düzenlenirse (3.16) elde edilir.

$$mv_p(t) = A\int_{t_0}^{t} p(t)\,dt \tag{3.16}$$

Şekil 3.9'da p(t) basınç eğrisinin altında kalan grafik alanın büyüklüğünün namlu kesit alanı işe çarpımının momentumdaki değişimi vereceği böyle gösterilmiş olur. Bu denklemde Vp(t) yalnız bırakılarak, mermi hızının zamana göre değişimini veren ikinci eğri denklemi (3.17) analitik olarak elde edilir [1,15].

$$v_p(t) = \frac{A}{m}\int_{t_0}^{t} p(t)\,dt \tag{3.17}$$



Şekil 3.9: Üst üste çizdirilmiş yanma gazları basınç - zaman ve mermi hız – zaman diyagramları [14]

(3.17) denkleminde şuna dikkat edilmelidir: Burada, mermi hızı hesabında yalnızca yanma gazının etkisi göz önüne alınmaktadır. Fakat yanma gazları mermi tabanına etkiyerek ona hız veren kuvveti oluştururken aynı anda merminin yan yüzeyleri namlu duvarlarına sürterek hızı düşürücü bir faktör olan sürtünme kuvvetinin oluşmasına sebep olmaktadır [14,16]. Yine bir başka hız düşürücü faktör, merminin burnuna etkiyen hava basıncının oluşturduğu aerodinamik sürükleme kuvvetidir.

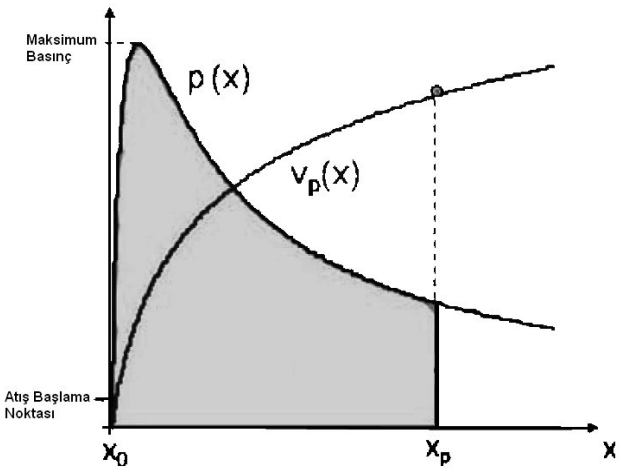
Yanma gazlarının mermi üzerine yaptığı iş (W), gazların oluşturduğu itme kuvvetinin (F) merminin hareketi boyunca integre edilmesi ile bulunur. Mermiye verilen iş onun kinetik enerjisine de eşit olacağından, iş (3.18) şeklinde ifade edilir.

$$W = \int F dx = \frac{1}{2} m v_p^{\,2} \tag{3.18}$$

Şekil 3.10'da p(x) eğrisi altında kalan alan, mermi tabanının birim kesit alanı başına mermi kinetik enerjisini verir. Bu enerji, kesit alanı ile çarpıldığında; merminin namlu ağzında iken sahip olduğu toplam kinetik enerjiye eşit olur (3.19). Buradan hareketle merminin namlu çıkış hızı bulunabilir (3.20).

$$A\int_{x_0}^{x_p} p(x)dx = \frac{1}{2}mv_p^2(x) \tag{3.19}$$

$$v_p\Big|_{x_p} = \sqrt{\frac{2A\int_{x_0}^{x_p} p(x)dx}{m}} \tag{3.20}$$



Şekil 3.10 Üst üste çizdirilmiş, yanma gazlarının basınç – mermi yolu ve merminin hız – mermi yolu diyagramları [14]

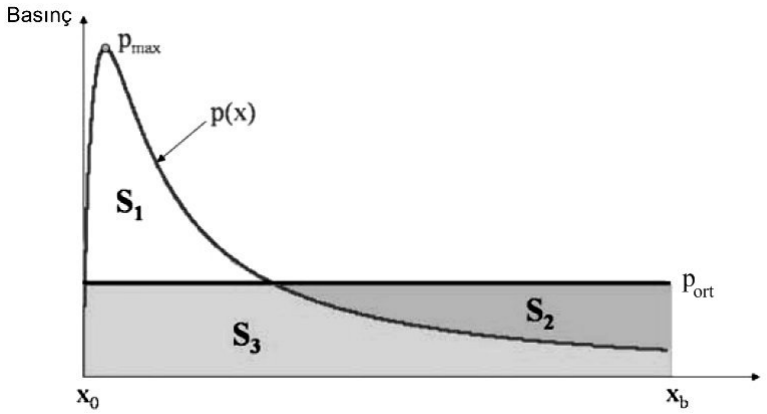
3.2.2. Piezometrik verim

Piezometrik verim, namlu boyunca uniform bir şekilde etkidiğinde, deney sonucu gözlenen namlu çıkış hızını verecek ortalama basıncın, deneyde görülen maksimum basınca oranı şeklinde tanımlanır (3.21) [15,16].

$$\eta_p = \frac{p_{ort}}{p_{\max}} \tag{3.21}$$

Piezometrik verim, bir şekilde p(x) basınç eğrisinin şekli hakkında da fikir verir. Dik eğrilerin düşük, yayvan olanların ise yüksek piezometrik verime sahiptir [17,18].

Şekil 3.11'de deney sonucu çizilen p(x) eğrisi altında kalan alanlar S_1 ve S_3'tür. Aynı namlu çıkış hızını sağlayacak, namlu boyunca uniform etkiyen ortalama basınç eğrisi p_{ort} altında kalan alanlar ise S_2 ve S_3'tür. Aynı namlu çıkış hızının elde edilmesi için S_1 ve S_2 alanlarının toplamının S_2 ve S_3 alanlarının toplamına eşit olması gerekir (3.22).



Şekil 3.11: Piezometrik verimde kullanılan ortalama basınç [14]

$$\int_{x_0}^{x_b} p(x)dx = p_{ort}\left(x_b - x_0\right) \tag{3.21}$$

(3.21) eşitliğinden ortalama basınç çekilerek (3.22) eşitliği elde edilir.

$$p_{ort} = \frac{\int_{x_0}^{x_b} p(x)dx}{\left(x_b - x_0\right)} \tag{3.22}$$

3.2.3. Balistik verim

Balistik verim, merminin silahın namlusunu terk ederken sahip olduğu çıkış kinetik enerjisinin, sevk barutu içinde depolanan kimyasal enerjiye oranı şeklinde tarif edilir [14,15]. Termodinamik verim de denir; η_b ile gösterilir; b alt indisi Fransızca namlu ağzı demek olan "bouche" kelimesinden gelmektedir. Sevk barutunun kimyasal enerjisi (3.1); merminin kinetik enerjisi ise (3.19) denkleminden alınarak balistik verir (3.23)'deki şekilde yazılır.

$$\eta_b = \frac{E_p}{E_k} = \frac{\frac{1}{2} m v_b^2}{\frac{C_0 F}{\gamma - 1}} \tag{3.23}$$

Tablo 3.2'de bazı çok bilinen silah sistemlerinin barut ve mermi özelikleri ile balistik verimleri verilmiştir [14].

Tablo 3.2: Yaygın bilinen bazı silah sistemlerinin sevk barutu ve mermi özellikleri ile balistik verimleri

Silah Sistemi	Sevk Barutu				Mermi			η_b
	Tip	C_0	$F/(\gamma-1)$	E_k	m	v_b	E_p	
7,62mm Tüfek	WC846	3,2 g	4160 J/g	13312 J	9,7 g	833 m/s	3365 J	% 25,3
9mm Tabanca	BP	0,45 g	4000 J/g	1800 J	8,0 g	320 m/s	410 J	%22,8
20mm Top	WC870	39,3 g	4073 J/g	160069 J	101,7 g	1005 m/s	51360 J	%32,1
81mm Havan	M9	0,109 kg	5643 J/g	615,09 kJ	4,08 kg	267 m/s	145,43 kJ	%23,6
120mm Tank	JA2	8,12 kg	5067 J/g	41,144 MJ	7,12 kg	1650 m/s	9,692 MJ	%23,6
155mm Ağır Top	M30A2	11,76 kg	4468 J/g	52,544 MJ	43,54 kg	826 m/s	14,853 MJ	%28,3

3.2.4. Sevk barutunun mermi kütlesine oranı ile verim ilişkisi

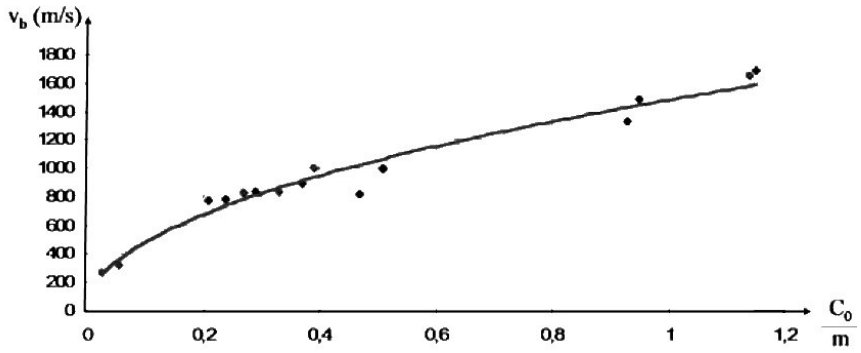
Sevk barutunun kimyasal enerjisinin yalnızca belli bir kısmı kinetik enerji halinde mermiye iletilebilir. Hafif silahlar için balistik verim, içten yanmalı motorlar ile benzer şekilde %20 - %40 arasında değişmektedir.

Tablo 3.3: Bazı silah sistemlerine ait balistik verim, namlu çıkış hızı, sevk barutu ve mermi kütleleri

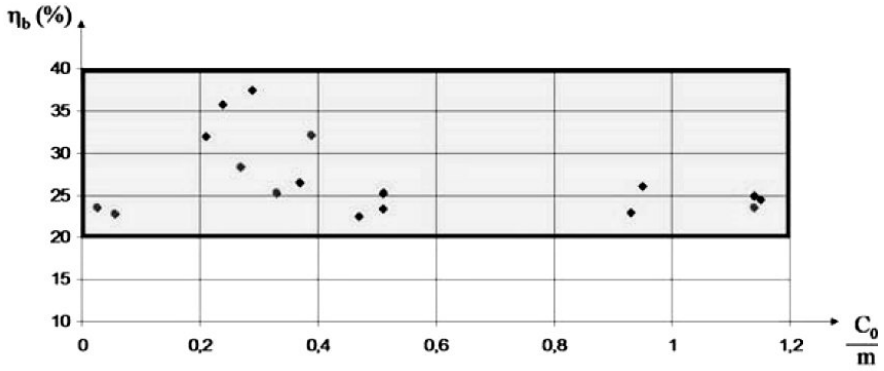
Silah Sistemi	Kalibre (mm)	Mermi Kütlesi m	Sevk Barutu / Mermi Kütlesi C_0/m (%)	Namlu Çıkış Hızı v_b (m/s)	η_b (%)
M16 Tüfek	5,56	3,63 g	51	991	23,4
Ağır makineli tüfek	12,7	40,3 g	37	887	26,5
Bradley M242	25	105 g	93	1329	23,0
Bofors L70 uçaksavar	40	960 g	51	1005	25,3
M60 Patton tankı M68 topu	105	5,87 kg	95	1486	26,0
M1 Abrams tankı M256 topu	120	7,12 kg	114	1650	25,0
Mk-45 / 54 gemi topu	127	31,75 kg	29	839	37,4
ATACS tank topu	140	13,61 kg	15	1686	24,5
M198 sahra ağır topu	155	43,54 kg	27	826	28,2

Enerjinin büyük bir kısmı, sıcak ve yüksek basınçlı yanma gazları içerisinde kalırken, bir kısım kimyasal enerji de ısı transferi, sürtünme, geri tepme ve atalet kuvvetlerine bağlı olarak kaybolur [14-18]. Bu kayıplar enerji dengesi bölümünde ayrıntılı olarak verilmiştir. Tablo 3.3'de bazı silah sistemlerine ait balistik verim, namlu çıkış hızı, sevk barutu ve mermi kütlesi değerleri verilmiştir [14].

Sevk barutu kütlesinin mermi kütlesine oranı (C_0/m) arttıkça, namlu çıkış hızının artmasına karşın (Şekil 3.12) silahın daha az verimli olması ilginçtir. Özellikle C_0/m 0,2 - 0,4 değerleri arasında balistik verim yüksek iken, artan C_0/m değeri ile azalma eğilimindedir (Şekil 3.13) [14].



Şekil 3.12: Sevk barutu kütlesinin mermi kütlesine oranının değişimi ile namlu çıkış hızı ilişkisi [14]



Şekil 3.13: Sevk barutu kütlesinin mermi kütlesine oranının değişimi ile balistik verim ilişkisi [14]

3.3. İç Balistikte Enerji Kayıpları ve Enerji Dengesi

Sevk barutunda depolanan enerjinin yalnızca %20 - %40 kadarı merminin kinetik enerjisine çevrilir. Mermi namluyu terk ederken enerjinin büyük kısmı hala sıcak ve yüksek bir basınçlı olan yanma gazlarının içindedir. Bunun dışında kalan enerji ise kaybolur.

Bu kayıpların doğru hesaplanabilmesi iç balistiğin önemli bir problemi olmaya devam etmektedir. Bu bölümde, enerji kayıplarının şekilleri ve enerji dengesi açıklanmıştır. Her bir kayıp şekli için yaklaşık bir formül sağlanmıştır.

3.3.1. Yanma gazlarının ataleti

Yanma gazlarının kendi ataletinin olmasından kaynaklanan kayıptır. Mermi ile beraber yanma gazları ve henüz yanmakta olan barut granülleri ve diğer partiküller de hareket etmektedirler ve kinetik enerji taşımaktadırlar; bu yüzden yanma gazlarının yaptığı, mermi üzerinde kinetik enerjiye çevrilebilecek olan işin bir kısmı bunlarca kinetik enerji halinde soğurulmaktadır. Yanma gazlarının, yanan barut granüllerinin ve diğer yabancı partiküllerinin kinetik enerjisi E_g ile gösterilir ve yaklaşık olarak (3.24) formülü ile hesap edilir [14-16].

$$E_g \approx \frac{1}{6} C_0 v_p^2 \tag{3.24}$$

Bu denklemde, C_0 ve v_p sırasıyla sevk barutunun kütlesi ve merminin namlu çıkış hızıdır. E_g bir kayıptır. Değeri, sevk barutu kütlesinin mermi kütlesine oranı olan C_0/m arttıkça artar. Bu da C_0/m değeri artıkça balistik verimin düşmesinin temel sebebidir.

$$\frac{E_g}{E_p} = \frac{C_0 v_p^2 / 6}{m v_p^2 / 2} = \frac{1}{3}\frac{C_0}{m} = \lambda_1 C_0 / m \tag{3.25}$$

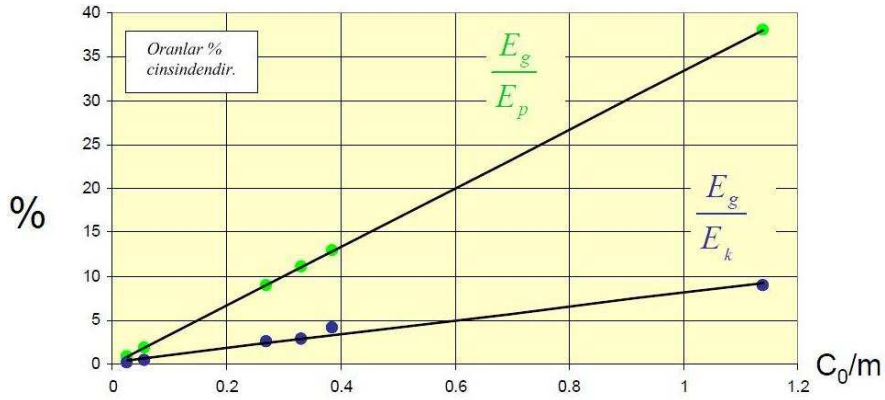
Kaybın büyüklüğü hakkında bir bilgi vermesi için yanma gazlarının kinetik enerjisi (E_g) merminin kinetik enerjisine (E_p) oranlanır (3.25). Eşitlikte C_0/m önünde yer alan 1/3 çarpanı Piobert'in 1. katsayısı olarak bilinir ve λ_1 ile gösterilir [1,15,16].

Tablo 3.4'de bazı silah sistemlerinin mermi ve sevk barutu özellikleri, yanma gazları ataletinin mermi kinetik enerjisine oranı olan kinetik enerji kaybı ve yine yanma gazları ataletinin sevk barutunda depolanan kimyasal enerjiye oranı olan kimyasal enerji kaybı oranları verilmiştir [14].

Tablo 3.4: Örnek silah sistemlerinin mermi ve sevk barutu özellikleri, kinetik enerji kaybı ve kimyasal enerji kaybı oranları

Silah Sistemi	Mermi			Sevk Barutu			Kinetik Kayıp E_g/E_p	Kimyasal Kayıp E_g/E_k
	m	v_p	E_p	C_0	E_g	E_k		
7,62mm Tüfek	9,7 g	833 m/s	3365 J	3,2 g	370 J	13312 J	% 11,0	% 2,8
9mm Tabanca	8,0 g	320 m/s	410 J	0,45 g	7,7 J	1800 J	% 1,9	% 0,4
20mm Top	101,7 g	1005 m/s	51360 J	39,3 g	6616 J	160069 J	% 12,9	% 4,1
81mm Havan	4,08 kg	267 m/s	145,43 kJ	0,109 kg	1295 J	615,09 kJ	% 0,9	% 0,2
120mm Tank	7,12 kg	1650 m/s	9,692 MJ	8,12 kg	3684 kJ	41,144 MJ	% 38,0	% 9,0
155mm Ağır Top	43,54 kg	826 m/s	14,853 MJ	11,76 kg	1337 kJ	52,544 MJ	% 9,0	% 2,5

Şekil 3.14'de sevk barutu kütlesinin mermi kütlesine oranı olan C_0/m değerinin değişmesiyle kinetik enerji kaybı ve kimyasal enerji kayıplarının ne şekilde değiştiği görülmektedir [14].



Şekil 3.14: C_0/m değerinin değişmesiyle kinetik enerji kaybı ve kimyasal enerji kayıplarının değişimi [14]

3.3.2. Isı transferi

Bir fişek ateşlendiğinde, yanma gazları merminin yanı sıra fişek kovanı, mekanizma ve namlunun iç duvarına da temas halindedir. Yanma gazlarının ısı enerjisinin bir bölümü bunlara transfer olur.

Transfer olan bu ısı enerjisi, merminin kinetik enerjisine bir katkıda bulunmaz bu yüzden kayıp olarak değerlendirilir [14-16]. Toplam ısı kaybını hesaplamak zordur. Isının büyük kısmı namlunun iç duvarına transfer olur. Bu yüzden diğer çevre yüzeyler ihmal edilebilir. Sevk barutunun ateşlendiği *t=0* anından belirli bir *t* anına kadar yanma gazlarından çevresine transfer edilen toplam ısı miktarı E_h, teorik olarak (3.26) bağıntısı ile hesaplanır.

$$E_h = \int_0^t A_w h\left(T - T_w\right) dt \tag{3.26}$$

Yukarıdaki bağıntıdan da görüleceği üzere, transfer edilen ısı miktarı; yanma gazlarının sıcaklığı (T) ile namlu iç duvarının sıcaklığı (T_w) arasındaki farka, namlu iç duvarının o an yanma gazları ile temas halinde olan toplam yüzey alanına (A_w) ve ısı transfer katsayısına (h) bağlıdır.

Bu değişkenlerin hepsi zamana bağlıdır. "Islanan Alan" olarak da isimlendirilen A_w namlunun kesit alanı ile merminin namlu içindeki hareketinin çarpılması şeklinde hesaplanabilir. Yanma gazlarının sıcaklığı T, uzaydan bağımsız olarak kabul edilir; yani mekanizma yüzeyi ile mermi tabanı arasında kalan hacmin tümünde gaz sıcaklığının o an için sabit olduğu kabul edilir [14-17]. Zamana bağlı olarak değişen ısı transfer katsayısının hesabı ise diğerlerine göre daha zordur. NATO/PfP STANAG 4367 sayılı standardına göre, zamana bağlı ısı transfer katsayısı h birimi W/(m^2K) cinsinden olmak üzere (3.27) bağıntısı ile hesaplanır.

$$h = h_0 + \lambda \bar{v} \bar{\rho} c_p' \tag{3.27}$$

Yukarıdaki bağıntıda: h_0, hava ile namlu arasındaki serbest konveksiyonla ısı transfer katsayısıdır ve değeri 5 ila 25 W/(m^2K) arasında değişir. λ, boyutsuz Nordheim sürtünme faktörüdür; d silahın metre cinsinden kalibresi (namlu çapı) olup (3.28) ile hesaplanır. c'_p, sabit basınçta özgül ısısı olup J/(kgK) cinsinden ifade edilir. $\bar{v}$, yanma gazlarının ortalama hızıdır ve mermi hızı (v_p) ile geri tepme hızının (v_r) aritmetik ortalaması alınarak bulunur. $\bar{\rho}$, yanma gazlarının kg/m3 cinsinden ortalama yoğunluğu olup (3.28) formülü ile hesaplanır.

$$\bar{\rho} = \frac{C_0 Z}{V_c + A_z \left(x_p - x_0 \right) - \dfrac{C_0 \left(1 - Z \right)}{\rho} - C_0 Z b} \tag{3.28}$$

Yanma gazlarının ortalama yoğunluğunu veren (3.28) formülünde; C_0, Z, V_c, A_z, x_p-x_0, ρ ve b sırasıyla; sevk barutunun kütlesi, yanmış barut kütlesinin sevk barutu kütlesine oranı, atım yatağının hacmi, namlunun kesit alanı, merminin ilk konumuna göre almış olduğu yol, sevk barutunun yoğunluğu ve eş-hacmidir.

Yanma gazlarından çevresine transfer edilen toplam ısı miktarı E_h, hesaplamada kullanılan bir başka formül, yarı-ampirik Thornhill denklemidir (3.29). Denklemde; tüm uzunluk, alan ve hacimler inç tabanında, kütleler libre ve sıcaklıklar Kelvin olmak üzere; d silahın kalibresi, Lz namlu uzunluğu, Vc atım yatağının hacmi, Az namlunun kesit alanı, T_0 barutun patlama sıcaklığı, T_{w0} namlu iç duvarının başlangıçtaki sıcaklığı ve C_0 sevk barutunun kütlesidir.

$$E_h = \frac{0,38 d^{1,5} \left(L_z + \dfrac{V_c}{A_z} \right) \left(T_0 - T_{w0} \right)}{1 + 0,6 \dfrac{d^{2,175}}{C_0^{0,8375}}} \tag{3.29}$$

Tablo 3.5'de bazı silah sistemlerinin namlu ve sevk barutu özellikleri, ısı transferiyle enerji kaybı ve kimyasal enerji kaybı oranları verilmiştir. Isı transferi ile kaybolan enerji miktarları Thornhill yarı-ampirik formülü (3.29) ile hesaplanmıştır [14].

Tablo 3.5: Örnek silah sistemlerinin namlu ve sevk barutu özellikleri, ısı transferiyle enerji kaybı miktarı ve kimyasal enerji kaybı oranları

Silah Sistemi	Namlu				Sevk Barutu			E_h	Kayıp E_h/E_k
	d (inç)	Az ($inç^2$)	Vc ($inç^3$)	Lz (inç)	E_k	C_0 (lb)	T_0 (K)		
7,62mm Tüfek	0,300	0,071	0,189	20,12	13312 J	3,2 g	2860	965 J	% 7,3
9mm Tabanca	0,354	0,099	0,122	3,082	1800 J	0,45 g	2750	39 J	% 2,2
20mm Top	0,787	0,486	2,700	56,69	160069 J	39,3 g	2800	11 kJ	% 6,9
81mm Havan	3,189	7,987	63,001	32,80	615,09 kJ	0,109 kg	3861	12 kJ	% 2,0
120mm Tank	4,724	17,527	594,982	187,09	41,144 MJ	8,12 kg	3410	1,05 MJ	% 2,5
155mm Ağır Top	6,102	29,244	1150,298	198,35	52,544 MJ	11,76 kg	3044	1,25 MJ	% 2,4

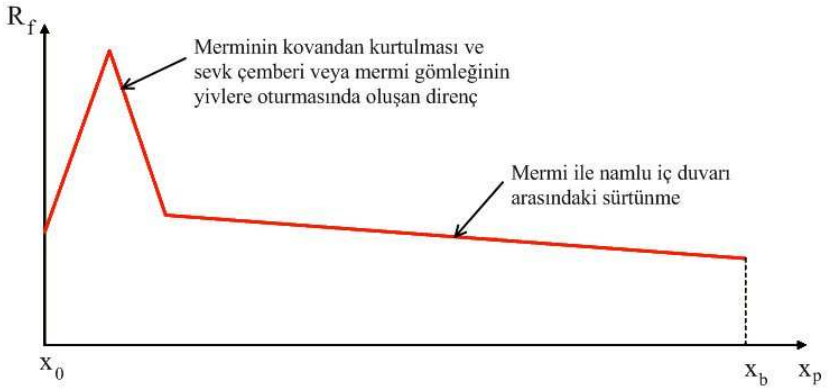
3.3.3. Sürtünme kaynaklı enerji kaybı

Atış başlama basıncına ulaşıldığında, mermi tabanına etkiyen basınç kuvveti, merminin, kovanı ile arasındaki kuvvet bağını koparmasına ve mermi üzerindeki sevk çemberinin veya mermi gömleğinin (eğer namlu yivli-setli ise) namlunun yivlerince oyulmasına yetecek mertebeye varır [19]. Mermi ancak bundan sonra namlu içerisindeki hareketine başlar. Merminin namlu içinde ileriye doğru hareketi süresince de, mermi ile namlu arasındaki sürtünme kuvvetinden dolayı enerji tüketilir. Tüm bu enerji, sevk barutunun kimyasal enerjisinden karşılanır [19,20]. İç balistik verimliliği açısından bakıldığında bu bir kayıp olarak değerlendirilir.

Toplam sürtünme enerjisinin (E_f) hesaplanması zordur. Merminin namlu içerisindeki hareketinin (x_p) bir fonksiyonu olmak üzere, merminin hareketine direnç gösteren sürtünme kuvvetlerinin toplamı şeklinde bir direnç kuvveti (R_f) tanımı yapılmıştır (3.30) [11,14,16].

$$E_f = \int_{x_0}^{x_b} R_f \, dx_p = \int_{x_0}^{x_b} p_f \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) dx_p \tag{3.30}$$

(3.30) bağıntısında direnç kuvvetinin namlu kesit alanına bölünmesi ile sürtünmesel basınç (p_f) tanımı yapılır. Şekil 3.15'de merminin hareketine göre sürtünme kaynaklı direnç kuvvetinin değişimi gösterilmiştir. Grafikte, eğrinin altında kalan alan toplam sürtünmesel enerjiyi verir.



Şekil 3.15: Merminin namlu içerisindeki hareketine göre sürtünme direnç kuvvetinin değişimi [14]

Sürtünmeden dolayı kaybedilen toplam enerjiyi bulmak için (3.30) bağıntısının uygulanması zahmetlidir. Bunun yerine pratikte, merminin kinetik enerjisinin belli bir yüzdesi sürtünme kaybı olarak alınır [6,7]. Buna göre, büyük kalibre ve yivli setli bir namluya sahip silahlarda sürtünme kaybı, merminin kinetik enerjisinin %5'i olarak alınır. Orta ve küçük kalibre yivli setli namlulu silahlarda bu oran %10 olarak alınır. Yiv ve set içermeyen boru namlulu silahlarda ise %2 oranı kullanılır. Tablo 3.6'da bazı silahların mermi kinetik enerjileri, sevk barutu kimyasal enerjileri ile sürtünmesel enerji ve kayıp oranları verilmiştir [14].

Tablo 3.6: Örnek silahların mermi kinetik enerjileri, sevk barutu kimyasal enerjileri ile sürtünmesel enerji ve kayıp oranları

Silah Sistemi	Mermi	Sevk Barutu	E_f	Kayıp E_f / E_k
	E_p	E_k		
7,62mm Tüfek	3365 J	13312 J	337 J	% 2,5
9mm Tabanca	410 J	1800 J	41 J	% 2,3
20mm Top	51360 J	160069 J	5136 J	% 3,2
81mm Havan	145,43 kJ	615,09 kJ	2,91 kJ	% 0,5
120mm Tank	9,692 MJ	41,144 MJ	0,194 MJ	% 0,5
155mm Ağır Top	14,853 MJ	52,544 MJ	0,743 MJ	% 1,4

Mermi namlu içerisinde hızlandıkça önündeki hava sıkıştırılır. Havanın basıncı p_{hv}, (3.31) formülü ile hesaplanır. Formülde, p_a atmosfer basıncını Ma ise Mach sayısını göstermektedir. Mach sayısı, hareket eden cismin hızının (mermi), sesin bulunulan ortamdaki (hava) hızına oranıdır (3.32). v_s ve u sırasıyla cismin ve sesin (bulunulan ortamdaki) hızlarıdır (Hava ortamında ses hızı yaklaşık 340 m/s'dir).

$$p_{hv} = p_a \left(1 + 0,84 Ma^2\right) \tag{3.31}$$

$$Ma = \frac{v_s}{u} \tag{3.32}$$

Çok hızlı mermiler için mermi önündeki hava basıncı atmosfer basıncının yirmi katından fazla olabilir. Örneğin; namlu içinde 1700 m/s hızına ulaşan bir mermi düşünüldüğünde Mach sayısı 5 ve hava basıncının atmosfer basıncına oranı 22 olmaktadır. Buna rağmen hava basıncı p_{hv}, yanma gazlarının basıncı yanında çok düşük kalmaktadır. Yanma gazlarının basıncı, atmosfer basıncının birkaç bin katı olabilmektedir.

İç balistik verimliliği açısından bakılırsa, merminin, önündeki havanın direncini yenmek için sarf ettiği enerji kendi kinetik enerjisinden dolayısıyla sevk barutunun kimyasal enerjisinden harcanmaktadır [14,16]; bu yüzden bu bir kayıp olarak değerlendirilir. Hava direnç kaybı E_{hv} (3.33) bağıntısı ile hesaplanır.

$$E_{hv} = \int_{x_0}^{x_b} p_h \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) dx_p \tag{3.33}$$

Tablo 3.7'de bazı silah sistemlerinin namlu boyu, mermi ilk hızı, sevk barutu kimyasal enerjisi, (3.33) bağıntısı ile hesaplanan hava direnç enerjisi ve enerji kaybı oranları verilmiştir.

Tablo 3.7: Örnek silah sistemlerinin namlu boyu, mermi ilk hızı, sevk barutu kimyasal enerjisi, hava direnç enerjisi ve enerji kaybı oranları

Silah Sistemi	Namlu Boyu	Mermi İlk Hızı v_p	Sevk Barutu Kimyasal Enerjisi E_k	E_{hv}	Kayıp E_{hv}/E_k
7,62mm Tüfek	52 cm	833 m/s	13312 J	14 J	% 0,1
9mm Tabanca	8 cm	320 m/s	1800 J	0,9 J	% 0,05
20mm Top	144 cm	1005 m/s	160069 J	382 J	% 0,2
81mm Havan	83 cm	267 m/s	615,09 kJ	0,658 kJ	% 0,1
120mm Tank	4,75 m	1650 m/s	41,144 MJ	0,113 MJ	% 0,3
155mm Ağır Top	5,04 m	826 m/s	52,544 MJ	0,057 MJ	% 0,1

3.3.4. Geri tepme enerjisi

Geri tepme, bir silah ateşlendiğinde verdiği tepkidir. Bu tepki, merminin ileri doğru olan momentumunu dengeleyen silahın geriye doğru momentumundan kaynaklanır. Newton'un ikinci yasası uyarınca, silahın geriye doğru momentumunun zamana göre türevi geri tepme kuvvetini verir. Momentumun ifadesi ise, m_R ve v_R sırasıyla geri tepen kütle ve geri tepme hızı olmak üzere geri tepen kütlenin momentumu kütlesi ile hızının çarpımıdır (3.34).

$$M_R = m_R v_R \tag{3.34}$$

Geri tepme enerjisi E_R ise geri tepen (silahın tümü veya sadece geriye hareketlenen parçaları) kütlenin kinetik enerjisidir (3.35). Bu enerji de balistik verim açısından kayıp olarak değerlendirilir.

$$E_R = \frac{1}{2} m_R v_R^2 \tag{3.35}$$

Momentumun korunumu ilkesinden yararlanılarak geri tepme hızı bulunabilir. İleri doğru momentumlar; m kütlesi ve v_p hızı ile ileriye doğru hareket eden mermi, C_0xZ (sevk barutunun kütlesi çarpı yanan kütle oranı) kütlesi ve $v_p/2$ ortalama hızında ileri doğru (diğer yön mekanizma tarafından kapatılmıştır) hareket eden yanma gazlarıdır. Geriye doğru momentum ise geri tepen kütle m_R ve geri tepme hızı v_R'dir. İleri doğru olan momentumlar geriye doğru olana eşitlenir ve v_R çekilerek geri tepme hızı bulunur (3.36). Bulunan v_R değeri (3.35) formülünde yerine konularak E_R geri tepme enerjisi elde edilir [14].

$$v_R = \frac{\left(m + C_0 Z/2\right)}{m_R} v_p \tag{3.36}$$

Geri tepme enerjisi, sevk barutunun kimyasal enerjisinin sadece %0,5 - %1,5'u kadardır [6,7]. Balistik verimlilik açısından bir kayıp olarak görülse de bir başka açıdan yaralı bir kayıptır; çünkü geri tepme olayı yarı-otomatik ve otomatik silahların çalışma ilkelerinin temellerinden birisidir.

3.3.5. Rotasyonel kinetik enerji

Yivli-setli bir namludan atılan bir mermi çizgisel kinetik enerjinin (E_p) yanında rotasyonel kinetik enerji de (E_w) kazanır. Mermiye geçen enerjinin bir kısmı dönmesi (spin) için harcanacağından rotasyonel kinetik enerji de balistik verimlilik açısından bir kayıp olarak değerlendirilir. Öte yandan merminin bu dönme hareketi uçuşunun stabil olması için gereklidir. Genellikle mermilerin rotasyonel kinetik enerjileri sevk barutunun kimyasal enerjisinin %0,5'i kadardır [10,21].

$$E_w = \frac{1}{2} I_a \omega_a^2 \tag{3.37}$$

Bir merminin rotasyonel kinetik enerjisi (3.37) formülü ile hesaplanır. I_a ve w_a sırasıyla dönme atalet momenti ve açısal hızdır. Rotasyonel kinetik enerjinin çizgisel kinetik enerjiye oranı çok düşük olduğundan, genellikle, bir merminin taşıdığı toplam kinetik enerji olarak yalnızca çizgisel kinetik enerjisi alınır.

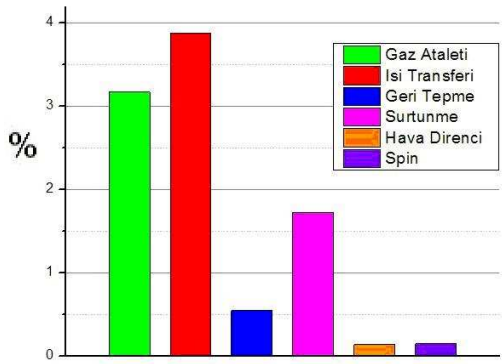
3.3.6. Enerji dengesi

İç balistikte enerji kayıp tipleri belirlendikten sonra; toplam enerji kaybı, mermiye aktarılan enerji miktarı ve yanma gazları içerisinde kalan enerji miktarı yazılabilir. Yine, Tablo 3.4, Tablo 3.5, Tablo 3.6 ve Tablo 3.7'de verilen örnek silah tipleri için bir enerji dengesi tablosu aşağıda verilmiştir (Tablo 3.8).

Tablo 3.8: Örnek silah tipleri için iç balistik enerji kayıpları, mermiye aktarılan ve yanma gazları içerisinde kalan enerjilerin miktarları

Silah	E_g/E_k	E_h/E_k	E_R/E_k	E_f/E_k	E_{hv}/E_k	E_w/E_k	Toplam Enerji Kaybı	E_p/E_k	Gazda Kalan Enerji
7,62mm Tüfek	% 2,8	% 7,3	% 0,5	% 2,5	% 0,1	% 0,1	% 13,3	% 25,3	% 61,4
9mm Tabanca	% 0,4	% 2,2	% 0,5	% 2,3	% 0,05	% 0,1	% 5,6	% 22,8	% 71,6
20mm Top	% 4,1	% 6,9	% 0,5	% 3,2	% 0,2	% 0,3	% 15,2	% 32,1	% 52,7
81mm Havan	% 0,2	% 2,0	% 0,0	% 0,5	% 0,1	% 0,0	% 2,8	% 23,6	% 73,6
120mm Tank	% 9,0	% 2,5	% 0,5	% 0,5	% 0,3	% 0,0	% 12,8	% 23,6	% 63,6
155mm Ağır Top	% 2,5	% 2,4	% 1,3	% 1,4	% 0,1	% 0,4	% 8,1	% 28,3	% 63,6

Enerji kayıplarının büyüklükleri yönünden karşılaştırılması Şekil 3.16'da yapılmıştır. Her bir kaybın büyüklüğü, Tablo 3.8'de verilen örnek silah sistemlerinin ilgili enerji kaybının ortalaması alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.16: İç balistikte enerji kayıplarının, büyüklükleri yönünden karşılaştırılması

Sonuç olarak, örnek silah tipleri için, balistik verim %20 - %30 arasındadır. Toplam enerji kaybı %5 - %20 arasındadır. Enerji kayıplarında en büyük kayıplar; yanma gazlarının hareketi, ısı transferi ve sürtünme kaynaklı olan kayıplardır. Kimyasal enerjinin %55 - %75 arasında olan en büyük kısmı yanma gazları içerisinde kalmaktadır.

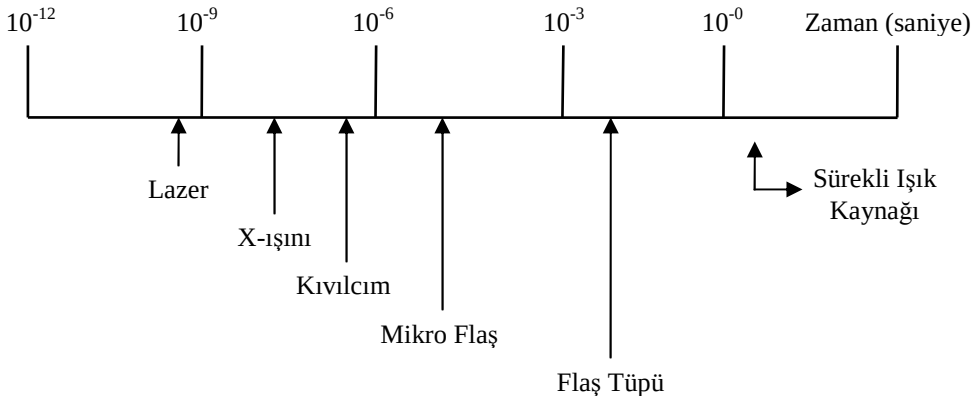
Daha uzun bir namlu kullanılarak, yanma gazları içinde kalan enerjinin bir kısmından daha, mermiyi itmek ve daha yüksek bir çıkış hızı elde etmek üzere istifade edilebilir. Diğer taraftan bu kez sürtünme kayıpları yükselir. Belli bir namlu boyundan daha uzun boylarda mermi çıkış hızı düşme eğilimine girer.

4. BALİSTİK TEST VE ENSTRÜMENTASYON

Balistik fenomenlerin tümü çok yüksek hızlarda meydana gelir ve çok sayıda karmaşık etkileşimler oluşur. Balistik fenomenin analizi için bu işe özel tasarlanmış ekipmanların kullanmasına ihtiyaç vardır. Bu bölümde değinilen konular: Değişik hızlarda kameralar ile görüntüleme, merminin ivmesi, hızı ve yörüngesinin tayini, namlu içi basıncın tayini için kullanılan ekipmanların kısa tanımları.

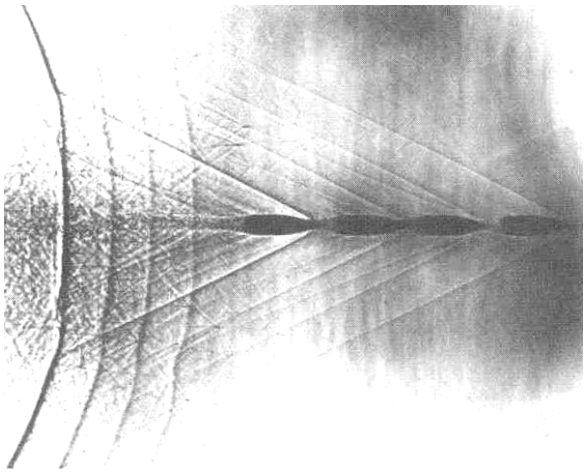
4.1. Balistikte Yüksek Hızlı Görüntüleme

Yüksek hızlı fotoğraflama ve videoya alma balistiğin tüm dallarında direkt olarak kullanılır. Balistiğin tüm olayları çok kısa bir zaman aralığında başlayıp biter. Net resimler elde etmek için poz süreleri de haliyle çok kısadır. Takip edilen nesnenin hızı artıkça, poz süresi kısaltılmalı ve aydınlatma arttırılmalı veya suni bir şekilde elektronik olarak iyileştirilmelidir. Genelde bir fotoğraflama sistemi şu temel bileşenleri içerir: Işık kaynağı, optikler, perde (obtüratör) ve görüntünün kaydedildiği (film, teyp, disk vb.) bir ortam. Fotoğraflama sisteminin seçimi izlenen olayın süresine doğrudan bağlıdır. En çok kullanılan aydınlatma kaynaklarının süreleri Şekil 4,1'de verilmiştir.



Şekil 4.1: Değişik aydınlatma kaynakları için zaman ölçeği

Örneğin, 840 m/s hızla ilerleyen 7.62 mm bir mermi 1mm mesafeyi $1{,}2x10^{-6}$ saniyede alır. Böyle bir hareketi dondurmak, bundan daha kısa sürede gerçekleşen yani daha hızlı bir aydınlatma kaynağını gerektirir. Bunun için kıvılcım kullanılır. Eğer, tipik süresi 10^{-5} olan bir mikro flaş sistemi kullanılırsa, mermi bulanık olur. Eğer fotoğraflamak yerine olay videoya alınmak istenirse bu durumda hızlı perdeli filmli veya dijital bir kamera ile birlikte sürekli bir ışık kaynağı kullanılmalıdır. Veya az sayıda resim, sıralı çakan çoklu kıvılcımlar veya flaşlar kullanılmak suretiyle aynı film karesi üzerine kayıt edilebilir (Şekil 4.2) [1].

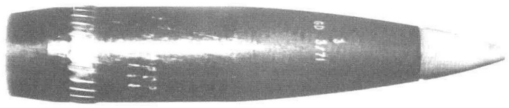


Şekil 4.2: Çoklu kıvılcımla tek bir film karesi üzerine çekilmiş bir fotoğraf [1]

4.1.1. Mikro flaş fotoğraflama

Bu sistemde, argon veya ksenon gazı ile dolu bir tüpten yüksek voltaj geçirildiğinde salıverilen ve bir kaç mikro saniye süren yoğun bir flaş, ışık kaynağı olarak kullanılır. Bu flaş, örneğin Şekil 4.3'de gösterildiği gibi çok hızlı hareket eden bir nesnenin keskin bir fotoğrafının elde edilmesi için gerekli aydınlatma ve kısa poz süresini mümkün kılar [1].

Çoğu zaman bu teknik, sadece ses altı hızlarda ilerleyen mermiler için elverişlidir. Mikro flaşla fotoğraflamanın, merminin uçuşu sırasında olabilecek düzensizlikleri gözleme veya ateşleme sırasında ortaya çıkabilecek hasarları çalışma gibi uygulamaları mevcuttur. Belli bir olayın bir seri fotoğrafı çoklu flaşlar kullanılarak elde edilebilir.

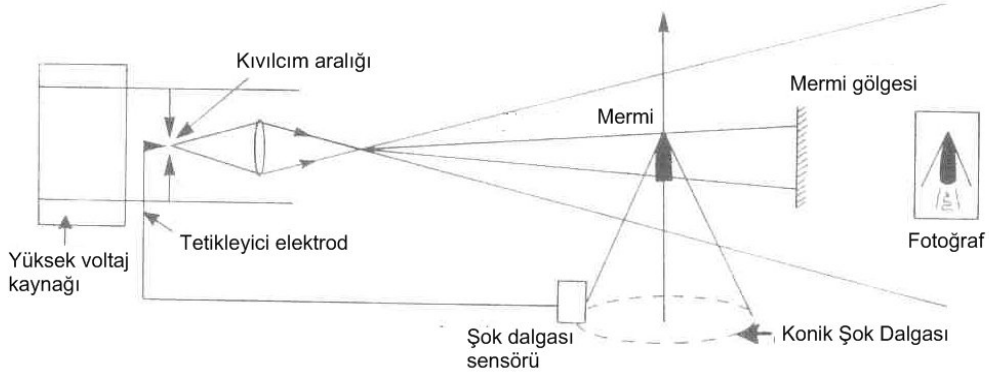


Şekil 4.3: 105mm bir merminin mikro flaşla çekilmiş bir fotoğrafı [1]

Mikro flaş, aynı zamanda mermilerinin spinlerini ölçmek için de kullanılabilir. Bunun için merminin üzerine boylamasına çizgiler boyanır, merminin uçuş yönüne dik iki adet mikro flaş belli bir aralık bırakılarak yan yana konumlandırılır ve mermi fotoğraflanır. İki flaşın çakma anları arasında geçen süre deneyi yapan kişi tarafından ayarlandığından bilinmektedir. Elde edilen fotoğraftaki iki mermi görüntüsünden boya çizgileri karşılaştırılarak dönüşün miktarı elde edilir. Böylece spin hızı yani merminin kendi etrafında saniyede attığı tam tur sayısı bulunur.

4.1.2. Kıvılcım fotoğraflama

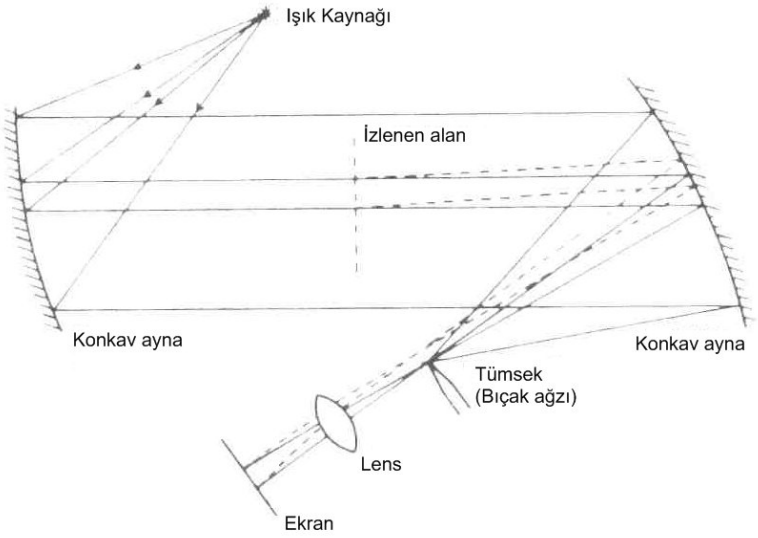
Kıvılcım kullanmak, balistik fotoğraflamada bilinen en eski aydınlatma şeklidir ve popülaritesi ve kullanımı hala devam etmektedir. Bu metodun avantajı kuşkusuz 0,5 mikro saniye gibi çok kısa olan poz süresidir [1]. Kıvılcım argon gibi bir gaz içerisinden yüksek voltaj geçirerek elde edilir. Kıvılcım düzeneği, merminin fotoğraf makinesi veya kameranın olduğu tarafının tam karşısına konumlandırılır. Kıvılcım çaktığında, salınan ışık, kaydedici ortam olan film veya görüntü sensörüne ulaşır. Arada, ışığın bir kısmı mermi üzerine düşüp yansıyacağından, kaydedici ortam üzerine merminin gölgesi düşer. Böylece görüntüleme yapılmış olur (Şekil 4.4).



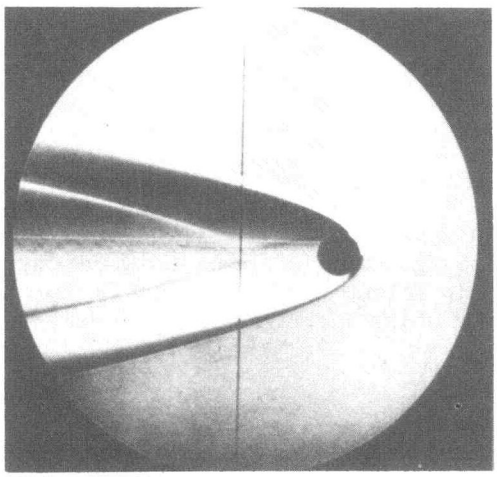
Şekil 4.4: Kıvılcımla fotoğraflama için deney düzeneği [1]

4.1.3. Schlieren görüntüleme

Schlieren tekniği izlenen bir alandaki yoğunluk değişimlerini tespit etmede kullanılır. Küçük bir ışık kaynağından yayılan ve konkav aynalardan yansıyan ışığın tümü bir tümsek üzerine odaklamıştır. Yalnızca izlenen alandaki ortamın (genelde hava) basınç dağılımına göre kırılmış olan ışık, bu tümsekten geçer ve bir lens vasıtası ile fotoğraf filmi üzerine odaklanır (Şekil 4.5). Şekil 4.6'da yüksek hızda hareket eden bir bilyenin Schlieren tekniği kullanılarak çekilmiş fotoğrafı görünmektedir [1].



Şekil 4.5: Sclieren görüntüleme için deney düzeneği [1]



Şekil 4.6: Bir bilyenin Schlieren fotoğrafı [1]

4.1.4. Yüksek hızlı sinema fotoğraflama

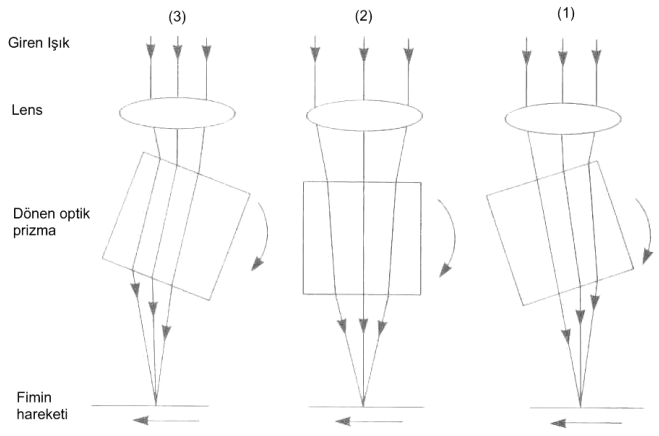
Yüksek hızlı sinema fotoğraflama yapabilen kameralar saniye başına kayıt edebildiği resim sayısına göre üç tipte incelenebilir.

4.1.4.1. Düşük hızlı sinema

Düşük hızlı sinema: Saniyede 16 – 40 resim kaydedebilen konvansiyonel sinema kameralar kullanılır. Film şeridindeki her bir kare pozlanırken film durdurulur. Filmin yavaş oynatılması ile zaman ölçeği uzatılabilir ve kayıt edilen olay ağır çekimde izlenebilir. Görüntü keskindir.

4.1.4.2. Orta hızlı sinema

Orta hızlı sinema: 16mm filme saniyede 1000/10.000 kare kayıt yapabilen kameralar kullanılır. Çeyrek resim yöntemi ile bir film karesine iki görüntü alınarak saniyede 20.000 kare hıza çıkılabilir. Bu kameralar, çok kullanışlıdır ve muhtemelen balistik testlerde en çok kullanılan kameralardır. Film kameranın içinden durmaksızın akmaktadır. Film şeridinin bu hareketi dolayısıyla oluşacak resim bulanıklığını önlemek için lens ile film arasına bir optik kompansatör konulmuştur (Şekil 4.7). Görüntü, konvansiyonel kameralarda olduğu kadar kaliteli değildir. Saniyede 10.000 kare ile 30 m'lik standart bir film şeridi kamera içinde 273 km/h hıza ulaşır ve üç saniyeden kısa bir sürede biter. Bu yüzden kameranın tetiklenme zamanı önemlidir.

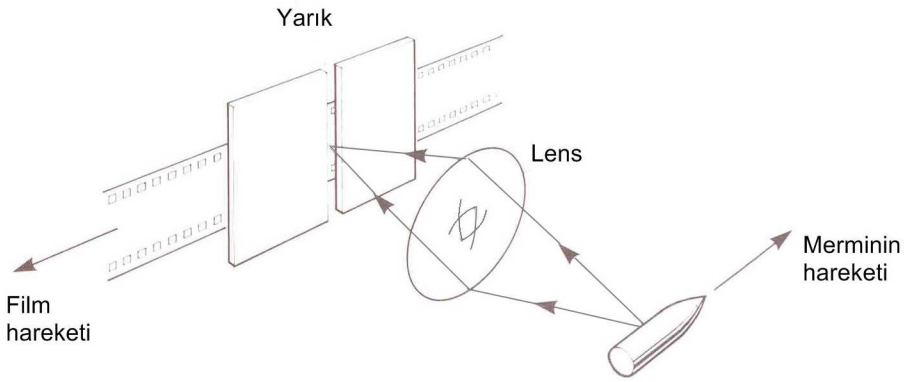


Şekil 4.7: Dönen bir optik prizma ile film hareketinin kompanzasyonu [1]

Orta hızlı sinema kameraları kullanılırken yüksek yoğunluklu ışık kaynaklarına gereksinim vardır. Çoğu uygulamada en uygun seçim photoflood lambalar olur. Bu lambaların her biri ortalama 750 – 1000 watt gücündedir. Işığın nesne üzerine yoğunlaşması için kendi üzerlerinde reflektörlerle gelirler.

Bu kameralarla kullanılan daha karmaşık bir aydınlatma sitemi ise senkron flaş veya stroboskopik aydınlatmadır. Bir gaz deşarj tüpü sayesinde yüksek yoğunluklu ve sürekli tekrarlayan flaş elde edilir. Bu flaşın fasılası kameradan akan film şeridinin hızlı ile senkronize edilirse, lensin arkasına tam bir film karesinin geldiği her seferinde bir flaş çakar. Bu sistem, photoflood lambalardan daha yoğun bir ışık vermektedir.

Senkron flaş ile "Balistik Senkron" metodunu uygulamak mümkündür. Şekil 4.8'de şeması gösterilen balistik senkron, dönen optik prizmalı kompanzatöre ihtiyaç duymaz. Orta hızlı kameralarla görüntüleme için çok güçlü bir metottur. Bu metotla, merminin önden ışıklandırılmış kaliteli fotoğraflarını elde etmek mümkündür. Bu fotoğraflar ile merminin durumu, yalpalaması ve spin hızı çalışılabilir.

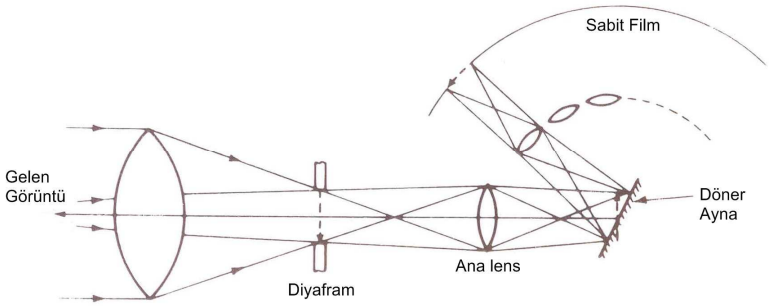


Şekil 4.8: Balistik senkron metodunun şematiği [1]

4.1.4.3. Yüksek hızlı sinema

Belirli bir ivmelenme hızının üstünde film şeridi mekanik olarak yeterli gelmemekte, bu yüzden yüksek kareleme hızları alternatif metotlarla elde edilmektedir. Bu metotların birçoğunda film sabit durmakta ve resimler film kareleri üzerine dönen aynalar ve prizmalar vasıtsıyla "süpürülmektedir" [1].

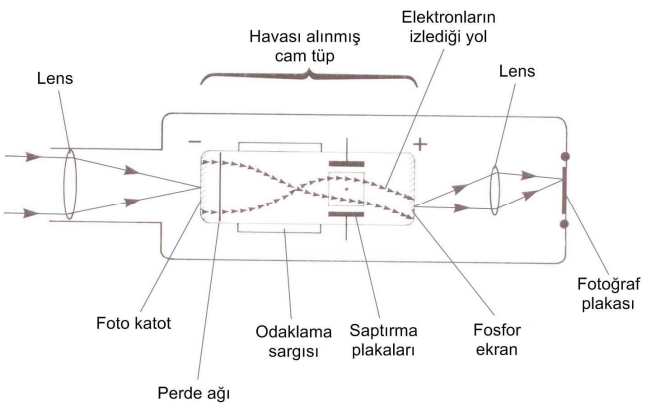
Şekil 4.9'da böyle bir kameranın çalışma ilkesi görülmektedir. Bu kameralar saniyede bir kaç milyon resim hızlarına çıkabilecek kapasitededirler. Deney öznesini aydınlatmak için çok miktarda ışığa gereksinim vardır. Film uzunluğu başına kısıtlı miktarda film karesinin olması da bir diğer sorundur. Ayrıca, gözlenmek istenen olay ile ayna konumunun senkronizasyonunda da problem çıkabilir.



Şekil 4.9: Sabit filmli, döner aynalı yüksek hızlı kamera ilkesi [1]

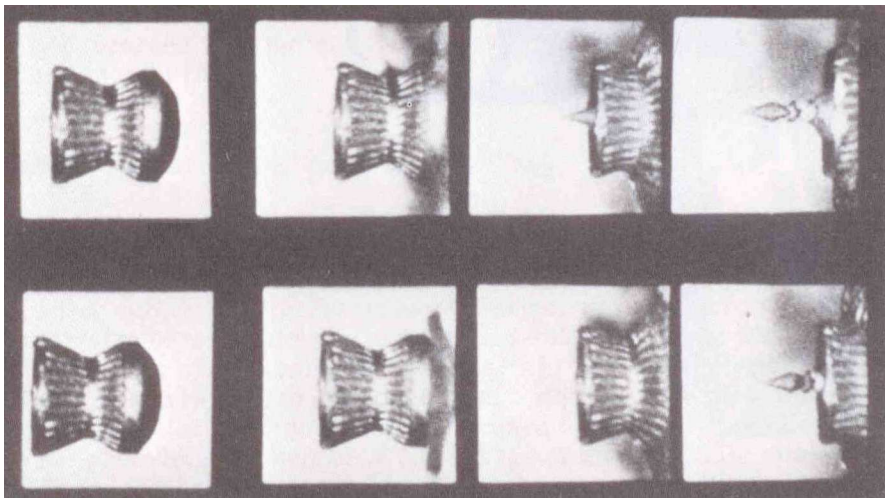
4.1.5. Resim dönüştürücü kamera

Resim dönüştürücü kameraların iki temel avantajı vardır: Elektronik olarak gözlenen bir olayın parlaklığı arttırabilirler ve bunun sonucu olarak sıradan film üzerine çok kısa pozlu resimler verebilirler. Tipik bir resim dönüştürücü kameranın kareleme hızı saniyede 10.000 ila $2x10^7$ kare olabilir. Maksimum hızda, bir karenin pozlama süresi 10 nano saniyeye kadar kısalabilir [1]. Şekil 4.10, böyle bir kameranın içyapısını göstermektedir.



Şekil 4.10: Bir resim dönüştürücü kameranın şematiği [1]

Resim dönüştürücü kameralarda, resim bir foto katot üzerine düşürülür. Buradan uyarılan elektron ışını ise fosfor bir ekran üzerine odaklanır. Cihazın içinden geçerken resmin orijinal parlaklığı, konvansiyonel bir kameranın fosfor ekrandan alabileceği mertebeye kadar iyileştirilir. Elektronik kontrol ile görüntüyü taşıyan elektronlar kesintiye uğratılabilir ve fosfor ekranın istenen bir bölgesine taranabilir; böylece aynı film karesine birden fazla sıralı görüntü kaydedilebilir. Şekil 4.11'de böyle çekilmiş bir fotoğraf yer almaktadır. Saniyede 100.000 karelik bir hızla çekilmiştir.



Şekil 4.11: Resim dönüştürücü ile çekilmiş bir kurşunun sıralı fotoğrafları [1]

4.1.6. Flaş radyografi

Bazı balistik uygulamalarda uygun bir resmin elde edilebilmesi için tek yol X-ışınları kullanmak olabilir; örneğin atış anında bir tabancanın içerisin durumu veya hedefe saplanan bir merminin hedef içerisindeki ilerleyişi gibi. X-ışını ile fotoğraflamada kullanılan dalga uzunlukları bir mikro saniyede 10^{-4} ila 10^{-1} nano-metre arasında değişir.

İlk başlarda yalnızca tek fotoğraflar elde edilebilirken yapılan geliştirmeler sonucunda bugün saniyede 150 – 200 kare hıza ulaşmak mümkündür. Tek bir film üzerine beş adede kadar resim kaydedilebilir fakat bu kaliteyi düşürür. Bunun yerine sürekli filme yüksek kare hızlarında kayıt yapmak daha yaygındır.



Şekil 4.12: 45cal. bir tabancanın ateşleme anının X-ışını radyografisi [1]

Şekil 4.12' deki gibi bir tabancanın iç fonksiyonlarının radyografisi yüksek enerjili ışınlar gerektirir. Radyografi ile yapılabilecek gözlemler, merminin namlu içindeki hareketinin zamana göre değişimi, ateşleme sırasında tabancanın iç parçalarının davranışları olarak sayılabilir. Namludan çıktıktan sonra merminin takibi bu yöntemle çok zordur: çok miktarda ışın gerekir. Bu yüzden bu yöntem merminin namlu ağzı ile hedef arasındaki seyahatinin gözlenmesi için uygun değildir [1]. Fakat merminin hedefe girdikten sonra hedef içerisindeki hareketinin gözlenmesi için kullanılabilir.

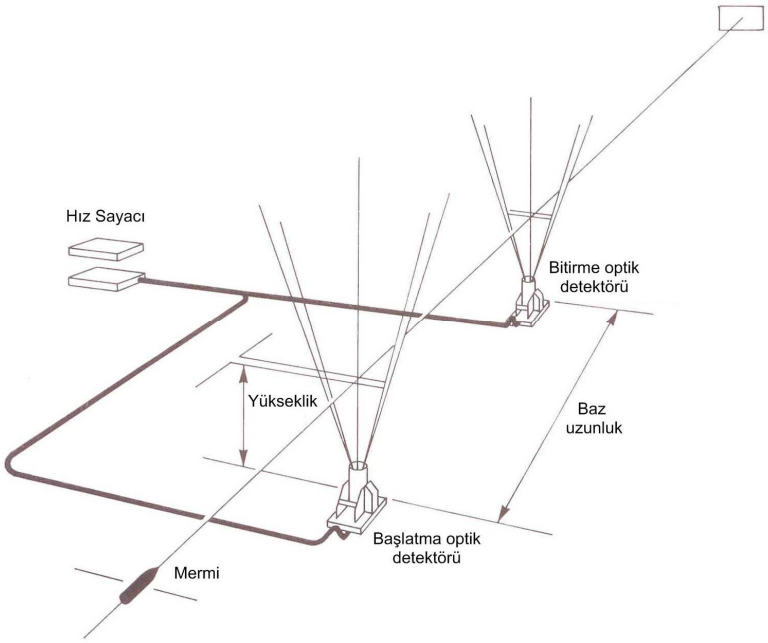
4.2. Dış Balistik Ölçümleri

Bu bölümde dış balistik ölçümlerinde yaygın olarak kullanılan ölçüm ekipman tipleri tanıtılmıştır. Dış balistikte genellikle ilgilenilen konular; merminin yer değişimi, hızı, zamana göre hızında meydana gelen düşüş, merminin sapması ve spin hızıdır.

4.2.1. Foto - detektör sayaç - kronometre

Foto - detektör sayaç - kronometre (FSK), bilinen bir mesafede merminin yörüngesini hassas bir şekilde zamanlayarak, merminin hızını ölçen optik - elektronik bir ekipmandır. İki adet ışığa duyarlı detektör ve hızı hesaplayan bir sayaçtan meydana gelir. Detektörler, bir yükselticiye bağlı lens, yarık veya foto-diyot kullanmaktadır. Detektör üzerindeki ışığı sürekli olarak ölçmektedir. Üzerinden bir cisim geçtiğinde algılanan ışık miktarında ani bir düşüşle sayacı tetikler. İkinci detektör de aynı şekilde üzerinden geçen cisimle sayacı tetikler: Sayaç iki

detektörden aldığı sinyaller arasındaki zaman farkını hesaplar: Birinciden gelen tetikleme ile kronometreyi başlatır; ikinciden gelenle durdurur. Detektörler arası mesafe belli ve kalibrelidir. Böylece sayaç, belirli olan mesafe ve zaman büyüklüklerini oranlayarak hızı hesaplar



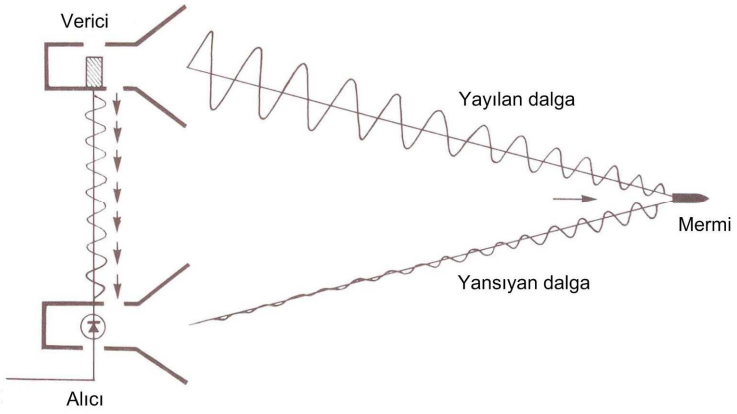
Şekil 4.13: Foto - detektör sayaç - kronometre ekipmanı [1]

Şekil 4.13, bir FSK siteminin kurulum şemasını göstermektedir [1]. Uzun sahalarda, bilinen aralıklarla ardı ardına birçok foto - detektör kurulabilir. Merminin, her bir detektöre ulaşma zamanları kaydedilip bir bilgisayara yüklenerek saha boyunca merminin hızının zamana bağlı olarak azalışı grafik olarak elde edilebilir.

4.2.2. Radyo doppler (Doppler radarı)

Eğer bir radyo vericisi kendisinden direkt olarak uzaklaşmakta olan bir mermiye doğru sürekli dalga yaymakta ise merminin tabanı radyasyonun bir kısmını geri yansıtacaktır. Dönen sinyal vericinin yakınına yerleştirilmiş bir alıcı tarafından toplanabilir. Eğer bu alıcı aynı zamanda vericiden de beslenirse, birini kaynaktan ve birini mermiden almak üzere birbirine girişim yapan iki dalga setini simültane olarak algılayacaktır.

Alıcı, merminin yörüngesi boyunca iki dalganın da aynı fazda belli pozisyonları algılar. Bu dalgalar aynı fazda olduklarından birbirlerini güçlendirirler ve maksimum sinyal alınır. Yine alıcı bazı ara noktalarda, aralarında faz farkı olan iki dalga algılayacaktır. Dalgalar girişim yapacağından buralarda, sinyal minimuma doğru gidecektir. Sonuç olarak alıcı, mermi vericiden uzaklaştıkça bir sıra maksimum ve minimum sinyaller algılayacaktır. Radyo dopplerin çalışma ilkesi Şekil 4.14'de yer almaktadır [1].



Şekil 4.14: Radyo dopplerin çalışma ilkesi [1]

İki maksimum sinyal arasındaki geçen zaman; Δ , sinyalin dalga boyu λ , ve merminin hızı V olmak üzere bunlar arasında şöyle bir bağıntı vardır:

$$\Delta = \lambda / 2V \tag{4.1}$$

Yukarıdaki bağıntı, saniyede gerçekleşen maksimum sinyal sayısı f_D: doppler frekansı olmak üzere şöyle de yazılabilir:

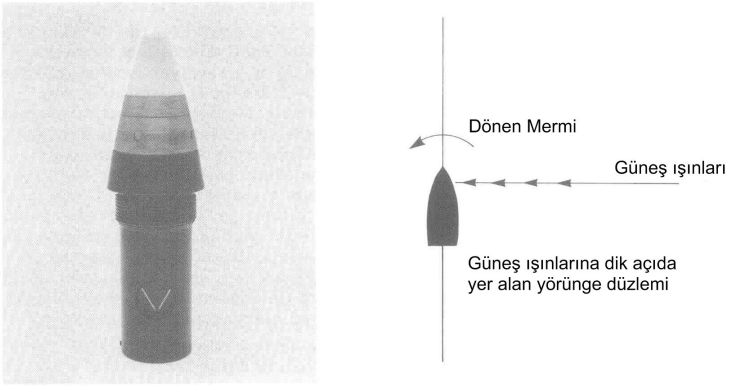
$$f_D = 2V / \lambda \tag{4.2}$$

Ticari olarak satılan birçok doppler radarı aynı zamanda merminin hızında meydana gelen düşüşün zamana bağlı değişimini verebilecek donanım ve yazılıma da sahiptir. Doppler radarları, Bölüm 4.2.1' de anlatılan FSK sistemlerine göre bazı üstünlüklere sahiptirler.

Doppler radarları sis veya yüksek nem gibi kötü hava koşullarından etkilenmezler. Silahın ön tarafına kurulacak çok sayıda aparata ve ara kablolara ihtiyaç duymazlar. Basitçe dezavantajlı sayılabileceği tek alan düşük kalibrede mermiler izlenirken mermi tabanından yansıyan sinyalin yeterince yüksek olmamasıdır.

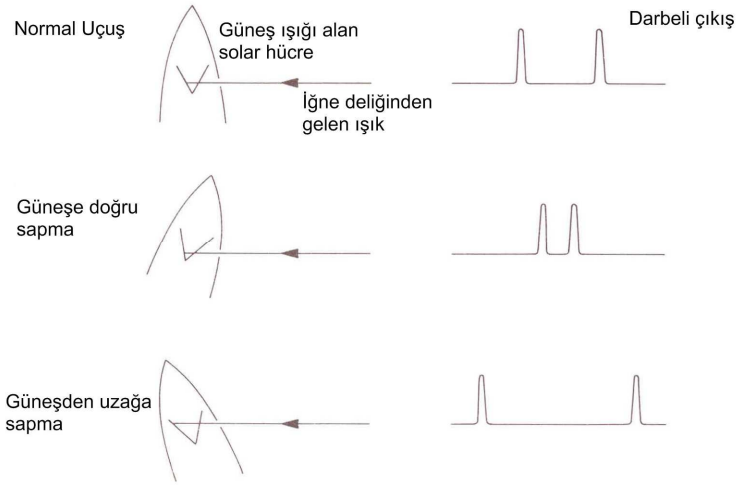
4.2.3. Sapma sondası

Sapma sondası, günümüzde, her atış açısında ve merminin yörüngesinde serbest uçuşu boyunca sapma ve spin davranışının ölçümü için mevcut olan yegane tatmin edici ekipmandır [1]. Sonda temelde, bir iğne deliğinden geçen güneş ışını ile periyodik olarak aydınlatılan solar bir hücre tarafından frekansı modüle edilen minyatür bir radyo vericisidir. Solar hücre V şeklindedir ve merminin eksenine paralel olarak yerleştirilmiştir (Şekil 4.15). Sonda, mermi gömleğinde açılan iğne deliği, bu V şeklinin üzerine gelecek şekilde mermide açılan yuvaya yerleştirilir. Sondanın ucu bir merminin burnu ile aynıdır. Ekipman aynı zamanda ateşleme anında maruz kalınan 30.000 G'lik kuvvete karşı mukavim bir biçimde imal edilmiştir.



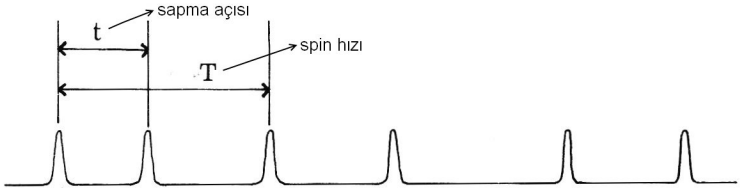
Şekil 4.15: Sapma sondası ve sağında çalışma ilkesi [1]

Mermi, mümkün olduğunca güneşin ışınları ile dik açı yapacak bir düzlemde ateşlenmelidir. Uçuş sırasında, mermi dönerken, güneşin ışınları iğne deliğinden geçerek V şekilli solar hücrenin önce bir kolundan sonra diğer kolundan geçerek hücre yüzeyini süpürür. Güneşin ışınlarının V hücresinin kollarını süpürdüğü bu pozisyon mermi ekseni ve güneşin konumuma bağlıdır.



Şekil 4.16: V şekilli solar hücrenin çalışma ilkesi [1]

Sondadan veri iletimi, ateşlemeden yaklaşık 0,4 saniye sonra başlar ve yerdeki bir alıcı tarafından toplanır. Çıkış verisi bir katar halinde devam eden darbe çiftleri şeklinde grafik üzerinde gösterilebilir (Şekil 4.17). Devam eden darbe çiftleri arasındaki süre spin hızını belirler. Bir darbe çiftinin tepeleri arasındaki süre ise sapma açısını verir.

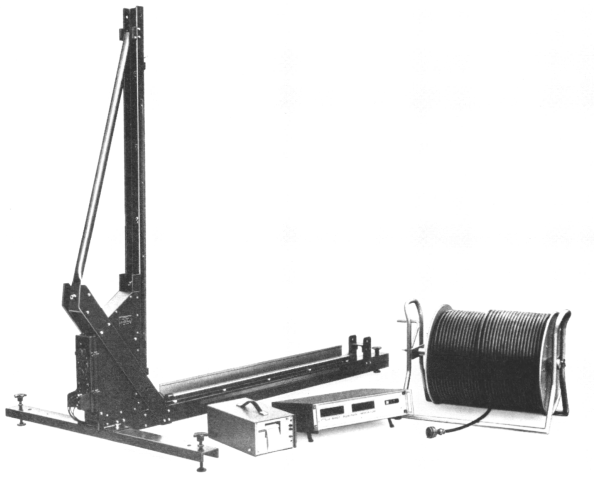


Şekil 4.17: V hücresi darbe kaydının grafiği [1]

4.2.4. Elektronik hedef (Vuruş noktası belirleyici)

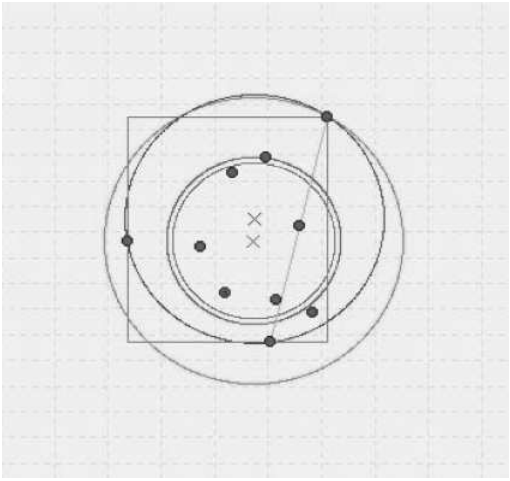
Vuruş noktası belirleyici ekipman, süpersonik hızda ilerleyen bir mermi sensör düzleminden geçerken X ve Y koordinatlarını otomatik olarak kaydeden bir elektronik hedeftir. Bu sistemler tek bir atımın koordinatlarını ölçmek için kullanılabileceği gibi otomatik atışta birden fazla merminin koordinatlarını ölçmek için de kullanılabilir. Merminin koordinatları, merminin önünde seyreden ve genişleyen çember şeklinde çevreye yayılan şok dalgasının, birbirine dik

yerleştirilmiş ve üzerinde sensörler bulunan iki çubuğa çarpması ile bulunur. Basit bir elektronik hedef Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Mermi, hedef düzleminin normaline doğru hedefin kolları arasından geçerken, şok dalgası da merkezi mermi olan bir çember şeklinde genişlemektedir.



Şekil 4.18: Elektronik hedef [1]

Genişleyen şok dalgaları cihazın kollarına çarparak onları titreştirir. Kolların birbirine ve yere bağlı olduğu yerde bu titreşimleri ölçen sensörler bulunur. Titreşimlerin her kolun sonuna ulaşma süreleri arasındaki fark ile X ve Y koordinatları hesaplanır. Sonuçlar bir sinyal işleyici cihaza aktarılır ve buradan da bilgisayara alınarak sanal bir hedef kâğıdı üzerinde gösterilir (Şekil 4.19) [1].



Şekil 4.19: Elektronik hedeften alınan sonuçların grafik gösterimi [1]

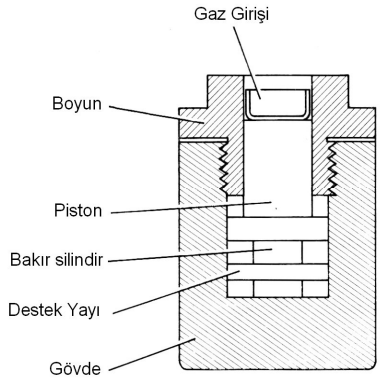
4.3. İç Balistik Ölçümleri

İç balistiğin enstrümentasyonu, merminin namlu içindeki hareketi boyunca yükleme ve tepki şartlarının belirlenmesini içerir. Namlu içindeki hareket, ateşleme yapıldığı ve mermi harekete geçtiği anda başlar ve mermi namluyu terk edip artık yanma gazlarının etkisinden kurtulduğunda sona erer. Burada iki amaç vardır: Birincisi, silahın ve merminin gerçekte maruz kaldığı özel yükleme koşulları ve tepkilerinin ölçülmesi; ikincisi, bu şartların silahın dışında, hassas ayarlanmış özel mekanik cihazlarda simüle edilerek bir model oluşturulması.

Ölçülmesi gereken iki asal büyüklük vardır. Bunlar, basınç ve mermi yoludur. Ölçülebilecek diğer büyüklükler, mermi hızı ve ivmesidir. Bu bölümde, iç balistik ölçümlerinde kullanılan ölçüm teknikleri ve ekipmanları açıklanacaktır.

4.3.1. Gaz basıncının ölçümü

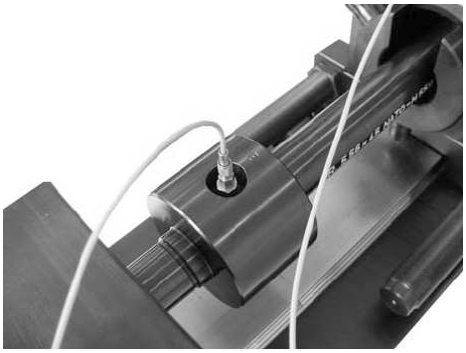
İki temel tip basınç ölçme ekipmanı vardır. Kroşe tipi basınç-ölçer (Şekil 4.20) atış sırasında namlu içinde ulaşılan maksimum basıncı ölçer; ölçüm sırasında tahrip olduğundan tek kullanımlıktır.



Şekil 4.20: Kroşe tipi basınç-ölçer [1]

Kroşe, namlu içinde atım yatağına yakın bir bölgede açılan deliğe yerleştirilir. Namlu içindeki basınç gaz girişinden girerek pistonu iter. Piston bakır bir silindire basmaktadır. Maksimum basınç, bu silindirde meydana gelen plastik deformasyonun boyutundan elastisite kuralları doğrultusunda elde edilir [1].

Piezo-elektrik sensör (Şekil 4.21) basınç – zaman değişimi sürekli olarak ölçer. Tek kullanımlık değildir, uzun süreler kullanılabilir. Bu sensörde atım yatağı civarında namlu duvarına açılan bir deliğe monte edilir. Bu sensör basınca maruz kaldığında, basıncın büyüklüğü ile doğru orantılı olarak bir elektrik akımı üretir.



Şekil 4.21: Piezo-elektrik basınç sensörü

Sinyal kaybı olmaması için bu sensörden kablo ile alınan akım bir sinyal amplifikatöründe yükseltilerek kullanılır [1,22,23]. Bu sinyal bir sinyal işleme cihazı ve yazılımı ile herhangi bir ortama kaydedilebilir ve grafik çıktılar alınabilir.

4.3.2. Merminin namlu içi hareketinin ölçümü

Merminin namlu içi hareketinin ölçümü için farklı metotlar mevcuttur. Bu metotlar, atış süreci boyunca merminin silahın namlusu içerisindeki eksenel yer değişimi hakkında bilgi sahibi olunmasına imkân verirler. En yaygın olan metotlara bu bölümde değinilmiştir.

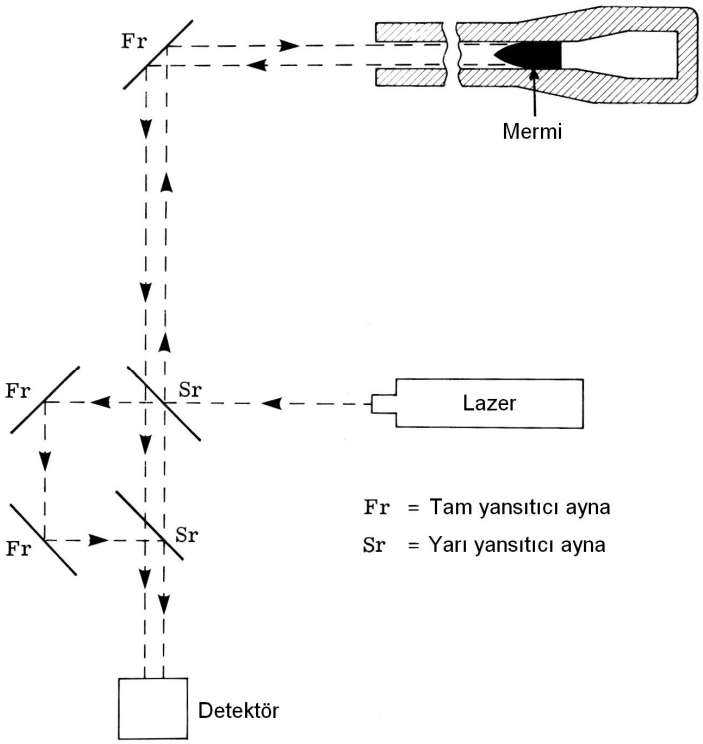
4.3.2.1. Mikrodalga girişimölçer

Mikrodalga girişimölçer veya interferometre sisteminde, frekansı bilenen bir mikrodalga kaynağı ve bu kaynaktan beslenebilen bir anten vardır. Kaynağın enerjisi, ucuz ve değiştirilmesi kolay bir reflektör ile silahın namlusunun içerisine yönlendirilir. Namlunun içerisine giren dalgalardan bir kısmı hareket eden mermiye çarpıp yansıyarak anten tarafından toplanır.

Herhangi bir anda, kaynaktan yayılan ve mermiden yansıyan dalgalar arasındaki faz farkından merminin o anki konumu bulunabilir. Bir diğer anda yeni konumu bulunur ve önceki ile karşılaştırılarak hareket miktarı bulunabilir. Buradan da mermi hızı bulunabilir.

4.3.2.2. Lazer interferometri

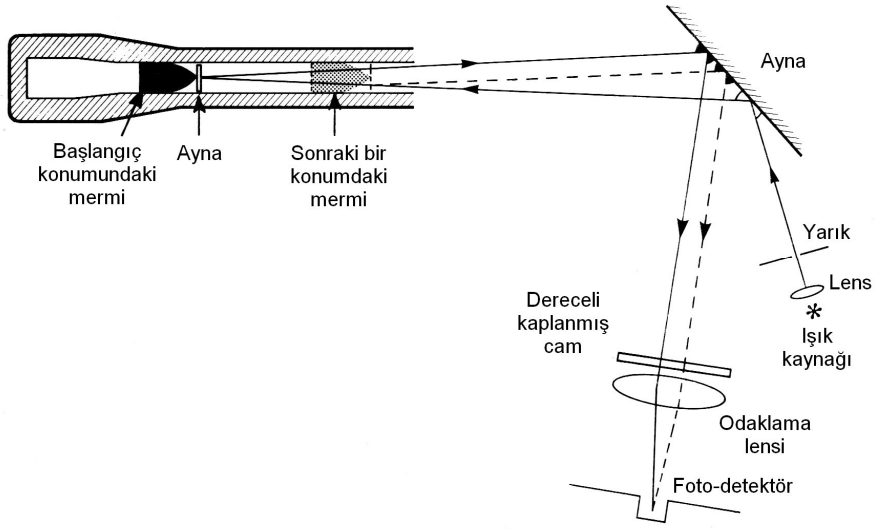
Lazerin dalga boyu mikrodalgalardan daha kısa olduğu için bu sistem mikrodalga sisteminden daha hassas ölçüm imkânı verir. Fakat meydana gelen girişim tepe noktalarının çok fazla sayıda olması sebebiyle ölçüm yapmak zordur. Hassas ve yüksek kapasiteli cihazlar gerektirir. Helyum-neon lazeri yerine, karbondioksit lazeri kullanmak girişim tepe noktaları arasındaki mesafeyi 0,315 µm'den 5,3 µm'ye çıkarır. Q bandı bir mikrodalga kaynağında iki tepe noktası arası mesafenin 4,5mm olduğu düşünülürse, lazer interferometri sisteminde merminin hareketinin ne kadar hassa bir biçimde izlenebileceği görülür. Şekil 4.22'de bir lazer interferometri sisteminin şematiği verilmiştir [1].



Şekil 4.22: Lazer interferometri sistemi [1]

4.3.2.3. Direkt optik metot

Merminin önünden yansıtılan bir ışık ışını Şekil 4.23'de gösterildiği gibi ışığa duyarlı bir detektöre yönlendirilerek direkt optik bir ölçüm yapmak mümkün olur [1]. Mermi başlangıç konumunda iken, ışık ışını merminin burnuna yerleştirilmiş olan aynanın merkezine çarpar; yansıyan ışık optik işleme evrelerinden geçer. Mermi namlunun ağzına ilerledikçe, yansıyan ışığın yolu değişir ve detektör cihazının yüzeyinde oluşan resim hareket eder. Detektöre, dereceli kaplanmış bir cam ve odaklama yapmak için lens eklenmiştir. Lens yansıyan ışığı tek bir noktaya toplar. Dereceli cam ise, üzerindeki farklı bölgelere düşen ışığı farklı yoğunluklarda arka tarafına geçirir. Foto detektör, zamanla yoğunluğu değişen ışığı merminin hareketini gösterecek şekilde kaydedebilir.



Şekil 4.23: Direkt optik metot [1]

4.3.2.4. Namlu üzerine strain-gauge metodu

Bu metotta, namlunun dış yüzeyine atım yatağı tarafından namlu ağzına doğru eksenel bir şekilde ve belli aralıklarla strain-gaugeler yerleştirilir. Varış zamanı bildiren ölçerler şeklinde gerekli bilgiyi üretirler. Bunların aralarındaki mesafeler ve sinyal üretmeye başladıkları zamanlar bilindiğine göre merminin hareketi grafik olarak çizilebilir [22].

4.3.2.5. Namlu kontakları metodu

Namlu üzerine belli aralıklarla açılmış deliklere izoleli problar kontak noktaları şeklinde davranmak üzere yerleştirilir. Mermi, herhangi bir proba temas ettiğinde o prob üzerinden devre tamamlanacak ve kayıt edilebilecek bir varış zamanı sinyali sağlayacaktır [24]. Bu şekilde her bir probdan alınan varış zamanı bilgisi kullanılarak zamana göre merminin konumunun değişimi elde edilir.

4.3.3. Mermi ivmelenmesi

Merminin namlu içindeki ivmelenmesini ölçmek için ivmeölçerler kullanılır. Namlu içi çalışmalarında kullanılan tüm ivmeölçerler sapmalı tip olanlardır. Bunlar, temel olarak bir sismik kütle ve bunun hareketine karşı koyacak tercihen lineer bir mekanik direnç siteminden meydana gelirler. İvmelenmenin büyüklüğü, sismik kütlenin hareketi ile kazandığı atalet kuvvetine tepki veren direnç sistemdeki sapma miktarı ile belirlenir. Piezo-elektrik ivmeölçerlerde sismik kütle bir piezo-elektrik materyalce desteklenmektedir. İvmelenen sismik kütlenin zorlaması altında bu malzemede, sinyal yükseltme teknikleri ile işlenip kullanılabilecek bir elektrik akımı oluşur.

4.3.4. Merminin namlu içindeki spini

Merminin namlu içindeki spin hareketini ölçümü optik veya mikrodalga metotlar kullanılarak yapılabilir. Her iki durumda da dışarıdaki bir kaynaktan namlunun içine doğru bir ışın yollanır ve merminin ucuna yerleştirilmiş özel bir reflektörden yansıyan ışın toplanır.

4.3.5. Termal ölçümler

İç balistik fenomenine ilişkin termal ölçümlerin yapılması zordur. Mevcut teknikler ile güvenle kullanılabilecek doğrulukta ve yeterlilikte veri elde edilip edilemeyeceği kesin değildir. Atış süreci çok kısa bir zaman aralığında başlayıp bittiğinden termal kameralarla izlenmesi mümkün değildir. Yine de bu kameralar, belli sayıda atıştan sonra namlunun sıcaklığının ne kadar arttığının incelenmesi için kullanılabilir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

9mm Luger fişekleri kullanılarak bir deney çalışması yapılmıştır. Deney çalışması NATO'nun EPVAT testi prosedürlerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. İç balistik ölçümleri çalışılmış; aksiyon zamanları belirlenmiş; basınç, mermi yolu ve hız büyüklerinin değişimlerini veren grafikler elde edilmiştir. Bu bölümde sırasıyla, deneyde kullanılan cihazlar tanıtılmış, deneyin yapılışı açıklanmış, deney sonuçları verilmiştir.

5.1. NATO EPVAT Testi

NATO'nun bir standardı olan EPVAT testi, C.I.P ve SAAMI ile birlikte dünyada en çok kullanılan üç mühimmat ve silah güvenliği ve performans belirleme testinden birisidir [24,25]. EPVAT kelimesi Estimation of Pressure Velocity and Action Time (Basınç Hız ve Aksiyon Zamanı Hesabı) kelimelerinin baş harflerinden oluşmuştur.

5.2. Deneylerde Kullanılan Cihazlar

5.2.1. Test namluları

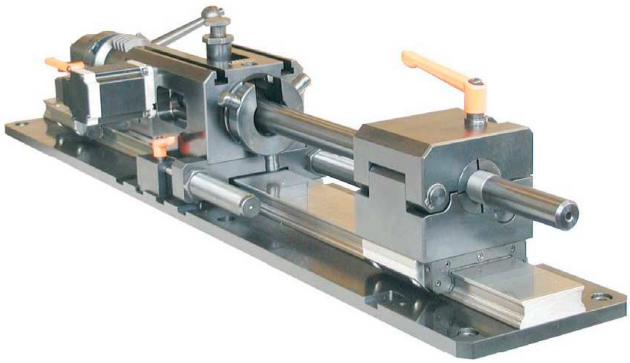
9 mm Luger, ve farklı kalibe fişekler için üzerlerinde basınç sensörlerinin vidalanabildiği yuvalar bulunan ve üniversal bir mekanizma sistemine bağlanarak kullanılan test namluları mevcuttur (Şekil 5.1).



Şekil 5.1: Test namluları

5.2.2. Üniversal mekanizma sistemi

Üniversal mekanizma sistemi, üzerine test namluları bağlanan, vidalı kilitlenen kamaya sahip, manuel veya uzaktan kumanda ile ateş edebilen, üzerine ivmeölçerler, strain gaugeler ve flash sensörleri takılabilen yuvalar bulunan bir deney ekipmanıdır (Şekil 5.2). Bu sistemle aksiyon zamanı, basınç ve hız çalışmalarının hepsi yapılabilir.



Şekil 5.2: Üniversal mekanizma sistemi

5.2.3. Balistik test masası

Üniversal mekanizma sistemi ve diğer ekipmanın üzerine bağlandığı ve atışın etkilerine dayanıklı bir masadır (Şekil 5.3). Yüksekliği ve iki yönde açıları ayarlanabilir. Özel aparatlar kullanmak suretiyle bir tüfek veya tabanca da bağlanıp örneğin prototip deneme atışları bunun üzerinde yapılabilir.



Şekil 5.3: Balistik test masası

5.2.4. Balistik analiz ünitesi

Balisitk analiz ünitesi bilgisayar yazılımı da üzerinde olan bir sinyal işleme kutusudur (Şekil 5.4). Sinyal güçlendirme için amplifikatörü de mevcuttur. Sensörün tipine ve işlevine göre üzerinde çok sayıda giriş bulunur. İşlediği verileri bilgisayara aktarmak ve analiz etmek mümkündür.



Şekil 5.4: Balistik analiz ünitesi

5.2.5. İlk hız ölçüm sistemi

İlk hız ölçüm sistemi iki optik sensörlü, ışık kapısı olarak adlandırılan basit bir foto-detektör sayaç ve kronometredir (Şekil 5.5). İlk hızı ölçmenin yanında, seri atışlarda dakikadaki atım adedini de ölçebilir.



Şekil 5.5: İlk hız ölçüm sistemi

5.2.6. Elektronik hedef

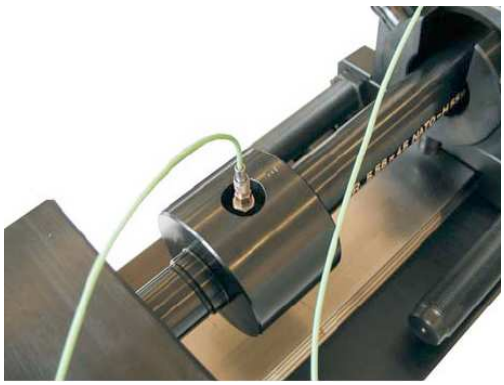
Uzun mesafelerde merminin isabetini veya bir silahın atış dağılımını ölçmek için kullanılan bir elektronik hedef sistemidir (Şekil 5.6). 100cm x 100cm boyutunda bir algı alanı vardır. Balistik analiz ünitesi ile uyumludur; ölçtüğü verileri doğrudan üniteye gönderir.



Şekil 5.6: Elektronik hedef sistemi

5.2.7. Piezo-elektrik basınç sensörü

Test namlusu atım yatağı üzerindeki yuvasına bağlanır. Atış çevrimi boyunca namlu içindeki basınçla doğru orantılı olarak ürettiği elektrik sinyallerini bir kablo aracılıyla balistik analiz ünitesine besler. Böylece ünite basıncın zamana göre değişimini ölçebilir. İşlem sırasında tahrip olmadığı için birçok kereler kullanılabilir.



Şekil 5.7: Piezo-elektrik basıç sensörü

5.2.8. Kroşe basınçölçer

Test namlusu atım yatağı üzerindeki yuvasına bağlanır. Atış çevrisi sırasında oluşan basıncın etkisi ile içerisindeki bakır silindir ezilir ve plastik deformasyona uğrar. Atıştan sonra kroşe çıkarılır ve içindeki silindirin deformasyon miktarına bakılır. Elastisite hesapları ile basınç hesaplanabilir. Kroşeler ile beraber satıcı firma tarafından konulmuş çizelgelere bakılarak da basınç okunabilir. Sadece atış sırasındaki maksimum basınç öğrenilebilir. Atış sırasında içindeki silindir tahrip olduğu için tek bir kez kullanılabilir.



Şekil 5.8: Kroşe tipi basınçölçer

5.2.9. Piezo-elektrik ivmeölçer

Piezo-elektrik ivmeölçer (Şekil 5.9), ateşleme anında, mermi hareketine başlarken sahip olduğu ivmeyi ölçer. Aynı zamanda hareketin başladığı anı da kaydeder, namlu ağzındaki bir flaş detektörü ile akuple edildiğinde merminin çıkış anı da bilineceğinden aksiyon zamanının bulunması mümkün olur.



Şekil 5.9: Piezo-elektrik ivmeölçer

5.2.10. Flaş dedektörü

Flaş detektörü (Şekil 5.10) mermi namlu ağzından çıkarken oluşan flaşı tespit eder ve bir sinyal üretir. Bu sinyal balistik analiz ünitesine beslenirse, ivmeölçer ile beraber aksiyon zamanının belirlenmesi sağlanır. Flaş detektörünün sinyali aynı zamanda hızlı kamera gibi cihazları tetiklemekte kullanılır. Böylece kamera sürekli kayıt yapmak durumunda kalmaz; mermi namluyu terk eder etmez flaş detektörü kamerayı harekete geçirir ve kaydı başlatır.



Şekil 5.10: Flaş detektörü

5.2.11. Programlanabilir tetikleme ünitesi

Programlanabilir tetikleme ünitesi (Şekil 5.11) test cihazını otomatik ateşleyebilir. Geri sayımla veya kablo ile uzaktan tetikleme seçenekleri vardır. Bununla beraber bu ünite test cihazı ile aynı anda, hızlı kamera, doppler radarı, flaş veya kıvılcım aydınlatma sistemlerini de elektronik olarak tetikleyebilir.



Şekil 5.11: Programlanabilir tetikleme ünitesi

5.2.12. Yüksek hızlı kamera

Redlake firmasının Motionmeter model dijital kamerası (Şekil 5.12) kullanılmıştır. Orta hızlı sinema tipidir. Saniyede 1000 kareye kadar hızda siyah beyaz çekim yapar. 2 GB hafızaya sahiptir. Çekim hızları; 60, 125, 250, 500 ve 1000 kare/saniyedir. En yüksek hızda 4 saniyeye kadar kayıt yapabilir. Elektronik sinyalle tetiklenebilmesi için üzerinde giriş mevcuttur.



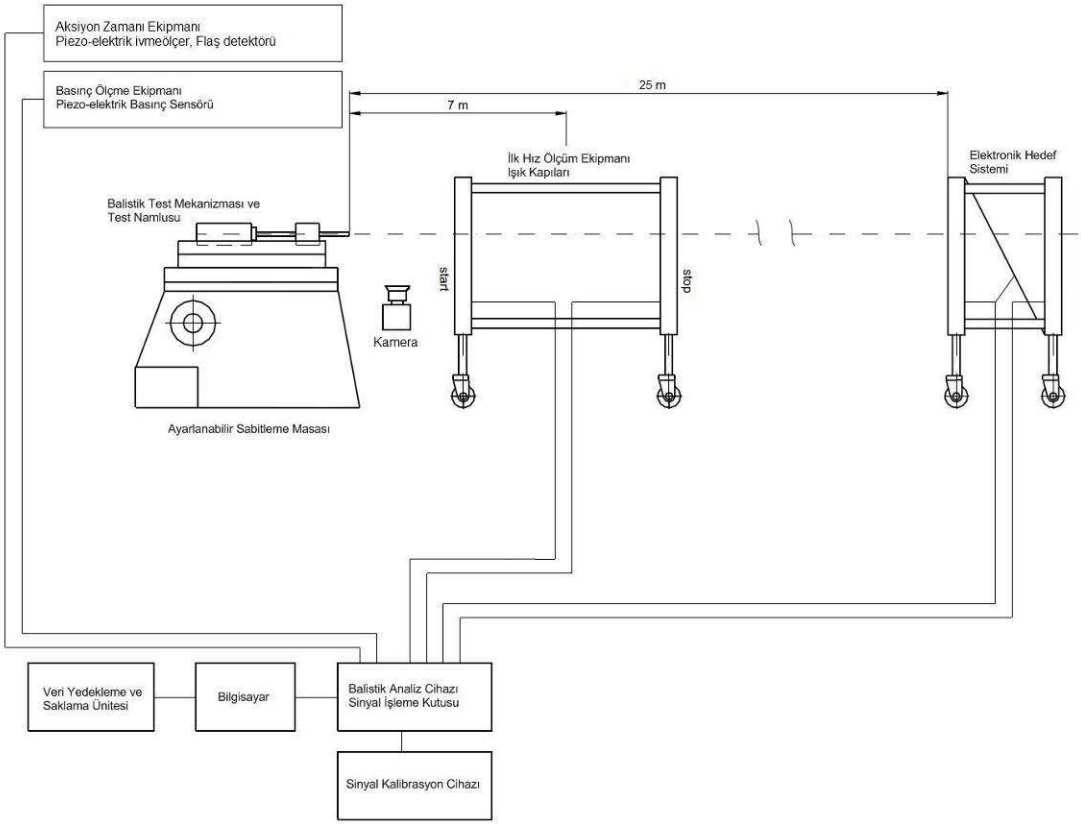
Şekil 5.12: Redlake motionmeter kamera

5.3. Deneyin Yapılışı

Test ekipmanları Şekil 5.13'de gösterilen şemaya göre kuruludur. Deney için 9mm Luger fişeklerin kullanımı uygun görülmüştür. Buna göre 10cm uzunluklu 9mm test namlusu üniversal mekanizmaya bağlanmıştır. Basınç – zaman grafiği elde edilmesi de istendiğinden kroşe yerine piezo-elektrik basınç sensörü test namlusu üzerine bağlanmıştır. Sensör kablosu balistik analiz ünitesinde ilgili girişe bağlanmıştır.

Aksiyon zamanının belirlenmesi için piezo-elektrik ivmeölçer ve flaş detektörü akuple kullanılmıştır. İki cihaz da analiz ünitesinde ilgili girişe bağlanmıştır. Programlanabilir tetik ünitesi kamerayı çalıştıracak bir saniye gecikmeli olarak da cihazı ateşleyecek şekilde programlanmıştır. Tetik ünitesinden kameraya sinyal kablosu çekilmiştir. İlk hız ölçümü için ışık kapısı kullanılmıştır. Namlu ağzından 7m ileriye yerleştirilmiştir; analiz ünitesine bağlantıları yapılmıştır.

Merminin namlu içindeki konum bilgisi namlu üzerine belli aralıklarla yerleştirilen strain-gaugelerden alınmaktadır. Balistik analiz ünitesi, ivmeölçerden gelen zaman bilgisi ile atışın başlama anını bilmektedir. Strain-gaugeleden gelen her bir varış zamanı bilgisi ile merminin konumunun zamana bağlı değişimi yani mermi yolu grafiği elde edilebilir. Yine bu konum ve zaman bilgisi ile balistik analiz ünitesi mermi hızının zamana göre değişimini çizebilir.



Şekil 5.13: EPVAT test ekipmanı kurulum şeması

Tüm ekipmanların tesisat bağlantıları ve kalibrasyonları kontrol edilmiştir. Oda koşulları: Ortam sıcaklığı 21ºC, ortam basıncı 1020mm Hg ve bağıl nem %34'dür. Deney sahasında, Uluslararası Atıcılık Sporu Federasyonu ISSF'in atıcılar ve tesisler için hazırlamış olduğu güvenlik şartnamelerinde belirtilen önlemler alınmıştır. Test sistemi hazırlandıktan ve güvenlik önlemleri alındıktan sonra deneye geçilmiştir. Toplam 20 adet test atışı yapılmıştır. Her bir atış için, maksimum basınç, ilk hız ve aksiyon zamanı bilgileri kayıt edilmiştir.

Balistik analiz cihazının yazılımı istatistikî araçlar da sunmaktadır. Buna göre 20 adet atışın basınç ve ilk hız değerlerinin standart sapmasını hesaplayıp %95 güvenirlikli olarak ortalama değerler vermektedir.

Buna göre, namlu içi maksimum basınç 205 MPa ve merminin ilk hızı 396 m/s olmuştur. Mermi çekirdeğinin kütlesi 7,45 g olduğuna göre; merminin çıkış enerjisi 584,1 J olmaktadır. Deney sonuçlarına göre elde edilen basınç, ilk hız ve aksiyon zamanı değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1: Deney sonuçlarına göre her bir test atışının maksimum namlu içi basınç, mermi ilk hızı ve aksiyon zamanı değerleri

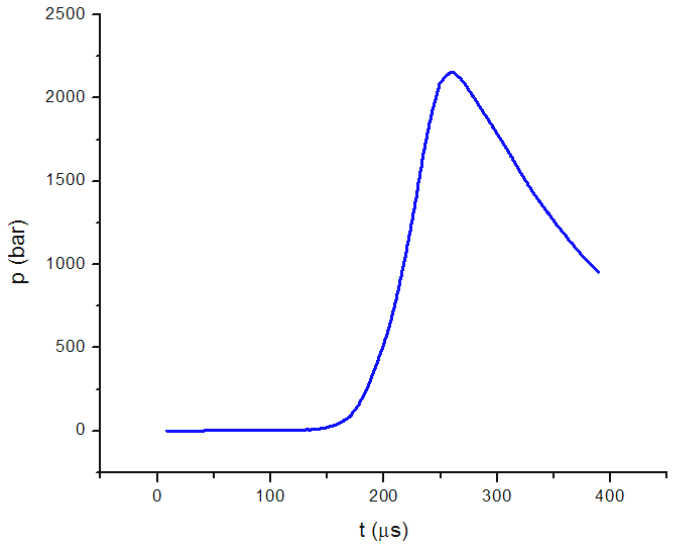
Atım No.	Max Basınç [MPa]	İlk Hız [m/s]	Aksiyon Zamanı [µs]	Atım No.	Max Basınç [MPa]	İlk Hız [m/s]	Aksiyon Zamanı [µs]
1	203	383,3	846	11	200	382,6	556
2	196	386,9	854	12	191	382,2	531
3	206	394,1	871	13	197	386,8	917
4	204	392,6	781	14	191	384,0	504
5	188	373,4	902	15	192	383,0	987
6	202	387,1	867	16	192	380,6	862
7	201	386,4	878	17	191	381,5	824
8	199	389,8	589	18	175	369,0	495
9	197	381,2	859	19	182	375,5	939
10	198	384,4	618	20	182	377,2	872

Balistik analiz ünitesinin, basınç, ilk hız ve aksiyon zamanı için hesapladığı standart sapmalar, %95 güvenirliğe göre düzeltme değerleri ve buna göre düzeltilmiş ortalama değerler Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2: Basınç, ilk hız ve aksiyon zamanı standart sapmaları, %95 güvenirliğe göre düzeltme ve ortalama değerleri

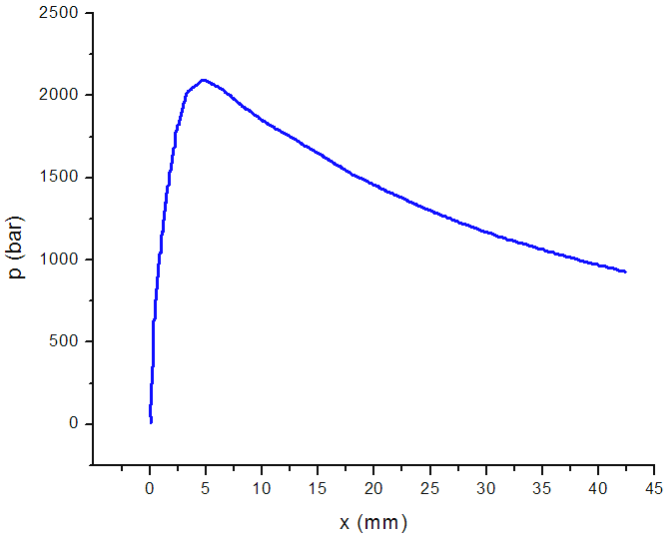
	Basınç [MPa]	İlk Hız [m/s]	Aksiyon Zamanı [µs]
Ortalama	194,4	383,1	777,6
Standart Sapma	8,13	6,12	161,02
Düzeltme	10,6	12,9	
Düzeltilmiş Değer	205,0	396,0	

Deney sonuçlarına göre balistik analiz ünitesince çizdirilen grafikler sırasıyla aşağıda verilmiştir. Namlu içi basıncın zamana göre değişimi Şekil 5.14'de verilmiştir. Yatay eksen zamanı düşey eksen basıncı göstermektedir.



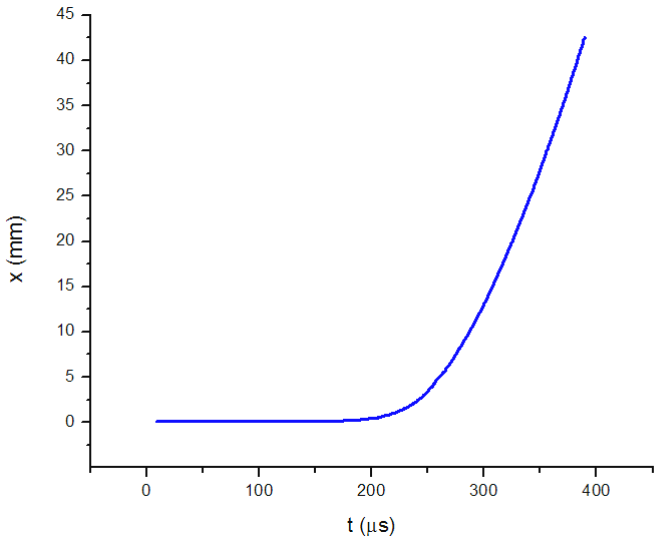
Şekil 5.14: Namlu içi basıncın zamana göre değişimi

Şekil 5.15'de basınca karşılık gelen mermi konumu grafiği verilmiştir. Namlu içindeki basıncın, merminin namlu içindeki atım yatağından namlu ağzına hareketi boyunca nasıl değiştiğini göstermektedir. Yatay eksen mermi yolunu, düşey eksen basıncın değerini vermektedir.



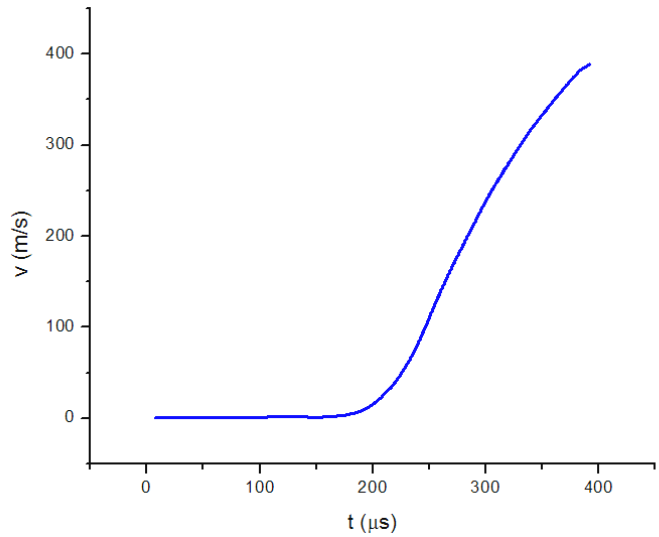
Şekil 5.15: Namlu içi basıncın merminin konumuna göre değişimi

Şekil 5.16’da mermi konumunun zamana göre değişimi verilmiştir. Yatay eksen zamanı, düşey eksen merminin namlu içinde bulunduğu noktayı göstermektedir.



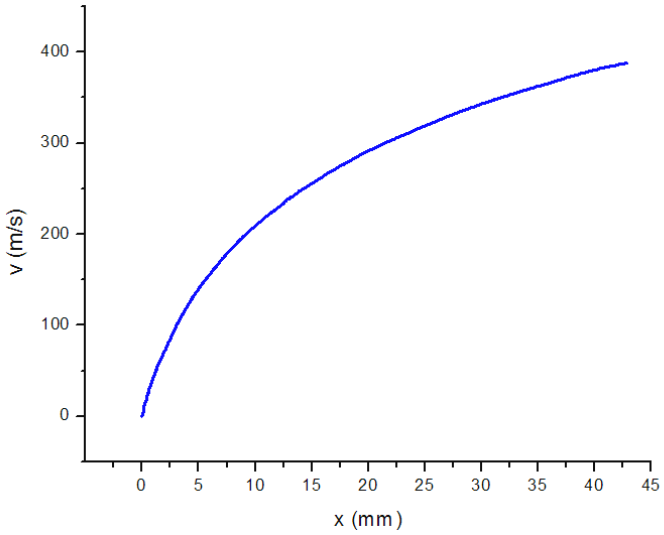
Şekil 5.16: Merminin konumunun zamana göre değişimi

Şekil 5.17’de mermi hızının zamanla nasıl değiştiğini gösteren grafik verilmiştir. Yatay eksen zaman, düşey eksen hız eksenidir.



Şekil 5.17: Mermi hızının zamana göre değişimi

Mermi hızının merminin konumuna göre nasıl değiştiğini gösteren grafik Şekil 5.18'de verilmiştir. Yatay eksen merminin namlu içindeki atım yatağından namlu ağzına doğru olan hareketi, düşey eksen ise merminin hızını göstermektedir.



Şekil 5.18: Mermi hızının mermi konumuna göre değişimi

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tasarımın ilk sabit girdi verisi olan mühimmat tipi, önceki bölümlerde açıklanan teorik ve deneysel sonuçlardan görülebileceği üzere, en önemli tasarım kriteri olup, diğer tüm tasarım özellikleri bu veri ile ilişkilidir. Bu kapsamda deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

Namlu içindeki basıncın zamana göre değişimini veren grafikten görüleceği üzere, namlu çıkışında basınç, merminin namluyu terk etmesiyle düşmeye başlamıştır. Barutun yanması sonucu elde edilebilecek basınç değerleri çok daha fazla iken, namlu boyunun kullanım amacına göre sınırlı olması, maksimum basınç değerine ulaşılamadan, merminin namluyu daha düşük basınç değerinde terk etmesini sonucunu doğurur. Ancak gereksiz barut kullanımı çağrışımı yapan bu durum, aslında mermiye ilk hız için gerekli enerjinin kısa namlu boyunca yüklenebilmesi için gereklidir. Uzun namlulu silahların mermi ilk çıkış hızlarının yüksek olmasının sebebi bu durumla açıklanabilir.

İlk anda, basınç artışına rağmen merminin hareketsiz kalıyor olmasının nedeni, kilit mekanizmasının çözülmesi için gerekli basınç değeri için gerekli bekleme süresidir. Kilit mekanizmasının çözülmesinden sonra, mermi basınç etkisiyle hızlanmaya başlamakta ve maksimum değerde namluyu terk etmektedir.

Tasarlanan hafif silah mekanik bir makine'dir. Teorik olarak elde edilecek her tasarım kriteri, günümüz imal yöntemleri ile imal edilemeyebilir. Güncel imal yöntemleri araştırılarak ve gözlemlenerek, her gün yeni bir fikir ile yeni tasarımlar yapmak mümkündür. Ancak dikkat edilmesi gereken nokta, tasarımın gerçek hayatta imal edilebilirliğinin gerçekçi bir göz ile filtre edilmesidir. Bu kapsamda tasarım yaparken dikkat edilmesi gereken diğer hususlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

1- Mühimmat seçimi yapılmadan, hafif silah tasarımına başlanmamalıdır.
2- Atım yatağı ve zorlama konisi ölçüleri, mermi ilk çıkış hızı ve hedef doğruluğu için hassas ölçülerdir, dolayısı ile imalatında gereken hassasiyet gösterilmelidir.
3- Çalışma çevrimi ve mekanizma tipi dakikadaki atım sayısını belirleyen değerler olduğundan, tasarıma başlamadan önce belirlenmelidir.
4- Hafif silahlarda balistik verim %20-%30 civarındadır. En büyük enerji kayıpları sırasıyla, ısı transferi, gaz ataleti ve sürtünme kayıplarından meydana gelmektedir. Sürtünme ve ısı transferi kaynaklı enerji kayıplarını azaltmak aynı zamanda namlu ömrünü uzatmak için namlu içi kaplama ve namlu dışı ısı transferini kolaylaştıracak ve silah kullanım ergonomisini bozmayacak tasarımlar önem arz etmektedir.
5- Yiv – set ile mermi üzerine yüklenen rotasyonel kinetik enerji merminin hedefe ulaşması için gerek şarttır. Bu enerjinin daha verimli yüklenebilmesi için sabit dönülü namlu yerine, değişken dönülü namlu kullanılabilir.
6- Tasarımı yapılan silah için uygun test düzeneğinin hazırlanması ve güvenli ölçümler yapılabilmesi için atış alanlarının tesisi gerek şarttır.

KAYNAKLAR

1. Farrar, C.L., Leeming, D.W., "Military Ballistics - A Basic Manual", ***Brassey's Publishers Ltd., Oxford,*** (1983).

2. Allsop, D.F., Toomey, M.A., "Small Arms: General Design", ***Brassey's (UK) Ltd., London,*** (1999).

3. U.S. Army Materiel Command, "Engineering Design Handbook, Ammunition Series, Design For Terminal Effects", The Engineering Handbook Office of Duke University, Durham, North Carolina, USA, (1964).

4. U.S. Army Materiel Command, "Engineering Design Handbook, Ammunition Series, Design For Projection", The Engineering Handbook Office of Duke University, Durham, North Carolina, USA, (1964).

5. Dyckmans, G., 2007, Fundamentals of Ballistics - 4. External Ballistics - Trajectories [online], https://e-ballistics.com/ebook, (**Ziyaret tarihi: 30 Eylül 2009**).

6. Pejsa, A.J., "Modern Practical Ballistics", Second edition, ***Kenwood Publishing, Minneapolis,*** (1991).

7. Rinker, R.A., "Understanding Firearm Ballistics", Sixth edition, ***Mulberry House Publishing, Clarksville,*** (2007).

8. Dyckmans, G., 2007, Fundamentals of Ballistics - 2. Propellants [online], https://e-ballistics.com/ebook, (**Ziyaret tarihi: 30 Eylül 2009**).

9. U.S. Army Materiel Command, "Engineering Design Handbook, Elements Of Armament Engineering, Sources Of Energy", ***The Engineering Handbook Office of Duke University, Durham, North Carolina, USA,*** (1964).

10. U.S. Army Materiel Command, "Engineering Design Handbook, Ballistics Series, Trajectories, Differential Effects And Data For Projectiles", ***The Engineering Handbook Office of Duke University, Durham, North Carolina, USA,*** (1963).

11. U.S. Army Materiel Command, "Engineering Design Handbook, Guns Series, Gun Tubes", ***The Engineering Handbook Office of Duke University, Durham, North Carolina, USA,*** (1964).

12. U.S. Army Materiel Command, "Engineering Design Handbook, Elements Of Armament Engineering, Ballistics", ***The Engineering Handbook Office of Duke University, Durham, North Carolina, USA,*** (1963).

13. Dyckmans, G., 2007, Fundamentals of Ballistics - 1. Firearms [online], https://e-ballistics.com/ebook, (**Ziyaret tarihi: 30 Eylül 2009**).

14. Dyckmans, G., 2007, Fundamentals of Ballistics - 3. Internal Ballistics [online], https://e-ballistics.com/ebook, (**Ziyaret tarihi: 30 Eylül 2009**).

15. Carlucci, D.E., Jacobson, S.S., "Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition", ***CRC Press, New York,*** (2008).

16. U.S. Army Materiel Command, "Engineering Design Handbook, Ballistics Series, Interior Ballistics Of Guns", ***The Engineering Handbook Office of Duke University, Durham, North Carolina, USA,*** (1965).

17. Oliveira, J.L.S.P. de, Filho, A.A.M.F., Platt, G.M., Peixoto, F.C., "Estimation of Ballistic Parameters of Gun Propellants Through Closed Vessel Experiment Modeling", ***Engenharia Térmica***, Vol.4, No.1, 50-55, (2005).

18. Gough, P.S., "Interior Ballistics Modeling: Extensions to the One-Dimensional XKTC Code and Analytical Studies of Pressure Gradient for Lumped Parameter Codes", ***U.S. Army Research Laboratory, ARL-CR-460, Maryland, USA,*** (2001).

19. Siewert, J., Cytron, S., "Rifling Profile Push Tests: An Assessment of Bullet Engraving Forces in Various Rifling Designs", ***Armament Research, Development and Engineering Center, ARAET-CR-04002, Picatinny, New Jersey, USA,*** (2005).

20. George, M.A., "Frictional and Wear Characteristics of Various Coatings Used on Small Caliber Weapon Components", ***Springfield Armory, SA-TR18-1089, Springfield, Massachusetts, USA,*** (1965).

21. Dyckmans, G., 2007, Fundamentals of Ballistics - 5. External Ballistics - Forces [online], https://e-ballistics.com/ebook, (**Ziyaret tarihi: 30 Eylül 2009**).

22. Brode, H.L., Enstrom, J.E., "A Numerical Method for Calculating Interior Ballistics", ***The RAND Corporation, Santa Monica, California, USA,*** (1970).

23. Goldstein, S., "Interior Ballistics Modeling Applied to Small Arms Systems", ***US Army Armament Research and Development Fire Control and Small Caliber Weapon Systems Laboratory, ARSCD-TR-79001, Dover, New Jersey,*** USA, (1979).

24. Oberle, W.F., "Constant Pressure Interior Ballsitics Code CONPRESS: Theory and User's Manual", ***U.S. Army Research Laboratory, ARL-TR-199, Maryland, USA,*** (1993).

25. Simmons, R.L., Malinoski, F.A., Hung, H.M., "Some Mathematical Models and Computer Programs for Small Arms Analyses", ***US Army Weapons Command Systems Analysis Directorate, SY-TN10-70, Rock Island, Illinois, USA,*** (1971).

ÖZGEÇMİŞ

1975 yılında Erzurum'da doğdu. İlköğrenimini Erzincan, orta ve lise öğrenimini Kocaeli'nde tamamdı. 1993 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden 2000 yılında mezun oldu. 1998–2000 yılları arasında Temsan-Gemsan A.Ş şantiye ve atölye imalat sorumlusu olarak görev yaptı. 2000–2004 yılları arasında, arkadaşları ile Zenit Plastik Ltd. şirketini kurarak plastik kalıpları üretmeye başladı ve Türkiye'nin ilk askeri plastik şarjörü olan HK33 plastik şarjörünü üretti. 2004–2007 yılları arasında İstanbul'a yerleşerek İnformatik Bilgisayar Sistemleri AŞ'nin teknik yöneticiliğini yaptı. 2007 yılında Barrows International firmasında çalışmaya başladıktan sonra, tekrar savunma sanayine dönerek Sarsılmaz Silah sanayi AŞ. Ar-ge ekibinin çekirdek kadrosunda yer almış ve halen görevini devam ettirmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.