

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DÖNÜ KARARLI MERMİLERİN AERODİNAMİK KATSAYILARI,
KARARLILIK ÖZELLİKLERİ VE YÖRÜNGE HESAPLAMALARI**

Erkan TİRYAKİ

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA

2009

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Erkan TİRYAKİ tarafından hazırlanan “**Dönü Kararlı Mermilerin Aerodinamik Katsayıları, Kararlılık Özellikleri Ve Yörünge Hesaplamaları**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile 09/07/2009 tarihinde Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Mehmet KABAK

Jüri Üyeleri :

Başkan : Prof. Dr. Basri ÜNAL, Ankara Üniversitesi
Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : H. Mehmet ŞAHİN, Gazi Üniversitesi
Gazi Üniversitesi, Enerji Anabilim Dalı

Üye : Doç. Dr. Mehmet KABAK, Ankara Üniversitesi
Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Orhan ATAKOL

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DÖNÜ-KARARLI MERMİLERİN AERODİNAMİK KATSAYILARI, KARARLILIK ÖZELLİKLERİ VE YÖRÜNGE HESAPLAMALARI

Erkan TİRYAKI

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet KABAK

Bu çalışmada dönü kararlı mermilerin aerodinamik katsayıları ve kararlılık kriterleri türetilerek bu katsayıların nasıl hesaplanabileceği açıklanmıştır. Mermi aerodinamiğine etkisi olan aerodinamik kuvvet ve momentler olarak, sürüklenme kuvveti, kaldırma kuvveti, Magnus kuvveti, yunuslama sönümlenme kuvveti, yunuslama momenti, yunuslama sönümlenme momenti, Magnus momenti, spin sönümlenme momenti detaylı olarak anlatılmıştır. 6-DoF hareket denkleminin çizgisel çözüm yöntemi kullanılarak türetilen merminin statik ve dinamik kararlılık kriterlerinin mermi tasarımı açısından önemi anlatılmıştır. Açısal hareketinin parametrelerinden olan açısal frekans ve sönümlenme oranlarının özellikleri belirtilmiştir. Mermi yörüngesini hesaplama metotları özetlenerek bu metotların birbirlerine göre üstünlükleri ve kullanım amaçları belirtilmiştir. Bir top mermisi modellemesi yapılarak, balistik tasarım, akışkanlar mekaniği ve teknik hesaplama programları kullanılarak aerodinamik katsayıları, farklı hızlarda sahip oldukları kararlılık değerleri hesaplanmıştır. Bu çalışma kapsamında oluşturulan 2-DoF yörünge hesaplama programı ile elde edilen sonuçlar gerçek atışlı testlerden elde edilen radar takip verileri karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Ayrıca merminin namlu çıkışındaki salınım hareketi karakteristiği teknik hesaplama metotlarıyla analiz edilmiş, iki farklı programla doğrulanarak grafiksel olarak gösterilmiştir. Yükseklik farkının menzil üzerindeki ve yüksek ilk hız değerlerinin açısal salınım üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar hakkında gerekli açıklayıcı yorumlar yapılarak sebep sonuç ilişkileri kurulmuştur. Bu çalışma sonucunda dönü kararlı mermiler için aerodinamik kararlılık ve yörünge hesaplamaları yapabilen bir programının geliştirilebileceği görülmüştür.

Temmuz 2009, 80 sayfa

Anahtar Kelimeler: Balistik, mermi, aerodinamik kararlılık, statik ve dinamik kararlılık, açısal frekans, sönümlenme oranı, CFD, Prodas, McDrag,

ABSTRACT

Master Thesis

CALCULATION OF AERODYNAMIC COEFFICIENTS, STABILITY PROPERTIES AND TRAJECTORY OF SPIN-STABILIZED PROJECTILES

Erkan TIRYAKI

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet KABAK

In this study, the aerodynamic coefficients and stability criterions of spin-stabilized projectiles have been derived and calculations of these coefficients have been explained. The aerodynamic forces and moments that may have significant effects on projectile aerodynamics have been explained in detail, which are drag force, lift force, Magnus force, pitch damping force, pitching moment, pitch damping moment, Magnus moment and spin damping moment. The static and dynamic stability criterions have been derived by using the linear solution method of the 6-DoF equations of motion and their importance are explained in the design perspective. The characteristics of angular frequencies and damping coefficients, that are the parameters of angular motion, have been explained. Trajectory calculation methods have been summarized and eligibility and use cases of them are specified. The modeling of howitzer ammunition has been made and aerodynamic coefficients, stability criterions at different velocities have been calculated by using ballistic design, fluid dynamics and technical computing programs. The results of a 2-DoF trajectory calculation program that have been programmed in the scope of this study have been verified with the comparison of live firing test results. Also, the angular motion characteristics of the projectile at the muzzle exit has been analyzed by technical computing methods, illustrated by graphics and verified by two different programs. Additionally, the effects of firing altitude on the projectile range and the effects of muzzle velocity on the muzzle exit angular motion have been investigated. Clarifying comments about the obtained results have been made and the causation has been interrelated. By the end of this study, a ballistics computer program has been verified for the calculation of aerodynamic stability and trajectory of spin stabilized projectiles.

July 2009, 80 pages

Key Words: Ballistics, projectile, aerodynamic stability, static and dynamic stability, angular frequency, damping rate, CFD, Prodas, McDrag

TEŞEKKÜR

Araştırmalarımı yönlendiren ve çalışmalarım süresince birikim, öneri ve yardımlarını esirgemeyerek, insani ilişkilerdeki engin davranışı ile akademik ortamda gelişmeme katkıda bulunan danışman hocam sayın Doç. Dr. Mehmet KABAK'a, yüksek lisans öğrenimim boyunca akademik ve insani desteklerini esirgemeyen bölüm başkanım değerli bilim adamı sayın Prof. Dr. Ali Ulvi YILMAZER'e, iş yaşamımdaki ARGE faaliyetlerinde destekleyici ve yönlendirici yönetimi ile çalışmalarımda maddi manevi desteklerini esirgemeyen MKE ARGE ve Teknoloji Dairesi Başkanı sayın Dr. Onur OKGÖR'e, yüksek lisans tez çalışmalarım süresince maddi manevi desteğini sürekli yanımda hissettiğim fedakar eşim Sayın Gülçin TİRYAKİ'ye, varlığı ile tüm çalışmalarıma anlam katan kızım Ayřenaz'a en derin duygularla teşekkür ederim.

Erkan TİRYAKİ
Ankara, Temmuz 2009

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|-----|
| ÖZET..... | iii |
| ABSTRACT..... | iv |
| TEŞEKKÜR..... | v |
| SİMGELER DİZİNİ..... | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | xii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ..... | xv |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. KURAMSAL TEMELLER..... | 7 |
| 2.1 Sürüklenme Kuvveti..... | 7 |
| 2.2 Kaldırma Kuvveti..... | 11 |
| 2.3 Yunuslama Momenti..... | 12 |
| 2.4 Magnus Etkisi ve Kuvveti | 13 |
| 2.5 Magnus Momenti..... | 16 |
| 2.6 Yunuslama Sönümlenme Kuvveti..... | 18 |
| 2.7 Yunuslama Sönümlenme Momenti..... | 19 |
| 2.8 Spin Sönümlenme Momenti..... | 21 |
| 2.9 Normal Kuvvetin ve Magnus Kuvvetin Basınç Merkezi..... | 22 |
| 2.10 Kütle Merkezinin Kuvvet ve Momentlere Etkisi..... | 23 |
| 3. HAREKET DENKLEMİ HESAPLAMALARI..... | 24 |
| 3.1 İki Serbestlik Dereceli (2-DoF) Yörünge..... | 24 |
| 3.2 Altı Serbestlik Dereceli (6-DoF) Yörünge..... | 24 |
| 3.3 6-DoF Hareket Denkleminin Çizgiselleştirilmesi..... | 25 |
| 3.4 Runge-Kutta Entegrasyon Yöntemi..... | 26 |
| 4. AÇISAL SALINIM AERODİNAMİK KARARLILIK HESAPLAMASI...28 | |
| 4.1 Açısız Hareketin Çizgisel Çözümü..... | 28 |
| 4.2 Statik Kararlılık Durumu İncelemesi..... | 31 |
| 4.3 Dinamik Kararlılık Durumu İncelemesi..... | 32 |
| 4.4 Statik ve Dinamik Kararlılık Özellikleri..... | 37 |
| 4.5 Açısız Frekanslar ve Sönümlenme Oranları Özellikleri..... | 39 |
| 4.6 Başlangıç Değer Problemi..... | 40 |
| 5. MATERİYAL | 43 |

| | | |
|-----|---|----|
| 5.1 | ANSYS CFX Programı Kullanımı..... | 43 |
| 5.2 | McDRAG Programı Kullanımı..... | 44 |
| 5.3 | PRODAS Programı Kullanımı | 44 |
| 5.4 | MATLAB Programı Kullanımı | 45 |
| 5.5 | Yörünge Takip Radarı Ölçümleri..... | 45 |
| 6. | YÖNTEM | 46 |
| 6.1 | Ansys Cfx Programı İle C_{d0} Hesaplanması..... | 46 |
| 6.2 | Mcdrag Programı İle C_{d0} Hesaplanması..... | 48 |
| 6.3 | Prodas Programı İle Aerodinamik Katsayıların Hesaplanması..... | 49 |
| 6.4 | Kararlılık Değerlerinin Hesaplanması..... | 49 |
| 6.5 | 2-Dof Hareket Denklemi İle Yörünge Hesaplanması..... | 49 |
| 6.6 | Namludan Çıkışında Açısız Sönümlenme Hareketinin Hesaplanması | 51 |
| 6.7 | Hesaplanan Yörünge YTR Verileri İle Karşılaştırması..... | 52 |
| 7. | BULGULAR ve TARTIŞMA..... | 53 |
| 7.1 | Hesaplanan C_{d0} Katsayılarının Karşılaştırılması..... | 53 |
| 7.2 | Mermi Kararlılık Hesapları Sonuçlarının Karşılaştırılması..... | 54 |
| 7.3 | Gerçek Test Atışları 2-Boyutta Yörünge Hesaplamaları Karşılaştırması..... | 55 |
| 7.4 | Yörünge Hesabında Atış Yüksekliği Etkilerinin İncelenmesi..... | 59 |
| 7.5 | Namlu Çıkışında Açısız Sönümlenme Denklemi İncelenmesi..... | 61 |
| 7.6 | Menzildeki Hedefi Sabit İlk Hız ile Vuruş Açısının Hesaplanması..... | 65 |
| 8. | SONUÇ..... | 66 |
| | KAYNAKLAR..... | 72 |
| | EKLER..... | 74 |
| | EK 1. ANSYS CFX Programı Analiz Raporu..... | 75 |
| | EK 2. McDrag Programı C_{d0} Hesap Sonuç Ekranı..... | 77 |
| | EK 3. Aerodinamik Katsayılar Hesaplamalar Tablosu..... | 78 |
| | ÖZGEÇMİŞ..... | 80 |

SİMGELER DİZİNİ

| | |
|---|---|
| α | Yunuslama açısı, deg |
| α_t | Toplam yaw açısı, deg |
| β | Yalpalama açısı (imajiner), deg |
| CG | Mermi burnu ile Kütle Merkezi arasındaki mesafe, m |
| CP _N | Mermi burnu ile Normal Kuvvet basınç merkezi arasındaki mesafe, m |
| CP _F | Mermi burnu ile Magnus Kuvvet basınç merkezi arasındaki mesafe, m |
| C _D | Sürüklenme katsayısı |
| C _{Mα} | Yunuslama kuvvet katsayısı |
| C _{Lα} | Kaldırma kuvvet katsayısı |
| C _{Nα} | Magnus kuvvet katsayısı |
| C _{Mα} | Magnus moment katsayısı |
| C _{N$\dot{\alpha}$} | Yunuslama kuvvet katsayısı |
| C _{M$\dot{\alpha}$} | Yunuslama moment katsayısı |
| C _{Nq} | Yunuslama sönümleme kuvvet katsayısı , q_t ye göre |
| C _{N$\dot{\alpha}$} | Yunuslama sönümleme kuvvet katsayısı , $\dot{\alpha}_t$ ye göre |
| C _{Mq} | Yunuslama sönümleme moment katsayısı , q_t ye göre |
| C _{M$\dot{\alpha}$} | Yunuslama sönümleme moment katsayısı , $\dot{\alpha}_t$ ye göre |
| C _{lp} | Spin sönümleme kuvvet katsayısı |

| | |
|-----------------|--|
| \vec{F}_D | Sürükleme (drag) kuvveti, N |
| \vec{F}_L | Kaldırma (lift) kuvveti, N |
| \vec{F}_1 | Basınç merkezine etki eden net rüzgâr kuvveti, N |
| g | Yerçekimi ivmesi, m/s^2 |
| \vec{H} | Merminin toplam vektörsel açısal momentumu |
| K_F | Hızlı epicyclic yaw modunun (kolunun) genliği |
| K_S | Yavaş epicyclic yaw modunun (kolunun) genliği |
| m | Mermi kütlesi, kg |
| Ma | Mach sayısı |
| ρ | Cismin yoğunluğu, kg/m^3 |
| Re | Reynolds sayısı |
| S | Yüzey kesit alanı, m^2 |
| S_d | Dinamik kararlılık faktörü |
| S_g | Statik kararlılık faktörü |
| t | Zaman, s |
| V | Cismin çizgisel hızı, m/s |
| φ_{F_0} | Hızlı epicyclic yaw modunun (kolunun) başlangıç faz açısı, rad |
| φ_{S_0} | Yavaş epicyclic yaw modunun (kolunun) başlangıç faz açısı, rad |
| φ'_F | Hızlı kol açısal frekansı oranı, rad / kalibre |
| φ'_S | Hızlı kol açısal frekansı oranı, rad / kalibre |

| | |
|-------------|----------------------------------|
| φ_F | Hızlı kol açısal frekansı, rad/s |
| φ_S | Yavaş kol açısal frekansı, rad/s |
| λ_F | Hızlı kol sönümlenme oranı |
| λ_S | Yavaş kol sönümlenme oranı |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|--|----|
| Şekil 1.1 Altı serbestlik dereceli modelde serbestlik dereceleri..... | 2 |
| Şekil 1.2 Mermi üzerine oluşan rüzgâr basıncı gösterimi..... | 6 |
| Şekil 2.1 Bir mermiye kararlı durumda etki eden aerodinamik kuvvetler..... | 7 |
| Şekil 2.2 Basınç merkezine etki ettiği kabul edilen rüzgâr kuvveti | 8 |
| Şekil 2.3 Sürüklenme kuvveti ve kaldırma kuvveti | 8 |
| Şekil 2.4 Bir mermi üzerine etki eden sürüklenme faktörleri | 9 |
| Şekil 2.5 Merminin 850 m/s hızda anlık görüntüsü..... | 9 |
| Şekil 2.6 Sürüklenme faktörlerinin hıza göre değişimi..... | 10 |
| Şekil 2.7 Kaldırma kuvveti ve oluşturan hücum açısı..... | 11 |
| Şekil 2.8 Yunuslama Momentini oluşturan rüzgâr kuvveti..... | 12 |
| Şekil 2.9 Yunuslama momenti..... | 12 |
| Şekil 2.10 Magnus etkisi oluşumu..... | 14 |
| Şekil 2.11 Magnus etkisi ve kuvveti (-) yönlü..... | 14 |
| Şekil 2.12 Magnus kuvveti (pozitif yönde)..... | 15 |
| Şekil 2.13 Magnus momenti..... | 17 |
| Şekil 2.14 Yunuslama sönümleme kuvveti..... | 18 |
| Şekil 2.15 Yunuslama Sönümleme Momenti | 19 |
| Şekil 2.16 Spin sönümleme momenti | 21 |
| Şekil 2.17 Aerodinamik momentlerin kararlı bir mermide yönleri..... | 23 |
| Şekil 3.1 3-Konum ve 3-Açısal momentum serbestlik dereceleri..... | 24 |
| Şekil 4.1 Koordinat eksenlerinin tanımlanması..... | 28 |
| Şekil 4.2 Merminin sağa dönülmesi hareketinin izdüşümü..... | 32 |
| Şekil 4.3 Dinamik Kararlılık ve Sönümlenme..... | 36 |
| Şekil 4.4 Yalpalama açısının dinamik kararlılık sonucu sönümlenmesi..... | 37 |
| Şekil 4.5 Yörünge boyunca S_g faktörünün değişimi..... | 38 |
| Şekil 4.6 S_g faktörü ile S_d faktörünün kesişim şeması..... | 39 |
| Şekil 4.7 a) Dinamik sönümlenme b) Statik kararlılık..... | 40 |
| Şekil 5.1 Merminin hava içinde hareketinde hız alanları..... | 43 |
| Şekil 5.2 Prodas analizinde açısal salınım hareketi hesabı | 45 |
| Şekil 6.1 Akışkanlar dinamiği için hazırlanan çözüm ağı..... | 46 |
| Şekil 6.2 Mermi etrafındaki ortamda oluşan hız dağılımı..... | 47 |
| Şekil 6.3 Mermi üzerinde oluşan basınç dağılımı..... | 47 |

| | |
|---|----|
| Şekil 6.4 Mermi etrafındaki ortamda oluşan basınç dağılımı..... | 48 |
| Şekil 6.5 Modelleme yapılan top mermisi fiziksel özellikleri..... | 49 |
| Şekil 7.1 McDrag, CFX, Prodas ile karşılaştırmalı C_{do} grafikleri..... | 53 |
| Şekil 7.2 Prodas ile hesaplanan C_{do} grafiği..... | 54 |
| Şekil 7.3 Top mermisinin namlu çıkışındaki hızlı kamera görüntüsü..... | 56 |
| Şekil 7.4 Top mermisinin havadaki hızlı kamera görüntüsü..... | 56 |
| Şekil 7.5 YTR ile 15 adet atışa ait verilerin 2-boyutta gösterimi..... | 57 |
| Şekil 7.6 YTR verileri ve hesaplama yapılan yörüngenin gösterimi..... | 57 |
| Şekil 7.7 Atmosfer yoğunluğunun yükseklikle değişimi..... | 60 |
| Şekil 7.8 Yükseklik-Menzil artışı eğrisi..... | 60 |
| Şekil 7.9 $V_0= 935$ m/s ve $\varphi = 51^\circ$ için Prodas sönümleme grafiği..... | 62 |
| Şekil 7.10 $V_0= 935$ m/s ve $\varphi = 51^\circ$ için MATLAB sönümleme grafikleri..... | 62 |
| Şekil 7.11 $V_0= 680$ m/s ve $\varphi = 51^\circ$ için Prodas sönümleme grafiği..... | 63 |
| Şekil 7.12 $V_0= 680$ m/s ve $\varphi = 51^\circ$ için MATLAB sönümleme grafikleri..... | 63 |
| Şekil 7.13 $V_0= 460$ m/s ve $\varphi = 51^\circ$ için Prodas sönümleme grafiği..... | 64 |
| Şekil 7.14 $V_0= 460$ m/s ve $\varphi = 51^\circ$ için MATLAB sönümleme grafikleri..... | 64 |
| Şekil 7.15 Hedefi vuruş açısının hesaplanması..... | 65 |
| Şekil 8.1 Gerçek bir test atışında meydana gelen sürüklenme kuvvet grafiği..... | 68 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Çizelge 2.1 Aerodinamik kuvvet ve momentler hakkında özet bilgiler..... | 22 |
| Çizelge 2.2 Aerodinamik kuvvet ve momentlerin ölçüm doğrulukları..... | 22 |
| Çizelge 6.1 Modelleme yapılan top mermisi kütleli özellikleri..... | 49 |
| Çizelge 7.1 MS-Excel ve Prodas programlarının sonuçları..... | 55 |
| Çizelge 7.2 YTR Test Verileri ve 2-Boyut Yörünge Hesaplaması Karşılaştırması..... | 58 |
| Çizelge 7.3 Rakıma Göre Menzil Azalması..... | 60 |

1. GİRİŞ

Balistik, mermi hareketinin incelendiği uygulamalı bilim dalıdır. Genel olarak bu bilim dalı, iç balistik, dış balistik ve hedef balistiği olmak üzere üç ana bölümde incelenir. İç balistik, merminin namlu içindeki hareketini, dış balistik merminin hava ortamındaki hareketini, hedef balistiği ise merminin hedefte meydana getirdiği etkileri inceler. Bu bilim dalında en az üç farklı uzman bakış açısı bulunmaktadır. 1) Teorikçi 2) Silah ve mermi tasarımcısı 3) Hedefi vurmak için yörüngeyi tahmin eden pratik uygulayıcı. Son kullanıcı için yapılan uygulamalar, balistik koşullardaki değişkenleri göz önüne alacak metotları ve düzeltmeleri geliştirmeyi de içerir. (British Artillery Fire Control, 2009)

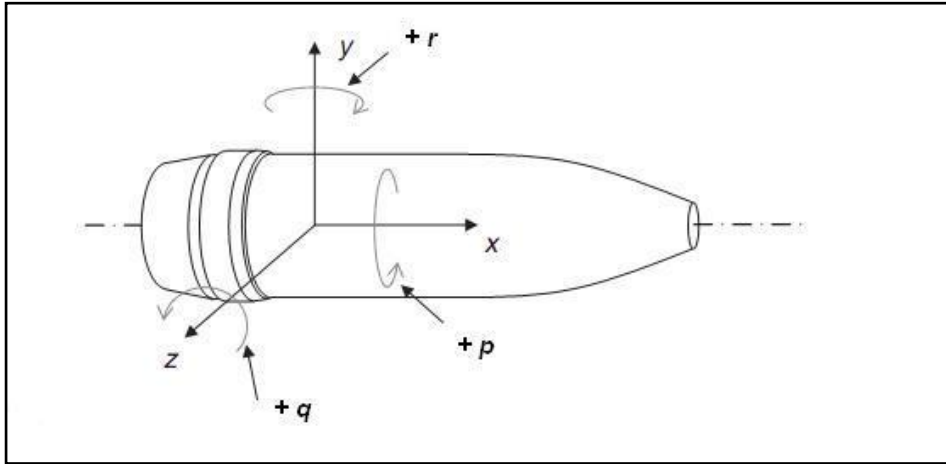
Bir mermi namluyu terk ettikten sonra dış balistikçinin faaliyet alanına girmiş olur ve hedefe vurma anına kadar yaptığı hareketler dış balistik hesaplamaları ile incelenir. Atmosfer ortamında hareket eden cisimler üzerinde oluşan sürtünme kuvveti, cismin büyüklüğü, şekli, hızı, dönüşü, hücum açısı ile birlikte atmosferin koşulları, yoğunluğu, rüzgâr hızı ve yönü, yerçekimi ivmesi gibi birçok faktörden etkilenir. Mermi hareketine etki eden bu parametreler, oluşturdukları kuvvet ve momentlere ait katsayılar, hareket boyunca sabit değildir ve mermi hızına konuma bağlı olarak yörünge boyunca değişkenlik gösterirler. Uzun menzillerde dünyanın dönüşünün de (Coriolis ivmesi) menzil üzerinde etkisi oluşur.

Merminin namludan çıkış anında etrafındaki yanıcı gazların anlık etkisi de dâhil olmak üzere, bütün değişken faktörler hesaplanarak mermi hareketine etkileri yörünge boyunca dış balistikçiler tarafından incelenir. Mermi, uçuş sırasında konumsal ve açısal hareketinde herhangi bir sınırlamaya maruz kalmadığı için serbest bir cisim olarak kullanıcının ve tasarımcının amacına ters olarak karmaşık ve bazen de kararsız olarak hareket edebilir. Bu istenmeyen hareketlerin incelenerek önlenmesi ve merminin hedefe doğru istenen şekilde ilerlemesi dış balistik uzmanlarının temel amacıdır.

Merminin hava ile etkileşmesi sonucunda oluşan kuvvet ve momentlerin hesaplanması, yani mermi aerodinamiğinin hesabı sayesinde, mermi yörüngesinin hesaplanması ve yörünge boyunca maruz kalabileceği kararsız durumların kontrol edilebilmesi mümkündür. Bu çalışmada, merminin yörünge boyunca hareketinde maruz kaldığı

kuvvet ve momentler çeşitli tasarım programları kullanılarak hesaplanmış, merminin yörüngesi, kararlılık ve kararsızlık durumları ise matematiksel hesaplama programları ile belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ise hem sayısal hem de görsel olarak gerçek atış test sonuçları ile doğrulanmıştır. Bu aerodinamik kuvvet ve momentlerin ölçümü aerodinamik ölçüm yapılan poligonlar veya rüzgâr tüneli deneyleriyle elde edilebilir. Bununla birlikte bu tür çalışmaların yüksek maliyetli olmaları sebebiyle bilgisayar analizleri ve benzetimlerinin yapılarak sonuçların gerçek atış testleri ile doğrulanması daha az maliyetli, daha çabuk ve daha doğru sonuçlar vermektedir. Birçok sanayi dalında olduğu gibi savunma sanayinde de üretilecek mermi, roket ve füze gibi ürünlerin kullanım aşamasında istenen performansı gösterebilmesi için tasarım aşamasından itibaren bazı kriterlerin bilinmesi ve uygulanması gerekmektedir.

Balistik hesaplamalara ait temel teoriler ve sürüklenme etkileri 19. yüzyılda anlaşılmaya başlanmıştır ve farklı koşullar için hareket denklemleri geliştirilmiştir. Tek ve katı bir bütünden oluşmuş merminin hareket denklemlerini en hassas şekilde hesaplanması 2. Dünya Savaşı'nı takip eden yıllarda modellenmiştir ve 6 serbestlik dereceli modeller oluşturulmuştur. Bu serbestlik dereceleri, 3 adet konum (x , y , z) ve 3 adet açısal momentum (p , q , r) serbestlik derecesinden oluşmaktadır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 Altı serbestlik dereceli modelde serbestlik dereceleri

Her bir serbestlik derecesine ait diferansiyel denklem diğer diferansiyel denklemler ile çizgisel olmayan şekilde ilişkilidir. Dolayısıyla bu modellemenin çözümü sayısal entegrasyon gerektirir ve ancak güçlü bilgisayarlar kullanılarak hesaplanabilir. 6 serbestlik dereceli model en doğru sonuçları veren çözüm olmasına rağmen bu modelleme zaman ve fazla işlem gücü gerektirmektedir. Ayrıca elde edilmesi zor başlangıç koşulları bilgilerine de ihtiyaç duyulmaktadır ve daha pratik yöntemlere göre kayda değer bir doğruluk artışı elde edilmemektedir. Dolayısıyla daha çok ve özellikle mermi tasarımı ve roket yörünge hesaplamalarında kullanılmaktadır.

Pratik uygulamalarda ise daha sadeleştirilmiş yöntemler kullanılmaktadır. Merminin noktasal kütle olarak kabul edildiği ve hava sürtünmesinin ve yerçekimi kuvvetinin temel alındığı hareket denklemleri oluşturulur. Bu koşullar noktasal kütle yörünge çözümü (Point Mass Trajectory) olarak bilinir ve yine hareketin hız denklemleri çizgisel olmayan denklemlerdir. Dolayısıyla yine sayısal olarak hesaplanması gerekmektedir. Hesaplama tekniklerinin ve bilgisayarların matematiksel modellemelerde kullanılması ile mermi hareketini ve yörüngeyi etkileyen yaklaşık bütün faktörler hesaplamalara dâhil edilebilmiştir. Bu sayede hızlı ve hassasiyeti yüksek sonuçlar elde edilebilmiştir. Atmosfer koşullarındaki değişkenlik ve ölçüm belirsizlikleri, test ve donanımların hassasiyet dereceleri, üretim toleransları gibi faktörlerden dolayı hesaplamalar ile gerçekleşen balistik deneyler arasında bazı farklar oluşsa da bu durumlar ihtiyaç duyulan etkili sonucu elde etmeye engel değildir. Balistik uzmanları tarafından kullanılan modeller ve hesaplama teknikleri her geçen gün geliştirilmeye devam etmektedir. Bu çalışmada kanatsız, dönü kararlı (spin stabilize) bir top mermisinin tasarım ortamında bilgisayar programları ile teorik olarak hesaplanan aerodinamik özellikleri, tasarım kriterleri ve değişik hızlardaki yörüngeleri gerçek zamanlı test sonuçları ile karşılaştırılarak hesaplamaların ölçümler ile uyumlu olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmada incelenen top mermisi, dönü kararlı mermiler için yapılan dış balistik hesaplamalarında karşılaşılabilecek en zorlu koşullara sahip olduğu için özellikle seçilmiştir. Top mermileri en yüksek fırlatma açısı, en fazla dönme hızı, en fazla yüksekliğe ve uzaklığa ulaşma ve göreceli olarak yüksek ilk hız gibi özelliklere sahiptir. Dolayısı ile bu tez çalışmasında yapılan hesaplamalar, bilgisayar analizleri, çözüm yöntemleri ve bilgisayar kodları, tabanca, tüfek mermileri, tank mühimmatları gibi geniş

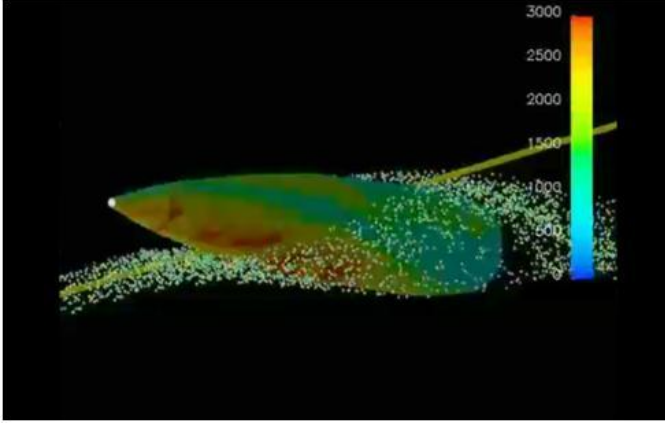
bir yelpazedeki ürünler için de kullanılabilir. Bununla birlikte mevcut bilgisayar yazılımlarında bazı geliştirmeler yapılarak, kanatlı veya düşük dönülü roket, füze ve havan mühimmatları için de uygulanabilir duruma getirilebilir. McCoy, Robert L. (1998) tarafından yazılmış olan “Modern Exterior Ballistics” adlı kitap modern uygulamalar ve matematiksel temeller konusunda detaylı bilgi ve atıflar içermektedir. McDrag ve McTraj adlı programların yanı sıra araştırma laboratuvarlarında kullanılan 4D ve 6D bilgisayar programlarının kıyaslamalı sonuçları bulunmaktadır. Carlucci (2008) tarafından yazılan kitap teorik açıklamalara ek olarak uygulamalı örnekler ile birlikte çözümlerini de vermesi sebebiyle konunun daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır. Weinacht (2003) tarafından 20mm çapındaki bir mermi üzerinde Sayısal Akışkanlar Dinamiği hesaplamaları ile aerodinamik katsayılar belirlenerek deneysel verilerle doğrulanmıştır. SAD hesaplamalarının kullanılabilirliği ve kararlılık kriterlerinin hesaplanması konusunda önemli pratik bilgiler sunulmaktadır. Weinacht (2006) tarafından yapılan bir seminer sunumunda rüzgâr tüneli verileri, Prodas ve SAD programları ile küçük kalibre mermilerin aerodinamik tanımlaması yapılmıştır. Yörünge hesaplamaları için hareket denklemlerinin sayısal entegrasyonu için kullanılan 4. dereceden Runge-Kutta yönteminin kullanımı konusunda özellikle Kiusalaas (2005) ve Fitzpatrick’ in (2006) detaylı açıklamalarından faydalanılmıştır. Bu çalışmada, 2 boyutta çizgisel olmayan hareket denkleminin sayısal entegrasyonla çözümü yapılarak yörünge hesaplanmıştır. Yörünge hesaplaması yapılırken, hıza bağlı sürüklenme katsayısının ve atmosfer yoğunluk değerlerinin de sayısal olarak hesaba katılması ile gerçek yörünge eğrisine büyük uyum elde edilmiştir. Yörünge hesaplamalarına ek olarak, merminin açılma hareketinin tanımlanarak incelenmesi, kararlılık kriterlerinin hesaplanması ve bir atış kontrol programının oluşturulması sonucunda bu tez çalışması mermi balistiği konusunda önemli bir kaynak haline gelmiştir.

Başlangıç olarak bazı tanımlamaların yapılması faydalı olacaktır:

a) Yunuslama (pitching) Hareketi: Merminin burnunu yörünge hareketi boyunca yukarı ve aşağı yönde yaptığı salınım hareketini tanımlar.

b) Yalpalama (yawing) Hareketi: Mermi burnunun yörünge hareketi boyunca sağa ve sola yaptığı salınım hareketini tanımlar.

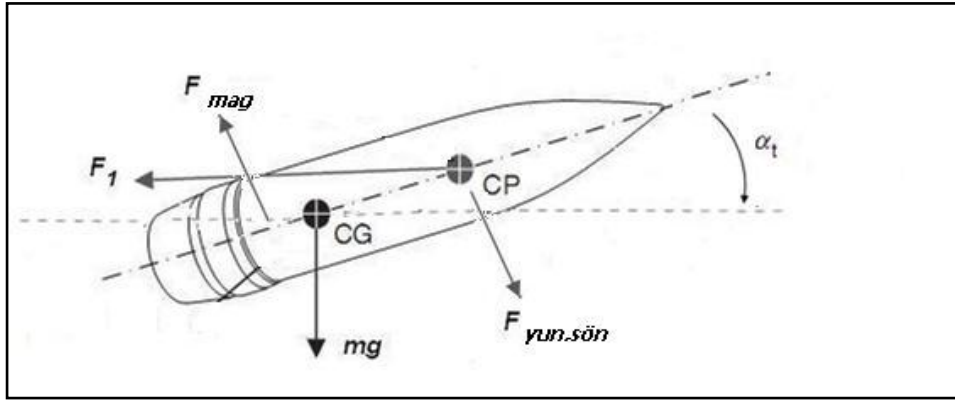
- c) Dönü (spin) Hareketi: Merminin uzunlamasına eksenini etrafında yaptığı dönme hareketini tanımlar. Kanatsız mermilerinde kararlılık mermiye dönü verilerek sağlanmıştır. Küçük mermilerde büyük top mermilerine oranla daha yüksek dönü sayısı gerekmektedir. Topçu mermilerinde 20,000 devir/dakika seviyelerinde, tüfek mermilerinde ise 200,000 devir/dakika seviyelerinde dönü meydana gelir. Dönü oranı merminin ilk hızı ve namlunun yiv açısı ile belirlenir.
- d) Hücüm Açısı: Merminin sağa ve sola yaptığı hareketin toplamı olan ve mermi eksenini ile hız vektörü arasında kalan açığı temsil eder.
- e) Kütle Merkezi (Center of Gravity): Mermiye etkiyen yerçekimi ivmesinin toplam bileşkesinin, etki ettiği varsayılan hayali tek bir noktadır.
- f) Basınç Merkezi (Center of Pressure): Mermi yüzeyine etkiyen rüzgâr kuvvetinin oluşturduğu basıncın, etki ettiği varsayılan hayali tek bir noktadır. Dönü kararlı (uzunlamasına eksenini etrafında dönüyorsa) mermiler için basınç merkezi noktası merminin kütle merkezinin (KM) önünde bulunur. Roket veya füze gibi kanatlarla kararlı hale getirilen mermiler için basınç merkezi noktası ağırlık merkezinin arkasında bulunur. Basınç merkezinin bulunduğu nokta, akış alanının şartlarına bağlıdır ve mermi hızının azalması ile birlikte yeri de değişir. Bilgisayar simülasyonu ile elde edilmiş Şekil 1.2'deki beyaz noktalarla hava akımı merminin arka tarafına doğru artmaktadır (noktaların yakınlığı veya arttığı yerler hava basıncının arttığını, seyrekleştiği yerler ise hava basıncının azaldığı bölgeleri göstermektedir).
- g) Serbestlik Derecesi (Degree of Freedom): Merminin momentum ve konum uzaylarında hareket serbestliği olan boyut sayısını ifade eder. Genel anlamda hareket denklemleri çözülürken 3 momentum ve 3 konum uzayı olmak üzere 6 serbestlik derecesi bulunmaktadır.
- h) Namlu hızı (Muzzle Velocity) : Merminin namluyu terk ettiği anda sahip olduğu hızdır. Dış balistik hesaplamalarında önemli bir giriş değişkenidir.



Şekil 1.2 Mermi üzerine oluşan rüzgar basıncı gösterimi

2. KURAMSAL TEMELLER

Bu kısımda dönü kararlı mermiler için geçerli olan aerodinamik kuvvet ve momentler tanımlanacaktır. Şekillerde kuvvet ve momentler pozitif yönde gösterilse de bazı kuvvet ve momentler bazen gerçekte bunun tersi yönde etki ederler (Şekil 2.1). Örneğin spin sönümlenme moment katsayısı her zaman negatiftir, Magnus moment katsayısı pozitif veya negatif olabilir. Kuvvet ve momentlerin şekillerdeki yönleri araştırılarak, gerçek yönlerine göre yorumlanmalıdır. Bu kuvvetler aşağıda anlatılmaktadır.



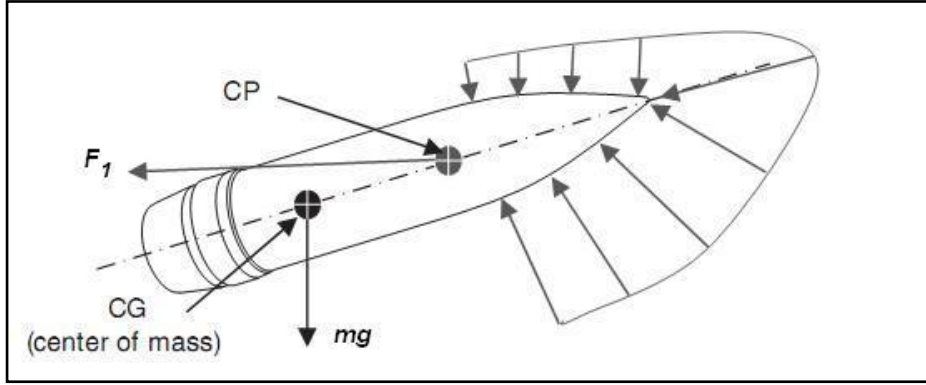
Şekil 2.1 Bir mermiye kararlı durumda etki eden aerodinamik kuvvetler

2.1 Sürüklenme Kuvveti

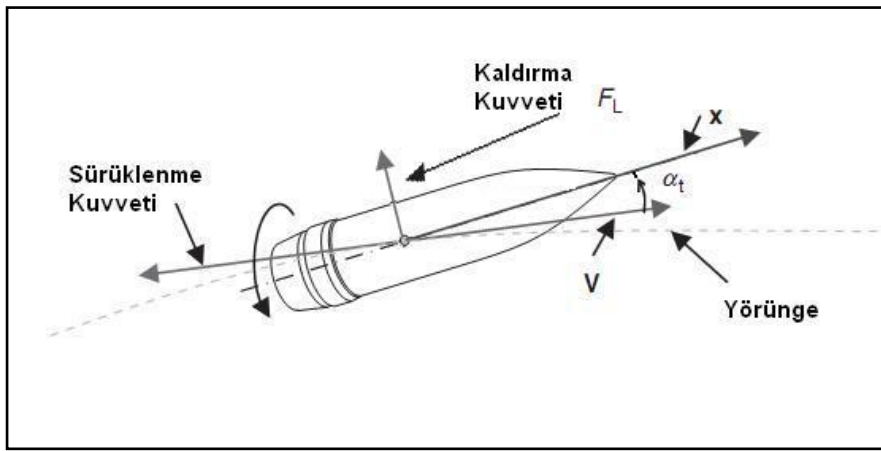
Sürüklenme kuvveti mermi üzerine etkiyen en önemli aerodinamik kuvvettir. Bir mermi α_t yalpalama açısında ve \vec{V} hızında hareket ediyor ise akış alanındaki hareketten dolayı mermi yüzeyindeki basınç farklılıkları Şekil 2.2'deki gibi net bir F_D rüzgâr kuvveti oluşturur. Bu kuvvet merminin basınç merkezi (BM) noktasına etki ettiği kabul edilir (Şekil 2.2).

$$\vec{F}_D = -\frac{1}{2} \rho S C_D V^2 \vec{i} \quad (2.1a)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho S C_D V^2 \quad (2.1b)$$



Şekil 2.2 Basınç merkezine etki ettiği kabul edilen rüzgâr kuvveti



Şekil 2.3 Sürüklenme kuvveti ve kaldırma kuvveti

F_D = Sürüklenme (drag) kuvveti, (Şekil 2.3)

F_L = Kaldırma (lift) kuvveti,

F_I = basınç merkezine etki eden net rüzgâr kuvveti,

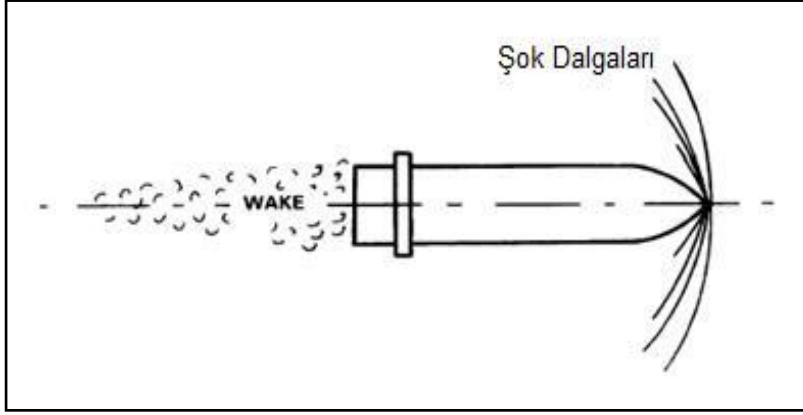
α_t = Hücüm açısı,

Hücüm açısının olmadığı durumda F_D kuvveti F_I rüzgâr kuvvetinin tek bileşenidir.

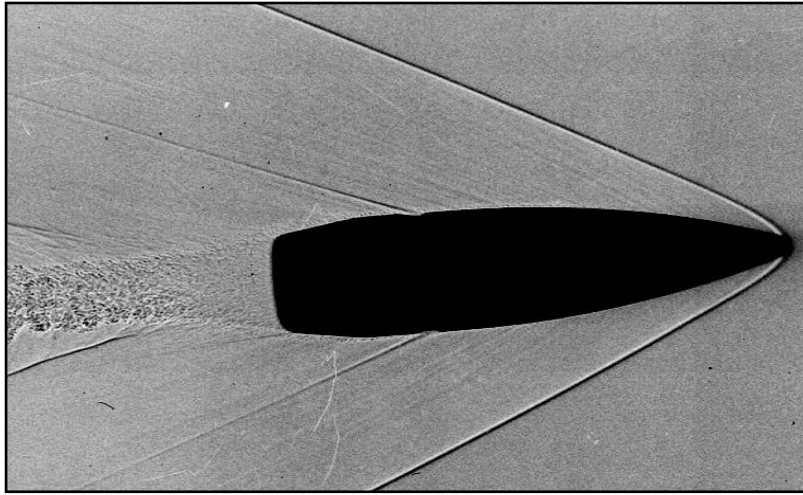
Sürüklenme Katsayısı - C_d

Sürüklenme katsayısı merminin uçuş performansını kestiriminde çok önemli ve mermi menziline etkileyen en önemli katsayılardan biridir. Bir mermi üzerindeki toplam sürüklenme uç ve arka kısmındaki sürüklemelerden oluşur. Uç sürüklenme hem basınç hem de atmosferin akışkanlığı (viskozite) bileşenlerini içerir. Basınç sürüklenmesi, merminin ön ve arkası arasındaki basınç farklılığından oluşur, fakat ses altı ve ses üstü bölgelerde büyük farklılık bulunur bu yüzden ses hızı bölgesinde özellikle kaotiktir.

Yüzey sürüklenmesi mermi yüzeyi ile hava sınır tabakasının etkileşiminden oluşur. Boy uzunluğu değişiminin, arka veya dip sürüklenmeye etkisi çok az olmaktadır. Dip sürüklenme ise, mermi arkasındaki hava akımının hava burgacı etkisi oluşturması ve vakum etkisiyle hareket yönüne karşı sürüklenmeden kaynaklanır (Şekil 2.4). Şekil 2.5 'te standart bir NATO mermisinin (7.62 x 51) 850 m/s (2.5 M) hızda etrafında ne kadar havayı sürüklediğini göstermektedir.

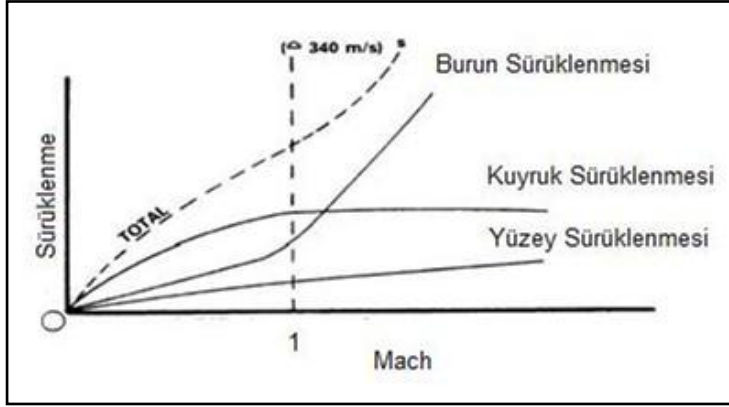


Şekil 2.4 Bir mermi üzerine etki eden sürüklenme faktörleri



Şekil 2.5 Merminin 850 m/s hızda anlık görüntüsü

1.8 Mach hızda ve $L/D=9$ ölçüsündeki bir mermi gövdesinde, burun kısmının basınç sürüklenmesi %39, yüzey viskozite sürüklenmesi %25, dip mermi sürüklenmesi %36 oranlarında olmaktadır. (Weinacht 2003) (Şekil 2.6)



Şekil 2.6 Sürüklenme faktörlerinin hıza göre değişimi

C_d katsayısı değişkendir ve cismin hızı, akış yönü, cismin şekli, akışkan yoğunluğu ve akışkan viskozitesinin bir fonksiyonu olarak değişir. Bu durum Şekil 2.6 da hıza bağlı olarak merminin değişik bölgelerinde hava sürüklenmesinin nasıl değiştiği gösterilmektedir. C_d genel olarak şu faktörlerden etkilenir;

Reynolds sayısı, Re ,

Hücum açısı α_t ,

Merminin geometrisi,

Mach sayısı Ma ,

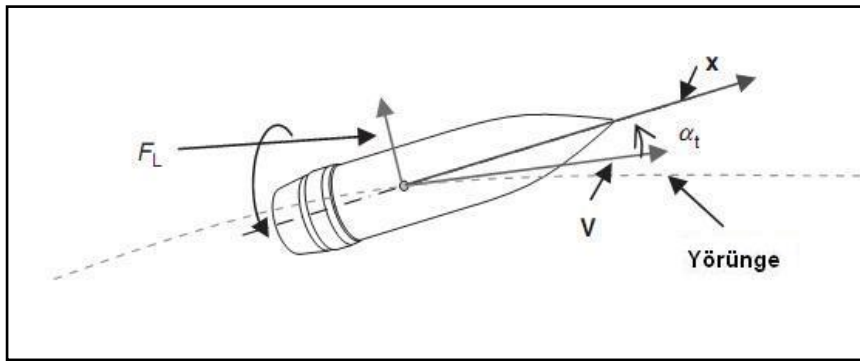
Boyutsuz olarak tanımlanan Reynolds sayısı Re içinde, hız, kinematik viskozite ve karakteristik uzunluk ifade edilebilir ve bu yüzden C_d , Re 'nin fonksiyonudur. Süpersonik ($V > 1.1Ma$) hızlarda, C_d 'nin Reynolds (Re) bağımlılığı ihmal edilebilir. Sıkıştırılabilir akış içinde ses hızı da etkin olur ve C_d Mach sayısının da bir fonksiyonudur. Hücum açısı, mermi eksenini ile yörünge tanjantı arasındaki açıdır, mermi dönüşünden kaynaklanır, mermiyi yana sürükleyen ve bir miktar kaldırma kuvveti oluşturan ve menzili artıran bir etki oluşturur. Mermi kararlılığının bir fonksiyonudur. Büyük hücum açıları kararsız durumun bir göstergesidir. Uygulanan fiziksel balistik modele bağlı olarak, hücum açısı (α_t) bağımlılığı ya tamamen ihmal edilir ($\alpha_t = 0$) ya da sadece küçük açılar durumunda hesaplamalara dâhil edilir. Küçük hücum açılarında da genellikle aşağıdaki yaklaşım kullanılır:

$$C_d = C_{d0} + C_{d\delta}^2 * \delta^2 \quad (2.2)$$

Denklemdaki C_{d0} hücum açısının sıfır olduğu durumdaki sürüklenme katsayısıdır. $C_{d\delta}^2$ ise hücum açısından kaynaklanan sürüklenme kuvveti katsayısı bileşenidir. Buradaki; $\delta = \sin(\alpha_t)$, $\alpha_t = \text{karekök}(\alpha^2 + \beta^2)$, α_t - hücum açısı, α - yunuslama, β - yalpalama hareketidir. Merminin hareketini teorik irdelerken bu parametrelerin hepsinin doğru tahmin edilmesiyle deneysel sonuçlara en yakın değerler elde edilebilir. Bu katsayıların hepsinin doğru tahmin edilmesi zordur. Hesaplamalarda bazen yaklaşımlar yapılır. Bu durumda sürüklenme katsayısı daha kolay hesaplanır.

2.2 Kaldırma Kuvveti

Kaldırma kuvveti F_L , F_I rüzgâr kuvvetinin bir bileşenidir ve kütle merkezi bu durumda hücum açısı düzlemi üzerindeki hareketine dik yöndedir (Şekil 2.7). Hücum açısı olmadığı zaman F_L kaldırma kuvveti oluşmaz.



Şekil 2.7 Kaldırma kuvveti ve oluşturan hücum açısı

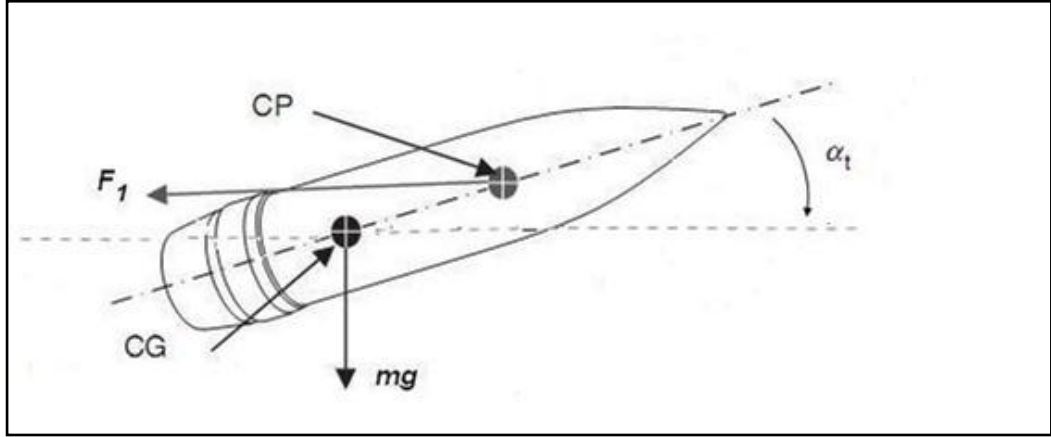
$$\vec{F}_L = \frac{1}{2} \rho S C_{L\alpha} V^2 [\vec{i} \times (\vec{x} \times \vec{i})] \quad (2.3a)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho S C_{L\alpha} V^2 \sin \alpha_t \quad (2.3b)$$

Kaldırma kuvveti toplam hücum açısının sinüs'ü ile orantılıdır, her zaman yörünge çizgisine dik olarak etkiler. Merminin uzunlamasına simetri eksenini ile yörünge içinde bulunduğu düzlemedir. Toplam hücum açısı sıfır olduğunda kaldırma kuvveti de yok olur.

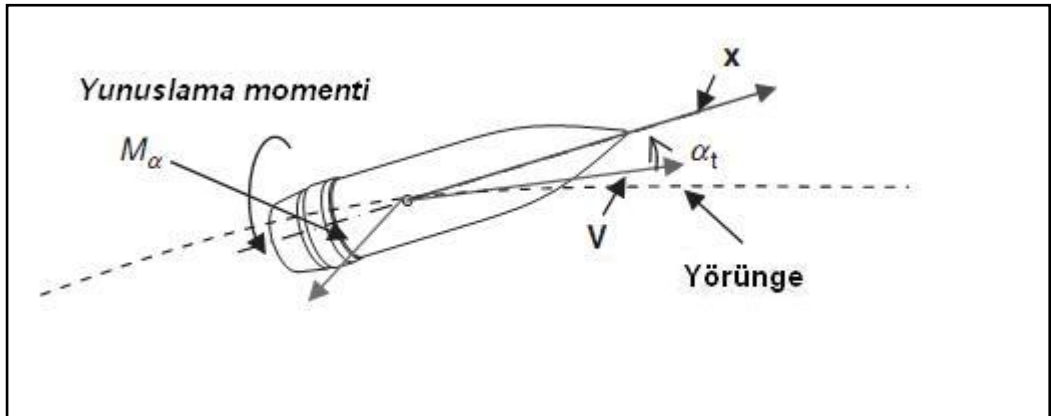
2.3 Yunuslama Momenti

Basınç merkezi üzerine etki eden F_1 rüzgâr kuvveti, merminin kütle merkezi üzerinde eşit yön ve büyüklükte bir kuvvet ve ek olarak yunuslama (pitching/overturning) momenti oluşturur (Şekil 2.8). Bu etki Şekil 2.9'da daha ayrıntılı görülmektedir.



Şekil 2.8 Yunuslama Momentini oluşturan rüzgâr kuvveti

Bu oluşan yunuslama momenti, basınç merkezi ve kütle merkezi arasındaki mesafeden dolayı oluşmuştur ve mermiyi kütle merkezi'den geçen, merminin simetri eksenine (boylamasına) dik bir eksen üzerinde döndürmeye çalışır. Yunuslama momenti, kaldırma kuvveti ile yani α_t ile ilişkili aerodinamik bir momenttir. Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'daki gibi mermi burnu yörüngenin üstünde ise pozitif bir yunuslama momenti, yunuslama açısını büyütecek şekilde etki eder.



Şekil 2.9 Yunuslama momenti

$$\vec{M}_\alpha = \frac{1}{2} \rho S d C_{M_\alpha} V^2 (\vec{i} \times \vec{x}) \quad (2.4a)$$

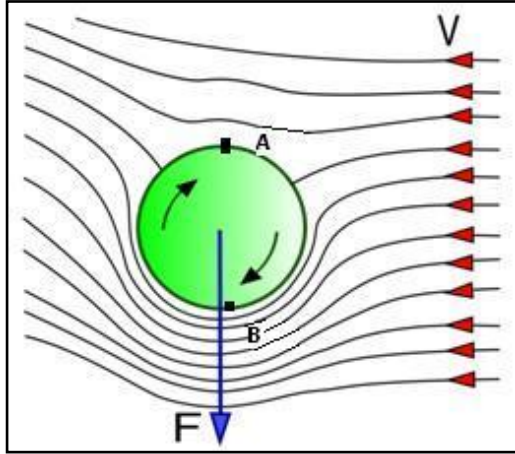
$$M_\alpha = \frac{1}{2} \rho S d C_{M_\alpha} V^2 \sin \alpha_t \quad (2.4b)$$

Merminin içinde hareket ettiği akış alanı değiştikçe basınç merkezi noktası da Mach sayısının bir fonksiyonu olarak değişir. Dönü kararlı (uzunlama eksenini etrafında dönen) mermilerde bu moment hücum açısını α_t artırmaya ve merminin hareketini kararsız (destabilized) hale getirmeye çalışır. Merminin dönüşünün olmadığı durumda ise mermi takla atar. Yunuslama momenti, toplam hücum açısının sinüsü ile değişir, pozitif bir katsayı ile sürekli hücum açısını artırır. Bu yüzden dönüşüz bir mermi, pozitif C_{M_α} katsayısına sahipse kararsızlaşma eğilimindedir.

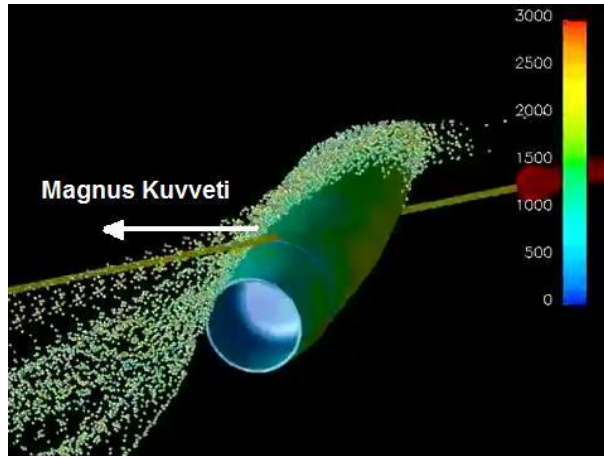
2.4 Magnus Etkisi ve Kuvveti

Bir akış alanı içerisinde dönerek hareket eden bir cisim, Şekil 2.10 'daki şartlarda A ve B noktalarında farklı basınçlar hissedecektir. Bunun sebebi Bernoulli ilkesi gereği hızın yüksek olduğu B noktasında düşük basınç, hızın düşük olduğu A noktasında yüksek basınç oluşur. Sonuç olarak şekilde görüldüğü gibi A noktasından B noktasına doğru bir kuvvet oluşur. Bu kuvvete Magnus Kuvveti, bu etkiye ise Magnus Etkisi denir. (Wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Magnus_effect, 2008)

Aşağıdaki Şekil 2.11 'de bir merminin arkadan görüntüsü verilmekte ve merminin sağa döndü (rüldü)ğü kabul edilmektedir. Ayrıca mermi bir α_t hücum açısına sahiptir. Merminin boylamsal eksenini yukarı doğru eğimlidir (yunuslama hareketi yapmaktadır). Merminin simetri eksenine dik bir akış alanının hız bileşeni (V) vardır. Merminin bu şekilde simetri eksenini etrafında dönmesi ve mermi yüzeyine yapışık hava molekülleri sebebiyle mermi etrafındaki akışkan alanı asimetric hale gelir. Hava akış hızı üst noktada yavaş alt noktada hızlıdır (çizgiler merminin üst kısmında birbirinden uzaklaşmakta, alt kısmında ise birbirine yaklaşmaktadır).



Şekil 2.10 Magnus etkisi oluşumu



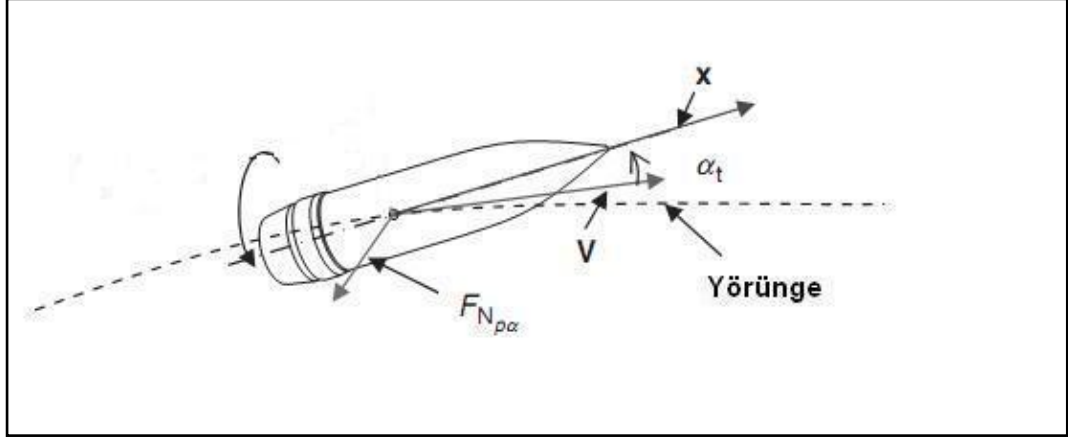
Şekil 2.11 Magnus etkisi ve kuvveti (-) yönlü

Dolayısıyla Bernoulli kuralı gereğince merminin etrafında basınç farklılığı oluşur. Bu basınç eşitsizliği, ortamdaki akışkana ve mermi yüzeyinin akışkanla viskoz etkileşimine bağlıdır. Bu basınç farklılığının oluşturduğu etkiye Magnus etkisi, kuvvete ise Magnus kuvveti denir. Magnus kuvveti daima yunuslama hareketi düzlemine dik yönde etki yapar, aero balistikçiler bu kuvvete “yan kuvvet” de demektedir. Magnus kuvveti aşağıdaki denklemlerdeki gibi ifade edilebilir:

$$\vec{F}_{N_{p\alpha}} = \frac{1}{2} \rho V^2 S \left(\frac{p^d}{v'} \right) C_{N_{p\alpha}} (\vec{i} \times \vec{x}) \quad (2.5a)$$

$$F_{N_{p\alpha}} = \frac{1}{2} \rho V^2 S \left(\frac{p^d}{v'} \right) C_{N_{p\alpha}} \sin \alpha_t \quad (2.5b)$$

Şekil 2.12 'de pozitif yönde kabul edilen Magnus kuvveti gösterilmektedir. Pratikte ise kararlı bir mermide Magnus kuvveti negatif yöndedir, yani Magnus kuvvet katsayısı $C_{N_{p\alpha}}$ genellikle küçük, negatif bir büyüklüktür.



Şekil 2.12 Magnus kuvveti (pozitif yönde)

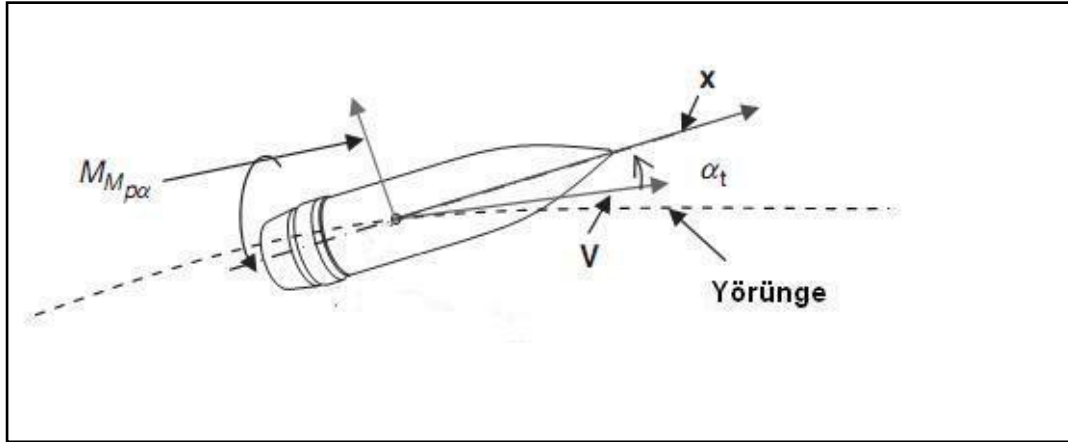
Şekil 2.12'deki merminin Magnus basınç merkezi'nin kütle merkezinin arkasında yer aldığı varsayılmıştır. Bu tür dönülü mermilerle yapılan deneyler göstermiştir ki ses üstü hız rejiminde mermiler namlu çıkışında, Magnus basınç merkezi, bu gösterimdeki gibi kütle merkezinin arkasında oluşur.

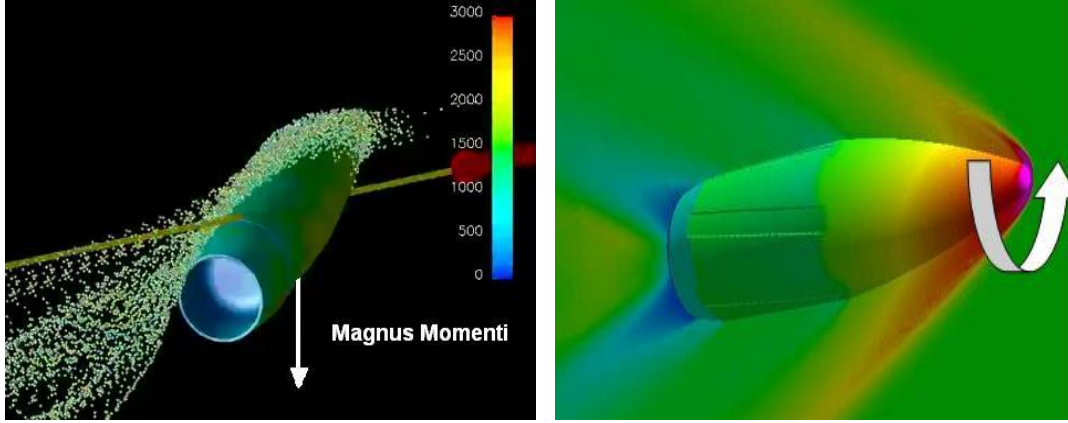
Magnus kuvveti dönün ve hücum açısının sinüsünün çarpımı ile orantılıdır, bu yüzden dönü veya hücum açısı sıfır olursa Magnus kuvveti de oluşmaz. Magnus etkisi ile oluşan Magnus kuvveti merminin basınç merkezine etki eder. Basınç merkezinin konumu akış alanının bir fonksiyonu olarak değişir. Magnus etkisinin mermi hareketinde etkili olduğu durumlarda basınç merkezinin kütle merkezinin önünde veya arkasında olması önemlidir. Magnus kuvvetini oluşturan etkenlerden biri de yan rüzgâr olabilmektedir. Magnus kuvveti diğer kuvvetlerle kıyaslandığında, sürüklenme kuvveti F_D kadar önemli bir büyüklüğe sahip değildir. Bununla beraber Magnus etkisinin mermi kararlılığına önemli bir katkısı vardır. Çünkü Magnus kuvveti merminin kütle merkezine değil merminin Magnus basınç merkezine etki etmektedir. Bunun anlamı Magnus kuvveti hücum açısını etkilemektedir. Merminin basınç merkezi merminin kütle merkezi önünde bulunuyor ise, Magnus etkisi merminin hareketini kararsızlaştırıcı bir kuvvet olarak etki edecektir. Tersine durumda yani basınç merkezi kütle merkezinin arkasında bulunuyor ise, Magnus etkisi merminin hareketini kararlılaştırıcı bir kuvvet olarak ortaya çıkacaktır.

Magnus Basınç merkezi'nin konumu akış alanının yapısına bağlıdır. Magnus kuvvetinin etki ettiği Magnus basınç merkezi, şayet kütle merkezi'nin arkasında bulunursa kararlılık etkisi oluşur ve hücum açısını α_t azaltma eğilimindedir. Merminin basınç merkezi, merminin kütle merkezinin önünde bulunursa, Magnus kuvveti mermiyi kararsızlaştırır ve hücum açısının büyümesine neden olur. Akış alanı yapısı hız (ses üstü veya ses altı), şekil, yoğunluk ve yüzey özelliklerinin bir fonksiyonudur. Magnus kuvveti kararlılığı büyük oranda etkiler çünkü mermiyi ya uçuş eksenine etrafına (kararlı durum) veya uçuş ekseninin uzağına doğru (kararsız durum) uçuş boyunca döndürmeye çalışır. Kararsızlaştırıcı durum özel bir hız bölgesinde gerçekleşir. Magnus etkisi dış balistikte “spin sürüklenmesi” olarak ta bilinir.

2.5 Magnus Momenti

Merminin basınç merkezine etki eden Magnus kuvveti, merminin kütle merkezinde bir moment oluşturur ve bu moment Şekil 2.13'teki gibi gösterilebilir. Bu moment Magnus momenti olarak bilinir. Bu moment mermiyi uzunlama eksenine dik bir ekseninde döndürmeye çalışır.





Şekil 2.13 Magnus momenti

Şekil 2.13 (a)'da Magnus Momenti pozitif yönde gösterilmiştir. Magnus moment katsayısı merminin şekli, kütle merkezi konumu, yalpalama hareketinin genliği ve Mach sayısına bağlı olarak pozitif veya negatif olabilir. Magnus moment katsayısı, $C_{M_{p\alpha}}$ spin ve hücum açısı birleşiminin akış asimetrisi sebebiyle oluşan bir yan momentini temsil eder.

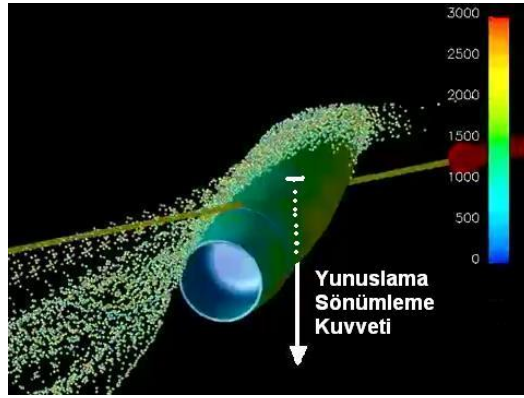
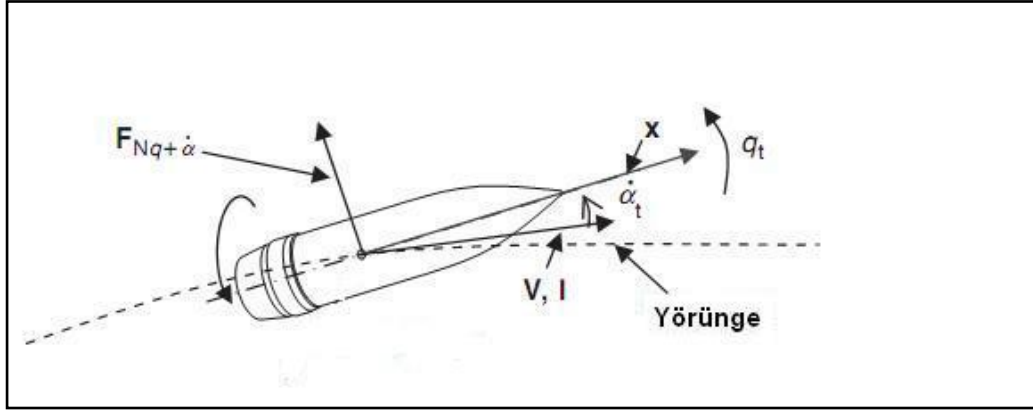
$$\vec{M}_{M_{p\alpha}} = \frac{1}{2} \rho S d \left(\frac{p d}{V} \right) V^2 C_{M_{p\alpha}} [\vec{x} \times (\vec{i} \times \vec{x})] \quad (2.6a)$$

$$M_{M_{p\alpha}} = \frac{1}{2} \rho S d \left(\frac{p d}{V} \right) V^2 C_{M_{p\alpha}} \sin \alpha_t \quad (2.6b)$$

Dönen bir mermide Magnus kuvveti ihmal edilebilecek kadar küçük olmasına rağmen, Magnus momenti her zaman dikkate alınmalıdır. Çünkü $C_{M_{p\alpha}}$ 'nın büyük değerleri dinamik kararlılık üzerinde büyük etkisi olabilir. Magnus momenti dönü kararlı mermilerin dinamik kararlılığı için çok önemlidir.

2.6 Yunuslama Sönümlenme Kuvveti

Merminin yunuslama hareketine karşı oluşturduğu tepki kuvvetidir. Şekil 2.14 (a) pozitif yöndeki yunuslama sönümlenme kuvvetini, pozitif yunuslama açısal hızı, q için göstermektedir.



Şekil 2.14 Yunuslama sönümlenme kuvveti (a) pozitif yön(b) negatif yön

Yunuslama sönümlenme kuvveti açısal hız düzleminde etki eder. Yunuslama sönümlenme kuvveti iki bileşen içerir, yan açısal hız ile orantılı kısım (yunuslama hızı $q_t = \sqrt{q^2 + r^2}$) ve hücum açısının değişim oranı $\dot{\alpha}_t$ ile orantılı kısım. (q_t ve $\dot{\alpha}_t$) nin düzlem atışlarında denk olduğu düşünülerek yapılan yaklaşımla basitleştirilen ifadeler şu şekilde oluşturulur:

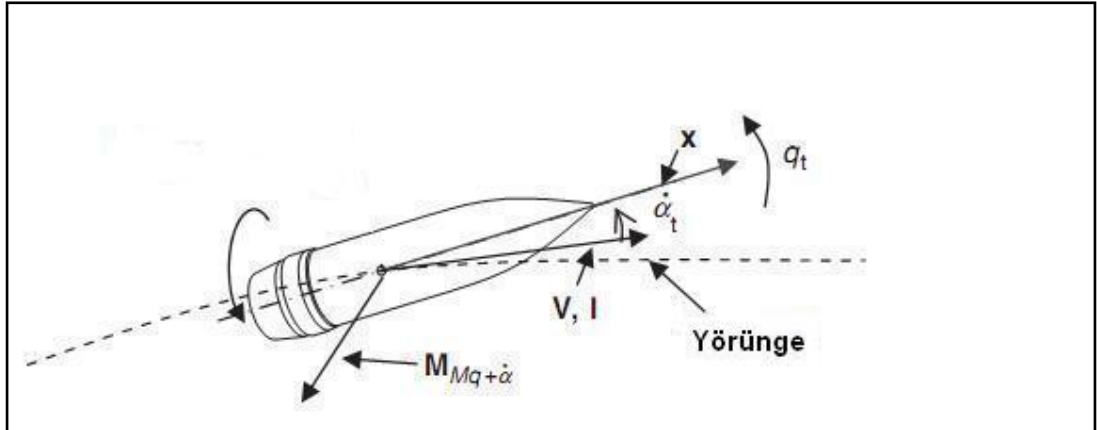
$$\vec{F}_{N_{q\dot{\alpha}}} = \frac{1}{2} \rho S d \left(C_{N_q} + C_{N_{\dot{\alpha}}} \right) V \left(\frac{d\alpha}{dt} \right) \quad (2.7a)$$

$$F_{N_{q\dot{\alpha}}} = \frac{1}{2} \rho S d \left(\frac{q_t d}{V} \right) V^2 \left(C_{N_q} + C_{N_{\dot{\alpha}}} \right) \quad (2.7b)$$

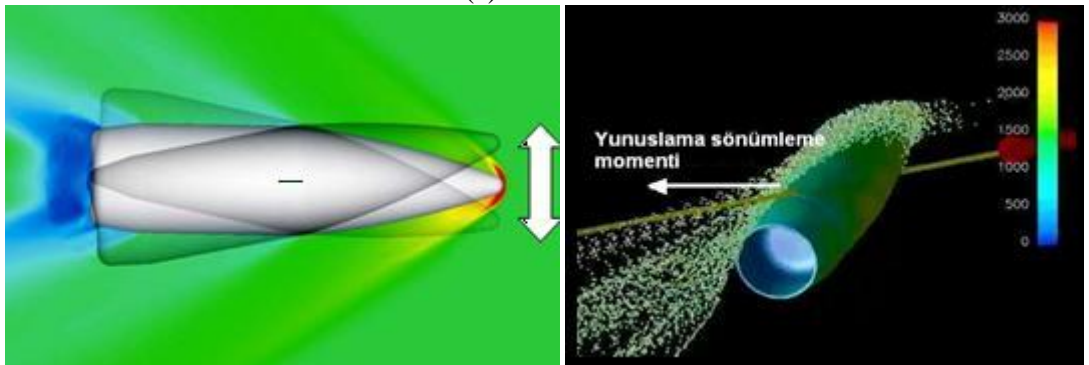
Dönü kararlı mermilerde yunuslama sönümlenme kuvveti normal kuvvetten çok daha küçüktür. Spark fotoğrafı tekniğinde sadece birkaç ölçüm gözlenebilmiştir. Yunuslama sönümlenme kuvveti, Magnus kuvveti gibi mantıksal bütünlük için elde tutulur fakat pratikte genellikle ihmal edilir, mermi hareketinde ölçülebilir bir etki göstermez.

2.7 Yunuslama Sönümlenme Momenti

Yunuslamayı sönümlenme momenti (Jiroskopik Etki olarak da bilinir) mermiyi bir eksen etrafında döndürmeye çalışır, bu eksen hız vektörü ve mermi ekseninin oluşturduğu düzleme diktir. Eğer merminin yeterli dönüşü varsa, yani kendi eksenini etrafında yeteri kadar hızlı dönüyorsa, jiroskopik etki oluşur. Merminin uzunlamasına eksenini, sürüklenme düzlemine dik olan yunuslama moment eksenine doğru hareket eder. Bununla beraber mermi ekseninin yönü değişimi sürüklenme düzleminin yönünü de değiştirir, daha sonra mermi eksenini hız vektörü etrafında döner. Bu hareket **precession** veya **slow mode oscillation** olarak adlandırılır. Yunuslama sönümlenme moment Şekil.2.15(a)'da pozitif açısal hız yönünde gösterilmiştir. Yunuslama sönümlenme momentini oluşturan iki bileşen, q_t ve α_t 'nin denk olduğu varsayılmıştır.



(a)



(b)

(c)

Şekil 2.15 Yunuslama sönüm. moment(a)pozitif yön(b)negatif yön(c)mermiye etkisi

$$\vec{M}_{M_q \dot{\alpha}} = \frac{1}{2} \rho S d^2 (C_{M_q} + C_{M_{\dot{\alpha}}}) V \left(\vec{x} \times \frac{d\vec{x}}{dt} \right) \quad (2.8a)$$

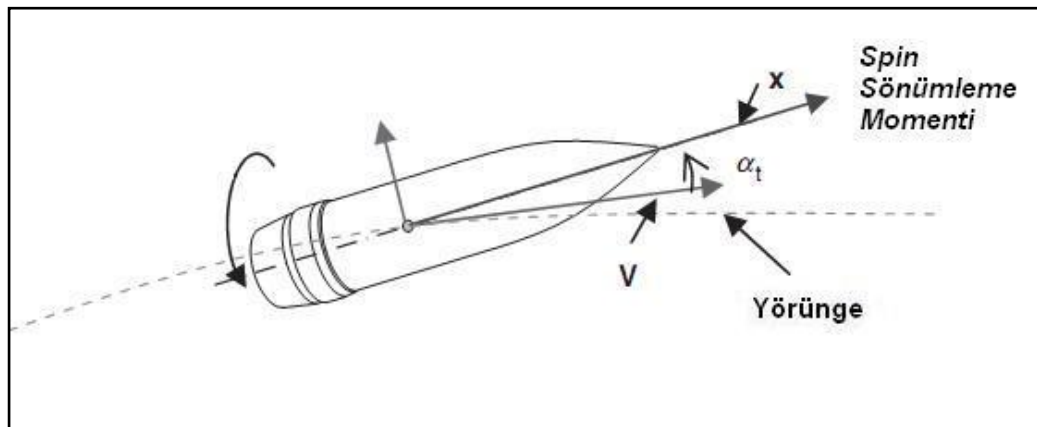
$$M_{M_q \dot{\alpha}} = \frac{1}{2} \rho S d \left(\frac{q_1 d}{r} \right) V^2 (C_{M_q} + C_{M_{\dot{\alpha}}}) \quad (2.8b)$$

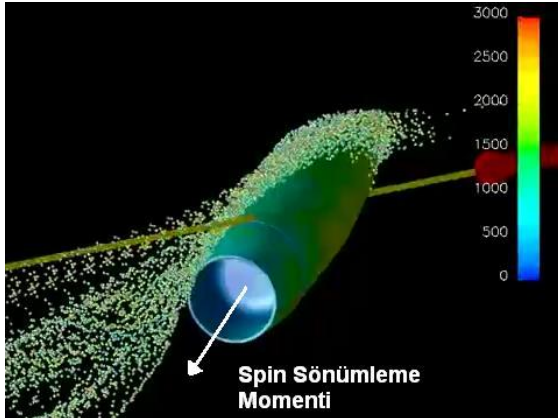
Yunuslama sönümlenme kuvveti genellikle ihmal edilebilir olmasına rağmen, yunuslama sönümlenme momenti dinamik kararlılığa etkisi sebebiyle her zaman hesaba katılmalıdır. Genellikle pozitif yunuslama sönümlenme momenti toplam yan açısız hızı artırmaya çalışır dolayısıyla merminin hareketini kararsızlaştırıcı bir etkisi vardır. Merminin dinamik kararlılığı (stabilizesi) için yunuslama sönümlenme momenti katsayısı toplamı ($C_{M_q} + C_{M_{\dot{\alpha}}}$) negatif olmalıdır. Balistikçiler ve mermi tasarımcılarının şansları olarak bu katsayı genellikle de negatiftir. Yunuslama sönümlenme momentinin gözlemlendiği çoğu durumda bu momentin yalpalama hareketine etkisi Magnus momentinin etkisinden çok daha küçük olmaktadır. Hesaplamalar ile deneysel verilerin karşılaştırılması (Weinacht Sturek ve Schiff 1997) tarafından belirtilmiştir. (Weinacht 2003)

Hücum açısı mermiyi yukarı doğru çekmeye çalışır fakat jiroskopik etki buna tepki olarak mermi yönünü sağa doğru çevirir. Bu etki mermiyi sola doğru çeviren Magnus kuvvetinden çok daha kuvvetlidir. Magnus kuvveti ise sırası geldiğinde sağa doğru etkileyen Poisson etkisinden daha kuvvetli olur. (British Artillery Fire Control 2009)

2.8 Spin Sönümlenme Momenti

Spin sönümlenme momenti; merminin dönü hareketine karşı gelen momenttir. Merminin eksensel dönüşünü daima azaltıcı bir etkisi vardır (Şekil 2.16).





Şekil 2.16 Spin sönümlenme momenti a) spin artırıcı b) spin azaltıcı yönde

$$\vec{M}_{M_{lp}} = \frac{1}{2} \rho S d V^2 \left(\frac{p \cdot d}{V} \right) C_{lp} \vec{x} \quad (2.9a)$$

$$M_{M_{lp}} = \frac{1}{2} \rho S d V^2 \left(\frac{p \cdot d}{V} \right) C_{lp} \quad (2.9b)$$

Yukarıdaki denklemede $(p \cdot d / V)$ değerinin dış balistikte özel bir önemi vardır. Bu katsayı yörüngedeki bir mermi için dönü veya eksensel dönünün hıza oranı (boyutsuz birimlerde) olarak tanımlanabilir. Tipik dönü-kararlı mermilerde spin sönümlenme moment katsayısı her zaman negatiftir. Merminin hem dönüşü, hem de hızı yörünge boyunca azalır. Bununla beraber spin sönümlenme, hızdaki sürüklenme etkisinden çok daha azdır, bu yüzden dönü kararlı mermilerde dönünün hıza oranı $(p \cdot d / V)$ sürekli artar. Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2’de bir atmosfer içinde hareket eden mermiye etki eden kuvvetler ve bunların oluşması (dikkate değer hale gelmesi) için bazı durumlar anlatılmaktadır. Hesaplamalarda kuvvetler önem derecesine göre dikkate alınması gerekmektedir.

Çizelge 2.1 Aerodinamik kuvvet ve momentler hakkında özet bilgiler

| Aerodinamik Kuvvetler | Gerek Şart | Öne mi |
|------------------------------|-------------------|--|
| Drag | | En önemli aerodinamik kuvvet |
| Kaldırma | Yalpa | Menzilce sürüklenme ve salınım sebebi. |
| Magnus | Yalpa, Dönü | Çok küçük, dinamik kararlılık önemli |
| Yunuslama Sönümlenme | Yalpa, Dönü | Çok küçük, kararlılık için önemli |
| Aerodinamik Momentler | Gerek Şart | Öne mi |
| Yunuslama | Yalpa | Kararsızlaştırıcı etkisi var |
| Yunuslama Sönümlenme | Yalpa, Dönü | Dinamik kararlılık açısından önemli, (-) |
| Magnus | Yalpa, Dönü | Dinamik kararlılık açısından önemli |
| Spin Sönümlenme | Yalpa, Dönü | Dönü azaltıcı etkisi var. |

Çizelge 2.2 Aerodinamik kuvvet ve momentlerin ölçüm doğrulukları

| SPİN DÖNÜLÜ MERMİLER | | | |
|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Aerodinamik Katsayı | Katsayı Sembol | Rüzgar Tüneli Doğruluğu (%) | Balistik Menzil Doğruluğu (%) |
| Sürüklenme Kuvveti (Drag) | C_D | 5-10 | 1-2 |
| Normal Kuvvet (Lift) | $C_{N\alpha}$ | 3-7 | 5-10 |
| Magnus Kuvveti | $C_{Np\alpha}$ | Geniş | 25 |
| Yunuslama Momenti | $C_{M\alpha}$ | 5-10 | 0-3 |
| Yunuslama Sönüm. Momenti | $C_{Mq} + C_{M\dot{\alpha}}$ | Geniş | 10-20 |
| Magnus Momenti | $C_{Mp\alpha}$ | Geniş | 10-20 |
| Spin Sönüm. Momenti | C_{lp} | Geniş | 10 |

2.9 Normal Kuvvetin ve Magnus Kuvvetinin Basınç Merkezi

Basınç merkezi daha önce de belirtildiği gibi, mermi yüzeyine etki eden hava akımının oluşturduğu basıncın hepsini tek bir noktada temsil eden hayali bir noktadır. Hesaplamalarda ve aerodinamik özelliklerin oluşumunu açıklamada kolaylık olması amacıyla kullanılmaktadır. Yunuslama moment katsayısı ile normal kuvvet katsayısı, Kütle merkezi ve normal kuvvet basınç merkezi arasındaki ilişki şu şekildedir;

$$C_{M\alpha} = C_{N\alpha} (CG - CP_N) \quad (2.10)$$

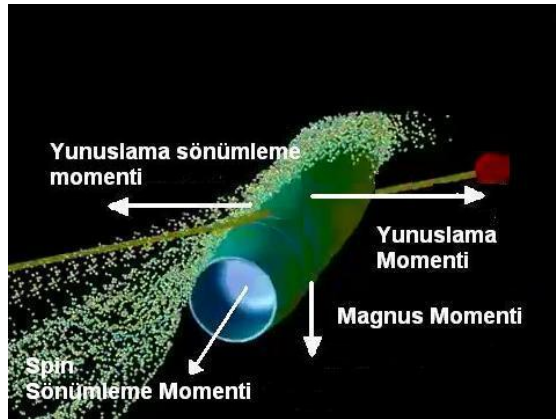
Aynı şekilde, Magnus moment katsayısı, Magnus kuvvet katsayısı, Kütle merkezi, Magnus kuvveti basınç merkezi arasındaki ilişki;

$$C_{M_{\rho\alpha}} = C_{N_{\rho\alpha}} (CG - CP_F) \quad (2.11)$$

Normal kuvvet basınç merkezi ile Magnus kuvvet basınç merkezi aynı değildir, çakışmazlar. Dönü kararlı mermiler için normal kuvvet CP_N genellikle kütle merkezinin önünde (merminin burnuna doğru) yer alır. Magnus kuvveti noktası CP_F genellikle kütle merkezinin arkasında bulunur.

2.10 Kütle Merkezinin Kuvvet ve Momentlere Etkisi

İki mermi şekil ve boyut olarak özdeşse fakat ikinci merminin kütle merkezi birinciye göre arkaya daha yakınsa, her iki mermiye de etki eden aerodinamik kuvvetler eşittir. Fakat ikinci mermi için aerodinamik moment birinciye etki eden aerodinamik momentler artı toplam kuvvet çarpı kütle merkezi yer değişimidir. Kararlı bir mermide oluşan momentler Şekil 2.17 'de gösterilmiştir.



Şekil 2.17 Aerodinamik momentlerin kararlı bir mermide yönleri

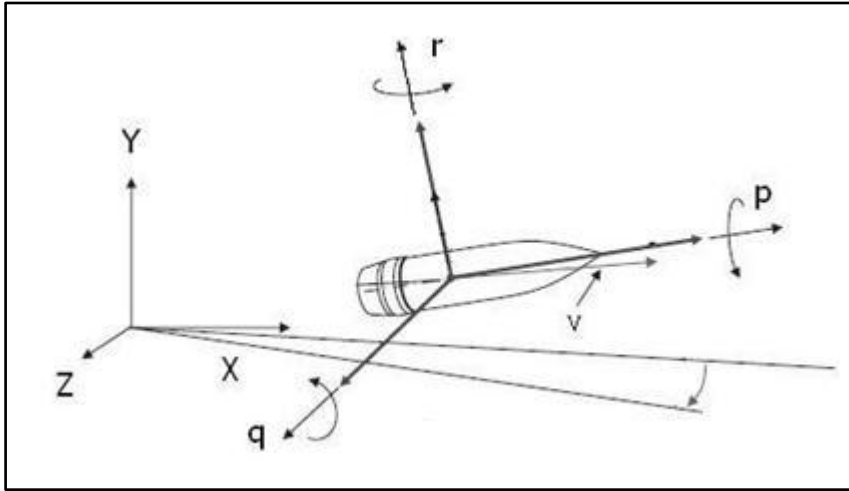
3. HAREKET DENKLEMİ HESAPLAMALARI

3.1 İki Serbestlik Dereceli (2-DoF) Yörünge

Bu yaklaşımda, merminin tüm ağırlığı bir noktada toplanmış olarak kabul edilmektedir. Mermi üzerine yerçekimi kuvveti ve sürüklenme kuvvetinin etkisi dikkate alınmaktadır. Uygulamada olan birçok yörünge hesaplamalarında hızlı ve doğru sonuç vermesi sebebiyle kullanılmaktadır. Üçüncü ve +z yönündeki konum hesap edilmemektedir, normal şartlarda bu yönde kuvvet olmadığı kabul edilmektedir. +z yönünde mermi dönüşünden kaynaklanan bir sapma oluşmaktadır (yaw of repose) ve bu sapma dönü oranına bağlı olarak hesaplanabilir. Kabul edilebilir derecede doğru ve kesin sonuçlar elde edilebilen bir yöntem olması sebebiyle bu tez çalışmasında 2-DoF yörünge hesaplama yöntemi rüzgârsız atmosfer koşullarında nümerik olarak çözülmüştür.

3.2 Altı Serbestlik Dereceli (6-DoF) Yörünge

Üç adet konum üç adet açısal momentum serbestlik dereceli hareket denklemleridir. Bu yöntemde konum ve açısal momentuma ait çizgisel olmayan şekilde birbirlerine bağlı 6 adet adi diferansiyel denklemlerin çözümü hesaplanarak mermi hareketinin gerçek yörüngeye en yakın sonuçları elde edilebilmektedir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 3-Konum ve 3-Açısal momentum serbestlik dereceleri

Bu çözüm yönteminin doğru sonuç vermesi için başlangıç koşullarının çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Denklemlerin başlangıç koşullarının belirlenmesi oldukça karmaşık olabilmektedir. Yüksek seviyeden nümerik entegrasyon gerekmekte ve CPU zamanları noktasal kütle çözümlerine göre ikinci dereceden üstel katlara kadar artmaktadır.

6-DoF çözümler genellikle roket yörüngeleri hesabı için kullanıldığı için roket kuvvet ve momentleri de hesaplamalarda kullanılmaktadır ve dolayısıyla konuma göre değil de zaman değişkenine göre hesaplamalar yapılmaktadır.

3.3 6-DoF Hareket Denkleminin Çizgiselleştirilmesi

6-DOF hareket denklem çözümleri ile doğru sonuçlar alınabilmesine rağmen çoğu zaman çizgisel çözüme ihtiyaç bulunmaktadır. Çünkü sayısal çözüm yönteminin pratikte bazı zorlukları bulunmaktadır. Çok sayıda çözüm ve iterasyon yapılmasından dolayı çözüm yapan bilgisayarların kapasiteli olması durumunda bile pratikte fazla zaman almaktadır ve kullanılamamaktadır. 6 serbestlik dereceli nümerik hesaplamalarla üretilmiş bir tablo dolusu sayı ile bir merminin açısal salınımında oluşabilecek aykırılıkların muhtemel sebebi (özel aerodinamik kuvvet ve momentler) tanımlanamaz. Bir topçu mermisinin 6 serbestlik dereceli çözümünü yaptığımızı düşünelim, aerodinamik ve başlangıç durum bilgilerini kesin olarak bildiğimizi de varsayalım ve sonuçta uzun menzilde çok büyük yunuslama ve yalpalama açıları tespit etmiş olalım. Sayısal çözüm metodunun özelliği, bir tablo dolusu sayıdan oluşmasıdır. Bu yöntemde yörünge kesin olarak hesaplanmakla birlikte, merminin kararlı ve istenen şekilde hareket etmesini sağlayan faktörlerin eldeki bir tablo dolusu sayı ile bilinmesi mümkün değildir. Sonuçlar üzerinde kabul edilebilir seviyede az etkisi olabilecek değerler veya pratikte çok küçük fiziksel büyüklükler ihmal edilmektedir ve açısal hareket denklemleri çizgisel ve analitik olarak çözülebilir duruma getirilmektedir. Problemin bir çizgisel analizi yaklaşık bir çözüm verecektir. Statik ve dinamik kararlılığı hangi fiziksel ve aerodinamik parametrelerin etkilediğini gösteren analitik bir çözüm olmasaydı, mermi uçuşundaki yalpalamayı/kararsızlığı çözmek için nereden başlamamız gerekeceği hakkında hiçbir fikrimiz olmazdı. Şayet bir merminin istenmeyen bir uçuş özelliği gösterdiği belirlenirse hareket denkleminin katsayıları olan aerodinamik katsayıları değiştirilerek (yani mermi tasarımını, fiziksel özelliklerini veya

başlangıç koşullarını değiştirerek) istenen uçuş özellikleri kazandırılabilir. Hangi aerodinamik katsayının hangi etkisi olacağı ancak analitik çözüm yöntemi kullanılıyor ise bilinebilir. Bu yöntem daha çok tasarım çalışmalarında kullanılmaktadır. Bu çizgisel olmama tipik olarak zayıftır uçuş yörüngesinin belirli kısımları için denklemler entegre edilebilir ve kapalı-form çözümler mermi hareketi için elde edilebilir. Çizgisel olarak açısal hareketi tanımlama ihtiyacının sebepleri olarak;

Açısal hareket denkleminin çizgisel olarak çözülmesi,
Hesaplama yapılan bilgisayarların kapasitesi ve kısa sürede çözümü,
Hesaplanan denklemlerin gerçek harekete yaklaşma derecesi, sayılabilir.

3.4 Runge-Kutta Sayısal Entegrasyon Yöntemi

Dördüncü dereceden Runge-Kutta metodu ikinci dereceden metotlarda olduğu gibi Taylor serilerinden elde edilmiştir. Taylor serisine açılım metodu genel olarak basit ve yüksek doğruluğa sahiptir. x noktasındaki açılım şu şekilde ifade edilir:

$$y(x + h) \approx y(x) + y'(x)h + \frac{1}{2!}y''(x)h^2 + \frac{1}{3!}y'''(x)h^3 + \dots + \frac{1}{n!}y^{(n)}(x)h^n \quad (3.1)$$

Bu denklem x noktasındaki bilgilerle $x+h$ noktasındaki y değeri hesaplanabildiği için sayısal entegrasyon için de kullanılabilen bir formüldür. Serideki son terim diferansiyel derecesini belirler. Bu denklemdeki diferansiyel derecesi m 'dir. Türev işlemleri uzun ve detaylı olduğu için burada ispatı yapılmamıştır. Diferansiyel formülünün en sık kullanılan şekli ve Runge-Kutta metodu aşağıdaki şekilde ifade edilir (Kiusalaas, 2005):

$$x_{n+1} = x_n + h$$

$$y(x + h) = y(x) + \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \quad (3.2)$$

$$K_1 = hF(x, y)$$

$$K_2 = hF\left(x + \frac{h}{2}, y + \frac{K_1}{2}\right)$$

$$K_3 = hF \left(x + \frac{h}{2}, y + \frac{K_2}{2} \right)$$

$$K_4 = hF (x + h, y + K_3)$$

Sayısal entegrasyon metodunda doğruluk, seçilen diferansiyel adımı seçilen h 'in büyüklüğüne bağlıdır. Euler metodu kullanılması durumunda ve entegrasyon adım büyüklüğü h değeri büyük seçilirse doğruluk azalır, sayısal kararsızlık durumu oluşur ve sayısal çözüm gerçek hareketten farklılaşır. Fakat Runge-Kutta metodunun 4. dereceden hesaplamaları kullanılması uygun sonuçlar vermektedir. (Fitzpatrick, 2006) Optimum doğruluk ve işlem zamanı için h değerleri birçok deneme sonucunda elde tespit edilmektedir. (McCoy 1998)

4. AÇISAL SALINIM ve AERODİNAMİK KARARLILIK HESAPLAMASI

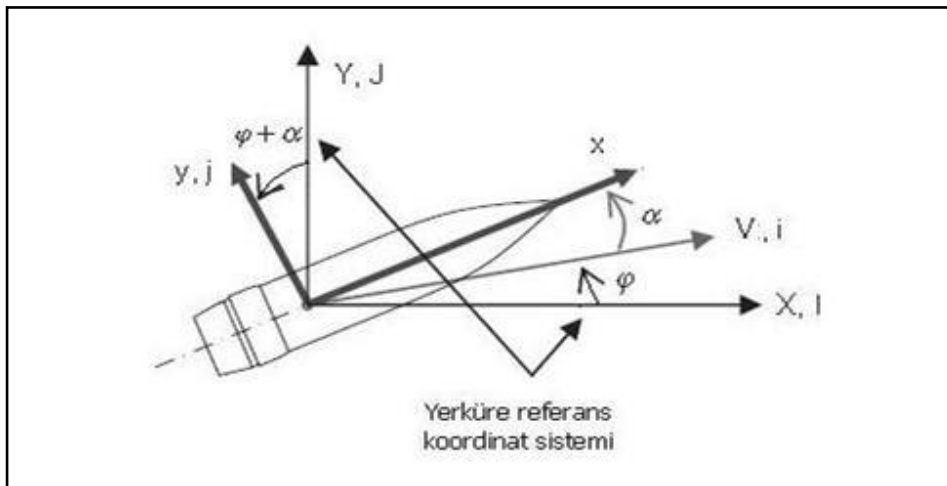
4.1 Açısal Hareketin Çizgisel Çözümü

Mermi hareketinde mermiyi etkileyen kuvvet ve momentleri, yerçekimi ivmesine göre küçük olan Coriolis etkisini ihmal ederek basitleştirilmiş hareket denklemlerini aşağıdaki gibi verilebilir (McCoy 1998):

$$m \frac{d\vec{r}}{dt} = \sum \vec{F} + m\vec{g} \quad (4.1)$$

$$\frac{d\vec{H}}{dt} = \sum \vec{M} \quad (4.2)$$

Sabit yer koordinat sistemine (**I, J, K**) ek olarak mermi kütle merkezi ile hareket eden dönmüş koordinat sistemi (**i, j, k**) kullanılmıştır. Hız \vec{V} vektörü dünya koordinat eksenleri ile φ açısı yapar. Merminin hız vektörüne göre açısal pozisyonu değişken $\alpha =$ hücum açısı, $\beta =$ yan yalpa açılarına göre değişir. Mermi ekseninde yönlendirilen geometrik eksenin birim vektörü \vec{x} tir. Yunuslama hareketi yapan merminin açısal hareketinin çizgisel çözümü için koordinat eksenleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Koordinat eksenlerinin tanımlanması

Dönüsel simetri ve katılık tanımlı olduğundan, simetri eksenine dik olan ve kütle merkezinden geçen her yan eksen başlıca eylemsizlik eksenidir (Şekil 3.1). Merminin toplam açısal momentü iki vektörün toplamından oluşur. Bunlar \vec{x} yönünde açısal momentum ve kütle merkezinden geçen ve \vec{x} 'e dik herhangi bir eksenin açısal momentumudur.

$$\vec{H} = I_x p \vec{x} + I_y \left(\vec{x} \times \frac{d\vec{x}}{dt} \right) \quad (4.3)$$

Burada p, merminin ana eksen etrafındaki açısal hızıdır. Bu bölümde sadece çok önemli olan aerodinamik kuvvet ve momentleri dikkate alacağız. Önemli kuvvet ve momentten kastedilen mermi uçuşuna ölçülebilir etki yapanlardır. Merminin uçuşu için önemli olan kuvvet ve momentleri özetlenirse sürüklenme kuvveti, kaldırma kuvveti, yunuslama momenti, yunuslama sönümleme momenti, Magnus momenti, spin sönümleme momenti ifadeleri tekrar yazılabilir:

$$\vec{F}_D = -\frac{1}{2} \rho S C_D V \vec{V} = -\frac{1}{2} \rho S C_D V^2 \hat{i} \quad (4.4a)$$

$$\vec{F}_L = \frac{1}{2} \rho S C_{L_\alpha} V^2 [\hat{i} \times (\vec{x} \times \hat{i})] \quad (4.4b)$$

$$\vec{M}_\alpha = \frac{1}{2} \rho S d C_{M_\alpha} V^2 (\hat{i} \times \vec{x}) \quad (4.4c)$$

$$\vec{M}_M = \frac{1}{2} \rho S d V^2 \left(\frac{p d}{V} \right) C_{M_{p\alpha}} [\vec{x} \times (\hat{i} \times \vec{x})] \quad (4.4d)$$

$$\vec{M}_{q\dot{\alpha}} = \frac{1}{2} \rho S d^2 \left(C_{M_q} + C_{M_{\dot{\alpha}}} \right) V \left(\vec{x} \times \frac{d\vec{x}}{dt} \right) \quad (4.4e)$$

$$\vec{M}_{i,p} = \frac{1}{2} \rho V^2 S d \left(\frac{p d}{V} \right) C_{I_p} \vec{x} \quad (4.4f)$$

Gerekli koordinat dönüşümleri ve klasik mekanik prensipleri uygulanarak çizgisel yalpalama (yawing) ve yunuslama (pitching) hareketlerini tanımlayan $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$ bileşenleri

için adi (ordinary), ikinci derece diferansiyel hareket denklemleri elde edilir. (McCoy 1998)

Ayrıca küçük hücum açısı kabulü ve klasik boyutlara göre küçük boyuttaki büyüklükler ihmal edildiğinde $\vec{1}$ bileşeni tamamen yok olur, diğer iki bileşen için aşağıda gösterilecek olan basitleştirilmiş denklem elde edilir.

α yalpalama açısı ve β yunuslama açısı cinsinden kompleks hücum açısı ξ tanımlanırsa aşağıdaki türevler elde edilir;

$$\xi = \alpha + i\beta \quad (4.5)$$

$$\xi' = \alpha' + i\beta' \quad (4.6a)$$

$$\xi'' = \alpha'' + i\beta'' \quad (4.6b)$$

ξ 'nin sağladığı denklem şu şekildedir (McCoy 1998) :

$$\xi'' + (H - iP)\xi' - (M + iPT)\xi = -iPG \quad (4.7)$$

$$H = C_{L\alpha}^* - C_D^* - k_y^{-2}(C_{Mq}^* + C_{M\alpha}^*) \quad (4.7a)$$

$$P = \left(\frac{I_x}{I_y}\right)\left(\frac{p\alpha}{r'}\right) \quad (4.7b)$$

$$M = k_y^{-2}C_{M\alpha}^* \quad (4.7c)$$

$$T = C_{L\alpha}^* + k_x^{-2}C_{M\varphi\alpha}^* \quad (4.7d)$$

$$G = \frac{g \, d \, \cos \varphi}{r'^2} \quad (4.7e)$$

Ek olarak, herhangi bir vektörü kompleks $e^{i\theta}$ sayısı ile çarpmak vektörü θ açısı kadar reel eksenden imajiner eksene doğru döndürür. Genel olarak P terimi yörünge boyunca yavaş değişir. Bunun anlamı denklem (4.7) 'nın lineer, ikinci dereceden, “hemen hemen

sabit” kompleks katsayılara sahip diferansiyel eşitlik olduğudur. Bu denklem dönülü veya dönüşüz mermilerin, küçük hücum açısında düzlem atışlarda yunuslama ve yalpalama hareketlerini açıklar. Denklem (4.7) aslında simetrik mermilerin gerçek uçuştaki açısal hareketinin çok iyi bir benzetimidir.

4.2 Statik Kararlılık Durumu İncelemesi

Yunuslama ve yalpalama hareketini göstermenin en iyi yolu (4.7) denkleminin basitleştirilmiş bir şekli ile başlamaktır. Basitleştirilmiş analizimizde en büyük aerodinamik momenti yunuslama momentini ele alacağız ve diğer bütün aerodinamik kuvvetleri ihmal edeceğiz. Bu basitleştirilmiş durumda (4.7) denklemi şu hali alır:

$$\xi'' - i P \xi' - M \xi = -i P G \quad (4.8)$$

Basitleştirilmiş diferansiyel hareket denkleminin çözümü epicyclic yunuslama ve yalpalama hareketinin temelini gösterecektir. Bu sayede statik (gyroscopic) kararlılık durumunu inceleyebileceğiz. Bu bölümün sonunda bütün diferansiyel denklemin (4.7) çözümüne döneceğiz ve epicyclic hareketin sönümlenmesi yani merminin dinamik kararlılığını inceleyeceğiz. Denklem (4.8)'un çözüm fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$\xi = K_F e^{i\varphi_F} + K_S e^{i\varphi_S} \quad (4.9)$$

K_F = Hızlı epicyclic yaw modunun (veya kolunun) genliği

K_S = Yavaş epicyclic yaw modunun (veya kolunun) genliği

$$\varphi_F = \varphi_{F_0} + \varphi'_F s \quad (4.10)$$

$$\varphi_S = \varphi_{S_0} + \varphi'_S s \quad (4.11)$$

$$\varphi_{F_0} = \text{Hızlı epicyclic yaw kolunun başlangıç faz açısı} \quad (4.12)$$

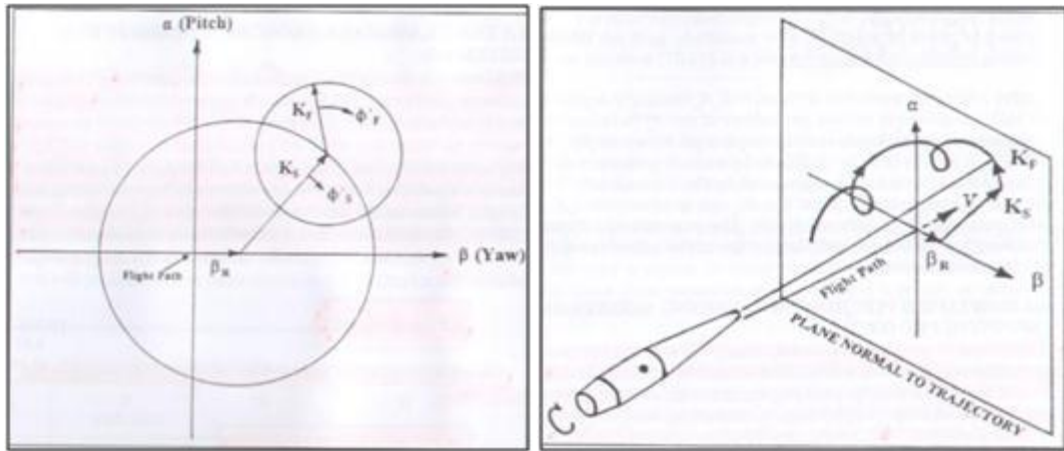
$$\varphi_{S_0} = \text{Yavaş epicyclic yaw kolunun başlangıç faz açısı} \quad (4.13)$$

$$\varphi'_F = \frac{1}{2} [P + \sqrt{P^2 - 4M}] \quad \text{Hızlı kol dönüş oranı (radyan/kalibre)} \quad (4.14)$$

$$\varphi'_S = \frac{1}{2} [P - \sqrt{P^2 - 4M}] \quad \text{Yavaş kol dönüş oranı (radyan/kalibre)} \quad (4.15)$$

(4.14) ve (4.15) denklemlerinden görüleceği üzere epicyclic frekanslar veya dönüş oranları (φ_F ve φ_S) sadece P ve M'e bağlıdır. Diğer aerodinamik kuvvet veya momentlerden etkilenmemektedirler. Denklem (4.9) eşitliğinden simetrik merminin yunuslama ve yalpalama hareketinin iki mod veya koldan oluştuğu görülmektedir. Bu iki kol farklı açısal hız veya frekanslara sahiptirler. Bazı yazarlar hızlı mod için "nutasyon" yavaş mod için "presesyon" ifadelerini kullanır.

($P^2 - 4M > 0$) ise, (4.9) eşitliğindeki ($i\varphi_F$ ve $i\varphi_S$) üstel sayıları tamamen imajinerdir ve hızlı ve yavaş mod epicyclic kollar sırasıyla ($i\varphi'_F$ ve $i\varphi'_S$) açısal hızları ile hareket ederler. Üstel sayılar reel olmadıkları için hızlı ve yavaş kolların uzunlukları (K_F ve K_S) sabit kalır. Mermi yörüngede ilerledikçe ne uzar ne de kısalırlar. Denklem (4.9) denklemi sönümlenmeyen epicyclic yunuslama ve yalpalama hareketinin mükemmel bir örneğidir. Şekil 4.2, sağa doğru dönülü bir simetrik merminin bu hareketini göstermektedir.



Şekil 4.2 Merminin sağa dönülü hareketinin izdüşümü

Bir önceki bölümde $(P^2 - 4M > 0)$ denklemlerdeki ifadenin sıfırdan büyük olması gerektiği belirtilmişti. Eğer bu şart gerçekleşmez ise ifadenin karekökü imajiner olacaktır, her iki epicyclic hareketin dönüş oranları imajiner bileşenlere sahip olacaktır. Eğer bu kompleks değerler denklem (4.9) deki $(\varphi_F$ ve $\varphi_S)$ değerlerinde yerine konursa üstel ifadeler reel sayılara sahip olacaktır. Bunlardan biri olan yavaş epicyclic yaw hareketinin kolu (K_S) üstel olarak sınırsız büyüyecektir. Bu durum kararsız hareketin tanımıdır, buradan statik (gyroscopic) kararlı olma koşuluna gelmiş oluruz:

$$(P^2 - 4M) > 0 \quad (4.16)$$

Statik kararlılık faktörü tanımlanarak denklem (4.16)'da P^2 terimi elimine edilerek:

$$S_g = \frac{P^2}{4M} = \frac{I_x^2 p^2}{2pI_y S_d^2 C_{M\alpha}} \quad (4.17)$$

$$4M (S_g - 1) > 0 \quad (4.18)$$

ifadesi elde edilir. Statik olarak kararlı (dönü kararlı) bir mermi için $(M > 0)$ dir ve denklem (4.18) ifadesi klasik kararlılık kriteri olarak şu şekilde basitleştirilir:

$$S_g > 1 \quad (4.19)$$

Statik kararlılık, bir merminin küçük bir hücum açısı ile hareket edeceğini garanti etmez. Bir çizgisel yunuslama moment için, statik kararlılık koşulu herhangi bir şekilde epicyclic hareketin genliğine bağlı değildir, tersi de geçerlidir yani epicyclic hareketin genliği statik kararlılık koşuluna bağlı değildir. Yani, bir mermi çok büyük yunuslama ve yalpalama hareketi yaparak ilerlerken hala statik kararlı olabilir. Statik kararlılık sadece namludan çıktıktan sonra hemen takla atmayacağını ve merminin hareketi boyunca periyodik bir yunuslama ve yalpalama hareketi yapacağını garanti eder.

4.3 Dinamik Kararlılık Durumu İncelemesi

Merminin hareketi boyunca kararlı olduğunu kabul edilirse, yunuslama ve yalpalama hareketini tanımlayan denklem aşağıdaki şekilde (4.7) çıkartılmıştı:

$$\xi'' + (H - iP)\xi' - (M + iPT)\xi = -iPG$$

Bu denklem yunuslama ve yalpalama hareketini etkileyen önemli bütün aerodinamik kuvvet ve momentlerin içermektedir. Bu diferansiyel denklemin çözümünden elde edilen sonuçların 6 serbestlik dereceli çözümlerin sonuçlarına yakın olmasını bekleyebiliriz çünkü bütün önemli katsayıları içermektedir. Merminin tam çizgisel yunuslama ve yalpalama hareketine ait olan bu denklemin bazı düzenlenmiş katsayılarla tam çizgisel çözümü aşağıdaki gibidir:

$$\xi = K_F e^{i\varphi_F} + K_S e^{i\varphi_S} \quad (4.20)$$

Denklemdaki terimler aşağıdaki gibidir:

$$\xi = \alpha + i\beta$$

$$K_F = K_{F_0} e^{\lambda_{F^S}} \quad \text{Hızlı epicyclic yaw modunun (veya kolunun) genliği} \quad (4.21)$$

$$K_S = K_{S_0} e^{\lambda_{S^S}} \quad \text{Yavaş epicyclic yaw modunun (veya kolunun) genliği} \quad (4.22)$$

$$\varphi_F = \varphi_{F_0} + \varphi_{F^S} \quad (4.23)$$

$$\varphi_S = \varphi_{S_0} + \varphi_{S^S} \quad (4.24)$$

$$\varphi_{F_0} = \text{Hızlı epicyclic yaw kolunun başlangıç faz açısı} \quad (4.25)$$

$$\varphi_{S_0} = \text{Yavaş epicyclic yaw kolunun başlangıç faz açısı} \quad (4.26)$$

$$\lambda_F + i\varphi'_F = \frac{1}{2} \left[-H + iP + \sqrt{4M + H^2 - P^2 + 2iP(2T - H)} \right] \quad (4.27)$$

$$\lambda_S + i\varphi'_S = \frac{1}{2} \left[-H + iP - \sqrt{4M + H^2 - P^2 + 2iP(2T - H)} \right] \quad (4.28)$$

Burada, kısa ve uzun kollara ait genlikler veya uzunluklar gerçek üstel terimler ile çarpılmıştır. Bu durum bize, kolların üstel olarak sönümlenebileceğini veya büyüyebileceğini ifade etmektedir. Sonuçtaki hareket (λ_F ve λ_S) her ikisi de negatif ise “sönümlü (damped epicyclic) hareket” olarak, (λ_F ve λ_S) her ikisi de pozitif ise “sönümsüz (undamped) epicyclic hareket” olarak anılır. Murphy (1953) yukarıdaki (4.27) ve (4.28) denklemlerini çözmüştür: (McCoy 1998)

$$\varphi'_F = \frac{1}{2} \left[P + \sqrt{P^2 - 4M} \right] \quad (4.29)$$

$$\varphi'_S = \frac{1}{2} \left[P - \sqrt{P^2 - 4M} \right] \quad (4.30)$$

$$\lambda_F = -\frac{1}{2} \left[H - \frac{P(2T - H)}{\sqrt{P^2 - 4M}} \right] \quad (4.31)$$

$$\lambda_S = -\frac{1}{2} \left[H + \frac{P(2T - H)}{\sqrt{P^2 - 4M}} \right] \quad (4.32)$$

Dinamik kararlılık koşulu, merminin uçuş hareketi boyunca her iki sönümlenme üstel sayısını da (λ_F ve λ_S) negatif olmasını gerektirir. Eğer sönümlenme üstel sayısı pozitif hale gelirse (ve pozitif kalırsa), yaw modu büyümeye başlar ki bu kararsızlığın tanımıdır. Pratikte λ 'lardan biri kısa süre için hafifçe pozitif geçip sonra negatif değere dönebilir, bu durum uçuşta önemli bir karışıklık oluşturmaz.

Bir merminin dinamik kararsız olacağı Mach sayısında namludan çıkması her zaman istenmeyen bir durumdur, çünkü başlangıç yunuslama ve yalpalama hareketi çabucak büyük bir genliğe büyümüş olur.

Dönü kararlı mermiler için (4.31) ve (4.32) denklemleri bize sönümlenme üstel sayılarının negatif olması için gereken şartı gösterir:

$$\left[H \pm \frac{P(2T-H)}{\sqrt{P^2-4M}} \right] > 0 \quad (4.33)$$

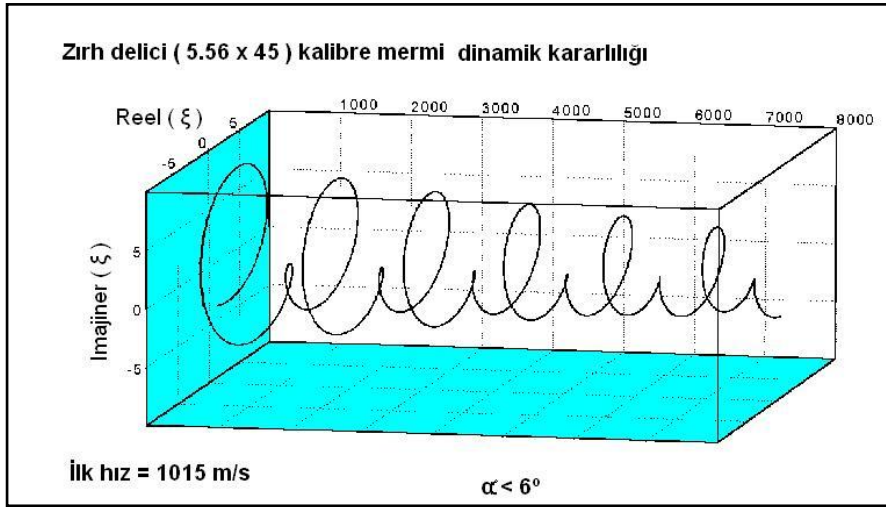
S_d dinamik kararlılık faktörü Murphy (1963) tarafından tanımlanmıştır (Winacht 2003) ve ifadesi şu şekildedir:

$$S_d = \frac{2T}{H} = \frac{2(C_{L\alpha} + k_x^{-2} C_{M_{p\alpha}})}{C_{L\alpha} - C_D - k_y^{-2} (C_{M_q} + C_{M_\alpha})} \quad (4.34)$$

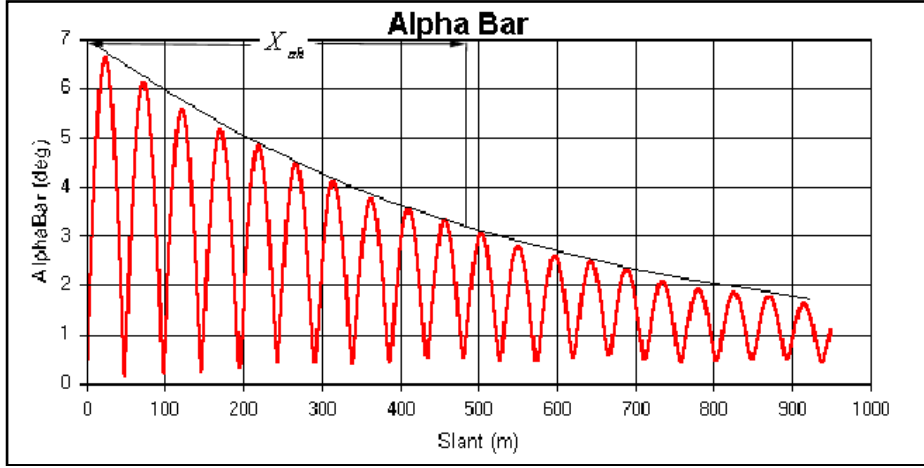
İfadelerin yerine konulmasından sonra dinamik kararlılık faktörü şu hale gelir ($H > 0$):

$$\frac{1}{S_g} < S_d(2 - S_d) \quad (4.35)$$

Dinamik kararlı bir tüfek mermisinin 3-boyuttaki sönümlenmesi Şekil 4.3'de ve 2boyutta açısız salınım sönümlenmesi Şekil 4.4'te gösterilmektedir. (Whyte 2003)



Şekil 4.3 Dinamik Kararlılık ve Sönümlenme



Şekil 4.4 Yalpalama açısının dinamik kararlılık sonucu zamanla sönümlenmesi

4.4 Statik ve Dinamik Kararlılık Özellikleri

Önceki kesimlerde elde edilen çözümler merminin kararlı uçuşu için gerekli şartlarda geçerli olmaktadır. Bir merminin kararlı uçuşu ile belirtilmek istenen ise merminin uzunlamasına ekseninin uçuş süresince genel hareket yönü doğrultusunda olması gerektiğidir. Kararlı hareket eden bir merminin uyması gereken önemli iki koşul vardır:

Statik Kararlılık

Dinamik Kararlılık

Ayrıca dinamik kararlılık durumu iki farklı parametrenin fonksiyonudur:

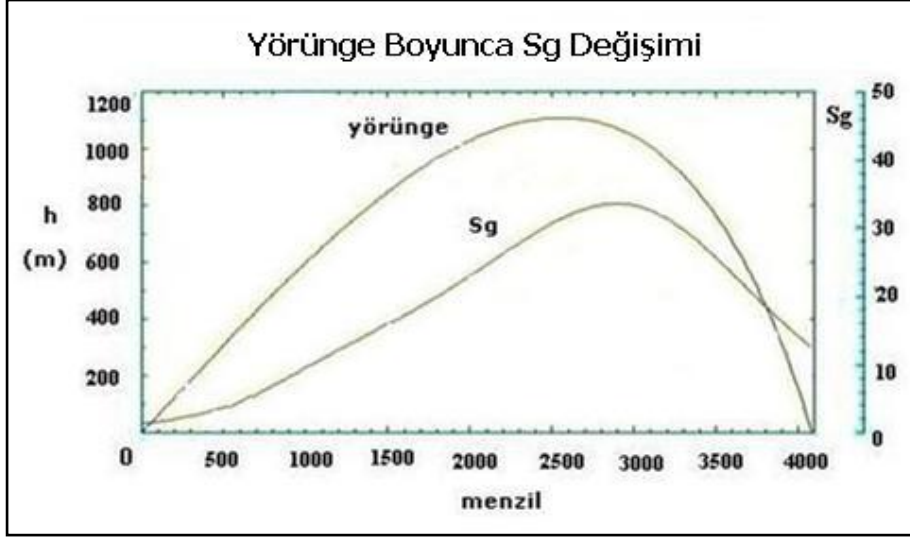
Açısal frekanslar (φ_1 ve φ_2)

Sönümlenme oranları, (λ_1 ve λ_2)

Bir merminin statik kararlılığı, merminin ucunun x eksenini etrafında döndüğünü ifade etmektedir. Statik kararsız bir mermi takla atacaktır. Statik kararlılık koşulu ($S_g > 1$) bir gerek şarttır, kararlı bir uçuş için kesinlikle yeterli değildir. Statik kararlı bir mermi aynı zamanda dinamik kararlı olabilir fakat olmayabilir de. Fakat statik kararsız bir mermi her zaman dinamik olarak kararsızdır! Statik kararlılık faktörü sadece yunuslama moment katsayısına ve dönüye bağlıdır. Dolayısıyla hesaplanması kolaydır.

$$S_g = f(v, C_{M\alpha}) \quad (4.36)$$

Bir mermi namlu çıkışında statik kararlı ise yörüngeyi geri kalanında da statik kararlı olacağı söylenebilir. Bunun sebebi formülden anlaşılabilir. S_g faktörü w/v oranı ile orantılıdır. Açısal hızdaki azalma ilerleme hızındaki azalmadan daha yavaş olacağı için w/v oranı artar ve S_g faktörüne bağlı olarak Şekil 4.5 'daki gibi gösterilebilir.



Şekil 4.5 Yörünge boyunca S_g faktörünün değişimi

Dinamik kararlılık faktörü ise birçok aerodinamik katsayıya bağlıdır ve hesaplanması karmaşıktır. Ayrıca anlık mermi hızının bir fonksiyonu olarak değişmektedir.

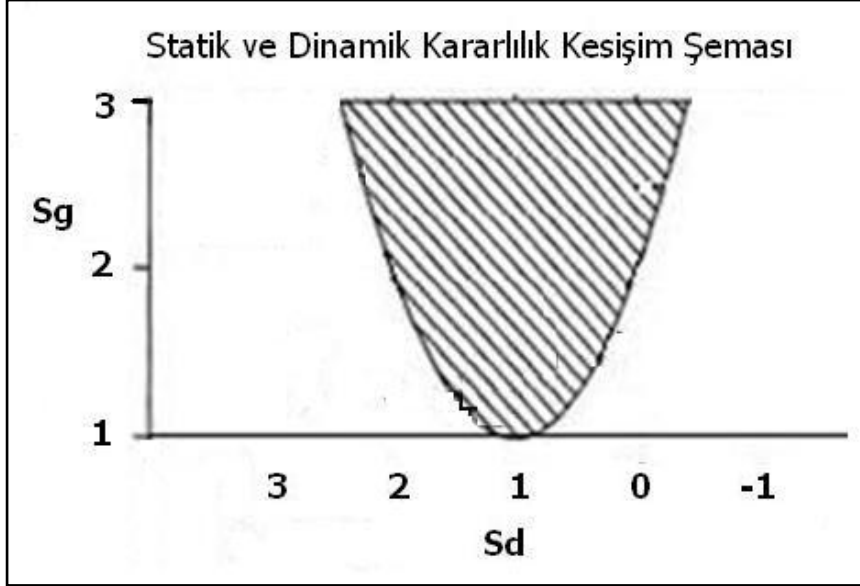
$$S_d = f(C_{M_{p\alpha}}, C_{M_q} + C_{M_{\dot{\alpha}}}, C_D, C_{L_{\alpha}}) \quad (4.37)$$

Eğer dinamik kararlılık faktörü sağlanıyor ve $(0 < S_d < 2)$ aralığında bulunuyor ise, statik olarak kararsız olan mermi dönü artırılarak dinamik kararlı hale getirilebilir. Dinamik kararlılık için gereken eksensel dönü kriteri şudur:

$$P^2 > \left[\frac{4M}{S_d(2-S_d)} \right] \quad (4.38)$$

Eğer dinamik kararlılık faktörü $(0 < S_d < 2)$ aralığının dışında ise mermi hiçbir şekilde dinamik kararlı hale dönü artırılarak bile getirilemez. Başlangıçtaki namlu çıkışında hücum açısı meydana gelmesi önlenemez ve birçok düzensizlik sebebiyle oluşur fakat mermi dinamik olarak kararlı ise, epicyclic (döngüsel) hareket sönümleniyor demektir

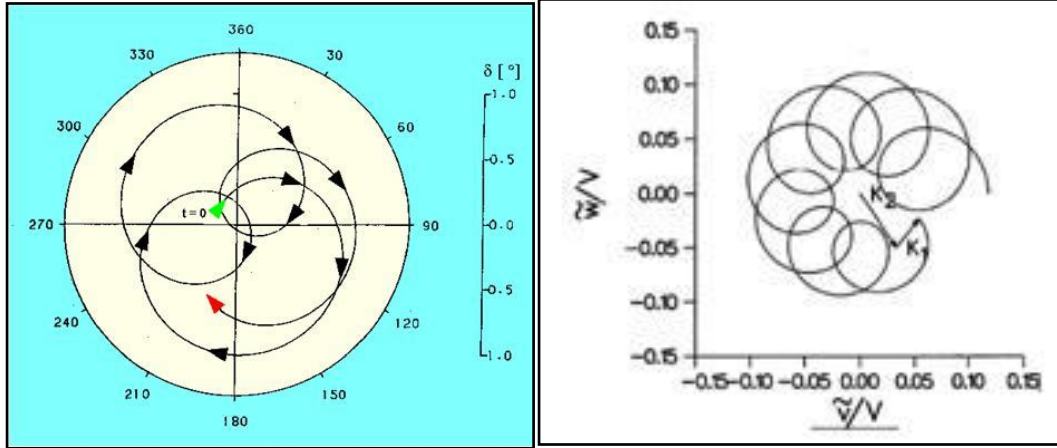
ve sonucunda salınım (yukarı ve yan) hareketleri yok olur. Statik ve dinamik kararlılık alanları Şekil 4.6'deki gibi aynı şekil içerisinde gösterilebilir (Weinacht 2003).



Şekil 4.6 S_g faktörü ile S_d faktörünün kesişim şeması

4.5 Açısal Frekanslar ve Sönümlenme Oranları Özellikleri

Sönümlenme oranları (λ_1 ve λ_2) negatif olmaları durumunda mermi hareketinin sönümlenerek kararlı olacağını ifade eder. Frekans (φ_1 ve φ_2) değerleri ise hareket kollarının dönüş frekanslarını ifade eder. Hareketin hızlı ve yavaş mod frekansları (φ_1 ve φ_2) ve sönümlenme oranları (λ_1 ve λ_2) aerodinamik katsayıların, mermi dönüş oranı ve mermi eylemsizlik özelliklerinin fonksiyonlarıdır. Genel olarak, frekanslar (φ_F ve φ_S) yunuslama momenti katsayısıyla kontrol edilirler, sönümlenme oranları ise (λ_1 ve λ_2) Magnus ve yunuslama sönümlenme moment katsayılarıyla kontrol edilirler.



Şekil 4.7 a) Dinamik sönümlenme b) Statik kararlılık

Yavaş mod frekans kritik bir öneme sahiptir, hızlı mod frekans temelde dönü oranı ile ilişkilidir ve esasen bir giriş parametresidir. Genel olarak, bir tasarımcı bakış açısından bakıldığında, frekanslardan ziyade, sönümlenme oranlarını kestirmek ve kontrol etmek öncelikle göz önünde tutulması gereken kriterlerdir. Amaçlanan kriterlerden biri sönümlenme oranlarının (λ_1 ve λ_2) negatif olmalarıdır, bu sayede merminin yörünge boyunca açısal hareketi büyümemiş tersine sönümlenmiş olur (Şekil 4.7 a))

Namlu çıkışında kısa süreli olarak sönümlenme oranlarının kısa süreli artı değer alması fakat genel olarak negatif değerde kalmaları sönümlenmeyi etkilemez. Hesaplamalarda, aerodinamik katsayıları kullanarak, hızlı ve yavaş mod sönümlenme oranları ve frekanslar hesaplanabilir. Hesaplamalar gövde uzunlukları, kütle merkezi pozisyonları, Mach sayıları ve dönü oranlarına göre değişir.

4.6 Başlangıç Değer Problemi

Birinci dereceden diferansiyel eşitliklerin genel formu,

$$y' = f(x, y) \quad (4.39)$$

şeklindedir, burada $y' = \frac{dy}{dx}$ ve $f(x, y)$ tanımlı bir fonksiyondur. Bu denklemin çözümü keyfi bir katsayı (enteegrasyon sabiti) içerir. Bu sabitin bulunması için çözüm

eğrisi üzerinde herhangi bir noktadaki değeri bilmemiz gereklidir. $x=a$ gibi bir noktaya karşılık gelen y değerinin belirtilmesi gerekir.

$$y(a) = \alpha$$

gibi n 'inci dereceden bir adi diferansiyel eşitlik

$$y^{(n)} = f(x, y', y'', y''', \dots, y^{(n-1)})$$

Şeklinde n adet birinci dereceden eşitliğe her zaman için dönüştürülebilir.

$$y_1 = y \quad y_2 = y' \quad y_3 = y'' \quad y_4 = y''' \quad \dots \quad y_n = y^{n-1}$$

ifadeleri kullanılarak birinci dereceden eşitlikler şu şekilde yazılabilir:

$$y_1' = y_2 \quad y_2' = y_3 \quad y_3' = y_4 \quad y_4' = y_5 \quad \dots \quad y_n' = f(x, y_1, y_2, \dots, y_n)$$

Bu noktada çözüm n tane yardımcı koşul olmasını gerektir. Eğer bu koşullar x 'in sabit bir değeri için sağlanmış ise, problem başlangıç değer problemi olarak tanımlanır. Daha sonra yardımcı koşullar, yani başlangıç koşulları şu hale gelir,

$$y_1(a) = \alpha_1 \quad y_2(a) = \alpha_2 \quad y_3(a) = \alpha_3 \quad y_4(a) = \alpha_4 \quad \dots \quad y_n(a) = \alpha_n$$

Eğer y_i değerleri farklı x noktaları için belirtilmiş ise, problem sınır değer problemi olarak adlandırılır. Örneğin,

$$y'' = -y \quad y(0) = 1 \quad y'(0) = 0$$

Bir başlangıç değer problemidir, çünkü bütün yardımcı koşullar $x=0$ değerinde verilmiştir. Diğer taraftan

$$y'' = -y \quad y(0) = 1 \quad y'(\pi) = 0$$

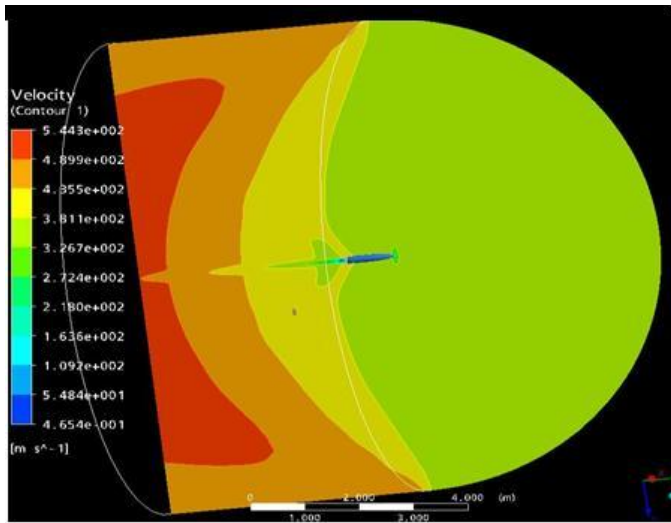
ifadesi bir sınır değer problemidir, iki koşul x 'in farklı değerleri için verilmiştir. (Kiusalaas, 2005)

Bu çalışmada merminin namludan çıktıktan sonraki açısal salınım hareketine ait diferansiyel denklemin çözümünü başlangıç değer problemi olarak çözülecektir. Yani açısal salınım denkleminin başlangıç anı $x=0$ 'daki (merminin namludan çıktığı an) yardımcı koşul değerlerine göre hesap yapılacaktır. Bunun birinci sebebi olarak ihtiyaç duyulan mermi kararlılık hesapları ve açısal salınımın sönümlenmesi için en kritik bölge başlangıç koşullarında ve namlu çıkış anında meydana gelmektedir. Dönü kararlı mermi hareketinin bu başlangıç koşullarında istenen özelliklere sahip olması ilerleyen yörünge üzerinde de normal şartlarda kararlı olacağı bilinmektedir. Kapsamlı olarak vektör gösterim sistemi kullanmanın sebebi, birbiri ile ilişkili birden çok birinci dereceden diferansiyel denklemlerin özlü ve kısa bir formda kullanılabilmesidir. Diferansiyel denklemleri nümerik olarak çözülmesi, esas olarak x ve y değerlerinin x in belirli aralıkları için tablo olarak gösterilmesidir.

5. MATERİYAL

5.1 ANSYS CFX Programı kullanımı

Sayısal Akışkanlar Dinamiği (SAD) yazılımlarının birçok alanda uygulamalarını olduğu gibi akışkan ortamında hareket eden cisimlerin etrafında oluşan hız, sıcaklık, basınç, kuvvet, moment hesaplamaları yanında eksiksiz olarak statik/dinamik aerodinamik hesaplamaları yapma kapasitesine erişmişlerdir (Weinacht 2006). Uçan bir cismin aerodinamik performansını hesaplarken ilk adımda aerodinamik kuvvet ve momentlerin hesaplanması gerekmektedir. SAD hesaplamaları da cisimlerin aerodinamik davranışının ve aerodinamik katsayılarının belirlenmesinde alternatif bir yöntem olarak kullanılır (Weinacht 2006). Aerodinamik katsayıların elde edilmesi ile mermi, roket veya füzelerin temel ve özel hareketlerini belirleyip, karmaşık 3-boyutta hareketlerini de karakterize edebilmekteyiz. Şekil (5.1).



Şekil 5.1 Mermi'nin hava içinde hareketinde hız alanları

Aerodinamik hesaplama yapılan birçok çalışmada, her bir aerodinamik veri ile deneysel verilerin birbirleri ile iyi uyum gösterdikleri görülmüştür (Weinacht 2003). Akışkanlar dinamiği programları kullanılarak alınan sonuçlar, farklı mermi uzunlukları, kütle merkezi konumları, Mach sayıları ve dönü oranları için test verileri ile uyumlu sonuçlar alınabildiği çok sayıda yayımlanmış makalede görülmektedir. Bu çalışmada ise mermi

etrafındaki bazı fiziksel parametrelerin gözlemlenmesi ve sıfır açıda sürüklenme katsayısının C_{d0} hesaplanması için kullanılmıştır.

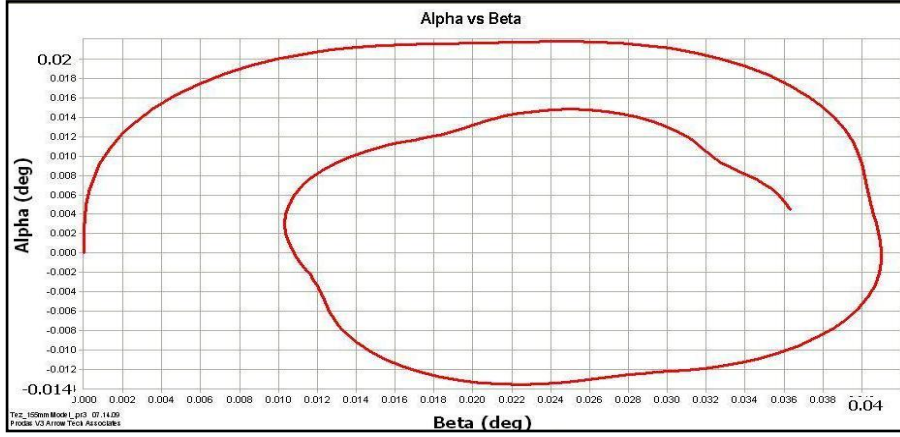
5.2 McDrag Programı Kullanımı

BASIC programlama dilinde Robert McCoy tarafından hazırlanmış olan ve merminin fiziksel parametreleri girilerek Mach sayısına göre sürüklenme katsayılarını veren programdır (McCoy 1981). Birçok balistikçi tarafından uzun yıllar küçük ve büyük çaplı mermilerin sürüklenme katsayıları için kullanılmaktadır. Bu çalışmada, CFX akışkanlar dinamiği ve Prodas programı ile yapılan C_{d0} hesaplamaları ile McDrag programının sonuçları karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır.

5.3 PRODAS Programı kullanımı

PRODAS (Projectile Design and Simulation) programı ABD ordusunda görevli mühendisler tarafından 1970'li yıllarda geliştirilmeye başlanmıştır. Yeni tasarlanan bir merminin de bütün aerodinamik katsayılarının benzetim yapılarak çıkarılabildiği bir programdır. Bilimsel amaçlı makalelerde SAD ile hesaplanan katsayılar Prodas yazılımı ile doğrulanmaya çalışılmaktadır. Yazılım tasarlanan mermiye benzer mermilere ait birçok test sonucunu içermekte ve istenen aerodinamik değerleri bu test sonuçlarına benzetim yaparak çıkarmaktadır. (Şekil 5.2). Bu özelliğinden dolayı “yarı-deneysel mühendislik programı” olarak bilinmektedir. Söz konusu yazılım uygulaması yapılmış yüzlerce mermiye ait bilgiyi kütüphanesinde bulundurması sebebiyle yeni tasarımı yapılmış bir mermi için gerçek test ve deneme ortamı olarak düşünülebilir. Balistik hesaplamaları yapan ve mermi tasarımı ile uğraşan uzmanlar tarafından sık kullanılan bir yazılımdır (Whyte 2003).

Bu çalışmada Prodas programından elde edilen C_{d0} ve diğer aerodinamik katsayılar, kararlılık kriter değerleri, toplam salınım açıları, temel referans bilgileri olarak kullanılmıştır.



Şekil 5.2 Prodas analizinde açısal salınım hareketi hesabı

5.4 MATLAB Programı Kullanımı

MATLAB programı matematik ve mühendislik uygulamalarının çoğunda kullanılmaktadır. Bu çalışmada ham veriler kullanılarak eğri fonksiyonunun çıkartılması ve çizdirilmesi, hareket denkleminin vektör matris şeklinde oluşturulması ve yörünge grafiğinin çıkartılması, Runge-Kutta ve diğer yöntemlerle sayısal entegrasyon yapılması, açısal salınım hareketinin denkleminin oluşturulması ve diferansiyel denklemin başlangıç koşullarına göre çözdürülerek salınım açılarının hesaplanması gibi işlemler için kullanılmıştır. MATLAB programı ile yapılan nümerik hesaplamalarda elde edilen bilgiler, Prodas verileri ve gerçek atış testlerinden elde edilen bilgiler doğrulanmıştır.

5.5 Yörünge Takip Radarı Ölçümleri

Yörünge takip radarı alıcıya yaklaşan ya da ondan uzaklaşan hedefin yansıttığı dalga frekansları arasındaki farklardan yararlanarak hedefin hızını ve yönünü tespit eden aygıttır. Bu radar ile bir toptan atılan merminin hız ve konum bileşenleri vb birçok parametre düşme noktasına yakın mesafelere kadar belli zaman aralıklarıyla elde edilebilmektedir. Gerçekleştirilmiş gerçek test atışlarına ait radar verileri kullanılarak hesaplanan yörünge denklemleri karşılaştırılarak doğruluğu sınanmıştır.

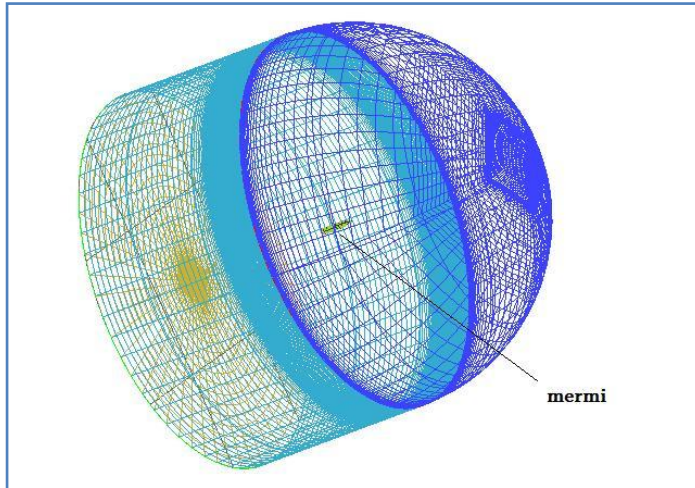
6. YÖNTEM

6.1 ANSYS CFX programı ile C_{d0} hesaplanması

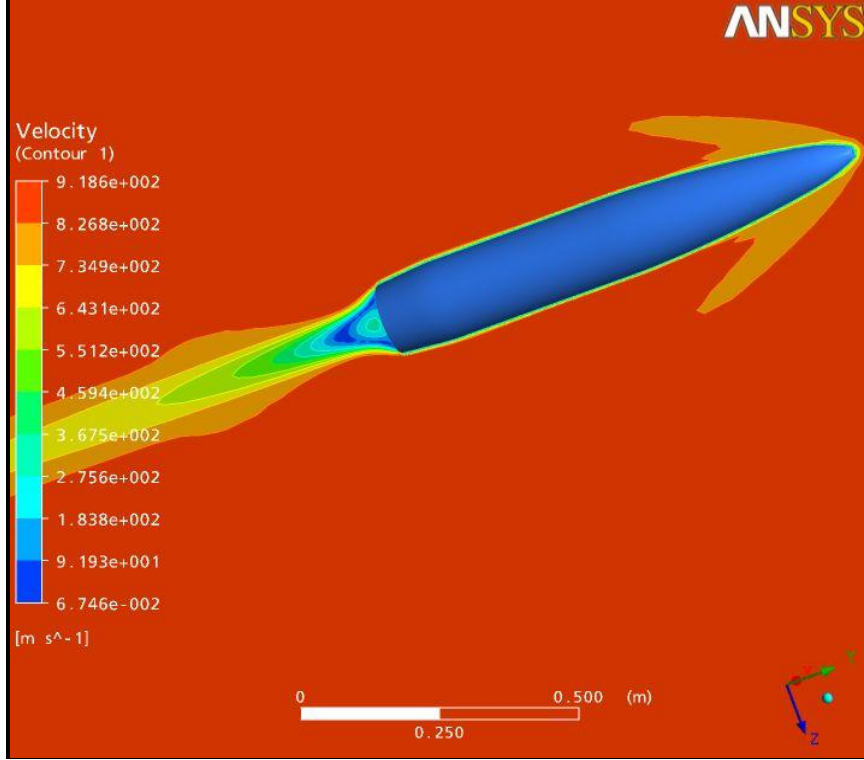
Sayısal akışkanlar dinamiği programları kullanılarak günümüzde bir merminin çoğu aerodinamik katsayıları hesaplanabilmektedir. Bu konu ayrı bir uzmanlık alanıdır. Bu çalışmada mermi etrafında meydana gelen hız, basınç gibi fiziksel olayların gözlenmesi ve hesaplamalarda kullanılacak en önemli aerodinamik katsayı olan C_{d0} katsayısının hesaplanması için ANSYS CFX programının deneme sürümü kullanılmıştır. Mermi farklı hızlarda iken etrafında oluşan sürüklenme kuvveti hesaplanarak,

$$F_D = \frac{1}{2} \rho S C_{d0} V^2$$

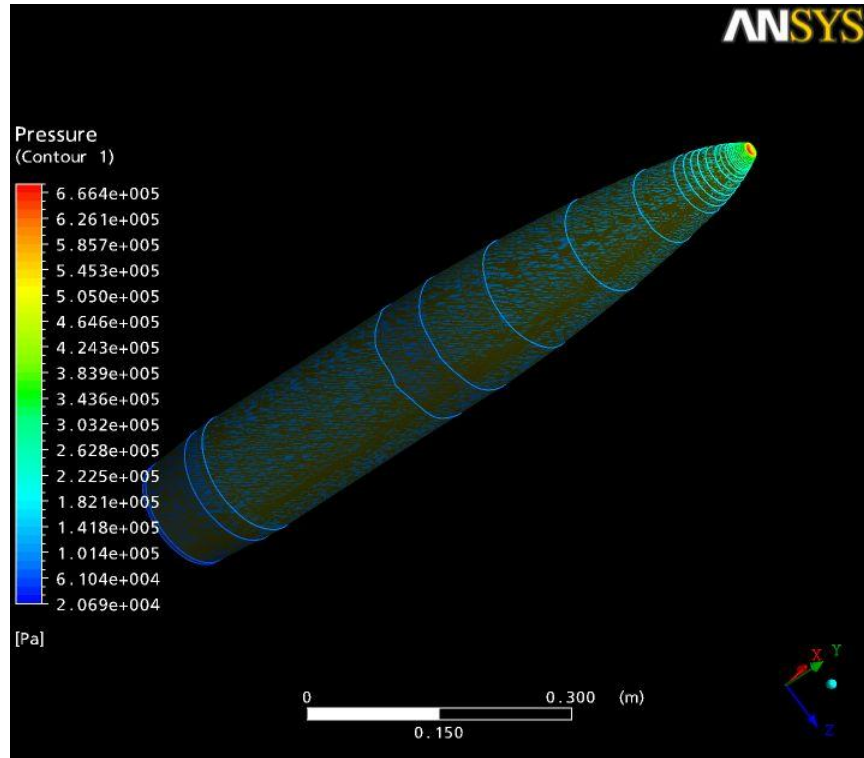
Formülünden C_{d0} uygulanan hız değerleri için sürüklenme katsayıları bulunmuştur. Hesaplamalarda kullanılan çözüm ağı (Şekil 6.1) ve 850 m/s hız bölgesinde mermi yüzeyinde ve hava ortamında hesaplanan hız, basınç dağılım değerleri ise Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4' da gösterilmiştir. Çözüm yapılan programda kullanılan parametreler ise Ek-1'de sunulmuştur.



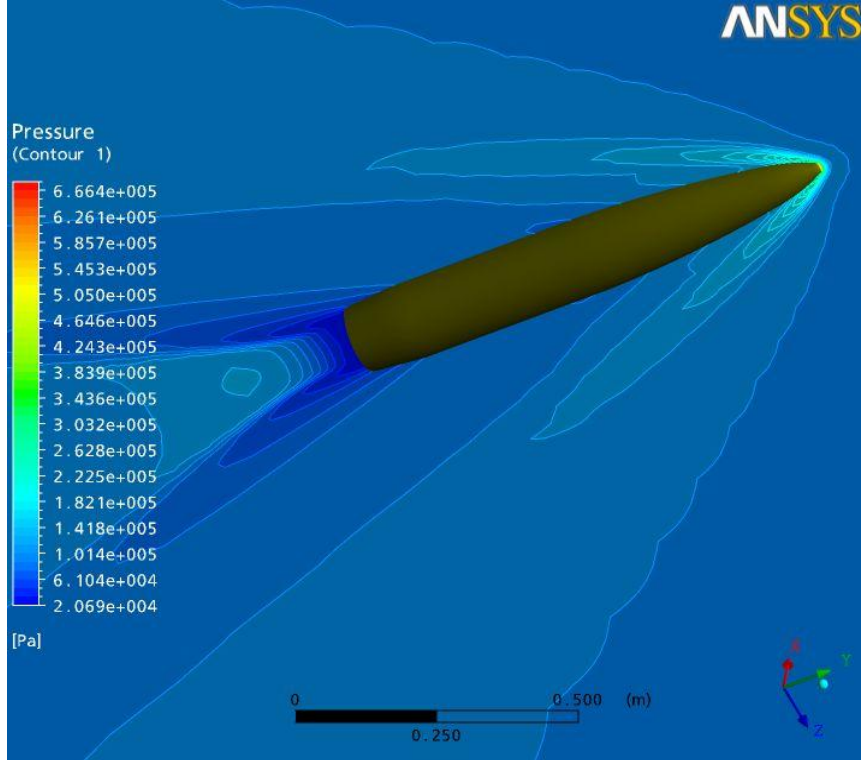
Şekil 6.1 Akışkanlar dinamiği için hazırlanan çözüm ağı



Şekil 6.2 Mermi etrafındaki ortamda oluşan hız dağılımı



Şekil 6.3 Mermi üzerinde oluşan basınç dağılımı

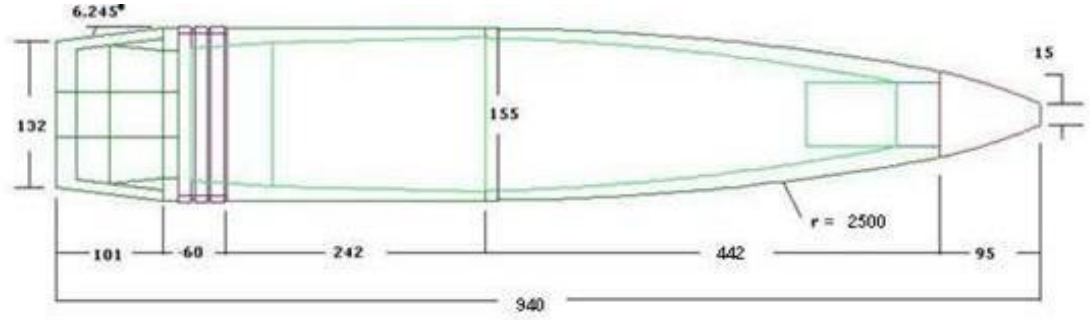


Şekil 6.4 Mermi etrafındaki ortamda oluşan basınç dağılımı

6.2 McDRAG programı ile C_{d0} hesaplanması

Robert L. McCoy tarafından hazırlanan McDrag programı BASIC dilinde hazırlanmıştır ve merminin fiziksel, şekilsel özellikleri kullanılarak belli Mach aralıkları için sürüklenme katsayılarını vermektedir. McDrag programı ABD ordusunda görevli bir uzman tarafından oluşturulmuş ve açık kaynaklarda erişilebilen bir yazılımdır (McCoy 1981). Bu çalışmada bir BASIC derleyicisi kullanılarak mermi modeline ait C_{d0} değerleri karşılaştırma amacıyla hesaplanmıştır. Kullanılan mermi özellikleri ve elde edilen fiziksel değerler Şekil 6.5 'deki gibidir. Ek-2' de model mermiye ait McDrag ile oluşturulmuş aerodinamik katsayılar tablosu verilmiştir.

6.3 PRODAS programı ile aerodinamik katsayıların hesaplanması



Şekil 6.5 Modelleme yapılan top mermisi fiziksel özellikleri

Şekil de ölçüleri ve kesiti verilen 155 mm çapındaki top mermisinin Prodas programı ile modellemesi ve uçuş simülasyonu yapılarak aerodinamik katsayıları çıkartılmıştır. Model mermi kesiti Şekil 6.5’de, kütleli özellikler Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Modelleme yapılan top mermisi kütleli özellikleri

| Kütle (kg) | I_x ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) | I_y ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) | KM burundan (mm) | Uzunluk (mm) |
|---------------|---|---|---------------------|-----------------|
| 45.0 | 0.154 | 2.480 | 541 | 940 |

6.4 Kararlılık değerlerinin hesaplanması

Prodas programı ile hesaplanan aerodinamik katsayılar kullanılarak elde edilen aerodinamik katsayılar ile merminin 6 farklı ilk hız değerinde sabitler hesaplanmıştır. Namludan çıkış anı için hesaplanan S_g (statik kararlılık faktörü), S_d (dinamik kararlılık faktörü), λ_F ve λ_S (dinamik sönümlenme katsayıları), ϕ_F ve ϕ_S (açısal frekans değerleri) MS Excel programında tablo halinde hesaplanarak Ek-3’de verilmiştir.

6.5 2-DoF hareket denklemi ile yörüngenin hesaplanması

Merminin yatay ve dikey boyutta olmak üzere 2-boyuttaki hareketi tanımlayan denklem;

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum \vec{F} + m\vec{g} \quad (6.1)$$

$$\vec{F} = -\frac{1}{2}\rho S C_D V^2 \hat{i} \quad (6.2)$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{\rho S C_D}{2m} V \vec{v} + \vec{g} \quad (6.3)$$

$$C_D^* = \frac{\rho S C_D}{2m} \quad (6.4)$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \dot{V}_x \vec{i} + \dot{V}_y \vec{j} + \dot{V}_z \vec{k} \quad (6.5)$$

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (6.6)$$

İfadeleri denklemde yerine konursa;

$$\dot{V}_x = -C_D^* V V_x \quad (6.7)$$

$$\dot{V}_y = -C_D^* V V_y - g \quad (6.8)$$

$$\dot{V}_z = -C_D^* V V_z \quad (6.9)$$

Hesaplamalarda kolaylık sağlaması açısından zamana göre türevleri konuma göre türevlere çevirmek isteriz. Zamana göre türev denklemlerini dx/dx ile çarparak gerekli düzeltmeleri yapılırsa konuma göre hız denklemleri elde edilir;

$$V_x' = -C_D^* V \quad (6.10)$$

$$V_y' = -C_D^* \frac{V V_y}{V_x} - \frac{g}{V_x} \quad (6.11)$$

$$V_z' = -C_D^* \frac{V V_z}{V_x} \quad (6.12)$$

Bu aşamadan sonra hareket denkleminin bir vektör matrisinde sayısal olarak çözdürülmesi gerekmektedir. Dönüden kaynaklanan doğal sapma hariç tutulursa, z yönünde normal şartlarda net bir kuvvet cisme etki etmediği için V_z bileşeni hesaplamalara katılmamıştır. MATLAB programının diferansiyel denklem entegralini sayısal olarak hesaplayan fonksiyonları kullanılarak yukarıda tanımlanan hareket denklemleri bileşenleri sayısal olarak merminin hareketi boyunca hesaplanmıştır.

$$A = \begin{bmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \\ t \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a(1) \\ a(2) \\ a(3) \\ a(4) \\ a(5) \\ a(6) \end{bmatrix} ; \quad A' = \begin{bmatrix} x' \\ x'' \\ y' \\ y'' \\ t' \\ h' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ V_x' \\ y' \\ V_y' \\ t' \\ h' \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

A' matrisinin bütün elemanları birbirlerine çizgisel olmayan şekilde bağlıdır. Bu matris elemanları 4.dereceden Runge-Kutta sayısal diferansiyel yöntemi ile Δx aralıklarında bütün menzil boyunca çözdürülecek olursa hareket denklemleri sonuçları elde edilmiş olur. Hareket denkleminde bulunan yoğunluk ρ ve C_{d0} değişkenleri sayısal entegrasyon boyunca her bir Δx aralığında hesaplanmıştır.

6.6 Namludan çıkışında açısız sönümlenme hareketinin hesaplanması

Merminin yunuslama ve yalpalama hareketinin çizgisel hale getirilmiş hali aşağıda verilen (4.7) denklemdir:

$$\xi'' + (H - iP)\xi' - (M + iPT)\xi = -iPG$$

$$\xi = \alpha + i\beta$$

Bu denklemde H , P , M , T , G değişken katsayılar Ek-3'de hesaplandıkları şekilde dönü, hız, mermi şekli, eylemsizlik momentleri ve aerodinamik katsayıların birer fonksiyonudurlar. Bu değişken katsayılar Ek-3'de 6 farklı namlu çıkış hızında, aerodinamik katsayılarla bağlı olarak hesaplanmıştır. Yukarıdaki açısız salınım hareket denklemleri, başlangıç değer problemi olarak yani namlu çıkışındaki kararlılık durumunun

gözlemlenmesi amacıyla yine sayısal entegrasyon yöntemi ile çözülmüştür ve elde edilen grafiklerde merminin sönümleme yaptığı görülmüştür. MATLAB’de yapılan hesaplamaların Prodas ile yapılan hesaplamalarla uyum gösterdiği görülmüştür.

Namlu çıkışında merminin statik kararlı ($S_g > 1$) olması, (pd/V) faktörünün yörünge boyunca büyümesi sebebiyle (Şekil 4.5), merminin bütün yörünge boyunca da statik kararlı kalacağını gösterir.

Namlu çıkışında merminin dinamik kararlılığının ve sönümlemenin ($0 < S_d < 2$) gözlemlenmesi merminin yörüngenin büyük bölümünde dinamik kararlı olacağı düşünülebilir. Sadece yörüngenin son bölümünde dönü azalması sebebiyle yalpalama açısı artabilir. Bu durum top mermisi gibi yüksek dönülü mermilerde mermi statik kararlı olduğu sürece sorun oluşturmaz, yalpa açısı sabit bir değerde kalır. MATLAB program ile yukarıda tanımlanan açısal salınım hareket denklemi merminin namludan çıkış anındaki katsayıları kullanılarak sayısal entegrasyonla hesaplanmıştır.

$$B = \begin{bmatrix} \xi \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha(1) \\ \alpha(2) \end{bmatrix} ; B' = \begin{bmatrix} \xi' \\ \xi'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi' \\ -(H - iP)\xi' + (M + iPT)\xi - iPG \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

ξ değerlerinin zamana göre değişiminin çözümü, merminin namlu çıkışında yapacağı salınım hareketini verecektir.

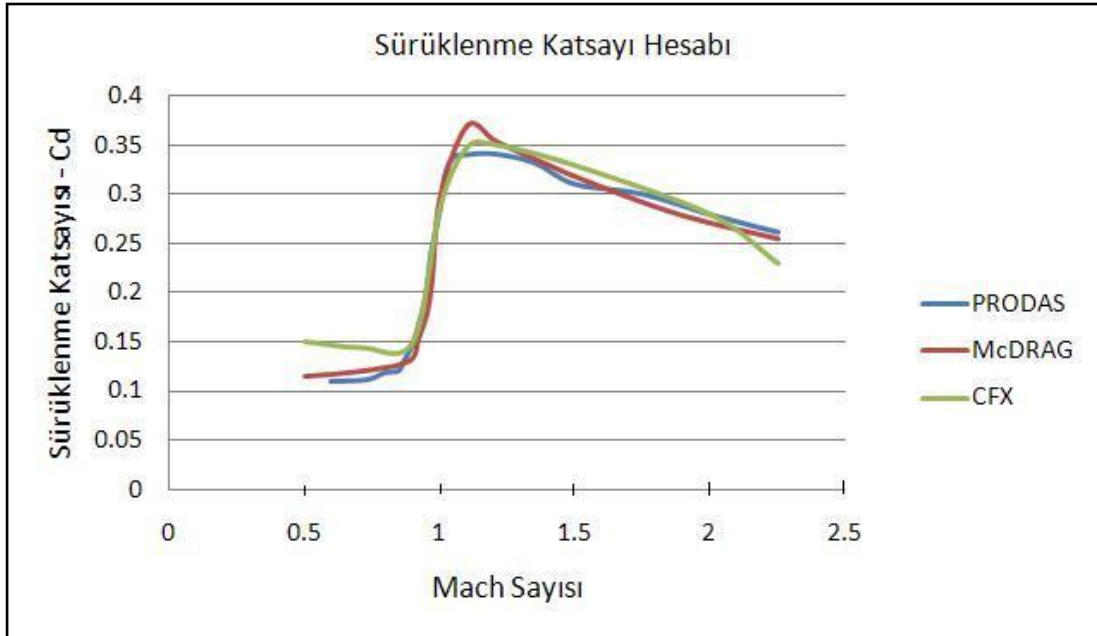
6.7 Hesaplanan yörüngenin yörünge takip radar verileri ile karşılaştırması

Bu çalışmada Prodas programı ile modellenmesi yapılan top mermisi temel alınarak 2-boyutta hareket denklemleri MATLAB programı ile çözülmüştür. MATLAB çözümlerinde rüzgâr etkileri hesaba katılmamıştır, atış yüksekliği (rakım), değişken sürtünme katsayısı ve yoğunluk hesaba katılmıştır. Her iki programda elde edilen yörünge hesaplamaları ayrıca benzeri bir top mermisinin gerçek atışlı testlerinden ölçümü alınan radar verileri ile de kıyaslanmıştır. Gerçek mermi ile modellenen merminin sürtünme katsayıları yakın değerlere sahiptir.

7. BULGULAR ve TARTIŞMA

7.1 Hesaplanan C_{d0} Katsayılarının Karşılaştırılması

Sıfır hücum açısı sürüklenme katsayısı Mach sayısının (Ma) bir fonksiyonu olarak genellikle deneysel olarak yada rüzgar tüneli testleri veya Doppler Radar ölçümleri ile hesaplanır. Bununla birlikte sıfır hücum açısında sürüklenme katsayısını Mach sayısının fonksiyonu olarak hesaplayan yazılımlar Şekil 7.1’de gösterildiği gibi (CFX, Prodas, McDrag) mevcuttur. Bu yöntemler esas olarak yeni bir merminin geliştirilme aşamalarında kullanılabilir.



Şekil 7.1 McDrag, CFX, Prodas ile karşılaştırmalı C_{d0} grafikleri



Şekil 7.2 Prodas ile hesaplanan C_{d0} grafiği

Yapılan sayısal akışkanlar dinamiği CFX programı, McDrag programı ve Prodas yarı empirik hesaplamaları, ($1\text{Mach} < V < 2.5\text{Mach}$) aralığında genellikle uyumlu sonuçlar göstermiştir. CFX programı ses altı bölgede ve 2.5 Mach üstünde, McDrag programı ise ses hızı geçiş bölgesinde küçük sapmalar göstermiştir. Dolayısı ile balistik hesaplamalarında genel olarak kullanılan Prodas programının doğruluğu ve kullanılabilirliği bu model üzerinde gösterilmiştir (Şekil 7.2). Bu temel katsayı hesabının doğrulanması, diğer aerodinamik katsayıların kullanılabilirliği için de önemli bir referans olmaktadır.

7.2 Mermi kararlılık hesapları sonuçlarının karşılaştırmaları

Ek-3' de Prodas tarafından hesaplanan mermiye ait 6 farklı namlu çıkış hızı için hesaplanmış aerodinamik katsayılar bulunmaktadır. Bu katsayılar kullanılarak (McCoy 1998) kitabında verilen formüllerde statik kararlılık faktörü ve dinamik kararlılık faktörünün namlu çıkışındaki değerleri MS Excel'de hesaplanmıştır. Prodas programının kendi hesapladığı kararlılık katsayıları ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 7.1).

Statik kararlılık faktörünün tam bir uyum içinde olduğu ve ($S_g > 1$) şartı bütün hızlarda sağlandığı görülmektedir. Statik kararlılık, temel olarak yunuslama momenti ve dönüye bağlıdır, dolayısıyla hesaplanması kolaydır.

Çizelge 7.1 MS-Excel ve Prodas programlarının sonuçları

| | | | | | | | |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Çıkış Hızı(m/s) | 935 | 850 | 765 | 680 | 595 | 510 | 410 |
| S _g (EXCEL) | 1.63 | 1.61 | 1.59 | 1.51 | 1.38 | 1.32 | 1.33 |
| S _g (PRODAS) | 1.63 | 1.61 | 1.59 | 1.51 | 1.38 | 1.32 | 1.33 |
| S _d (EXCEL) | 1.28 | 1.23 | 1.21 | 1.21 | 1.22 | 1.22 | 1.32 |
| S _d (PRODAS) | 1.34 | 1.32 | 1.31 | 1.30 | 1.30 | 1.29 | 1.33 |

Dinamik kararlılık faktörünün her iki hesaba göre de daima ($0 < S_d < 2$) aralığında olması sebebiyle dinamik kararlılık sağlanmıştır yani yalpalamalar sönümlenmektedir. Dinamik kararlılık için yapılan her iki hesap azalış ve artış olarak eğilimde uyum göstermesine rağmen %10'a varan oranda fark bulunmaktadır. Dinamik kararlılık birçok diğer katsayı ile beraber Magnus moment katsayısına bağlıdır ve bu katsayı birçok faktöre bağlı olarak anlık değiştiği için hesaplanması zordur. Dinamik kararlılık faktörü hesaplamalarındaki farkın bu katsayının hesabındaki zorluktan ve alınan ortalama değerlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

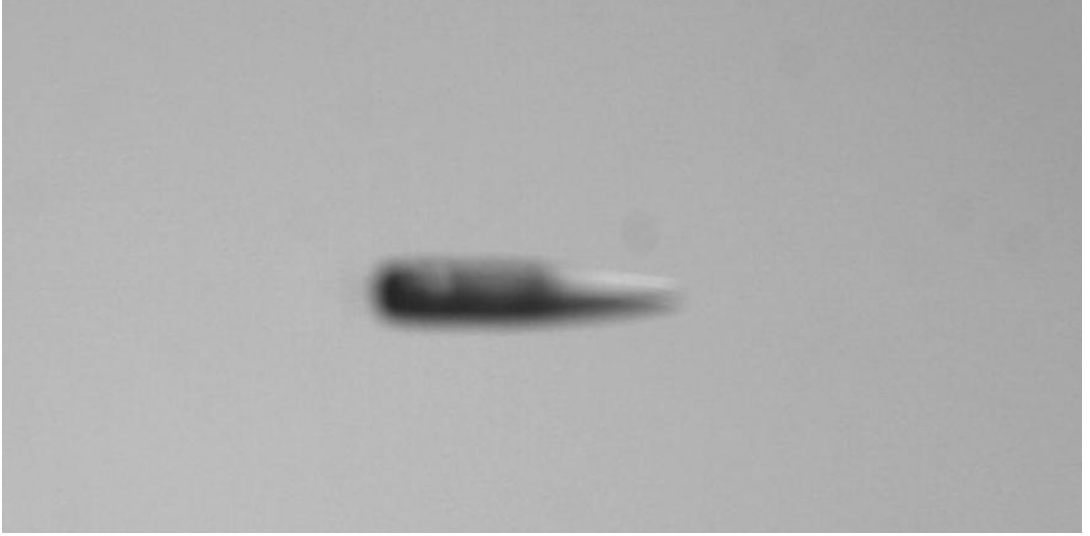
7.3 Gerçek Test Atışları ile 2-Boyutta Yörünge Hesaplamaların Karşılaştırması

Birebir aynı olmasa dahi benzer aerodinamik özelliklere sahip olan bir top mermisinin atış poligonunda gerçekleştirilmiş olan 15 adetlik atışa ait görüntüler Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'te gösterilmektedir. Atışlara ait yörünge verileri ile MATLAB programında 2-boyutta modellenerek hesaplanan hareket denklemlerinin yörünge grafikleri karşılaştırılarak kıyaslamalar yapılmıştır. Oluşan farklılıkların sebepleri tartışılmıştır. Toplam 15 adet gerçek atış test yörünge verileri radar dosyalarından alınmıştır (MKE, 2009) ve Şekil 7.5 'de görüldüğü gibi 2 adet gerçek atış test yörüngesi ortalama yörüngeden büyük oranda sapma göstermiştir. Düşük tepe noktası yüksekliği değerlerine ulaşan bu atışlardaki farklılığın baruttan ve ilk hız düşüklüğünden

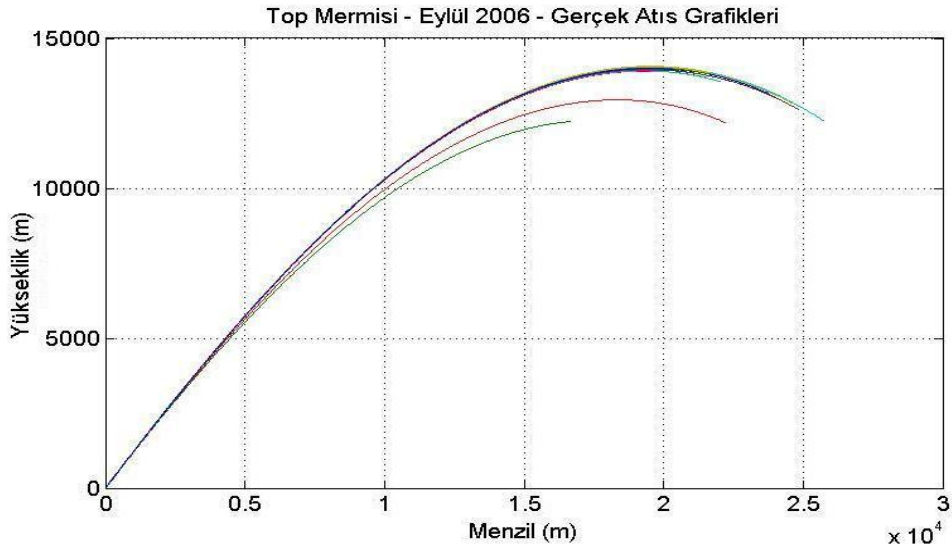
kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Bu iki atış değerleri ortalama hesaplamalarına katılmamıştır.



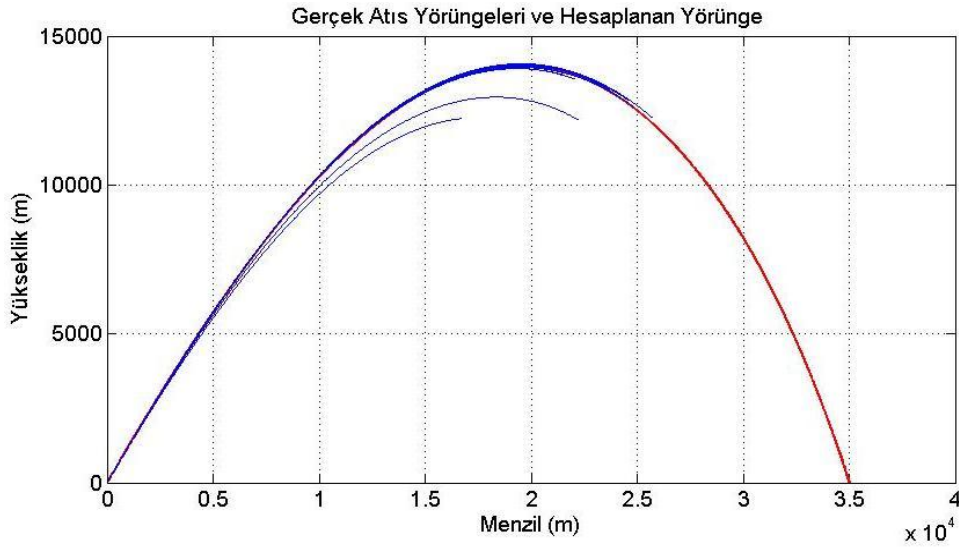
Şekil 7.3 Top mermisinin namlu çıkışındaki hızlı kamera görüntüsü



Şekil 7.4 Top mermisinin test atışında havadaki hızlı kamera görüntüsü



Şekil 7.5 YTR ile 15 adet atışa ait verilerin 2-boyutta gösterimi



Şekil 7.6 YTR verileri ve hesaplama yapılan yörüngeyi gösterimi

Şekil 7.6' de görüldüğü gibi, MATLAB ile yapılan 2-D yörünge hesaplaması ortalama yörünge eğrisi ile büyük uyum göstermektedir.

Çizelge 7.2 YTR TEST ATIŞ VERİLERİ ve 2-BOYUT YÖRÜNGE HESAPLAMASI KARŞILAŞTIRMASI

| | BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ | | | TEPE NOKTASI DEĞERLERİ | | | | Toplam Uçuş Zamanı (s) | Düşme Menzili (m) |
|--------------------------------|---------------------|---------------------------|------------------|------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|------------------------------|----------------------|
| | Ağırlık (kg) | Yükseliş açısı(derece) | İlk hız (m/s) | X_tepe (m) | Y_tepe (m) | V _x _tepe (m/s) | T_tepe (s) | | |
| Test Değerleri Ortalamaları | 45 | 51 | 944 | 19,433 | 13,990 | 323 | 49.51 | | 35,227 |
| 2-B HESAPLAMA (MATLAB) | 45 | 51 | 944 | 19,440 | 14,000 | 315 | 50.18 | 111.04 | 35,020 |
| Test Standart Sapmaları | 0 | 0 | 1.76 | 90 | 52 | 1.6 | 0.2 | | 155 |
| Sayısal fark | 0 | 0 | 0 | 7 | 11 | -8 | 0.33 | | -207 |
| Yüzde fark | 0 | 0 | 0 | 0.04 | 0.08 | -2.3 | 1.34 | | -0.59 |

Çizelge 7.2’de tablo halinde gösterilen ve her iki yöntemle elde edilmiş olan yörünge eğrileri verileri genel olarak uyum göstermiştir. Tepe noktasındaki x ve y konum değerlerinde 10 m seviyesinde farklar bulunmaktadır ve ihmal edilebilir seviyededir. En büyük farklılık düşme noktasının standart sapması 155 m olmasına rağmen hesaplanan değer 207 m düşük çıkmıştır.

Yüksek hız bölgesi olan başlangıçtan tepe noktasına kadar olan bölgede tam bir uyum görülmüştür. Hedef menzil hesabında ise standart sapmadan 50 m kadar düşük değer çıkmıştır. Bu durumun sebebi olarak rüzgâr olması bir olasılıktır. Ayrıca diğer atmosfer koşulları da bir olasılıktır. Bununla birlikte düşük hız bölgesinde hesaplanan sürtünme katsayısı diğer bir etken olabilir. Gerçek atış verilerinde ses hızı seviyelerinde ölçülen sürtünme katsayıları çok değişkenlik gösterdiğinden bu olasılık mümkün görülmektedir.

7.4 Yörünge Hesabında Atış Yüksekliği Etkilerinin İncelenmesi

Bilindiği gibi atmosferde yükseldikçe hava yoğunluğu (ρ) azalmaktadır (Şekil 7.7). Sürtünme kuvveti tanımı gereği hava yoğunluğu ile ilişkilidir.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho S C_{d0} V^2$$

Dolayısıyla deniz seviyesinden atılan bir mermi ile daha yüksek bir konumdan atılan mermi farklı sürtünme kuvvetlerine maruz kalacaktır. Yüksek rakımlı noktalardan atılan mermiler düşük yoğunluk sebebiyle deniz seviyesine göre daha ileri noktalara düşer (Şekil 7.8). Atmosferin yüksekliğe bağlı olarak değişen yoğunluk değerleri ICAO Standart Atmosfer modelinden (Swiss Aviation Resources, 2009) alınarak sayısal diferansiyel hesaplamalara dâhil edilmiştir. Bu çalışmada atış noktasının yüksekliği ile ulaşılan menzildeki artmalar MATLAB programında hesaplanarak tablo halinde verilmiştir Çizelge (7.3).



Şekil 7.7 Atmosfer yoğunluğunun yükseklikle değişimi



Şekil 7.8 Yükseklik-Menzil artışı eğrisi

Çizelge 7.3 Rakıma göre menzil artış tablosu

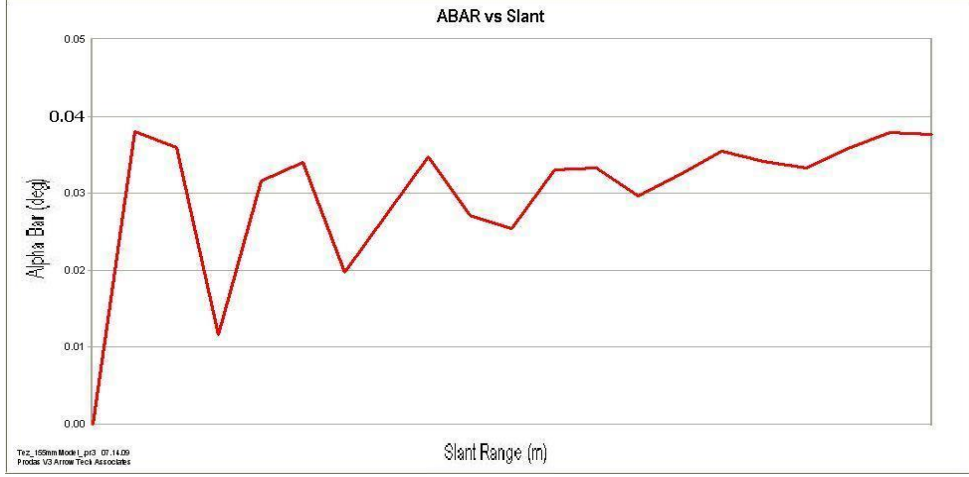
| İlk hız | Yükseliş Açısı | h – rakım (m) | Atış menzili | Menzil Artması (m) | Yüzde Atış (%) |
|---------|----------------|---------------|--------------|--------------------|----------------|
| | | | (m) | | |
| 900 m/s | 48° | 0 | 29,440 | 0 | 0 |
| 900 m/s | 48° | 500 | 30,630 | 1,190 | 3 |
| 900 m/s | 48° | 1,000 | 31,960 | 2,520 | 7 |
| 900 m/s | 48° | 1,500 | 33,430 | 3,990 | 11 |
| 900 m/s | 48° | 2,000 | 34,960 | 5,520 | 15 |

7.5 Namlu çıkışında merminin açısal sönümleme denkleminin incelenmesi

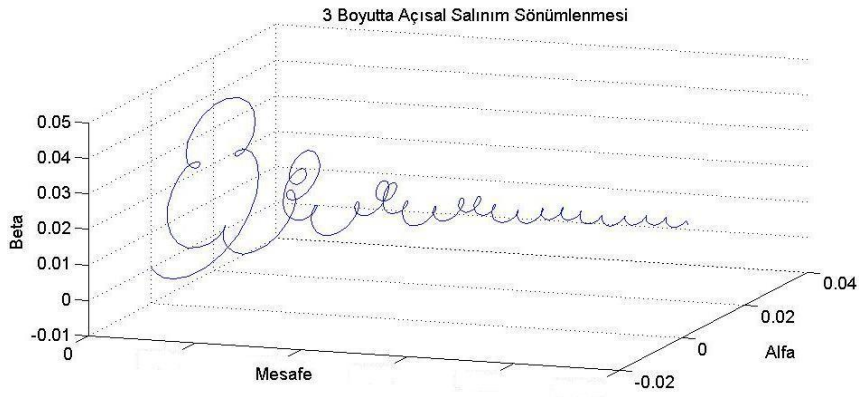
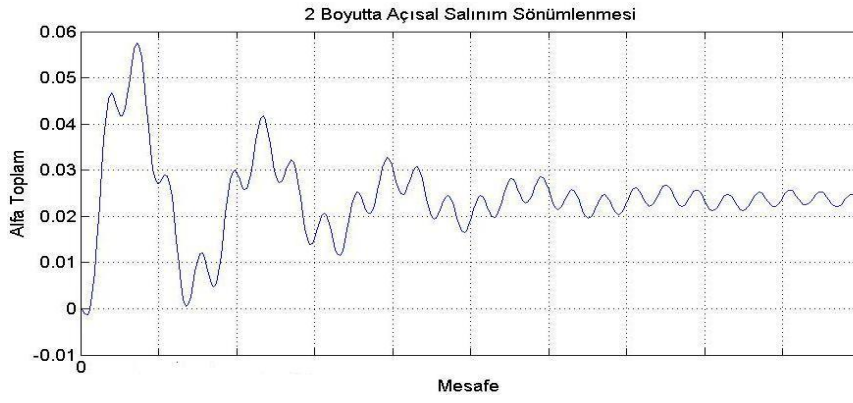
$$\xi'' + (H - iP)\xi' - (M + IPT)\xi = -iPG$$

$$\xi = \alpha + i\beta$$

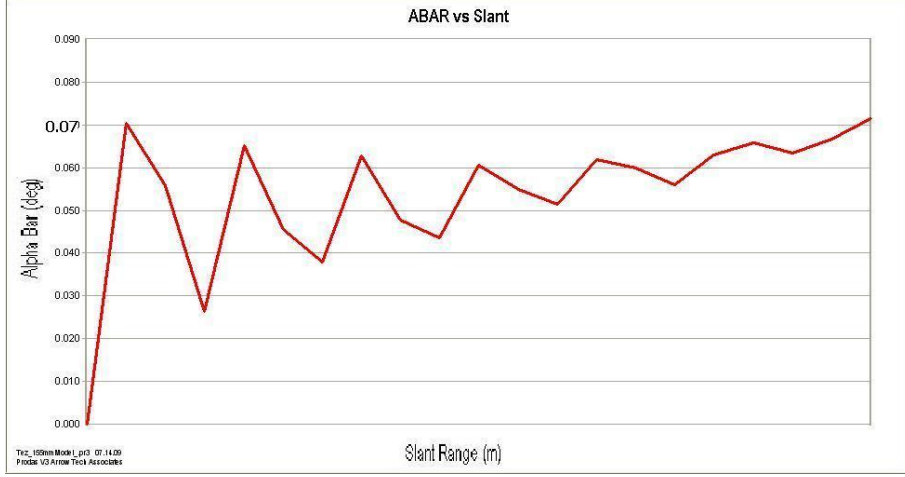
Açısal hareketi tanımlayan yukarıdaki denklemler modellenmesi yapılan mermi için 935 m/s, 680 m/s, 460 m/s olmak üzere 3 farklı namlu çıkış hızı için MATLAB programında hesaplanarak grafik halinde gösterilmiştir. Yapılan hesaplama Prodas program sonuçları ile karşılaştırılarak uyum görülmüştür.



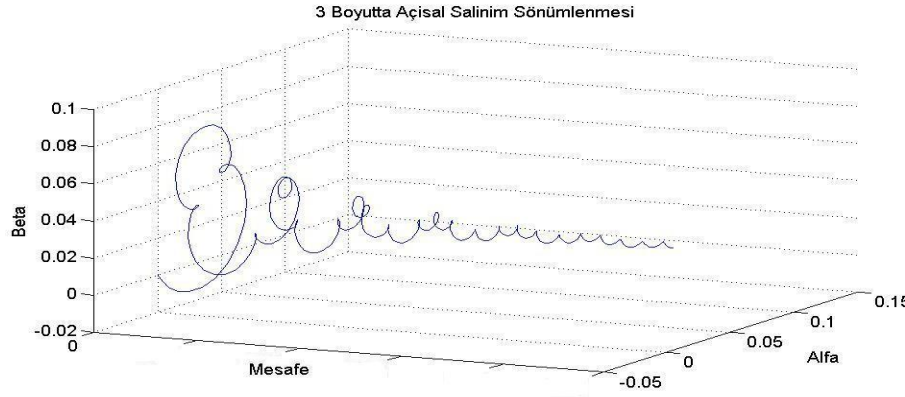
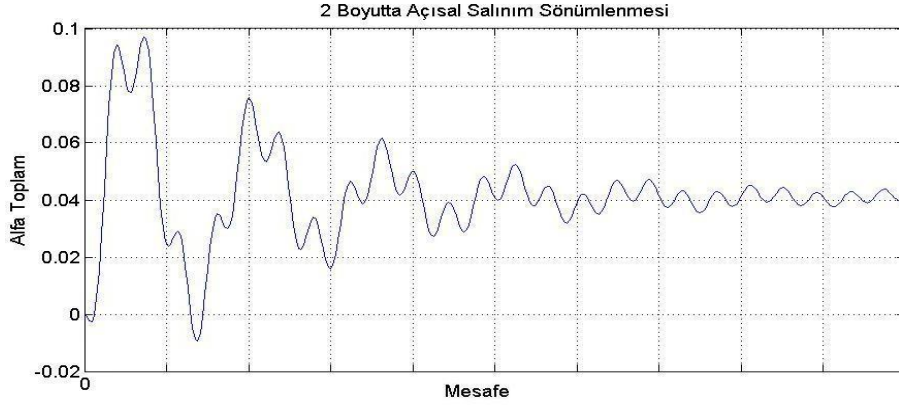
Şekil 7.9 $V_0=935$ m/s ve $\varphi = 51^\circ$ için Prodas sönümlenme grafiği



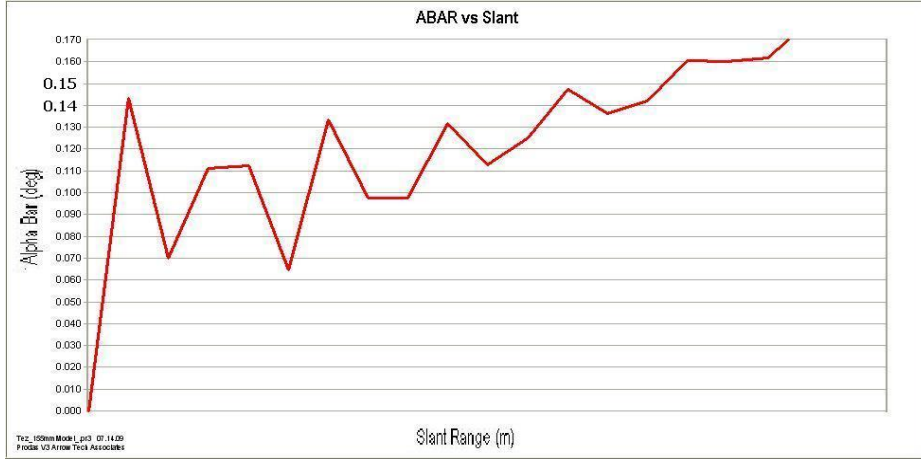
Şekil 7.10 $V_0=935$ m/s ve $\varphi = 51^\circ$ için MATLAB sönümlenme grafikleri



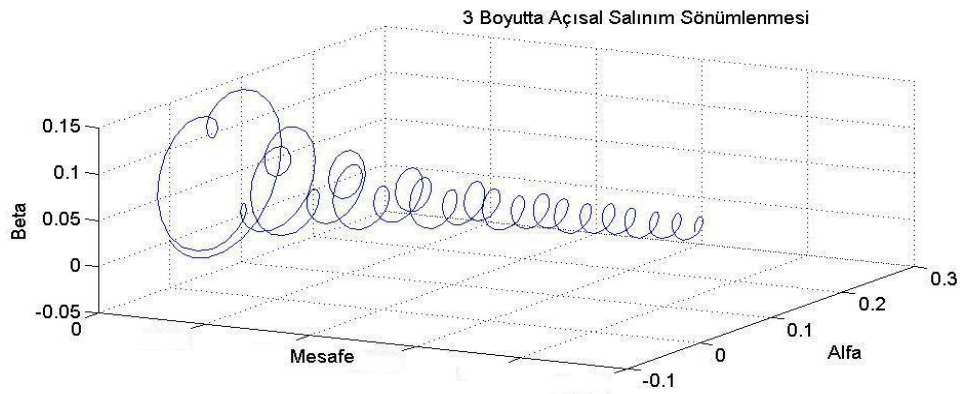
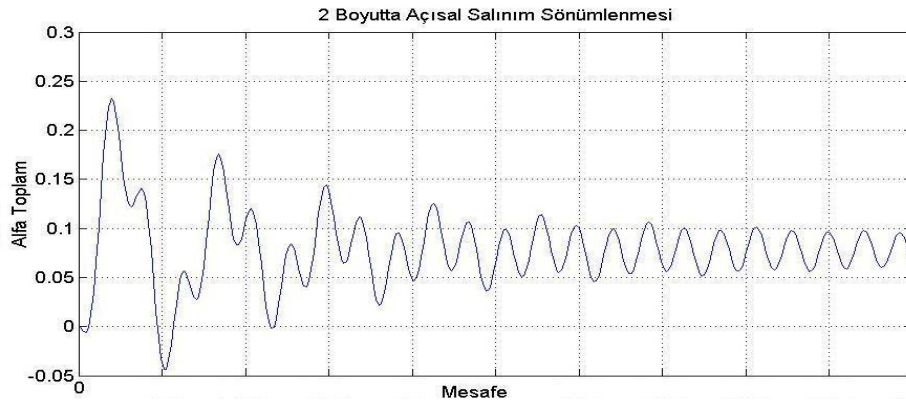
Şekil 7.11 $V_0=680$ m/s ve $\phi = 51^\circ$ için Prodas sönümlenme grafiği



Şekil 7.12 $V_0=680$ m/s ve $\phi = 51^\circ$ için MATLAB sönümlenme grafikleri



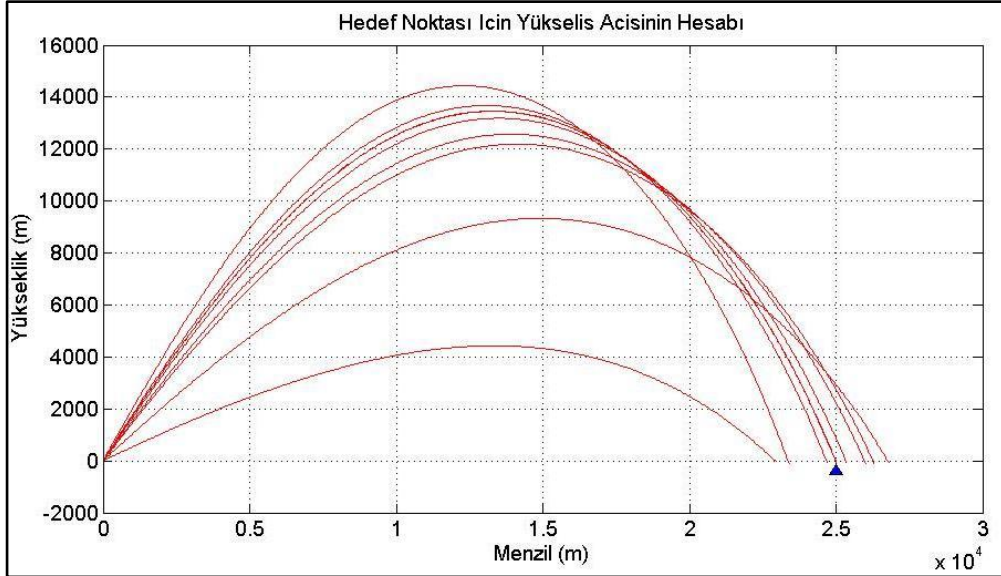
Şekil 7.13 $V_0=460$ m/s ve $\varphi = 51^\circ$ için Prodas sönümlenme grafiği



Şekil 7.14 $V_0=460$ m/s ve $\varphi = 51^\circ$ için MATLAB sönümlenme grafikleri

7.6 Menzildeki Hedefi Sabit İlk Hız ile Vuruş Açısının Hesaplanması

Bu çalışma kapsamında MATLAB programı ile hareket denklemi hesaplanarak yörünge oluşturulmuştur. Mevcut topçu atış uygulamalarında kullanılan atış kontrol sistemlerinde sabit bir namlu çıkış hızı ile sabit uzaklıktaki hedef vurulmaya çalışılmaktadır. Dolayısı ile hedefin vurulması için namlu yükseliş açısının doğru hesaplanması gerekmektedir. MATLAB programının ilgili en uygun şekilde sokma fonksiyonları kullanılarak sabit bir namlu çıkış hızı ile sabit uzaklıktaki hedefin vurulması için gereken açı ardışık olarak hedefe en yakın noktaya düşecek mermi yükseliş açısı hesaplanabilmektedir.



Şekil 7.15 Hedefi vuruş açısının hesaplanması

8. SONUÇ

Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

1- Sürüklenme katsayısının hesaplanması:

Bir merminin en önemli aerodinamik katsayısı sürüklenme katsayısıdır. Bu katsayı merminin havada ne kadar sürüklenmeye maruz kalacağını belirler. Dolayısıyla hesaplanması önem arz etmektedir. Bu çalışmada model olarak kullanılan ve teorik olarak üzerinde çalışılan hayali bir merminin aerodinamik katsayıları 3 farklı yöntemle hesaplanmıştır. İlk olarak sayısal akışkanlar dinamiği programı ANSYS CFX programı ile 0.5 Mach ve 2.5 Mach aralığında farklı hız rejimlerinde ayrı ayrı merminin sürüklenme kuvveti hesaplanarak sürüklenme katsayı değerleri elde edilmiştir (Ek-1). İkinci olarak Robert McCoy tarafından BASIC dilinde yazılmış olan ve birçok mermi türü için kullanıldığı ve doğrulandığı kaynaklarda belirtilen McDrag programı (McCoy, 1998) kullanılarak model mermiye ait sürüklenme katsayıları elde edilmiştir. (Ek-2) Üçüncü olarak, kütüphanesinde bulunan benzeri mühimmat bilgileri ile benzeştirme yaparak aerodinamik bilgiler veren “yarı empirik” Prodas programında mermi modellenerek sürüklenme katsayısı hesaplanmıştır (Ek-3). Her üç yöntem ile elde edilen sürüklenme verilerinin Mach sayısına göre grafiği çizdirildiğinde genel olarak verilerde uyum gözlenmiştir (Şekil 7.1). McDrag programının ses hızı (1 Mach) seviyelerinde, akışkanlar dinamiği programının ise ses altı ve yüksek ses üstü bölgelerinde küçük sapmalar meydana getirdiği gözlenmiştir. Bununla beraber model olarak kullanılan top mermisi hız aralığı olan 1 Mach ve 2.5 Mach aralığında genel olarak Prodas verileri ile diğer hesaplamalar uyumludur. Sonuç olarak Prodas programından elde edilen sürüklenme değerleri doğrulanmış ve hareket denklemi hesaplamalarında kullanılmıştır.

2- Aerodinamik kararlılığın teorik olarak belirlenmesi:

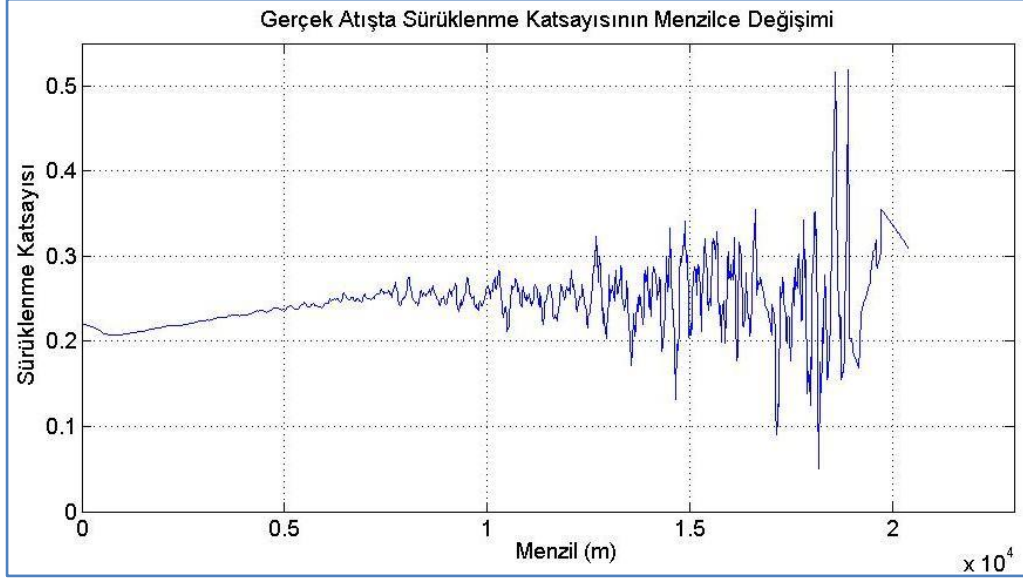
Prodas programı, mermilerin aerodinamik katsayılarını hesaplayan balistikçiler tarafından hesaplamalarını doğrulamak amacıyla kullanılmaktadır. (Whyte 2003) Bu program ABD ordusunda görev almış uzmanlar tarafından yazılmış ve kullanım izni ABD hükümeti tarafından verilen özel bir yazılımdır. Prodas ile elde edilen katsayılar kullanılarak, referans kitaplardan elde edilen ve denklem (4.17) ve denklem (4.34) ‘de

çıkarmı yapılan statik kararlılık, S_g ve dinamik kararlılık, S_d kriterleri hesaplanmıştır. Sonuçların bulunduğu değerler cetveli Ek-3'te verilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü üzere Çizelge (7.1), hesaplanan statik kararlılık kriterleri bütün ilk hız değerleri için kararlılık kriterine uyumludur ($S_d > 1$) ve Prodas değerleri ile uyumludur hatta aynıdır. Dinamik kararlılık kriterleri ise en fazla %10 seviyesinde yüksek çıkmasına rağmen kararlılık kriterleri sınırları ($0 < S_d < 2$) içerisinde kalmıştır ve genel eğilime uyumuştur. Dolayısı ile hesaplamanın doğru olduğu fakat dinamik kararlılık denkleminde çok fazla sayıda katsayı olması ve yüksek hassasiyeti ölçmenin zor olması sebebiyle bu farklılık oluşmuştur. Sonuç olarak oluşturulan model merminin her iki kararlılık kriterini sağladığı gösterilmiştir.

3- Yörünge hesaplamaları:

Hareket denklemlerinin çizgisel olmaması, değişken atmosfer yoğunluk değerleri ve değişken sürüklenme katsayısı değerleri sebebiyle bir top merminin yörünge hesabı analitik yöntemlerle doğru hesaplanamamaktadır. Yörünge hesaplamaları en doğru şekilde nümerik hesaplamalarla yapılabilmektedir. Yörünge hesaplamalarında en doğru sonuç 6-serbestlik dereceli çözümlerle elde edilebilmesine rağmen gerekli yaklaşımlar yapıldığı takdirde 4-serbestlik dereceli çözümler de yeterli sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada ise merminin dönüşünden kaynaklanan yana sapma (drift) hareketi hesaplanmamıştır ve noktasal kütle olarak kabul edilen mermiye ait hareket denklemi, 2-boyuttaki MATLAB programı ile programlanarak çözdürülmüştür. Hareketin çizgisel olmayan diferansiyel denklemleri 4. dereceden Runge-Kutta sayısal entegrasyon yöntemi ile hesaplanmıştır. Sayısal entegrasyonda zamana bağlı değişken atmosfer koşulları ve sürüklenme katsayıları hesaplamalara dâhil edilmiştir. Rüzgâr etkisinin olmadığı veya etkisinin ihmal edilebilir olduğu kabul edilmiştir. Programlanan hareket denkleminde ait sonuçlar benzeri bir merminin gerçek atış test verileri (Yörünge Takip Radarı) ile karşılaştırması yapılmıştır. İlk hız, yükseliş açısı ve mermi değerleri eşit olması durumunda yörünge tepe noktası değerleri ve menzil değerleri uyumludur. Şekil 7.6 ve Çizelge 7.2 'de gösterildiği gibi topçu atışları balistik hesaplamalarda ihmal edilebilir seviyedeki farklar haricinde gerçek test yörünge verileri ile teorik yörünge hesaplamaları tam uyum göstermektedir. Dolayısıyla yapılan yörünge hesaplamalarının doğruluğu gösterilmiştir. 15 adet radar verilerinden de anlaşılacağı üzere balistik veriler

istatistikî dağılım göstermektedir ve silah, mermi, atmosferden kaynaklı kontrol edilemeyen birçok değişken bulunmaktadır. Değerler arasındaki farklılıkların bu kontrol edilemeyen faktörlerden oluştuğu tahmin edilmektedir.



Şekil 8.1 Gerçek bir test atışında meydana gelen sürüklenme katsayısı grafiği

Şekil 8.1’de 15 no’lu gerçek atışa ait Mach sayısına göre Sürüklenme Kuvvetinin değişimi görülmektedir. Şekildeki gibi lineer olmayan bir grafik oluşma sebebinin merminin yapmış olduğu açısız hareket olduğu tahmin edilebilir. Hesaplamalardaki küçük farklılıklar bu gibi pratik değişkenlikler ve değişken atmosfer koşullarından oluşmaktadır.

4- Atış yüksekliği etkilerinin hesaplanması:

Uluslar arası havacılıkta kullanılan standart atmosfer verileri kullanılarak (ICAO Standard Atmosphere, 2009) standart atmosfer yoğunluk verileri hesaplamalarda kullanılmıştır. Bunun doğal sonucu olarak atış yapılan silahın yüksekliğine bağlı olarak merminin düşme noktası değişmektedir. Oluşturulan yörünge hesaplama programı kullanılarak 0-3000 m aralığında yüksekliğe bağlı olarak merminin düşme noktasındaki değişim hesaplanarak Çizelge 7.3 ’te verilmiştir.

5- Açısal Salınım Hareketi:

Mermi konum uzayında yaptığı harekete ek olarak aynı zamanda açısal momentum uzayında da hareket yapmaktadır. Bu harekete ait denklem, denklem (4.7)'de çıkartılmıştır.

$$\xi'' + (H - iP)\xi' - (M + IPT)\xi = -iPG$$

Bu denklemde $\xi = \alpha + i\beta$ ifadesi merminin yanal açısal momentum uzayında yaptığı açısal hareketi tanımlamaktadır ve bir reel bir imajiner eksen bulunmaktadır. Denklemde yer alan H, P, M, T, G katsayıları aerodinamik katsayıların fonksiyonudur ve formülleri kaynak kitaplarda (McCoy 1998) ve denklem (4.7)'de verilmiştir. Bu çalışmada ilk hıza ve aerodinamik katsayılara bağlı olarak namlu çıkışında mermiye ait bu katsayılar hesaplanarak Ek-3'te verilmiştir. Bu katsayılar merminin açısal salınım hareketini belirleyen katsayılardır ve merminin hareketini bu denklemi çözerek gözlemleyebiliriz. Merminin açısal hareketini tüm yörünge boyunca hesaplamak bir sınır değer problemidir ve tüm katsayıların yörünge boyunca sahip oldukları değerleri bilmek gerekir. Bunun yerine açısal hareketi bir başlangıç değer problemi olarak ele alıp sadece namlu çıkışındaki H, P, M, T, G katsayıları kullanarak merminin başlangıç koşullarında (namlu çıkışı) yapacağı hareketi (sönümlenmeyi) gözlemleyebiliriz. Başlangıç koşullarında merminin yapacağı hareketin incelenmesi bir mermi tasarımcısı için ihtiyaç duyacağı bilgiyi verebilecektir. Şekil 4.5 'te görüleceği üzere, dönü kararlı mermilerde S_g statik kararlılık faktörü namlu çıkışında en düşük değeri alır. Dolayısı ile namlu çıkışında bu koşulu sağlayan mermi tüm yörünge boyunca da sağlar. S_d , dinamik kararlılığın (açısal sönümlenmenin) namlu çıkışında gözlemlenmesi de merminin tasarımında sorun olmadığını göstermektedir. Merminin düşük hız veya tepe noktası bölgesinde dinamik olarak kararsız hale gelmesi mümkündür fakat bu durum hız ve dönü azalması, akış alanının değişmesi, yüksek açı ile atış gibi tasarımdan kaynaklanmayan faktörlere bağlıdır. 935 m/s, 680 m/s ve 460 m/s 'lik namlu çıkış hızlarında mermiye ait H, P, M, T, G katsayıları Ek-3'te hesaplanmıştır ve denklem (4.7)'de kullanılarak açısal salınım hareketi MATLAB programında çözdürülmüştür. Elde edilen sonuç grafikleri Şekil 7.10, Şekil 7.12, Şekil 7.14 'te gösterilmiştir. Merminin daha önce hesaplanan ve kabul edilebilir bölgede bulunan kararlılık kriterleri

gereği her üç grafikte de açısal sönümleme görülmüştür. Bununla birlikte aynı aerodinamik katsayılarla sahip model merminin Prodas programından elde edilen hücum açısı grafikleri Şekil 7.9, Şekil 7.11, Şekil 7.13' de gösterilmiştir. Prodas programına ait bu grafikler açısal sönümlemenin sağlandığını doğrulamak için gösterilmiştir. MATLAB programı hesaplamaları ile elde edilen 2-boyuttaki ve 3-boyuttaki şekillerden aşağıdaki sonuçlar çıkartılmıştır:

- a. MATLAB çözümlerinin 2-boyutta gösteriminde görüldüğü üzere, namlu çıkışındaki en yüksek hücum açısı, 935 m/s hız için 0.06 derece, 680 m/s ilk hız için 0.1 derece ve 460 m/s ilk hız için 0.23 derece olarak hesaplanmıştır. Namlu çıkış hızı arttıkça başlangıç hücum açıları artmaktadır.
- b. Yüksek hızlarda başlangıçta hücum açısı yüksek olmasına rağmen sönümleme daha hızlı olmaktadır. Bunun sebebi yüksek hız yüksek dönüye sebep olmakta, yüksek dönü ise daha çabuk sönümleme sağlamaktadır.
- c. İlk hızın yüksek olduğu durumlarda daha karmaşık bir epicyclic hareketi gözlenmekte, düşük hızlı durumlarda ise daha yumuşak bir epicyclic hareketi oluşmaktadır.
- d. Prodas ile yapılan hesaplamalarda elde edilen birinci hücum açısı birinci salınım tepe değeri MATLAB ile yapılan hesaplamalarda hep ikinci salınım tepe değerine denk gelmektedir. Buradan MATLAB hesaplamasının başlangıç değerlerini daha detaylı hesapladığı şeklinde yorumlanabilir. Bununla beraber nümerik çözümleme yapıldığı için başlangıç değeri verisinin bir sonucu olarak değerlendirilebilir.

MATLAB programında elde edilen çözümler sınır değer problemi olarak değil bir başlangıç değer problemi olarak çözülmüştür. Dolayısıyla merminin başlangıç hücum açısı değeri ve genel karakteristik davranışı hakkında bilgi vermektedir. Merminin yörünge boyunca x eksenine göre yapacağı yalpalama ve hücum açıları hesabı için diferansiyel denklemin sınır değer problemi olarak ele alınıp çözülmesi gerekecektir.

6- Bir balistikçi için temel olarak iki tür problem vardır. Birincisi, verilen bir ilk hız ve yükseliş açısı ile merminin yörüngesini ve menzilin hesaplamak. İkincisi, ise sabit bir menzildeki hedefi verilen bir hız değeri ile vuracak yükseliş açısını hesaplamak.

MATLAB programında hazırlanan yörünge hesaplama programı ile birinci tür problemler çözülebilmektedir. Yine MATLAB programı olan en iyiyi bulma (optimizasyon) araç kutusu fonksiyonları kullanılarak verilen menzil için yükseliş açısı hesaplatılabilmektedir. Şekil 7.15'te 800 m/s ilk hız ile 25,000 m'deki hedefi vurma açısı, optimizasyon fonksiyonları kullanılarak 60.39° olarak hesaplanmıştır. Bu açı hesaplamaları, hedef bölgesi içinde bütün hız aralıklarında yapılabilmektedir. Dolayısıyla bir çeşit atış kontrol hesabı yapılabilmektedir.

KAYNAKLAR

- British Artillery Fire Control, http://members.tripod.com/~niglelf/ fc_ballistics.htm
#introduction (Eriřim Tarihi 01.06.2009)
- Carlucci, D.E, Jacobson, S. S.2008. Ballistics Theory and Design of Guns and Ammunition. CRC Press.502 sayfa, Boca Raton FL USA
- Fitzpatrick, Richard.2006. Computational Physics: An Introductory Course. Lecture Notes. 322 sayfa, University of Texas, Austin USA
- ICAO Standard Atmosphere , Swiss Aviation Resources, <http://www.aviation.ch/tools-atmosphere.asp> (Eriřim Tarihi 01.06.2009)
- Kiusalaas, Jaan.2005. Numerical Methods in Engineering with MATLAB, Cambridge University Press, 426 sayfa, The Edinburgh Building, Cambridge UK
- McCoy, R.L.1981. McDrag - A Computer Program for Estimating The Drag Coefficients of Projectiles. U.S. Army Research Laboratory Technical Report ARBRL-TR- 02293. Aberdeen Proving Ground, MD USA.
- McCoy, R.L.1998. Modern Exterior Ballistics.Shiffer Publishing Ltd. 328 sayfa,Atglen PA USA.
- MKE, 2009. Gerçek Test Atış Verileri, Konya
- Murphy, C.H. 1953. On Stability Criteria of the Kelly-McShane Linearized Theory of Yawing Motion. Ballistic Research Laboratories Report No: 853 (McCoy 1998)
- Murphy, C.H. 1963.Free Flight Motion of Symmetric Missiles. Ballistic Research Laboratories Report No: 1216. (Weinacht 2003)
- Weinacht, P. Sturek, W. B. Schiff, L. B. 1997.Navier-Stokes Predictions of Pitch Damping for Axisymmetric Projectiles. Journal of Spacecraft and Rockets, 34 (6); 753-761. (Weinacht 2003)
- Weinacht, P. July 2003.Prediction of Projectile Performance, Stability, and Free-Flight Motion Using Computational Fluid Dynamics. U.S. Army Research Laboratory Technical Report 3015.Aberdeen Proving Ground, MD USA.

Weinacht, P.2006.Virtual Wind Tunnel Experiments for Small Caliber Ammunition Aerodynamic Characterization.Joint Services Small Arms Systems Annual Symposium Army Research Laboratory.Aberdeen Proving Ground, MD USA.

Whyte, John, 2003.Prodas Eğitim Notları. Arrow Tech Associates. South Burlington, VT USA

Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Magnus_effect (Eriřim Tarihi: 01.06.2009)

EKLER:

EK 1. SAD ANSYS CFX Programı Analiz Raporu

EK 2. McDrag Programı C_{d0} Hesap Sonuç Ekranı

EK 3. Aerodinamik Katsayılar Hesaplamalar Tablosu

EK-1. SAD ANSYS- CFX ANALİZ RAPORU

Contents

1. File Report

Table 1 File Information for mermi_std850ms_001

2. Mesh Report

Table 2 Mesh Information for mermi_std850ms_001

3. Physics Report

Table 3 Domain Physics for mermi_std850ms_001

Table 4 Boundary Physics for mermi_std850ms_001

1. File Report

| Table 1. File Information for mermi_std850ms_001 | |
|---|--|
| Case | mermi_std850ms_001 |
| File Path | D:/++CFX-analiz/agustos/850/mermi_std850ms_001.res |
| File Date | 21 May 2009 |
| File Time | 12:50:17 AM |
| File Type | CFX5 |
| File Version | 11.0 |
| Fluids | Air Ideal Gas |
| Solids | Steel |
| Particles | None |

2. Mesh Report

| Table 2. Mesh Information for mermi_std850ms_001 | | |
|---|--------|----------|
| Domain | Nodes | Elements |
| AirDomain | 260750 | 253232 |
| SolidDomain | 29889 | 28000 |
| All Domains | 290639 | 281232 |

3. Physics Report

| Table 3. Domain Physics for mermi_std850ms_001 | | | | |
|---|----------|-------|---------------|--|
| Name | Location | Type | Materials | Models |
| AirDomain | AIR | Fluid | Air Ideal Gas | Heat Transfer Model = Total Energy Turbulence Model = SST Turbulent Wall Functions = Automatic Buoyancy Model = Non Buoyant Domain Motion = Stationary |
| SolidDomain | MERMI | Solid | Steel | Domain Motion = Rotating |

| Table 4. Boundary Physics for mermi_std850ms_001 | | | | |
|---|------------------------|--------------|-----------|--|
| Domain | Name | Location | Type | Settings |
| Air Domain | AirIn | INLET | Inlet | Flow Regime = Supersonic Heat Transfer = Static Temperature Static Temperature = 288 [K] Mass And Momentum = Cartesian Velocity Components and Pressure Relative Static Pressure = 1 [atm] U = 0 [m s ⁻¹] V = -Vin W = 0 [m s ⁻¹] Turbulence = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio |
| Air Domain | Mermi Interface Side 1 | MERMI_WALL_1 | Interface | Heat Transfer = Conservative Interface Flux Wall Influence On Flow = No Slip |
| Air Domain | AirOpening | AIR_WALL | Opening | Flow Regime = Subsonic Opening Temperature = 288 [K] Heat Transfer = Opening Temperature Mass And Momentum = Static Pressure for Entrainment Relative Pressure = 1 [atm] Turbulence = Zero Gradient |
| Air Domain | AirOut | OUTLET | Outlet | Flow Regime = Supersonic |
| Solid Domain | Mermi Interface Side 2 | MERMI_WALL_2 | Interface | Heat Transfer = Conservative Interface Flux |

EK-2. McDRAG PROGRAMI İLE C_{D0} HESAP SONUÇ EKRANI

C:\DOCUME~1\user\Desktop\QUICKL-1\TEZ\mcdrag\exe\files\MCDRAG.EXE

PROJECTILE IDENTIFICATION: TEZ_MODEL1

| REF. DIA. (MM) | TOTAL LENGTH (CAL) | NOSE LENGTH (CAL) | RT/R | BOATTAIL LENGTH (CAL) | BASE DIA. (CAL) | MEPLAT DIA. (CAL) | BAND DIA. (CAL) | XCG NOSE (CAL) | BOUND. LAYER CODE |
|----------------|--------------------|-------------------|-------|-----------------------|-----------------|-------------------|-----------------|----------------|-------------------|
| 155.00 | 5.98 | 2.720 | 0.009 | 0.650 | 0.850 | .096 | 1.020 | 3.43 | L/T |
| M | CD0 | CDH | CDSF | CDBND | CDBT | CDB | PB/PINF | | |
| 0.500 | 0.115 | 0.000 | 0.040 | 0.000 | 0.000 | 0.075 | 0.982 | | |
| 0.600 | 0.117 | 0.000 | 0.039 | 0.000 | 0.000 | 0.078 | 0.973 | | |
| 0.700 | 0.120 | 0.000 | 0.037 | 0.000 | 0.000 | 0.082 | 0.961 | | |
| 0.800 | 0.124 | 0.000 | 0.036 | 0.001 | 0.000 | 0.086 | 0.947 | | |
| 0.850 | 0.127 | 0.000 | 0.036 | 0.003 | 0.000 | 0.088 | 0.938 | | |
| 0.900 | 0.134 | 0.000 | 0.035 | 0.005 | 0.003 | 0.090 | 0.929 | | |
| 0.925 | 0.153 | 0.014 | 0.035 | 0.008 | 0.006 | 0.091 | 0.924 | | |
| 0.950 | 0.178 | 0.028 | 0.035 | 0.010 | 0.012 | 0.092 | 0.919 | | |
| 0.975 | 0.212 | 0.041 | 0.034 | 0.010 | 0.034 | 0.093 | 0.914 | | |
| 1.000 | 0.290 | 0.053 | 0.034 | 0.010 | 0.068 | 0.125 | 0.879 | | |
| 1.100 | 0.370 | 0.162 | 0.033 | 0.009 | 0.042 | 0.123 | 0.855 | | |
| 1.200 | 0.355 | 0.143 | 0.032 | 0.008 | 0.050 | 0.122 | 0.830 | | |
| 1.300 | 0.342 | 0.133 | 0.032 | 0.008 | 0.050 | 0.120 | 0.803 | | |
| 1.400 | 0.330 | 0.127 | 0.031 | 0.007 | 0.047 | 0.118 | 0.776 | | |
| 1.500 | 0.318 | 0.122 | 0.030 | 0.007 | 0.043 | 0.116 | 0.748 | | |
| 1.600 | 0.307 | 0.117 | 0.029 | 0.006 | 0.040 | 0.113 | 0.720 | | |
| 1.700 | 0.297 | 0.114 | 0.029 | 0.006 | 0.038 | 0.110 | 0.691 | | |
| 1.800 | 0.287 | 0.111 | 0.028 | 0.006 | 0.036 | 0.107 | 0.663 | | |
| 2.000 | 0.271 | 0.106 | 0.027 | 0.006 | 0.032 | 0.101 | 0.609 | | |
| 2.200 | 0.255 | 0.101 | 0.026 | 0.005 | 0.029 | 0.094 | 0.557 | | |
| 2.500 | 0.235 | 0.096 | 0.024 | 0.005 | 0.025 | 0.085 | 0.488 | | |
| 3.000 | 0.206 | 0.090 | 0.022 | 0.005 | 0.020 | 0.069 | 0.395 | | |
| 3.500 | 0.184 | 0.085 | 0.020 | 0.005 | 0.017 | 0.057 | 0.326 | | |
| 4.000 | 0.165 | 0.082 | 0.018 | 0.005 | 0.014 | 0.047 | 0.277 | | |
| 4.500 | 0.151 | 0.078 | 0.017 | 0.004 | 0.012 | 0.039 | 0.240 | | |
| 5.000 | 0.139 | 0.076 | 0.016 | 0.004 | 0.011 | 0.032 | 0.213 | | |

COPY THIS? (ENTER Y FOR YES, N FOR NO):?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

EK 3. AERODİNAMİK KATSAYILAR HESAPLAMALAR TABLOSU

| | | | | | | | | | |
|----------------------------|---------------------------------|-----------------|-----------|-------------|------------------------|------------|-------------------------------|-----------------|-------------|
| | Çap | m | 0.1547 | Hava Yoğ. | $\rho = \text{kg/m}^3$ | 1.225 | $\rho S d / 2m$ | | 3.95781E-05 |
| | Kütle | kg | 45 | Kesit Alanı | m^2 | 0.01879622 | $\text{m}^2 \cdot \text{d}^2$ | kg m^2 | 1.07694405 |
| | Hız | m/s | 935 | 850 | 765 | 680 | 595 | 510 | 460 |
| | Mach | | 2.75 | 2.50 | 2.25 | 2.00 | 1.75 | 1.50 | 1.35 |
| Sürüklenme | C_{d_0} | | 0.238 | 0.246 | 0.257 | 0.274 | 0.296 | 0.315 | 0.327 |
| Kaldırma kuvvet kat. | Cl_α | | 2.81 | 2.78 | 2.74 | 2.63 | 2.48 | 2.33 | 2.15 |
| Yunuslama mom | Cm_α | | 3.38 | 3.435 | 3.47 | 3.66 | 4 | 4.19 | 4.17 |
| Magnus kuvveti | $Cn_{p\alpha} - C_{Y_{pa}}$ | | -0.64 | -0.64 | -0.64 | -0.65 | -0.69 | -0.72 | -0.74 |
| Magnus mom. Katsayı türevi | $Cm_{p\alpha}$ | | 1.14 | 1.15 | 1.15 | 1.15 | 1.17 | 1.17 | 1.19 |
| Yunus. Sön. kuvveti | $(Cn_q + Cn_\alpha)$ | | 4.9 | 4.9 | 5.3 | 6.5 | 7.7 | 9.9 | 9.9 |
| Yunus. Sön. momenti | $(Cm_q + Cm_\alpha)$ | | -33 | -34.34 | -34.96 | -35.15 | -35.31 | -35 | -32 |
| Spin sönümleme | Cl_p | | -0.018 | -0.019 | -0.02 | -0.02 | -0.021 | -0.022 | -0.023 |
| Eylemsizlik Momenti - x | I_p | kg m^2 | 0.1541 | 0.1541 | 0.1541 | 0.1541 | 0.1541 | 0.1541 | 0.1541 |
| Eylemsizlik Momenti - y | I_t | kg m^2 | 2.4807 | 2.4807 | 2.4807 | 2.4807 | 2.4807 | 2.4807 | 2.4807 |
| Spin | p (çıkış) | rad/sn | 1,896 | 1,723 | 1,551 | 1,379 | 1,206 | 1,034 | 933 |
| Sürüklenme | Cd_0^* | | 9.42E-06 | 9.74E-06 | 1.02E-05 | 1.08E-05 | 1.17E-05 | 1.25E-05 | 1.29E-05 |
| Kaldırma kuvvet kat. | Cl_α^* | | 1.11E-04 | 1.10E-04 | 1.08E-04 | 1.04E-04 | 9.82E-05 | 9.22E-05 | 8.51E-05 |
| Yunuslama mom | Cm_α^* | | 1.34E-04 | 1.36E-04 | 1.37E-04 | 1.45E-04 | 1.58E-04 | 1.66E-04 | 1.65E-04 |
| Magnus kuvveti | $Cn_{p\alpha}^* - C_{Y_{pa}}^*$ | | -2.53E-05 | -2.53E-05 | -2.53E-05 | -2.57E-05 | -2.73E-05 | -2.85E-05 | -2.93E-05 |
| Magnus mom. Katsayı türevi | $Cm_{p\alpha}^*$ | | 4.51E-05 | 4.55E-05 | 4.55E-05 | 4.55E-05 | 4.63E-05 | 4.63E-05 | 4.71E-05 |
| Yunus. Sön. kuvveti | $(Cn_q^* + Cn_\alpha^*)$ | | 1.94E-04 | 1.94E-04 | 2.10E-04 | 2.57E-04 | 3.05E-04 | 3.92E-04 | 3.92E-04 |
| Yunus. Sön. momenti | $(Cm_q^* + Cm_\alpha^*)$ | | -1.31E-03 | -1.36E-03 | -1.38E-03 | -1.39E-03 | -1.40E-03 | -1.39E-03 | -1.27E-03 |
| Spin sönümleme | Cl_p^* | | -7.12E-07 | -7.52E-07 | -7.92E-07 | -7.92E-07 | -8.31E-07 | -8.71E-07 | -9.10E-07 |
| | k_p^{-2} | | 6.99E+00 | 6.99E+00 | 6.99E+00 | 6.99E+00 | 6.99E+00 | 6.99E+00 | 6.99E+00 |
| | k_t^{-2} | | 4.34E-01 | 4.34E-01 | 4.34E-01 | 4.34E-01 | 4.34E-01 | 4.34E-01 | 4.34E-01 |

| | Hız | m/s | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
|------------------------------|-------------------------|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | Mach | | 2.75 | 2.50 | 2.25 | 2.00 | 1.75 | 1.50 | 1.35 |
| | H | | 6.6880E-04 | 6.9032E-04 | 6.9895E-04 | 6.9719E-04 | 6.9313E-04 | 6.8112E-04 | 6.2197E-04 |
| | M | | 5.8075E-05 | 5.9020E-05 | 5.9621E-05 | 6.2886E-05 | 6.8728E-05 | 7.1993E-05 | 7.1649E-05 |
| | T | | 4.2653E-04 | 4.2811E-04 | 4.2653E-04 | 4.2217E-04 | 4.2177E-04 | 4.1583E-04 | 4.1424E-04 |
| | P | | 1.9487E-02 | 1.9480E-02 | 1.9484E-02 | 1.9488E-02 | 1.9478E-02 | 1.9484E-02 | 1.9505E-02 |
| | G | | 1.0963E-06 | 1.3265E-06 | 1.6377E-06 | 2.0727E-06 | 2.7072E-06 | 3.6848E-06 | 4.5357E-06 |
| | (P ² -4M) | | 1.4744E-04 | 1.4338E-04 | 1.4112E-04 | 1.2825E-04 | 1.0449E-04 | 9.1640E-05 | 9.3847E-05 |
| Statik kararlılık katsayısı | Sg | | 1.63 | 1.61 | 1.59 | 1.51 | 1.38 | 1.32 | 1.33 |
| Dinamik kararlılık katsayısı | Sd | | 1.28 | 1.24 | 1.22 | 1.21 | 1.22 | 1.22 | 1.33 |
| Açısal Frekans Hızlı Kol | $\psi F'$ | | 0.0158 | 0.0157 | 0.0157 | 0.0154 | 0.0149 | 0.0145 | 0.0146 |
| Açısal Frekans Yavaş Kol | $\psi S'$ | | 0.0037 | 0.0038 | 0.0038 | 0.0041 | 0.0046 | 0.0050 | 0.0049 |
| Sönümlenme Oranı Hızlı kol | λF | | -1.865E-04 | -2.102E-04 | -2.231E-04 | -2.220E-04 | -2.033E-04 | -1.874E-04 | -1.031E-04 |
| Sönümlenme Oranı Yavaş kol | λS | | -4.823E-04 | -4.801E-04 | -4.758E-04 | -4.752E-04 | -4.899E-04 | -4.938E-04 | -5.189E-04 |
| Sapma Açısı | $\beta_R = PG/M$ | | 3.68E-04 | 4.38E-04 | 5.35E-04 | 6.42E-04 | 7.67E-04 | 9.97E-04 | 1.23E-03 |
| | PRODAS SONUÇLARI | | | | | | | | |
| | Sg | | 1.63 | 1.61 | 1.59 | 1.51 | 1.38 | 1.32 | 1.33 |
| | Sd 1° | | 1.33 | 1.32 | 1.31 | 1.3 | 1.3 | 1.29 | 1.33 |

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Erkan TİRYAKİ

Doğum Yeri : ELAZIĞ

Doğum Tarihi : 29 Ağustos 1974

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Elazığ Anadolu Lisesi (1985-1992)

Lisans : İstanbul Teknik Üniversitesi- Fizik Mühendisliği (1992- 1996)

Yüksek Lisans: Ankara Üniversitesi – Fizik Mühendisliği (2008 – 2009)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Makine ve Kimya Endüstrisi Kurumu Genel Müdürlüğü

ARGE ve Teknoloji Dairesi Başkanlığı (2000 , --)

Yayımlar

Top Mermisi Aerodinamik Kararlılık ve Yörünge Hesaplamaları

MKE ARGE Bülteni – 15 Haziran 2009