



Araştırma Makalesi

Roketlerde kanat geometrisinin statik stabiliteye etkilerinin sayısal olarak incelenmesi

Polat Çelik¹, Mehmet Sabancı², Hasan Sarpkaya³ ve Sezer Çoban⁴

Öz. Bu çalışmada, roket sistemlerinde kullanılan farklı kanatçık geometrilerinin statik kararlılık üzerindeki etkisi sayısal analiz yoluyla araştırılmıştır. Roket sistemlerinde aerodinamik kararlılığın sağlanması, özellikle yüksek hızlı uçuş sırasında sapma ve kararsızlığın önlenmesi için büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, ileri süpürülmüş delta, ileri süpürülmüş delta, eliptik ve trapez olmak üzere dört farklı kanatçık geometrisi hem OpenRocket simülasyonları hem de ANSYS Fluent tabanlı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. OpenRocket, roketin basınç merkezini (CP) ve kütle merkezini (CG) belirlemiş ve statik marjları hesaplamıştır. Her kanatçık tipi için kaldırma kuvveti, sürüklenme kuvveti ve moment değerleri HAD analizi yoluyla elde edilmiştir. Ayrıca, elde edilen veriler MATLAB'da oluşturulan bir uçuş dinamiği modeline beslenerek zamanla değişen yönelimleri analiz edilmiştir. Sonuçlar, eliptik kanatçıkların minimum sürüklenme katsayılarıyla en verimli çözümü sunduğunu, ileri süpürülmüş delta kanatların ise irtifa ve kaldırma performansı açısından üstün olduğunu göstermiştir. Çalışmanın sonuçları, roket tasarım sürecinde stabilizatörlerin optimum seçimi için mühendislik tabanlı öneriler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Roket aerodinamiği, kanat geometrisi, statik marj, HAD, OpenRocket.

Research Paper

Numerical investigation of the effects of wing geometry on static stability in rockets

Abstract. In this study, the effects of different fin geometries used in rocket systems on static stability were investigated through numerical analysis. Ensuring aerodynamic stability in rocket systems is crucial for preventing yaw and instability, especially during high-speed flight. In this context, four different fin geometries—forward-swept delta, forward-swept delta, elliptical, and trapezoidal—were evaluated using both OpenRocket simulations and ANSYS Fluent-based Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis. OpenRocket determined the rocket's Center of Pressure (CP) and center of mass (CG) and calculated the static margins. Lift, drag, and moment values for each fin type were obtained through CFD analysis. Furthermore, the obtained data were fed into a flight dynamics model created in MATLAB to analyze their time-varying orientations. The results showed that elliptical fins offer the most efficient solution with minimum drag coefficients, while forward-swept delta wings are superior in terms of altitude and lift performance. The results of the study provide engineering-based recommendations for the optimum selection of stabilizers in the rocket design process.

Keywords: Rocket aerodynamics, wing geometry, static margin, CFD, OpenRocket.

1 Uçak Bakım Onarım Bölümü, İskenderun Teknik Üniversitesi, 31000, Hatay, Türkiye; polatcelik121@gmail.com (Sorumlu Yazar)

2 Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İskenderun Teknik Üniversitesi, 31000, Hatay, Türkiye; msabanci.lee23@iste.edu.tr

3 Matematik Bölümü, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, 7900, Kilis, Türkiye; kayasarp321@gmail.com

4 Uçak Bakım Onarım Bölümü, İskenderun Teknik Üniversitesi, 31000, Hatay, Türkiye; sezer.coban@iste.edu.tr
<https://doi.org/10.52995/jass.1744172>

Geliş Tarihi: 16 Temmuz 2025; Kabul Tarihi: 26 Ağustos 2025; Yayımlanma Tarihi: 31 Ağustos 2025

© 2025 Türk Hava Kurumu Üniversitesi. Tüm hakları saklıdır.

Bu makale Creative Commons Atıf-GayriTicari-AynıLisanslaPaylaş 4.0 Uluslararası Lisansı ile lisanslanmıştır.



1. GİRİŞ

Roket teknolojisi, havacılık ve uzay endüstrisindeki en önemli mühendislik disiplinlerinden biridir ve insanlığın uzay uçuşu hayalini gerçekleştirmesini sağlar (Huang & Huzel, 1992), (Fortescue, Swinerd, & Stark, 2011), (Sutton & Biblarz, 2016). Hem askeri hem de sivil amaçlarla kullanılan roket sistemleri yapısal bütünlük, itme gücü üretimi, yön kontrolü ve aerodinamik kararlılık gibi çeşitli teknik unsurların koordinasyonu sayesinde etkin bir şekilde çalışır (Anderson, 2010), (Sadraey, 2012). Özellikle uçuş kararlılığı hem güvenlik hem de uçuş hassasiyeti açısından bu sistemler için önemli bir performans göstergesidir (Abzug & Larrabee, 2002), (Barokah v.d., 2024), (Barnard & Philpott, 2010).

Füzelere uçuş sırasında etki eden aerodinamik kuvvetler ile tasarım ve güdüm parametreleri tasarımlarda belirleyici bir rol oynar. Kararlılık, özellikle transsonik ve süpersonik hızlarda sistemin sapmalardan kurtulma yeteneğine doğrudan bağlıdır (Ruffles & Dakka, 2016), (Wibowo, Sutrisno, & Rohmat, 2018). Bu bağlamda, kuyruk sistemleri tasarımda kilit bir rol oynar ve roketin hem aerodinamik kararlılığını hem de yön kontrolünü sağlar (Sutton & Biblarz, 2016), (Abzug ve Larrabee, 2002).

Roket kararlılığını belirleyen temel parametrelerden biri basınç merkezi (CP) ile ağırlık merkezi (CG) arasındaki mesafedir. CP etkili aerodinamik kuvvetlerin uygulama noktasını temsil ederken, CG roketin kütle merkezinin konumunu temsil eder (Anderson, 2010). CP'nin CG'nin arkasındaki konumu, sistemin pozitif bir statik marja sahip olduğunu, yani roket eksen etrafında oluşabilecek sapmalardan kurtulma eğiliminde olduğunu gösterir (Barokah v.d., 2024), (Bordachev, 2023). Ancak bu denge yalnızca kütle dağılımına değil aynı zamanda kanatların geometrik yapısına da bağlıdır (Boumrrar & Djebali, 2019).

Bu bağlamda, literatürde roket kararlılığı üzerine çok sayıda deneysel ve sayısal çalışma yürütülmüştür. Smith ve Johnson farklı kanat tiplerinin yüksek hızlarda CP (konum düzlemi) konumu üzerindeki etkisini rüzgâr tüneli testleri ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri kullanarak araştırmış ve delta kanatların süpersonik uçuş için daha uygun olduğunu göstermiştir (Ruffles & Dakka, 2016). Barokah v.d. eliptik, trapezoid ve delta kanatların kaldırma kapasitelerini karşılaştırarak, trapezoid kanatların küçük roketler için kararlılık ve performans sağladığını göstermiştir (Barokah v.d., 2024). Boumrrar ve Djebali, CP konumunun değişkenliğini analiz etmiş ve HAD verilerini kullanarak kanat tasarımının kararlılık üzerindeki etkisini doğrulamıştır (Boumrrar & Djebali, 2019).

(Wibowo, Sutrisno, & Rohmat, 2018) çalışması delta kanat kontrolünün yüksek irtifa uçuş koşullarında türbülanslı akışlar üzerindeki etkisini deneysel olarak doğrulamıştır. Cesnik v.d. kompozit kanat malzemelerinin elastikiyetinin dinamik stabilite üzerindeki etkisini araştırmış ve dinamik davranışa odaklanan ileri süpürme kanatlarının aeroelastik etkilerini analiz ederek bu kanatların özellikle küçük sapmalarda daha düşük sönümlenme sağladıklarını göstermiştir (Cesnik, Hodges, & Patil, 1996).

Sayısal modelleme açısından bakıldığında, HAD roket aerodinamiğinde en yaygın kullanılan analitik araçlardan biri haline gelmiştir (ANSYS, , 2020), (Sutton & Biblarz, 2016). ANSYS Fluent gibi karşılaştırma araçları aerodinamik kuvvet dağılımlarını, basınç farklarını, sınır tabakası oluşumunu ve kaldırma/sürüklenme kuvvetlerini hesaplamada yüksek doğruluk sunar (Cesnik, Hodges, & Patil, 1996), (Bordachev, 2023). Ancak, HAD analizinin güvenilirliği, ağ kalitesi, uygun sınır koşulları ve türbülans modeli seçimi gibi faktörlere bağlıdır (Anderson, 2010), (Boumrrar & Djebali, 2019). Bu nedenle, farklı kanat geometrilerinin bir HAD ortamında karşılaştırmalı analizi hem sayısal doğruluk hem de mühendislik karar desteği açısından önemlidir.

Ayrıca, OpenRocket gibi açık kaynaklı simülasyon araçları ön tasarım ve ilk kararlılık analizi için pratik çözümler sunar (OpenRocket, 2023). CP ve CG hesaplamalarının kolay yapılabilmesi, bu yazılımın mühendislik eğitiminde ve tasarım meraklıları arasında yaygın olarak kullanılmasını sağlar. Ancak, OpenRocket hızlı ve karmaşık türbülanslı akış koşullarında sınırlı doğruluk sağladığından sonuçların HAD kullanılarak doğrulanması gerekmektedir (Barokah v.d., 2024), (Boumrrar & Djebali, 2019).

Bu çalışmada, OpenRocket yazılımı kullanılarak yapılan ön analizler ve ANSYS Fluent tabanlı HAD simülasyonları aracılığıyla dört farklı kanat geometrisinin (trapezoid, eliptik, geriye doğru taranmış delta ve ileriye doğru taranmış delta) roketin statik kararlılığı üzerindeki etkisi kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Kaldırma kuvveti, sürüklenme, CP-CG konumu ve statik marj tüm analizlerde karşılaştırılmıştır.

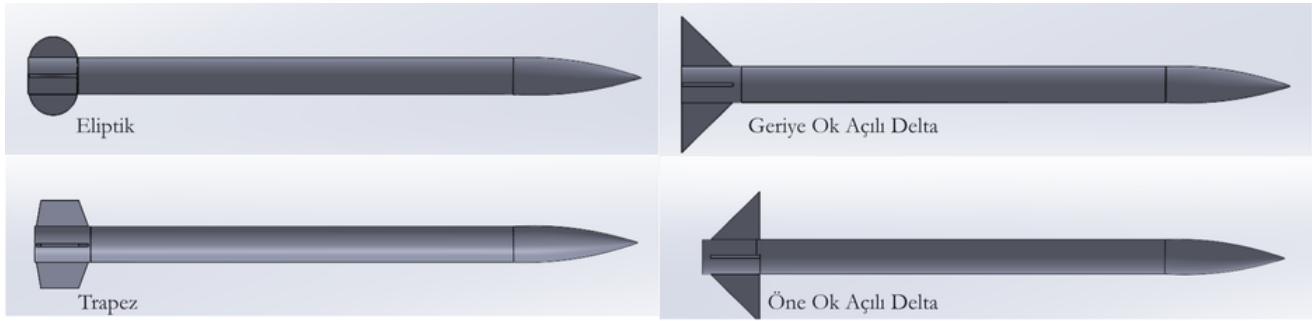
2. YÖNTEMLER

Bu çalışmada, dört farklı kuyruk (kanat) geometrisine sahip bir roket modelinin kapsamlı bir analizi simülasyon yöntemleri OpenRocket ve HAD kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen aerodinamik kuvvet değerleri MATLAB'da oluşturulan bir uçuş dinamiği modeli kullanılarak zamanla değişen kararlılık açısından da değerlendirilmiştir.

2.1. Geometrik Modelleme

Roket gövdesi ve kanatları SolidWorks yazılımı kullanılarak üç boyutlu olarak modellenmiştir. Roket gövdesi konik ön kısma sahip silindirik bir yapıya sahiptir. Roket gövdesinin uzunluğu, çapı ve kütlesi tüm varyantlarda sabit tutulmuş, yalnızca kanat geometrisi değiştirilmiştir. Bu bağlamda dört kanat tipi test edilmiştir (Rahman v.d., 2013), (Roberts, 2006):

- Eliptik Kanat (Şekil 1),
- Trapez Kanat (Şekil 1),
- Geriye Ok açılı Delta Kanat (Şekil 1),
- Öne Ok Açılı Delta Kanat (Şekil 1).

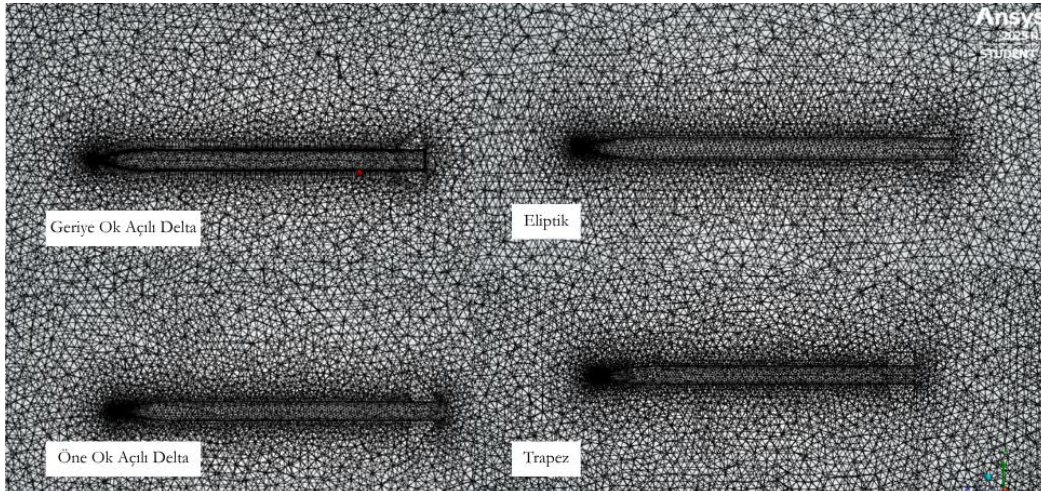


Şekil 1. Kanat Geometrilerinin ve Roket Tasarımının 3B Çizimi

Her kanat, simetri sağlamak için gövdeye 90° açıyla yerleştirilmiştir. Tüm kanatlar aynı alana (yaklaşık $0,006 \text{ m}^2$) sahip olacak şekilde değiştirilmiştir. Bu durum geometrik parametrelerin aerodinamik performans üzerindeki etkisinin ayrı ayrı değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.

2.2. Ağ Yapısı ve HAD Modellemesi

Geometrik modeller ANSYS Meshing ile altı yüzlü hücreler kullanılarak yapılandırılmıştır. Sınır tabakasının etkisini özellikle kanat-gövde arayüzünde daha doğru bir şekilde temsil etmek için şişirilmiş katmanlar kullanılmıştır. Ağ kalitesi ortalama hücre boyutu 10 mm, toplam hücre sayısı yaklaşık 1,25 milyon, asimetri (sapma) $0,25^\circ$ 'ten küçük, ortogonal kalite $0,85$ 'ten büyük olacak şekilde yapılmıştır (Faery, Strozier, & Ham, 1981), (Mahmood & Das, 2019). Şekil 2'de mesh yapıları gösterilmiştir.



Şekil 2. ANSYS Programında Mekanik R1 Aracılığı ile Mesh Yapısı Oluşturulan Farklı Kanat Tiplerine Sahip Roketlerin Mesh Görüntüleri

Ağ bağımsızlığı analizi çözünürlük sapmasının %0,1'den az olduğunu ve son analizde üçüncü ağ konfigürasyonunun tercih edildiğini göstermiştir.

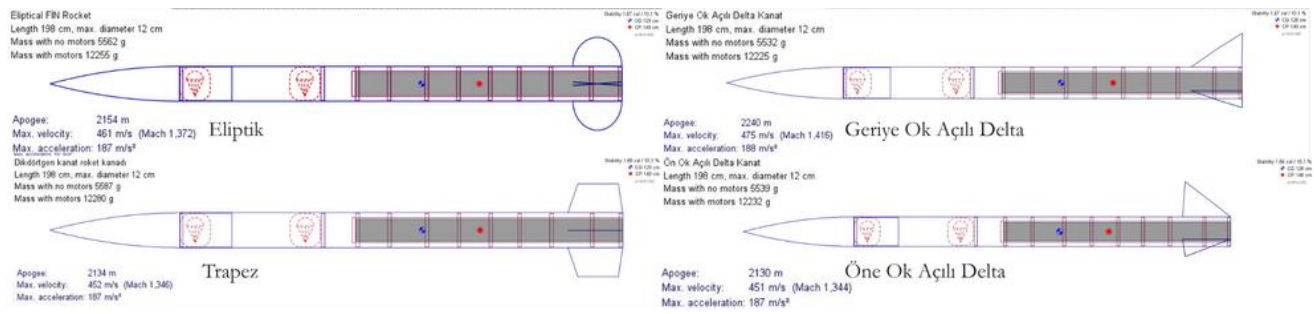
Çözüm Kurulumunda kullanılan modeller ve ayarlamalar şunlardır:

- Türbülans Modeli: k- ω SST,
- Akış Türü: Kararlı, Sıkıştırılmaz, Newtoncu,
- Sınır Koşulları:
- Giriş: Sabit hız (343 m/s – Mach 1, deniz seviyesi koşulları),
- Çıkış: Sabit çıkış basıncı,
- Duvarlar: Kaymayan koşullar.

k- ω SST türbülans modeli sınır tabakasındaki yüksek doğruluğu ve ana akışta kararlı çözümler üretebilme yeteneği nedeniyle özellikle kanat analizi için tercih edilen bir yöntemdir.

2.3. OpenRocket ile Statik Kararlılık Analizi

OpenRocket açık kaynaklı bir roket simülasyon yazılımı ve kanat tasarımının etkilerini değerlendirmek için pratik bir araçtır. Statik sınır değerleri CP (basınç merkezi) ve CG (kütle merkezi) konumlarına göre otomatik olarak hesaplanabilir (OpenRocket, 2023). Bu çalışmada, dört farklı kanat tipi için aşağıdaki parametreler elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır: Kütle merkezi (CG), basınç merkezi (CP), statik marj (boyut olarak), maksimum kalkış yüksekliği (Apogee, m), maksimum hız (m/s) karşılaştırılan verilerdir (NASA Glenn Research Center, t.y.-a), (NASA Glenn Research Center, t.y.-b). İlgili detaylar Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. OpenRocket ile Oluşturulmuş Farklı Kanat Tiplerindeki Roketlerin Kütle Merkezi (CG), Basınç Merkezi (CP), Statik Marj (Boyut Olarak), Maksimum Kalkış Yüksekliği (Apogee, m), Maksimum Hız (m/s) Verileri

Tüm varyantlar için motor karakteristikleri yalnızca aerodinamik farklılıklar dikkate alınarak sabit tutulmuştur. Elde edilen veriler HAD hesaplamalarının sonuçlarıyla birlikte analiz edilmiştir.

2.4. MATLAB'da Zamansal Kararlılık Analizi

Bu çalışmada, ANSYS Fluent yazılımında gerçekleştirilen HAD analizlerinden elde edilen aerodinamik türevler ve kuvvet/moment verileri, MATLAB ortamında geliştirilen üç serbestlik dereceli (3-DOF) bir roket uçuş modeli içine entegre edilmiştir. Bu model, Newton-Euler hareket denklemleri temel alınarak oluşturulmuş ve sistemin zamana bağlı yönelimsel kararlılığı analiz edilmiştir.

Modelde kullanılan temel parametreler şu şekildedir: Uçuş hızı $u_0=450$ m, kütle $m=12,2$ kg, boylamsal atalet momenti $I_y=3,98$ kg, hava yoğunluğu $\rho=1,225$ kg/m³, referans yüzey alanı $S=0,7666$ m² ve ortalama aerodinamik kord uzunluğu $c=0,132$ m olarak tanımlanmıştır. Aerodinamik türevler HAD çıktıları doğrultusunda; kaldırma eğimi katsayısı $CL_\alpha=4,81$, eğim momenti katsayısı $CM_\alpha=-0,81$ ve yalpa momenti türevi $CM_q=-450$ olarak belirlenmiştir.

Bu verilere dayanarak oluşturulan A durumu matrisi, aşağıda verilen biçimde sistem haline getirilmiştir:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{0.5\rho u_0 S C_{L_\alpha}}{m u_0} & 1 & 0 \\ \frac{0.5\rho u_0 S c C_{M_\alpha}}{I_{yy}} & \frac{0.5\rho u_0 S c^2 C_{M_q}}{2 I_{yy} u_0} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Model, MATLAB ortamında durum uzayı (state-space) modeli olarak çözümlenmiş; başlangıç hücum açısı $\alpha=5^\circ$ olan bir durum için sistemin zamana bağlı davranışı analiz edilmiştir. Elde edilen grafiklerde;

- Hücum açısının (α) zamanla azalarak sönümlendiği,
- Yalpa hızının (q) pozitif bir tepe değere ulaşp kısa sürede sifıra yaklaştığı,
- Pitch açısının (θ) ise zamana bağlı olarak dengeli bir artış gösterdiği

gözlemlenmiştir. Ek olarak, sistemin A matrisine ait özdeğerler hesaplanmış ve tüm özdeğerlerin reel kısmının negatif çıkması sistemin boylamsal eksen etrafında asal kararlı olduğunu doğrulamıştır. Bu durum hem eliptik hem de ileri ok açılı delta kanatlı konfigürasyonlar için özellikle belirgindir.

2.5. Karşılaştırmalı Değerlendirme Yöntemi

Her kanat tipi için aşağıdaki parametreler karşılaştırmalı tablolar ve grafikler kullanılarak değerlendirilmiştir:

- Statik marj (boyut olarak),
- Maksimum kalkış yüksekliği (Apogee, m),
- Kaldırma katsayısı (CL),
- Uçak sürüklenme katsayısı (CD),
- CP ve CG arasındaki mesafe,
- HAD kullanılarak elde edilen basınç dağılımı.

Veriler OpenRocket ve ANSYS Fluent sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve literatürle tutarlılık sağlamak için sayısal doğrulukları doğrulanmıştır (Barokah v.d., 2024).

3. SONUÇLAR

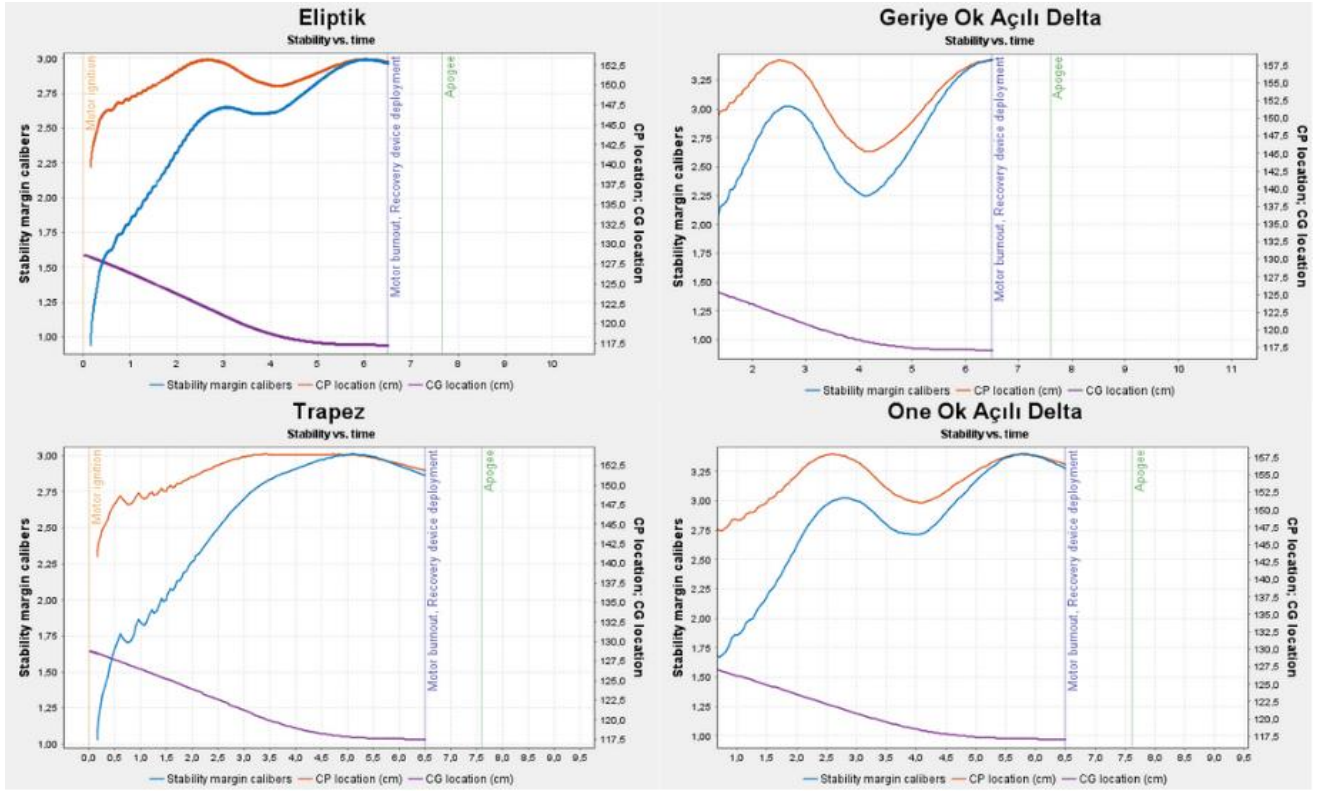
Bu bölümde, dört farklı kanat tipinin (eliptik, trapez, ileri ok açılı delta ve geri ok açılı delta) bir roketin aerodinamik ve dinamik kararlılığı üzerindeki etkileri çeşitli analiz yöntemleriyle elde edilen veriler kullanılarak değerlendirilmiştir. OpenRocket simülasyonlarından elde edilen statik marjlar ANSYS Fluent ile gerçekleştirilen HAD analizlerinden elde edilen basınç ve akış dağılımları ve MATLAB'da modellenen uçuş dinamikleri grafiksel olarak sunulmuş ve karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

3.1. OpenRocket Sonuçları

OpenRocket simülasyonları roketin ağırlık merkezi (CG) ve basınç merkezi (CP) noktalarından türetilen her kanat tipi için statik marj değerlerini ve bu değerler arasındaki farkları sağlamıştır. Statik marj sistemin ilk sapmaya karşı kararlılığının önemli bir göstergesidir. Bununla ilgili ana sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Eliptik kanat konfigürasyonu en yüksek statik marjı sunarak onu en kararlı konfigürasyonlardan biri haline getirmiştir.
- Öne doğru eğimli delta kanatlar yüksek irtifadaki en boy oranlarıyla dikkat çekmelerine rağmen sınıra yakın bir statik marj sağlamıştır.
- Geriye doğru eğimli delta kanatlar ve trapez kanatlar benzer marj değerleriyle orta düzeyde stabilite sağlamıştır.
- Tüm konfigürasyonlar genellikle 1,66 ile 1,67 arasında pozitif statik marjlar sağlayarak uçuş stabilitesi için temel koşulları sağlamıştır.

Şekil 4'teki grafikler, dört farklı konfigürasyon için statik marjların karşılaştırmalarını göstermektedir.



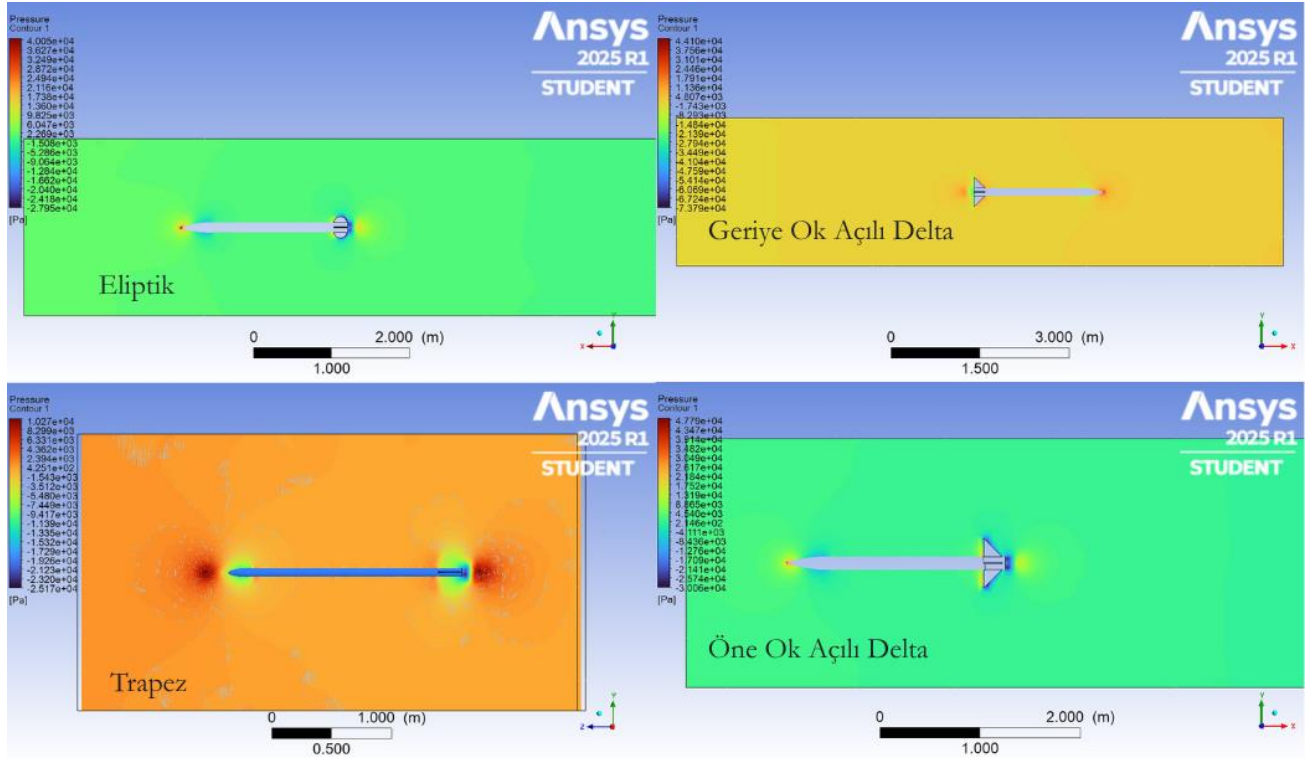
Şekil 4. Statik Marj Karşılaştırmasının Bir Grafiği

3.2. HAD Sonuçları

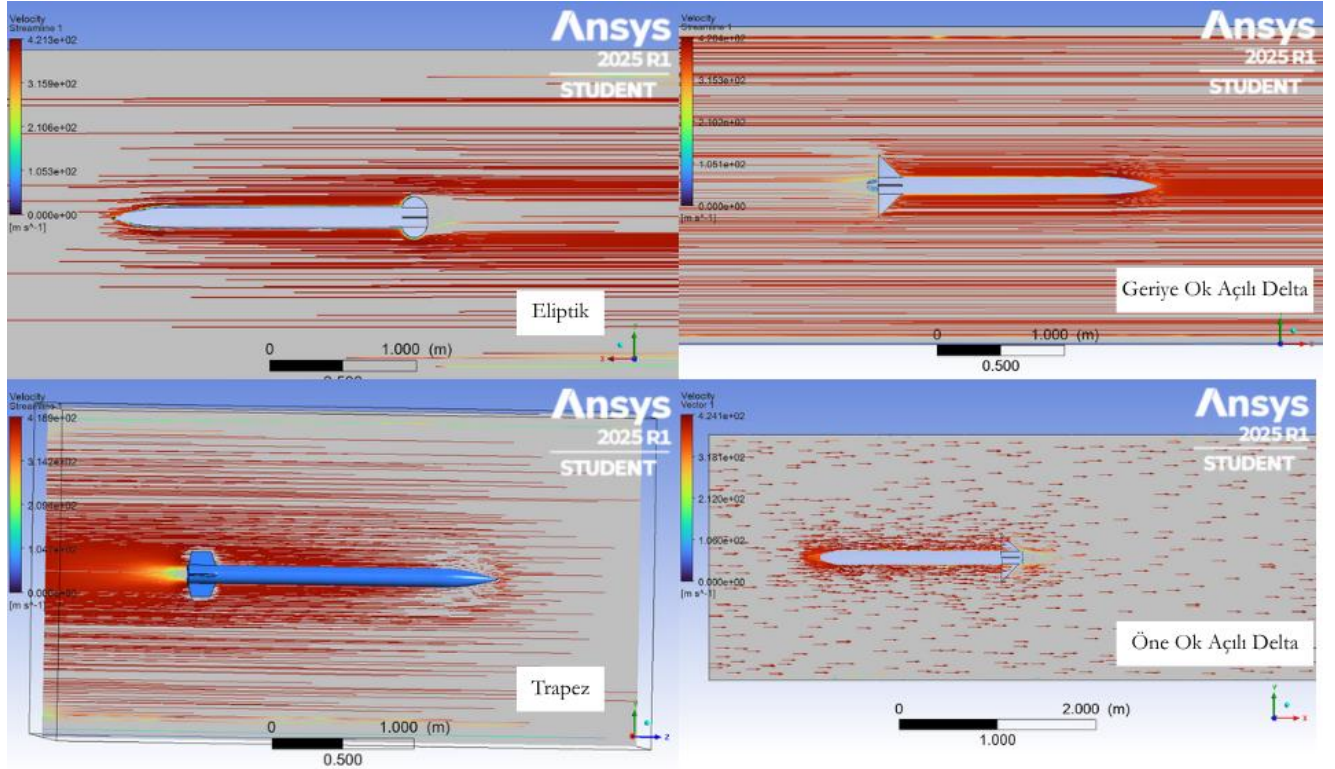
ANSYS Fluent ile gerçekleştirilen HAD analizleri her bir kanat geometrisinin aerodinamik performansını açıklamıştır. Kanat profillerinden ve basınç dağılım eğrilerinden elde edilen görselleştirmeler akış ayrımı, kaldırma kuvveti üretimi ve sürüklenme alanlarının incelenmesine olanak sağlamıştır. Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Eliptik kanat en düşük toplam sürüklenme katsayısını (yaklaşık 10^9) sergilemiş ve yüksek aerodinamik verimlilik göstermiştir.
- İleriye doğru eğimli delta kanat çok yüksek kaldırma ve tepe noktası değerleriyle yüksek performanslı bir yapı sergilemiştir.
- Geriye doğru eğimli delta kanat yüzeyde daha kararlı bir basınç dağılımı sağlayan geriye doğru akış ayrımı sergilemiştir.
- Trapezoid kanat dengeli kaldırma ve sürüklenme değerleriyle kararlı ancak orta düzeyde verimli bir yapı sergilemiştir.

Şekil 5 ve Şekil 6'daki grafikler sırasıyla, dört farklı kanat profiline göre basınç eğrilerinin ve hız vektör eğrilerinin karşılaştırmalarını göstermektedir.



Şekil 5. Kanat Profillerinin ve Basınç Eğrilerinin Görüntüleri



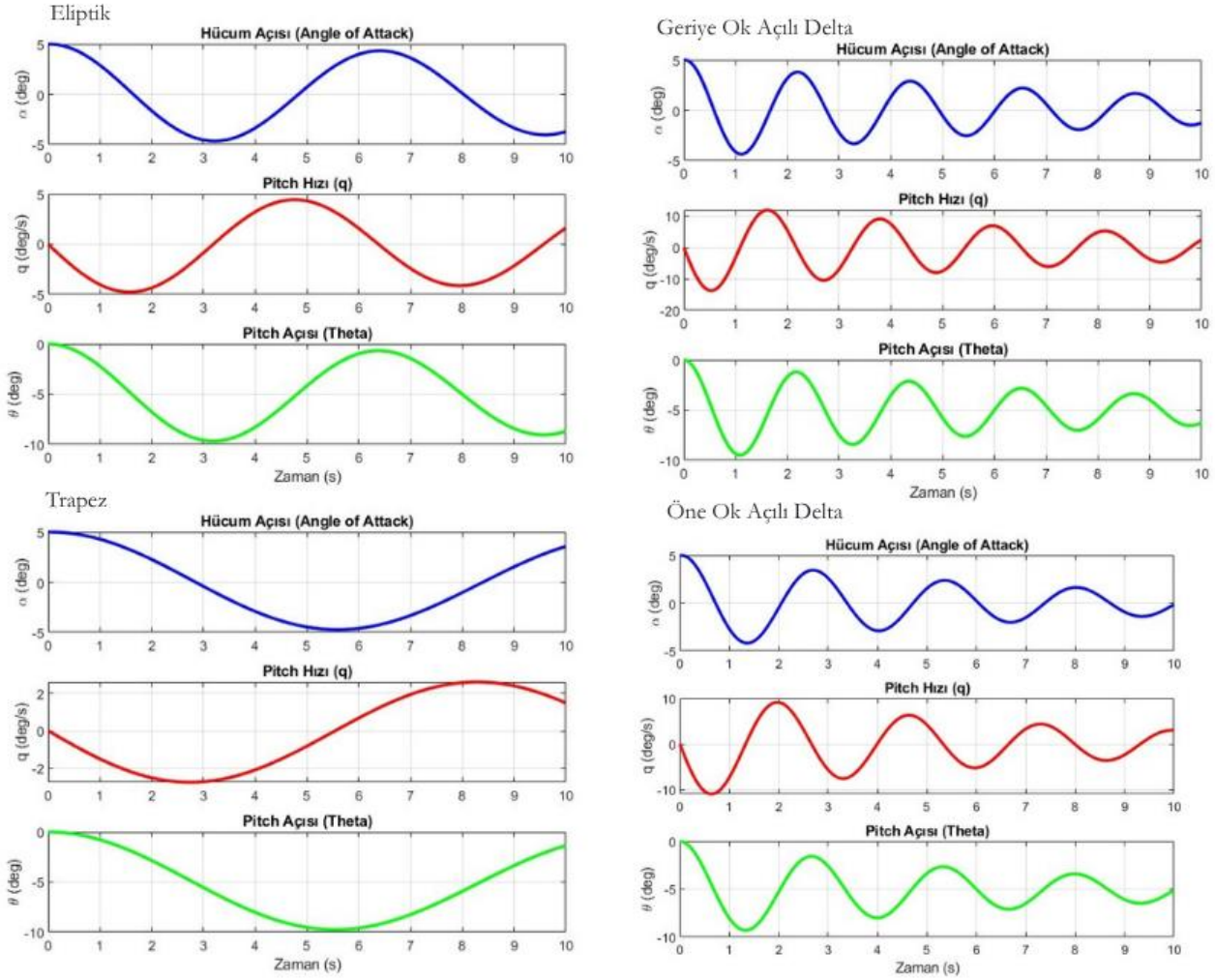
Şekil 6. Kanat Profillerinin ve Hız Vektör Eğrilerinin Görüntüleri

3.3. MATLAB Dinamik Stabilité Sonuçları

OpenRocket ve HAD ile elde edilen aerodinamik parametreler MATLAB ortamında geliştirilen bir uçuş dinamiği modeline entegre edilmiştir. Sistemin hücum açısı (α), eğim hızı (q) ve eğim açısı (θ) zaman içinde analiz edilmiştir. Grafikler (Şekil 7) bu parametrelerin on saniyelik bir uçuş senaryosundaki zamansal evrimini göstermektedir. Bu kısımda elde edilen veriler aşağıdaki sonuçları ortaya koymaktadır:

- Tüm konfigürasyonlar zamanla şu formülle verilen ilk sapmadan kurtulabilen kararlı bir yapı sergilemektedir: $\alpha=5^\circ$.

- İleri hareket eden delta konfigürasyonu daha büyük bir genliğe ancak daha hızlı bir sönümlenme salınımlarına sahiptir.
- Eliptik ve trapez kanatlar düşük genliğe ve yavaş bir sönümlenme tepkisine sahip daha yumuşak bir geçiş profili sergilemektedir.
- Sistemin özdeğerleri tüm konfigürasyonlar için negatif bir reel kısım sergileyerek kararlı bir davranışı doğrulamaktadır.



Şekil 7. Hücüm Açısı, Eğim Hızı ve Eğim Açısının Zaman Serisi Diyagramları

3.4. Genel Değerlendirme

Bu çalışmada, akış tabanlı HAD ve MATLAB kullanılarak farklı kanat geometrilerine sahip roketlerin kararlılığı, aerodinamik verimliliği ve dinamik davranışı incelenmiştir. Sonuçların karşılaştırmalı değerlendirilmesi aşağıda sunulmuştur:

3.4.1. Verimlilik

HAD analizinden elde edilen veriler eliptik kanatların en düşük aerodinamik direnç katsayılarını (CD) sağladığını göstermiştir. Akış dağılımı analizi sınır tabakası ayrışmasının önlemlendiğini ve eliptik kanatlar üzerinde basınç dağılımının daha homojen olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, eliptik kanatlar düşük aerodinamik direncin önemli olduğu uzun mesafeli uçuşlar için uygun bir seçimdir.

Öte yandan, delta kanatlar yüksek hızlarda akışı ve düşük dalga direncini kontrol etme kabiliyetleriyle öne çıkar. Mach 0,3'teki simülasyonlar geriye ok açılı delta kanada sahip roketin maksimum 5 m/s hıza ulaştığını göstermiştir. Bu bulgu literatürde yüksek hızlı uçuş için delta kanatlara yönelik tercihin doğruluğunu teyit etmektedir (Anderson, 2010).

3.4.2. İrtifa ve kaldırma kuvveti

OpenRocket simülasyon sonuçları geriye ok açılı delta kanatlı roketin 2.240 m maksimum irtifaya ulaştığını göstermiştir. Bu sonuç delta kanat geometrisinin yüksek kaldırma kuvveti (CL) üretme kabiliyetinden kaynaklanmaktadır. Eliptik kanatlar 2.154 m, trapez kanatlar 2.154 m ve öne ok açılı delta kanatlar 2.133 m irtifaya ulaşmıştır; ki bu etkileyici bir sonuçtur. Bu sonuçla tutarlı olarak, geriye ok açılı delta kanat tasarımı zorlu yüksek irtifa görevleri için en iyi çözümü sunmaktadır.

3.4.3. Statik kararlılık

Statik marj değerlerinin analizi tüm konfigürasyonların 1,6-1,7 kalibre aralığında güvenli bir kararlılık marjı sunduğunu göstermektedir. Ayrıca, trapez kanatlar daha tutarlı bir CG-CP pozisyonunu koruyarak hız aralığında daha az değişken bir kararlılık sergilemiştir. Geriye ok açılı delta kanatlar da yüksek hızlarda önemli bir statik kararlılık göstermiş ve bu statik kararlılık özellikle belirgin olmuştur. Bu durum delta geometrisinin süpersonik hızlara geçişte de bir avantaj sağlayabileceğini düşündürmektedir (Barokah v.d., 2024).

3.4.4. Dinamik olarak kararlılık

MATLAB'da gerçekleştirilen üç serbestlik dereceli durum uzayı analizi kanat tipine bağlı olarak dinamik uçuş tepkilerini ortaya koymuştur. Eliptik ve trapez kanatlar hücum açısındaki küçük değişikliklere daha yumuşak ve daha sönümlü tepkiler göstermiştir. Bu konfigürasyonlar öncelikle düşük frekanslı salınımların hızlı bir şekilde sönümlenmesi yoluyla uzun vadeli uçuş kararlılığı sağlar. Öte yandan, geriye ok açılı delta kanatlar agresif ancak hızlı bir tepki sergilemiştir. Bu durum, yüksek manevra kabiliyeti gerektiren görevlerde avantaj sağlarken, aynı zamanda hassas kontrol algoritmalarına olan ihtiyacı da göstermektedir. Bununla birlikte, geriye ok açılı delta kanatlar kontrol edilebilirlik için yeterli stabilite sağlamış, ancak düşük hızlarda akış ayrılmasına daha yatkın olmuştur.

3.4.5. Genel sonuçlar

Yapılan tüm değerlendirme analiz ve değerlendirmeler ışığında aşağıdaki genel sonuçlar ortaya konmuştur:

- Yüksek irtifa ve yüksek hızın öncelikli olduğu görevler için geriye ok açılı delta kanatlar tercih edilmelidir.
- Düşük aerodinamik sürüklenme ve verimliliğin son derece önemli olduğu görevler için eliptik kanatlar en uygun seçimdir.
- Stabilitenin kritik olduğu durumlarda trapez kanatlar güvenilir bir çözüm sunar.
- Çeviklik ve tepki hızı gerektiren görevler için özellikle geriye ok açılı sahip delta kanatlar tercih edilir.

Özetle, çalışmada kullanılan OpenRocket, HAD ve MATLAB yöntemleri kanat geometrisinin bir uçağın uçuş özelliklerini belirlemede önemli bir parametre olduğunu gösteren daha fazla bulgu sağlamıştır. Çalışma, farklı kanat tiplerinin avantaj ve sınırlamalarını karşılaştırmak için tasarım sürecinde kullanılabilecek önemli mühendislik verileri sunmaktadır.

ETİK BEYAN & GENEL AÇIKLAMALAR

Bu araştırma, İskenderun Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yürütülen bir yüksek lisans tezinin sonuçlarına dayanmaktadır. Bu makale araştırma ve yayın etiği standartlarını karşılamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

Fikir/Kavram: P. Çelik, M. Sabancı, H. Sarpkaya ve S. Çoban; Tasarım: P. Çelik; Veri Toplama/İşleme: P. Çelik, M. Sabancı ve H. Sarpkaya; Analiz/Yorum: P. Çelik. Tüm yazarlar makalenin son halini okumuştur ve onaylamıştır.

FON

Söz konusu değildir.

VERİ VE MALZEME MÜSAİTLİĞİ

Bu çalışmada analiz edilen roket geometrileri SolidWorks ortamında modellenmiş ve ardından 3B yazıcı kullanılarak PLA malzeme ile fiziksel olarak üretilmiştir. Üretilen modeller HAD ve OpenRocket analizlerine paralel olarak doğrulama amaçlı kullanılmıştır. Talep edilmesi halinde 3B model dosyaları (STL formatında) ve simülasyon girdileri araştırmacılara sağlanabilir.

ÇIKAR ÇATIŞMALARI

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışmalarının bulunmadığını belirtmektedir.

KAYNAKÇA

- Abzug, M. J., & Larrabee, E. E. (2002). *Airplane Stability and Control: A History of the Technologies That Made Aviation Possible*. Cambridge University Press.
- Anderson, J. D. (2010). *Fundamentals of Aerodynamics* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- ANSYS, Inc. (2020). *ANSYS Fluent Theory Guide*. ANSYS, Inc., Canonsburg.
- Barnard, R. H., & Philpott, D. R. (2010). *Aircraft Flight: A Description of the Physical Principles of Aircraft Flight*. Pearson Education.
- Barokah, A. D. N., ... & Hoa, N. L. (2024). A comparative analysis of the aerodynamic performance: Straight fin and curved fin rockets using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 115(1), 1-18. <https://doi.org/10.37934/arfmts.115.1.118>
- Bordachev, V. A. (2023). Static stability study of a model rocket. *Siberian Aerospace Journal*, 24(1), 64-75. doi: 10.31772/10.31772/2712-8970-2023-24-1-64-75
- Boumrar, I., & Djebali, R. (2019). Experimental validation of pressure distribution prediction under delta wing apex vortex at high Reynolds numbers. *CFD Letters*, 11(3), 92-102. <https://akademiarbaru.com/submit/index.php/cfdl/article/view/3146/2180>
- Cesnik, C. E. S., Hodges, D. H., & Patil, M. J. (1996). Aeroelastic analysis of composite wings. *AIAA Meeting Papers on Disc*, 1996, 1113-1123. <https://doi.org/10.2514/6.1996-1444>
- Faery, H. F. Jr., Strozier, J. K., & Ham, J. A. (1981). Experimental and theoretical study of three interacting, closely-spaced, sharp-edged 60 deg delta wings at low speeds. NASA Contractor Report 3460. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19810024617/downloads/19810024617.pdf>
- Fortescue, P., Swinerd, G., & Stark, J. (2011). *Spacecraft Systems Engineering*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119971009>
- Huang, D. H., & Huzel, D. K. (1992). *Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. <https://doi.org/10.2514/4.866197>
- Mahmood, C. A., & Das, R. K. (2019). Performance comparison of different winglets by CFD. *AIP Conference Proceedings*, 2121, 060006. <https://doi.org/10.1063/1.5115907>
- NASA Glenn Research Center (t.y.-a). Rocket Center of Pressure. <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/rocket-center-of-pressure/> sayfasından alınmıştır.
- NASA Glenn Research Center (t.y.-b). Rocket Stability. <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/rocket-stability/> sayfasından alınmıştır.
- OpenRocket (2023). [Computer software]. <http://openrocket.info/>
- Rahman, H., Khushnood, S., Raza, A., & Ahmad, K. (2013). Experimental and computational investigation of delta wing aerodynamics. In: *Proceedings of 2013 10th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology (IBCAST)*, Islamabad, Pakistan, 2013, 203-208. doi:10.1109/IBCAST.2013.6512155
- Roberts, D. W. (2006). *The Aerodynamic Analysis and Aeroelastic Tailoring of a Forward-Swept Wing*. North Carolina State University. <https://repository.lib.ncsu.edu/server/api/core/bitstreams/813d5ee5-3211-4485-b2da-503a7ff54fc2/content>
- Ruffles, W., & Dakka, S. M. (2016). Aerodynamic flow characteristics of utilizing delta wing configurations in supersonic and subsonic flight regimes. *Journal of Communication and Computer*, 13, 299-318. doi:10.17265/1548-7709/2016.06.004
- Sadraey, M. H. (2012). *Aircraft Design: A Systems Engineering Approach*. John Wiley & Sons. doi:10.1002/9781118352700
- Sutton, G. P., & Biblarz, O. (2016). *Rocket Propulsion Elements*. Wiley.
- Wibowo, S. B., Sutrisno, S., & Rohmat, T. A. (2018). An evaluation of turbulence model for vortexbreakdown detection over delta wing. *Archive of Mechanical Engineering*, 65(3), 399 – 415. <https://doi.org/10.24425/124489>