# DÜZLEMSEL VE SARMAL KANATLI FÜZELERE YÜKSEK HÜCUM AÇILARINDA ETKİYEN MAGNUS KUVVETİ VE MOMENTİNİN HESAPLANMASI

Batuhan NASUHBEYOĞLU<sup>1</sup> ve Kıvanç ARSLAN<sup>2</sup> Roketsan A.Ş., Ankara Emrah GÜLAY<sup>3</sup> Roketsan A.Ş., Ankara

## ÖZET

Yüksek dönü hızıyla uçan füze ve roketlerin yörünge tahmini ve aerodinamik performanslarının doğru hesaplanabilmesi için Magnus kuvveti ve momentine ait etkilerin dikkate alınması gerekmektedir. Özellikle yüksek hücum açıları ve dönü hızlarında hareket eden bir füzeye dikkate değer seviyede Magnus kuvveti ve momenti etkimektedir. Bu çalışmada, literatürde bulunan 'Modified Basic Finner' mühimmatı için 2.5 Mach sayısındaki Magnus kuvveti katsayısı, Magnus momenti katsayısı ve yuvarlanma momenti sönümleme katsayısını hesaplamaya yönelik Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri gerçekleştirilmiş ve analiz verileri deney verileri ile karşılaştırılmıştır. Deney verileri ile HAD analiz sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür. Uygulanan analiz yöntemi, sarmal kanatlara sahip bir füzenin 2.5 Mach sayısı ve yüksek hücum açılarındaki Magnus kuvveti katsayısı, Magnus momenti katsayısı ve yuvarlanma momenti sönümleme katsayısını hesaplamak için kullanılmıştır. Sarmal ve düzlemsel kanatlara sahip füzeler için hesaplanan bu katsayılar birbiri ile karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir.

### Giriş

Dönerek kararlı durumda uçan füze ve roketlerin yörünge tahminlerinin ve aerodinamik performanslarının doğru hesaplanabilmesi için, uçuş benzetim çalışmalarında statik/dinamik aerodinamik katsayılarına ek olarak Magnus kuvveti ve momentinin de dikkate alınması gerekmektedir. Özellikle yüksek hücum açıları ve dönü hızlarında hareket eden bir füzeye dikkate değer seviyede Magnus kuvveti ve momenti etkimektedir. Atışlı test verileri, rüzgar tüneli test verileri, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri ve ampirik yöntemler yardımı ile Magnus kuvveti ve momenti hesaplamaları yapılabilmektedir. Gelişen bilgisayar sistemleri ve modelleme yöntemleri sayesinde Magnus kuvveti ve momenti verileri HAD yöntemleri ile güvenli ve hızlı bir şekilde hesaplanabilmektedir.

Bu çalışmanın ilk kısmında HAD yöntemleri kullanılarak Magnus kuvveti katsayısı, Magnus momenti katsayısı ve yuvarlanma momenti sönümleme katsayısının hesaplanmasına yönelik doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Literatürde bulunan 'Modified Basic Finner' mühimmatına ait 2.5 Mach sayısı ve yüksek hücum açılarındaki Magnus kuvveti katsayısı, Magnus momenti katsayısı ve yuvarlanma momenti sönümleme katsayısı için deney verileri [Jenke, 1976] ile HAD analizleri sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında denek taşı ile doğrulanmış HAD yöntemi kullanılarak sarmal kanat setine sahip füzeler için Magnus kuvvet ve momenti ile

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Kıdemli Uzman Mühendis, Aerodinamik Tasarım ve Analiz Müdürlüğü, E-posta: bnasuhbeyoglu@roketsan.com.tr

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Kıdemli Uzman Mühendis, Aerodinamik Tasarım ve Analiz Müdürlüğü, E-posta: kivanc.arslan@roketsan.com.tr

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Yönetici Mühendis, Aerodinamik Tasarım ve Analiz Müdürlüğü, E-posta: egulay@roketsan.com.tr

yuvarlanma momenti sönümleme katsayısı hesaplanmış ve sonuçların füze aerodinamik performansına etkisi incelenmiştir.

## ÖN BİLGİ

Magnus kuvveti ve momenti, dönen mühimmatın yüzeyi ve üzerindeki sınır tabakanın etkileşimiyle mühimmat gövdesi üzerindeki basınç dağılımının eşit olarak dağılmamasından ortaya çıkmaktadır. Magnus kuvveti 1 numaralı denklem ile Magnus momenti ise 2 numaralı denklem ile tanımlanmaktadır [Bhagwandin, 2012]. Magnus kuvvet ve momenti hücum açısına bağlı olarak lineer olmayan şekilde değişmektedir. Çalışmada hücum açısı sabit durumda çözüm yapıldığı için geleneksel katsayılar olan  $C_{Y_{p_{\alpha}}}$  ve  $C_{n_{p_{\alpha}}}$  yerine  $C_{Y_{p}}$  ve  $C_{n_{p}}$  değerleri kullanılmıştır. Bu durumda Magnus kuvveti boyutsuz dönü oranı ( $\Omega$ ) ve Mach sayısı ile değişmektedir. Magnus momenti ise bunlara ek olarak füze ağırlık merkezi konumundan da etkilenmektedir.

$$Magnus \ Kuvvet = \frac{1}{2}\rho V^2 S\left(\frac{pD}{2V}\right) C_{Y_P} \tag{1}$$

$$Magnus Moment = \frac{1}{2}\rho V^2 SD\left(\frac{pD}{2V}\right)C_{n_P}$$
(2)

Yuvarlanma Sönümleme Momenti
$$=\frac{1}{2}\rho V^{2}SD\left(\frac{pD}{2V}\right)C_{l_{p}}$$
(3)

$$C_{Y_p} = \frac{\partial C_Y}{\partial \Omega} rad^{-1}, \quad C_{n_p} = \frac{\partial C_n}{\partial \Omega} rad^{-1}, \quad C_{l_p} = \frac{\partial C_l}{\partial \Omega} rad^{-1}, \quad \Omega = \frac{pD}{2V} rad$$

Sarmal kanatlara sahip füzeler için, yüksek hücum açılarında ses-altı ve ses-üstü hızlar için dönü ters yönlerde olmaktadır. Ses-altı hızlarda dönü yönü sarmal kanatların içbükeyine doğruyken, sesüstü hızlarda dönü yönü kanatların dışbükeyine doğru olmaktadır. Yapılan birçok çalışmaya rağmen dönü yönünün bu değişiminin asıl sebebi tam anlamıyla açıklanamamaktadır [Krishna, 2009].

#### YÖNTEM

Bu bölümde, hesaplamalarda kullanılan eksen takımı, çözüm ağı ve çözüm yöntemi detaylı olarak anlatılmaktadır.

#### Denek Taşı Geometrisi

Magnus kuvveti katsayısı, Magnus momenti katsayısı ve yuvarlanma momenti sönümlenme katsayısı hesaplamaları için kullanılan *Modified Basic Finner* (MBF) denek taşı modelinin geometrik bilgileri [Jenke, 1976] Şekil 1'de verilmiştir. Koordinat sistemi global eksende olup, füze ile beraber dönmemektedir.



Şekil 1: Modified Basic Finner (MBF) Geometrik Bilgileri [Jenke, 1976]

# Denek Taşı Çözüm Ağı

Hesaplamalarda kullanılan akış hacmi ve çözüm ağı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2: Çözüm Hacmi ve Sayısal Çözüm Ağı

Füze etrafında akış alanı Navier-Stokes denklemleri kullanılarak modellenmiştir. Navier-Stokes analizleri için kullanılan çözüm ağı, sınır tabaka ile düzgün geçişli yapısız elemanlardan oluşturulmuştur. Zamana-bağlı çözümlere başlamadan önce çözüm ağı yoğunluğunun sonuçlara etkisinin belirlenmesine yönelik farklı yoğunluklarda çözüm ağları üretilmiştir. Bu farklı ağlar kullanılarak modellemeler yapılmış ve en uygun çözüm ağı seçilmiştir. Analizler için oluşturulan çözüm ağı kullanılan türbülans modeli gereksinimlerine göre y+=1 olacak şekilde oluşturulmuştur. Sayısal çözüm ağı sayısı yaklaşık 8.5M hücreden oluşmaktadır. Katı model modifikasyonları ve çözüm ağı üretimi için GAMBIT ve TGrid programları kullanılmıştır.

#### Analiz Yöntemi ve Sınır Koşulları

*Modified Basic Finner* için gerçekleştirilen rüzgar tüneli testlerindeki sınır koşulları Tablo 1'de sunulmuştur. Analizler rüzgar tüneli testlerindeki sınır koşulları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Sınır Koşulları	
Μ	2.5
$\mathbf{Re}_{d}$	4.1x10 <sup>5</sup>
P <sub>0</sub>	98320 Pa
T <sub>0</sub>	311.1 K

Tablo 1: Rüzgar Tüneli Test Koşulları

Magnus kuvveti, Magnus momenti ve yuvarlanma momenti sönümlenme katsayılarının hesaplanması için zamana bağlı aerodinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler CFD++ ticari HAD programı kullanılarak zamana bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Zamana bağlı analizlere başlamak için öncelikle zamandan bağımsız (*steady*) çözüm elde edilmiştir. 2.5 Mach sayısında farklı hücum açılarında Realizable k-ε türbülans modeli kullanılarak türbülanslı akış modellemeleri yapılmıştır.

Bu çalışmada denek taşı modeli için 0.03 boyutsuz dönü oranında (Ω) ve 2.5 Mach sayısında HAD analizleri yapılmıştır. 2.5 Mach sayısı ve 0.03 boyutsuz dönü oranı için açısal dönü hızı 773.3 rad/s olmaktadır. Zaman adımı 4x10<sup>-5</sup> saniye olarak belirlenmiş ve analizler aerodinamik katsayıların yakınsama durumuna göre en az 3 tur olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Zaman adımları arasındaki yakınsamayı sağlamak için 100 iç özyineleme kullanılmıştır.

#### Analiz Sonuçları

Yöntem bölümünde anlatılan yaklaşım kullanılarak\_2.5 Mach sayısında ve 10°, 20°, 30°, 40°, 50° ve 60° hücum açılarında (xy düzleminde) zamana bağlı HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Ortalama olarak 0.03 saniyeyi kapsayan (3.6 devir), zamana bağlı analizlere ait örnek yanal kuvvet katsayısı ( $C_Y$ ), yalpalama momenti katsayısı( $C_n$ ) ve yuvarlanma momenti katsayısı ( $C_I$ ) değişimi Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 3: Yanal Kuvvet Katsayısının Zamana Bağlı Değişimi (MBF)

4







Şekil 5: Yuvarlanma Momenti Katsayısının Zamana Bağlı Değişimi (MBF)

Analizler sonucunda, zamana bağlı C<sub>Y</sub>, C<sub>n</sub> ve C<sub>l</sub> değerleri kullanılarak ortalama C<sub>Y</sub>, C<sub>n</sub> ve C<sub>l</sub> değerleri elde edilmektedir. Düzlemsel kanatlara sahip MBF geometrisi için, dönü hızının olmadığı ( $\Omega$ =0) durumda hücum açısından bağımsız olarak yanal kuvvetin sıfır olduğu bilinmektedir [Bhagwandin, 2016]. Buna ek olarak,  $C_{Y_p}$ ,  $C_{n_p}$  ve  $C_{l_p}$  değerlerinin boyutsuz dönü oranıyla doğrusal bir şekilde değiştiği de kabul edilebilir [Bhagwandin 2012]. Bu doğrultuda,  $\Omega$ =0.03 boyutsuz dönü oranındaki analiz sonuçları kullanılarak her hücum açısı için  $C_{Y_p}$ ,  $C_{n_p}$  ve  $C_{l_p}$  hesaplanmıştır. Şekil 6 - Şekil 8'de hesaplanan veriler ile deneysel veriler karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 6: Magnus Kuvveti Katsayısının ( $C_{Y_p}$ ) Hücum Açısına göre Değişimi (MBF)



Şekil 7: Magnus Momenti Katsayısının ( $C_{n_p}$ ) Hücum Açısına göre Değişimi (MBF)



Şekil 8: Yuvarlanma Sönümleme Momenti Katsayısının ( $C_{l_n}$ ) Hücum Açısına göre Değişimi (MBF)

# SARMAL KANAT MAGNUS ÇALIŞMASI

### Sarmal Kanat Modeli

Sarmal kanat modeli, MBF denek taşının kanat setinin sarmal kanat seti ile değiştirilmesiyle oluşturulmuştur. Sarmal kanat iz düşüm alanı ve profili, MBF denek taşı kanat seti ile aynıdır. Sarmal kanat modeline ait geometri Şekil 9'da verilmiştir. Koordinat sistemi global eksende olup, füze ile beraber dönmemektedir.



Şekil 9: Sarmal Kanat Modeli Geometrik Bilgileri

Sarmal kanat modeli için gerçekleştirilen analizlerde de Tablo 1'de verilen rüzgar tüneli testlerindeki sınır koşulları kullanılmıştır. Gerçek durumu modelleyebilmek için dönü yönü sarmal kanatlara göre dışbükeye doğru olacak şekilde kabul edilmiştir. Bu sebeple, doğrulama çalışmasından farklı olarak açısal dönü hızı -773.3 rad/s olarak alınımış olup; sadece kanat profili değiştiği için, bir önceki çalışmadaki analiz metodu değişmemiştir.

### Analiz Sonuçları

MBF ve sarmal kanat modeli için dönü olmayan durumda (Ω=0) gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen normal kuvvet ve yunuslama momenti katsayılarının hücum açısına göre değişimi sırasıyla Şekil 10 ve Şekil 11'de gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde, sarmal kanat modelinin kanat izdüşüm alanı MBF ile aynı olduğu için her iki modelin aerodinamik karakteristiğinin çok benzer olduğu görülmektedir.







Şekil 11: MBF ve Sarmal Kanat Modeli için Yunuslama Momenti Katsayısının Hücum Açısı ile Değişimi (Ağırlık Merkezinde)

Magnus etkilerini incelemek için ise, Tablo 1'deki koşullarda ve 10°, 20°, 30°, 40°, 50° ve 60° hücum açılarında zamana bağlı HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Ortalama olarak 0.03 saniyeyi kapsayan (3.6 devir) zamana bağlı analizlere ait örnek ( $\alpha$ =40°) yanal kuvvet katsayısı(C<sub>Y</sub>), yalpalama momenti katsayısı(C<sub>n</sub>) ve yuvarlanma momenti katsayısı (C<sub>I</sub>) değişimi Şekil 12 - Şekil 14'te gösterilmiştir.



Şekil 12: Yanal Kuvvet Katsayısının Zamana Bağlı Değişimi ( $\alpha$ =40°)



Şekil 13: Yalpalama Momenti Katsayısının Zamana Bağlı Değişimi (α=40°)



Şekil 14: Yuvarlanma Momenti Katsayısının Zamana Bağlı Değişimi (α=40°)

Zamana bağlı C<sub>Y</sub>, C<sub>n</sub> ve C<sub>l</sub> değerleri kullanılarak ortalama C<sub>Y</sub>, C<sub>n</sub> ve C<sub>l</sub> değerleri elde edilmekte, farklı boyutsuz dönü oranlarında elde edilen C<sub>Y</sub>, C<sub>n</sub> ve C<sub>l</sub> değerleri kullanılarak da her hücum açısı için  $C_{Y_p}$ ,  $C_{n_p}$  ve  $C_{l_p}$  hesaplanabilmektedir.  $C_{Y_p}$  ve  $C_{n_p}$  hesapları için kullanıları analiz sonuçlarına ait değerler sırasıyla Şekil 15 ve 16'da gösterilmiştir. Sarmal kanat modeli için, dönü hızının olmadığı durumda ( $\Omega$ =0), hücum açısına bağlı olarak yanal kuvvet oluşmaktadır. Bu sebeple MBF modelindeki yaklaşımdan farklı olarak, 3 farklı dönü oranı için yapılan analizlerden ilgili şekiller üzerinde gösterilen doğrusal eğilim çizgileri ve korelasyon katsayıları ( $\mathbb{R}^2$ ) elde edilmiştir. Korelasyon katsayılarının 1 veya 1'e çok yakın olması nedeniyle, sarmal kanat modeli için de  $C_{Y_p}$ ,  $C_{n_p}$  ve  $C_{l_p}$  katsayılarının dönü oranıyla doğrusal bir şekilde değiştiği kabul edilerek ilgili katsayılar hesaplanmıştır.



Şekil 15: Yanal Kuvvet Katsayısının Boyutsuz Dönü Oranı ile Değişimi (Sarmal Kanat) 10

Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı



Şekil 16: Yalpalama Momenti Katsayısının Boyutsuz Dönü Oranı ile Değişimi (Sarmal Kanat)

Sarmal kanat modeli ve düzlemsel kanat modeli (MBF) için hesaplanan  $C_{Y_p}$ ,  $C_{n_p}$  ve  $C_{l_p}$  katsayıları Şekil 17 - Şekil 19'da karşılaştırılmalı olarak paylaşılmıştır.



Şekil 17: Magnus Kuvveti Katsayısının ( $\mathcal{C}_{Y_p}$ ) Hücum Açısına göre Değişimi



Şekil 18: Magnus Momenti Katsayısının ( $C_{n_v}$ ) Hücum Açısına göre Değişimi



Şekil 19: Yuvarlanma Sönümleme Momenti Katsayısının ( $C_{l_n}$ ) Hücum Açısına göre Değişimi

Sarmal kanat modeli ve düzlemsel kanat modeli (MBF) için α=20° ile α=40°'de hesaplanan yanal kuvvet ve yalpalama momentinin dönü oranına göre değişimi sırasıyla Şekil 20 ve Şekil 21'de gösterilmiştir. Sonuçlardan elde edilen eğilim çizgileri de kesikli olarak şekiller üzerinde verilmiştir. İlgili şekillerden görülebileceği üzere, Magnus etkilerine ek olarak sarmal kanadın hücum açısıyla oluşturduğu yanal kuvvet ve yalpalama momenti sebebiyle eğriler orijine göre yukarı/aşağı kaymaktadır. Buna rağmen aynı hücum açılarında sarmal kanat modeli ve MBF için eğilim çizgilerinin paralele yakın olduğu söylenebilir. Bu doğrultuda, tasarım aşamasında sarmal kanatlı

modeller için  $C_{Y_p}$ ,  $C_{n_p}$  ve  $C_{l_p}$  katsayıları hesaplanırken eş değer aerodinamik özelliklere sahip düzlemsel kanatlı geometriye ait sonuçların gerekli düzeltme yapılarak kullanılabileceği değerlendirilmiştir.







Şekil 21: Yalpalama Momenti Katsayısının Boyutsuz Dönü Oranı ile Değişimi (MBF ve Sarmal Kanat)

## SONUÇ

Bu çalışmada, Modified Basic Finner (MBF) denek taşı modeli ve eşdeğer aerodinamik özelliklere sahip olacak şekilde oluşturulan bir sarmal kanat modeli için Magnus etkilerini incelemek ve karşılaştırmak amacıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, 2.5 Mach sayısında ve yüksek hücum açılarında zamana bağlı Navier-Stokes denklemleri kullanılarak türbülanslı akış analizleri ile elde edilmistir. Calışmanın ilk kısmında, zamana bağlı HAD analizleri ile sabit açısal hızda dönen düzlemsel kanatlara sahip füzeler üzerine etkiyen Magnus kuvveti katsayısı ( $C_{Y_p}$ ), Magnus momenti katsayısı ( $C_{n_p}$ ) ve yuvarlanma momenti sönümlenme katsayısı ( $C_{l_n}$ ) hesaplamaları yapılmıştır. "Arnold Engineering and Development Center" tarafından MBF için elde edilen rüzgar tüneli deney verileri HAD sonuçlarının doğrulanmasında kullanılmıştır. Magnus kuvveti katsayısı, Magnus momenti katsayısı ve yuvarlanma momenti sönümlenme katsayısının zamana bağlı Navier-Stokes analizler ile hesaplanabildiği gösterilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında ise, sarmal kanat modeli için benzer şekilde HAD analizleri gerçekleştirilerek sonuçlar MBF ile karşılaştırılmıştır. Eşdeğer özelliklerde düzlemsel ve sarmal kanatlara sahip modellerin Magnus kuvveti katsayısı, Magnus momenti katsayısı ve yuvarlanma sönümleme katsayılarının oldukça benzer olduğu belirlenmiştir. Tasarım asamasında, düzlemsel kanatlara sahip geometri icin elde edilen sonucların gerekli düzeltme yapılarak sarmal kanatlara da uygulanabileceği değerlendirilmiştir.

### Kaynaklar

Bhagwandin V. A., 2012. Numerical Prediction of Roll Damping and Magnus Dynamic Derivatives for Finned Projectiles at Angle of Attack, 30<sup>th</sup> AIAA Applied Aerodynamics Conference, New Orleans, Louisiana, 25 - 28 June.

Bhagwandin V. A., 2016. *High-Alpha Prediction of Roll Damping and Magnus Stability Coefficients for Finned Projectiles*, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 53, No. 4, pp. 720-729.

Jenke L. M., 1976. Experimental Roll-Damping, Magnus, and Static-stability Characteristics of Two Slender Missile Configurations at High Angles of Attack (0 to 90 deg) and Mach Numbers 0.2 through 2,5, Arnold Engineering Development Center, July

Krishna R., Surit R., Kushari A., Ghosh A. K., 2009. *Anomalies in the Flow over Projectile with Wraparound Fins*, Defence Science Journal, Vol.59, No.5, September.