



**TEKNOFEST
ROKET YARIŞMASI
ORTA İRTİFA KATEGORİSİ**

**OMÜ
EPSİLON ROKET TAKIMI**

UÇUŞ BENZETİM RAPORU

2022 / SAMSUN

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|----|
| 1. GİRİŞ | 3 |
| 2. RAPOR GEREKSİNİMLERİ..... | 4 |
| 2.1. Kinematik ve Dinamik Denklemler | 4 |
| 2.1.1. Benzetimde Kullanılacak İvme Denklemleri | 4 |
| 2.1.2. Benzetimde Kullanılacak Hız Denklemleri | 4 |
| 2.1.3. Benzetimde Kullanılacak Konum Denklemleri..... | 4 |
| 2.1.4. Benzetimde Kullanılacak Konum Denklemleri..... | 4 |
| 2.2. Atmosfer Modeli | 5 |
| 2.2.1. Hava Yoğunluğu – Deniz Seviyesi Yüksekliği Grafiği (0-10000 m) | 6 |
| 2.2.2. Ses Hızı- Deniz Seviyesi Yüksekliği Grafiği (0m- 10000m)..... | 6 |
| 2.3. Motor Modeli | 7 |
| 2.3.1. Zamana Bağlı İtke Kuvveti Modeli | 7 |
| 2.3.2. Zamana Bağlı Atılan Kütle Modeli | 7 |
| 2.4. Aerodinamik Model..... | 8 |
| 2.5. Benzetim Yapısı | 9 |
| 2.5.1 Hava yoğunluğu | 9 |
| 2.5.2 Toplam kütle değişimi | 10 |
| 2.5.3 Sürüklenme kuvveti | 11 |
| 2.5.4 Anlık itki | 12 |
| 2.5.5 İrtifa ölçümü (z ekseni eksen hareketi) | 12 |
| 2.5.6 Menzil ölçümü (x ekseni hareketi)..... | 13 |
| 3.Benzetim Çıktı Formatı | 18 |

1. GİRİŞ

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Epsilon Roket takımı tarafından özgün bir şekilde hazırlanmış ve beraberinde analiz ve tasarımları tamamlanmış olan Erdem66 roketinin Teknofest Orta İrtifa kategorisinde belirtilen kurallar dahilinde istenen görevleri başarı ile yerine getirmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla oluşturulmuş olan tasarımların güncel raporlara eklenmek üzere proje bünyesinde çeşitli zaman aralıklarında mekanik, termal ve uçuş analizlerinin yapılması gerekmektedir.

Günümüzde üretim alanında pek çok mühendislik problemi imalat öncesinde ve hatta yapısal tasarımlar öncesinde analizler ve simülasyonlar ile problemlerin belirlenmesi sağlanmaktadır. Bu sayede belirlenen problemler ve beraberinde tasarımların karşılaşacağı etkiler sonucunda yapacağı hareketlerin belirlenmesi sağlanmaktadır. Bu durum sonucunda yapısal tasarım aşamalarında tasarım süreçleri bu tür analiz ve simülasyon sonuçlarından elde edilen veriler ışığında hazırlanmaktadır.

Bulunan zaman aralığının bir gerekliliği olarak güncel raporla birlikte gönderilmek üzere Erdem66 roketinin atmosfer içerisindeki hareketi uçuş benzetimi yapılarak incelenecektir. Rokete Matlab Simulink yazılımı üzerinden belirlenen başlangıç koşulları altında iki (2) serbestlik dereceli uçuş benzetimi oluşturulacak ve sonuçları irdelenecektir. Bu sayede Erdem66 roketine ait yapılmış olan OpenRocket analiz sonuçlarının uçuş benzetim sonuçları ile karşılaştırılarak irdelenmesi ve yapılan tasarımların gerçek uçuş anında gösterdikleri etkileşimlerin önceden tespit edilmesi ve yapılan tasarımların hedeflenen görevleri yerine getirme hususunda ne derece doğru olduğunun ispatlanması hedeflenmektedir.

2. RAPOR GEREKSİNİMLERİ

2.1. Kinematik ve Dinamik Denklemler

2.1.1. Benzetimde Kullanılacak İvme Denklemleri

$$F_v = (T - D) \sin(b) - W$$

$$F_h = (T - D) \cos(b)$$

$$\sum F_v = m * a_v$$

$$\sum F_h = m * a_h$$

Bu denklemde bulunan semboller aşağıdaki gibi isimlendirilmiştir.

F_v : Dikey kuvvet

F_h : Yatay kuvvet

T : Motor itki kuvveti

D : Sürükleme kuvveti

m : Roket kütlesi

a_v : Dikey ivme

a_h : Yatay ivme

2.1.2. Benzetimde Kullanılacak Hız Denklemleri

Yatay ve dikey hız için ayrı ayrı olmak üzere;

$$\vec{V}(t) = \frac{dX(t)}{dt}$$

2.1.3. Benzetimde Kullanılacak Konum Denklemleri

Yatay konum (Menzil) ve dikey konum (irtifa) için ayrı ayrı olmak üzere;

$$\vec{a}(t) = \frac{dV(t)}{dt} = \frac{d^2 dX(t)}{dt^2}$$

2.1.4. Benzetimde Kullanılacak Konum Denklemleri

$$\tan^{-1} \left(\frac{V_{Düşey}}{V_{Yatay}} \right)$$

2.2. Atmosfer Modeli

Atmosfer modeli şartname gereğince isterler doğrultusunda oluşturulurken, çeşitli formüllerden faydalanılmıştır. Bu formüller yoğunluğun ve ses hızının temellerini oluşturan ve irtifaya göre değişimlerinin gözlemlenmesini sağlayan temel formüllerdir. Belirtilen formüller mühendislik yaklaşımı Matlab ortamında kodlanmış ve yoğunluk – deniz seviyesi yüksekliği (0m- 10000m) grafiği ile ses hızı – deniz seviyesi yüksekliği (0m- 10000m) grafiği oluşturulabilmesi açısından Matlab ortamında kodlanmak üzere aşağıdaki formüllerden yararlanılmıştır.

$h \leq 11000$ m'de kullanılmak üzere (Troposfer);

$$T = 15.04 - 0.00649 * h$$

$$P = 101.29 * \left(\frac{T + 273.1}{288.08} \right)^{5.256}$$

$$\rho = \frac{P}{(0.2869 * (T + 273.1))}$$

$$c = \sqrt{k * R * T}$$

$$Ma = \frac{V}{c}$$

Bu denklemlerde;

T = Sıcaklık

h = Yükseklik

P = Basınç

ρ = Yoğunluk

c = Ses Hızı

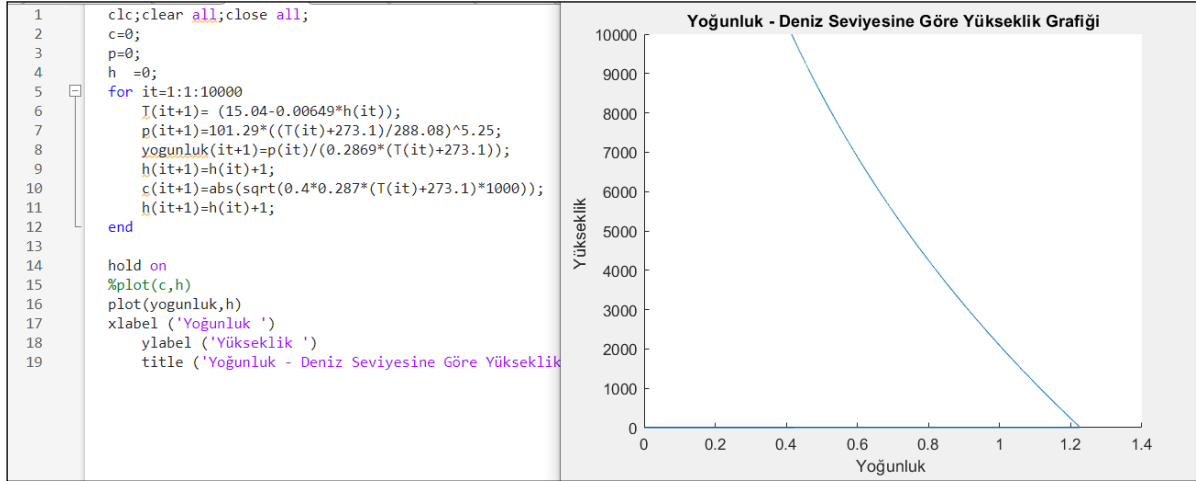
k = Havanın Özgül Isı Oranı (k=1.4)

R = Gaz Sabiti (Hava ideal kabul edilerek $R = 0.2869 \frac{kJ}{kg * K}$ alınmıştır.)

Not: 0 – 10000 m irtifa aralığında havadaki nem oranının ve ısı kapasitesinin (C_p) sabit olduğu varsayımı yapılmıştır. Bu nedenle havanın özgül ısı oranı denklemlerde $k = 1.4$ sabit olarak alınacaktır.

2.2.1. Hava Yoğunluğu – Deniz Seviyesi Yüksekliği Grafiği (0-10000 m)

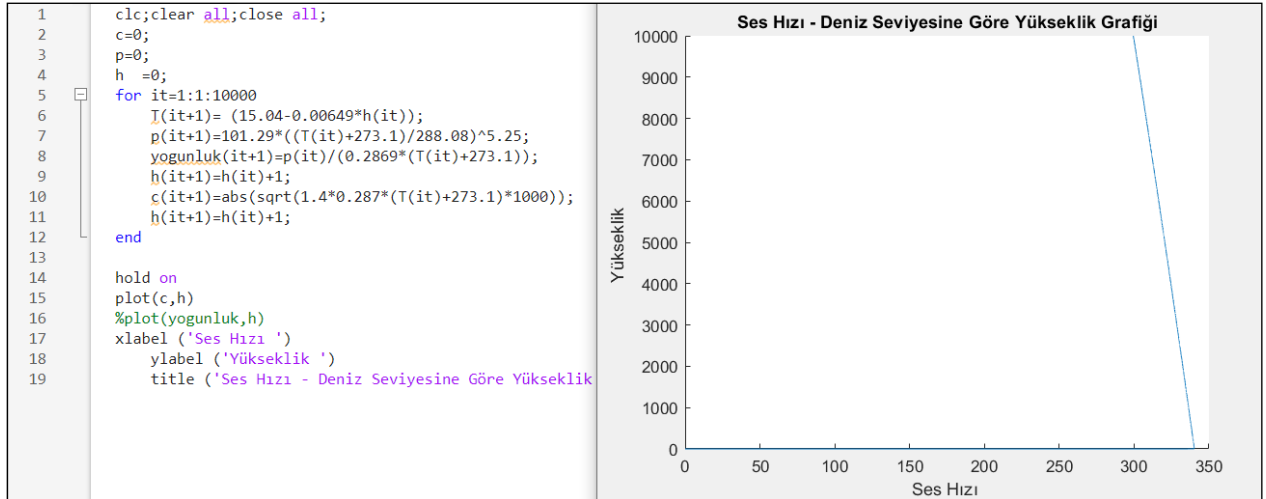
Hava yoğunluğunun rakıma göre değişimi grafiğini matlab üzerinden oluşturmak için aşağıda hazırlanmış olan kodlardan yararlanılır. Belirtilen kodlar özgün bir şekilde temel formüller kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan kodlar çalıştırıldığında elde edilen yoğunluk-yükseklik grafiği Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1.Yoğunluk – Deniz Seviyesine Göre Yükseklik Grafiği

2.2.2. Ses Hızı- Deniz Seviyesi Yüksekliği Grafiği (0m- 10000m)

Ses Hızı - Deniz Seviyesi Yüksekliği (0m- 10000m) grafiğini MatLab üzerinden oluşturmak için aşağıda hazırlanmış olan kodlardan yararlanılır. Oluşturulan kodlar çalıştırıldığında elde edilen yoğunluk-yükseklik grafiği Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Ses Hızı – Deniz Seviyesine Göre Yükseklik Grafiği

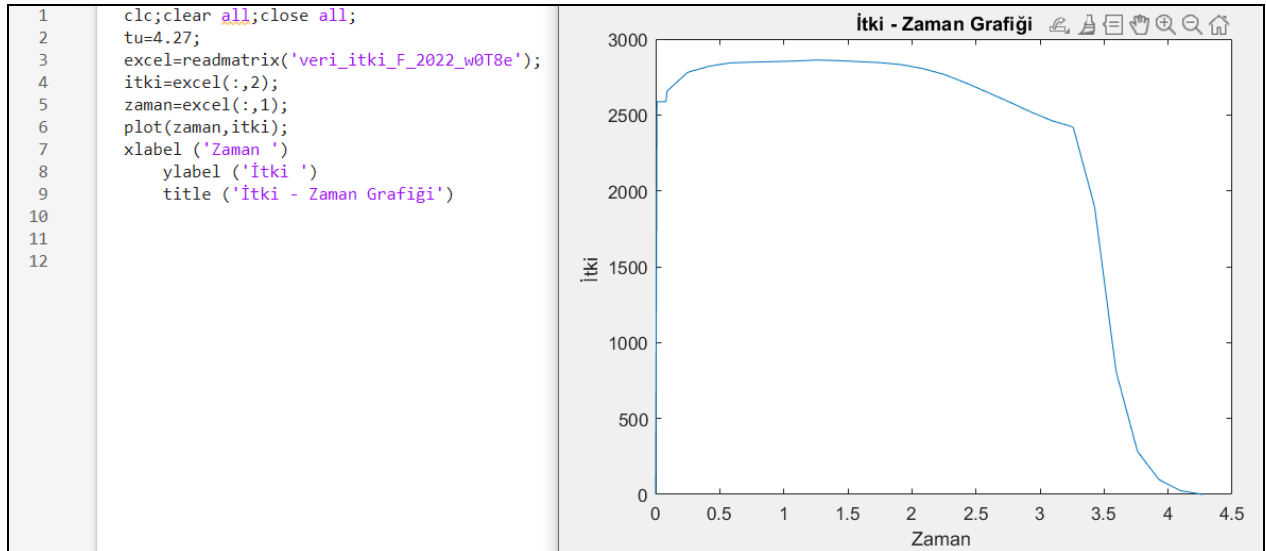
Elde edilen analiz sonucu incelendiğinde ses hızı değerinin 340 - 300 m/s hız bandında seyir aldığı gözlemlenmektedir. Bu seyir bandının yapılan literatür taramaları sonucunda ideal seviyede olduğu anlaşılmıştır.

2.3. Motor Modeli

Motor modeli Matlab üzerinde oluşturulurken Teknofest Roket Yarışması tarafından paylaşılan excel dokümanları temel alınmış ve kodlara aktarılmıştır. Oluşturulan kodlar tamamen özgün mühendislik yaklaşımı ile yazılmış olup, kullanılan teorik parametreler paylaşılan yarışma dokümanlarından ve Open Rocket programı verilerinden karşılanmıştır. Oluşturulan motor modeli neticesinde zamana bağlı itki kuvveti modeli ve zamana bağlı atılan kütle modeli oluşturulmuştur.

2.3.1. Zamana Bağlı İtki Kuvveti Modeli

Zamana bağlı itki kuvveti modelini Matlab üzerinden oluşturmak için aşağıda hazırlanmış olan kodlardan yararlanılır. Belirtilen kodlar özgün bir şekilde temel roket verilerinden yararlanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan kodlar çalıştırıldığında elde edilen yoğunluk-yükseklik grafiği Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. İtki – Zaman Grafiği

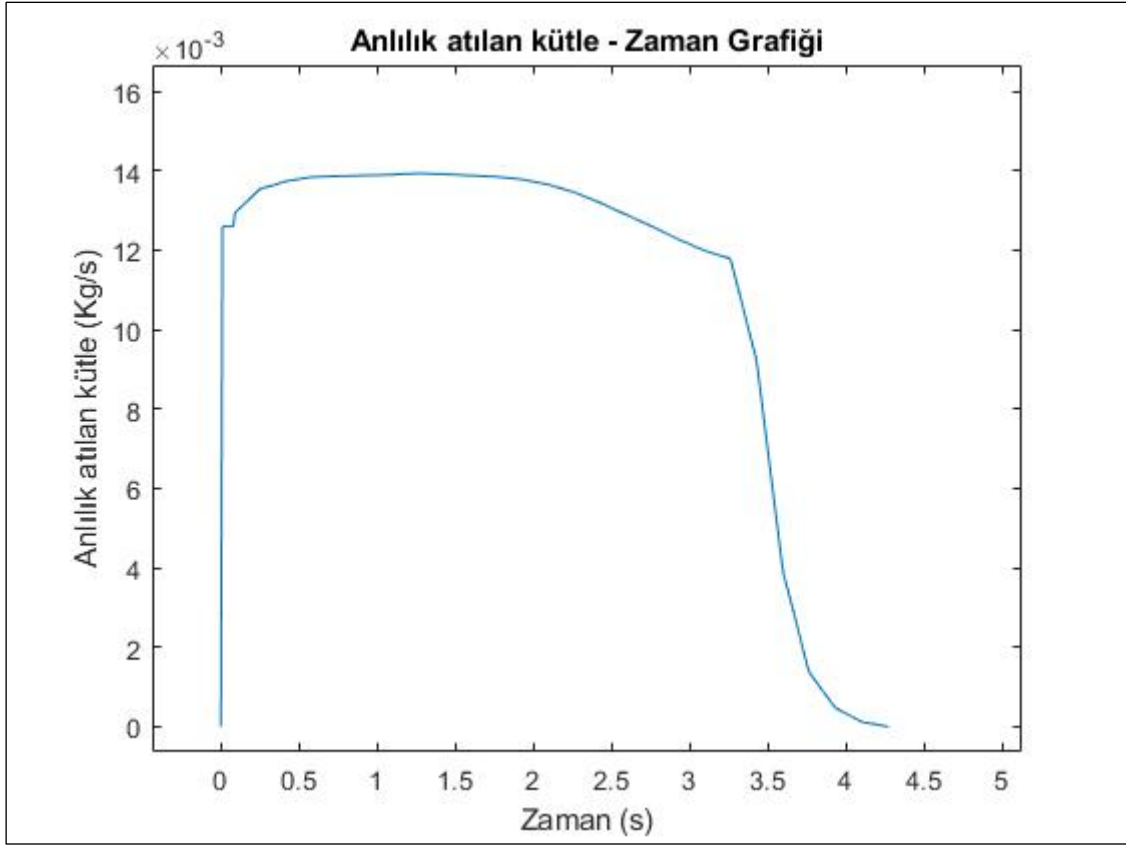
2.3.2. Zamana Bağlı Atılan Kütle Modeli

Yakıt kütleli debisinin, anlık itki kuvvetinin yerçekimi ve zamana bağlı olarak bulunması

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{m} \times g} \rightarrow \dot{m} = \frac{F}{I_{sp} \times g}$$

bağıntısına göre bulunmaktadır.

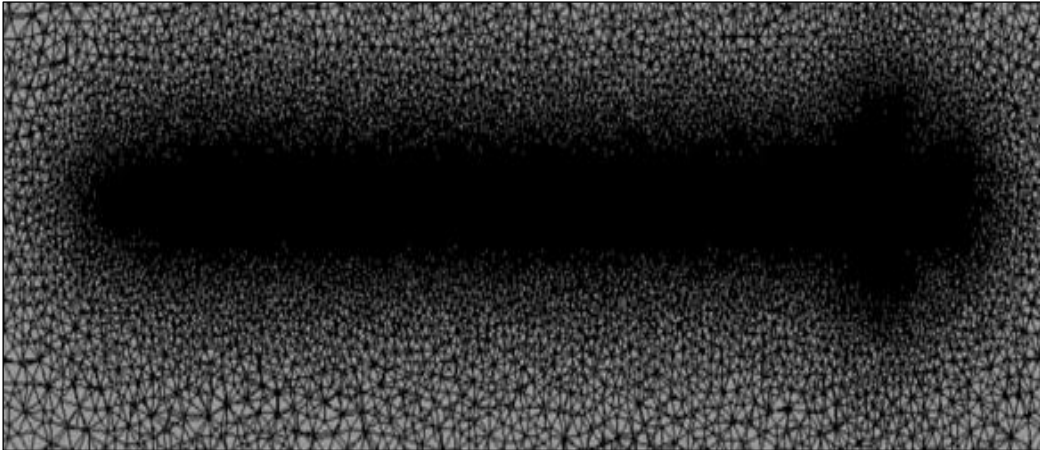
Kullanılan bu bağıntı ile elde edilen verilen 0,01 saniye aralığı için düzenlenerek Microsoft Excel dosya formatında veriler işlenmiştir. İşlenen veriler Matlab Simulink ortamına aktarılmıştır. Oluşturulan kodlar çalıştırıldığında elde edilen yoğunluk-yükseklik grafiği Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4. Anlık atılan kütle – zaman grafiği

2.4. Aerodinamik Model

Roketin sürüklenme katsayısını belirlemek için Ansys programı ile CFD akış yapılması tercih edilmiştir. Analizin mesh işleminde akışkanın roket üzerinde gelen hız dağılımını daha iyi gözlemleyebilmek için inflation mesh yöntemi atılmıştır. Böylelikle roketin yüzeyine daha sık ve düzenli mesh atılmıştır. Rokette kullanılan mesh yapısı **Şekil 5**'de verilmiştir ve bu mesh sonucundaki mesh kalite değerleri **Tablo 1**'de verilmiştir.



Şekil 5. Oluşturulan ağ yapısı görseli

Tablo 1. Oluşturulan ağ yapısının kalite değerleri

| Parametre | Skewness | Element Quality | Element Sayısı | Node Sayısı |
|-------------|-----------------------------|-----------------|----------------|-------------|
| Ağ Yapısı 1 | Maks: 0,8885 Ort: 0,2017 | Ort: 0,7658 | 4043741 | 926167 |

Mesh işlemi tamamlandıktan sonra havanın akış hızı 273 m/s $\cong 0.8$ Mach alınmıştır ve akış modeli olarak k-omega (2qn) kullanılmıştır. Zamandan bağımsız bir şekilde çözüm yapıp süreklilik 10^{-4} ve enerji 10^{-7} değerine yakınsayana kadar iterasyonlar koşturulmuştur. Analiz sonucunda elde edilen C_D sürüklenme katsayısı hesaplanmıştır. **Şekil 6**'da verilen görsel elde edilen sürüklenme değeri verilmiştir.



Şekil 6. Analiz sonucu elde edilen sürüklenme katsayısı

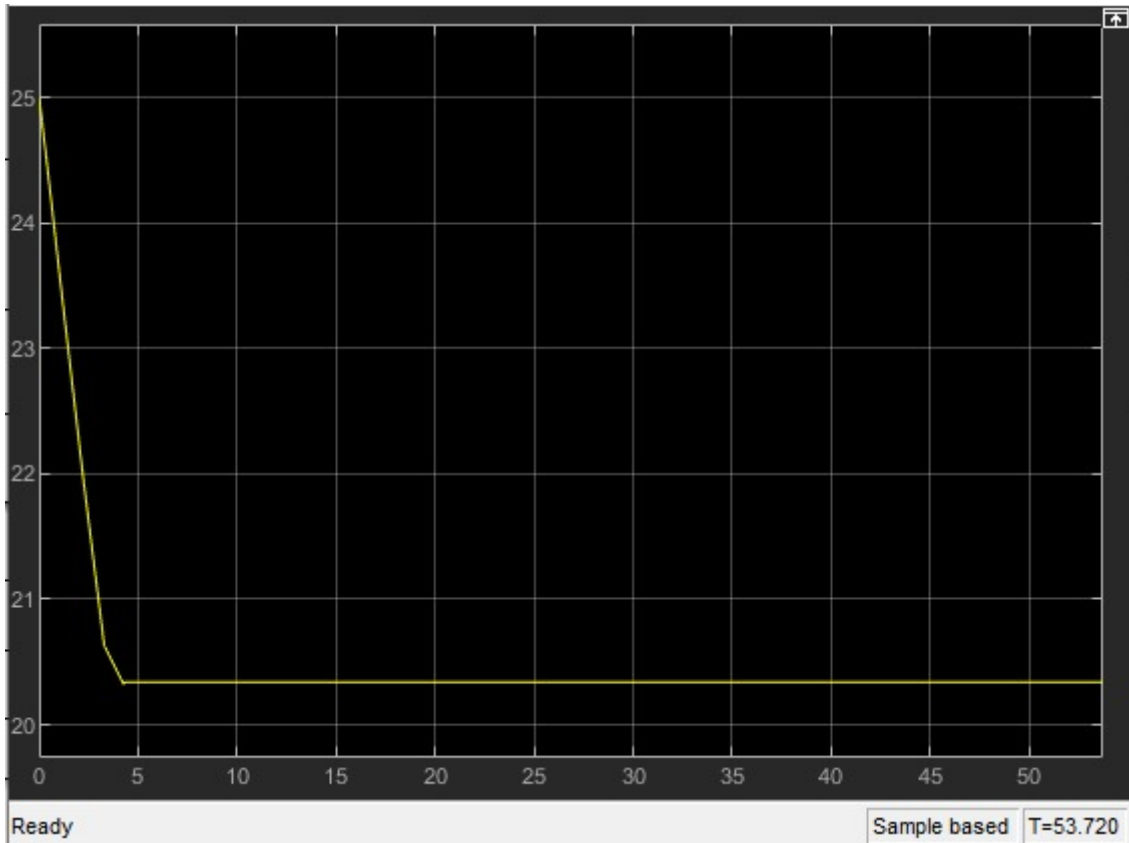
2.5 Benzetim Yapısı

Benzetim yapısı adı altında, verilen örnek parametreler kullanılarak teorik roket uçuş simülasyonu yapılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda istenilen çıktılar için, anlık itki, sürüklenme kuvveti, irtifa değişimine göre atmosferik parametreler, yakıt debisi ve yakıt debisine bağlı olarak toplam kütledeki değişim gibi giriş verilerinin Microsoft Excel ve Matlab Simulink programları kullanılarak hesaplamaları yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar ile verilen parametreler birlikte kullanılarak roket uçuş simülasyonu yapılmıştır.

Simülasyonda kullanılan giriş parametre hesaplamaları ve yöntemleri şu şekilde olmaktadır,

2.5.1 Hava yoğunluğu

Artan irtifa ile atmosferdeki hava yoğunluğu azalmaktadır. Azalan hava yoğunluğu ile doğru orantılı olarak hava sürtünmesi ve hava basıncı da azalmaktadır. Hava yoğunluğu sıcaklık, basınç ve yüksekliğe bağlı olarak değişmekte ve bu değişim parametreleri Matlab Simulink ortamında hesaplanarak uçuş benzetiminde giriş parametresi olarak kullanılmıştır.

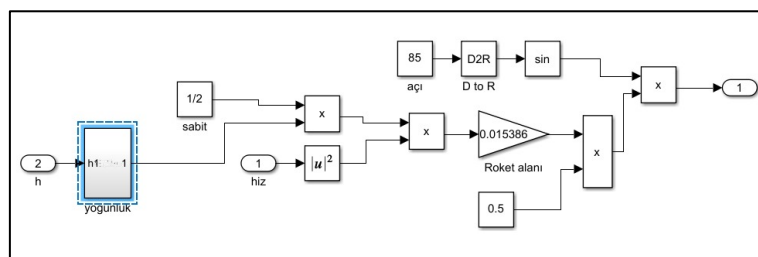


2.5.3 Sürüklenme kuvveti

Sürüklenme kuvveti, roketin hızına, kesit alanına, sürüklenme katsayı ve hava yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Sürüklenme kuvveti bu parametrelere bağlı olarak,

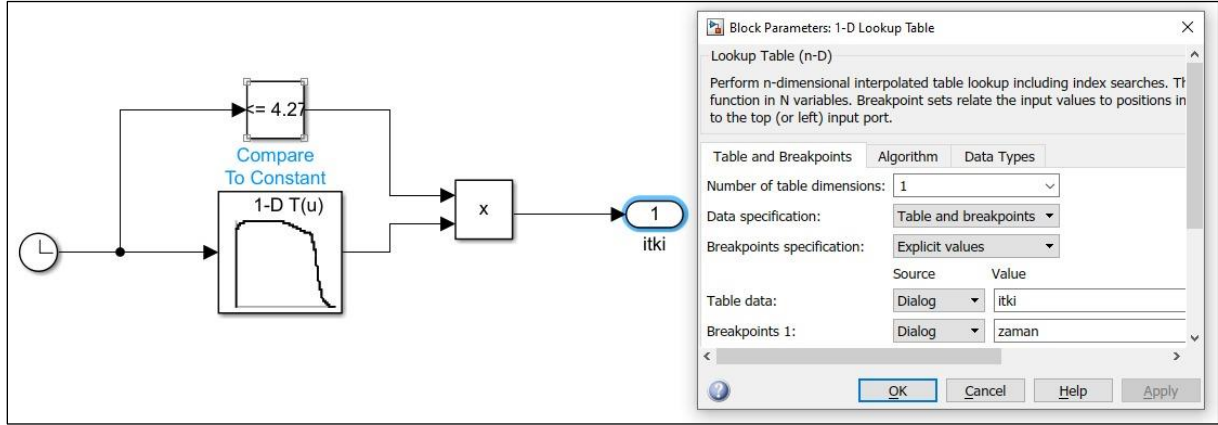
$$F_D = \frac{\rho \times V^2 \times A \times C_D}{2}$$

verilen bağıntı ile bulunmaktadır. Bu bağıntı, Matlab Simulink ortamında blok diyagramları kullanılarak analitik olarak hesaplanmıştır. Bağıntıda kullanılan sürüklenme katsayısı (C_D) “Aerodinamik Model” konu başlı altında da belirtilene uygun değer seçilerek bağıntıda kullanılmıştır. Sürüklenme kuvveti için oluşturulan değerde kesit alanı olarak bizlere verilen 0.14 çapındaki roketin kesit alanı girilmiştir ve oluşturulan blok diyagramı **Şekil 9**’da verilmiştir.



2.5.4 Anlık itki

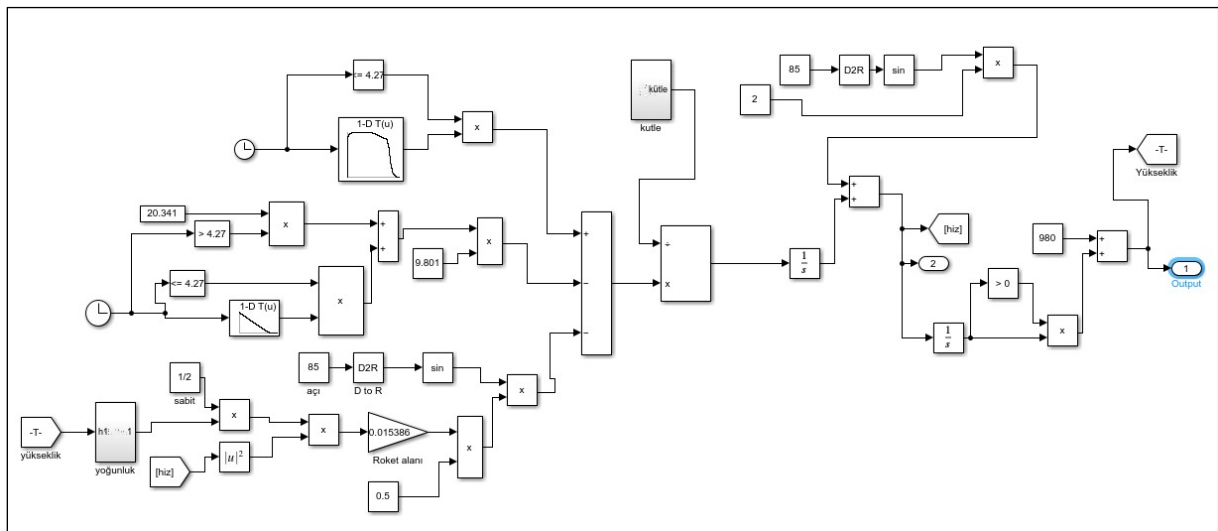
Anlık itki değerleri, Teknofest komitesi tarafından Microsoft Excel dosya formatında paylaşılan veriler doğrudan Matlab Simulink ortamında aktarılarak kullanılmıştır. Verilen itki kuvvetleri kullanılarak oluşturulan blok diyagramı **Şekil 10**'da verilmiştir.



Şekil 10. İtki kuvvetleri kullanılarak oluşturulan blok diyagramı

2.5.5 İrtifa ölçümü (z ekseni eksen hareketi)

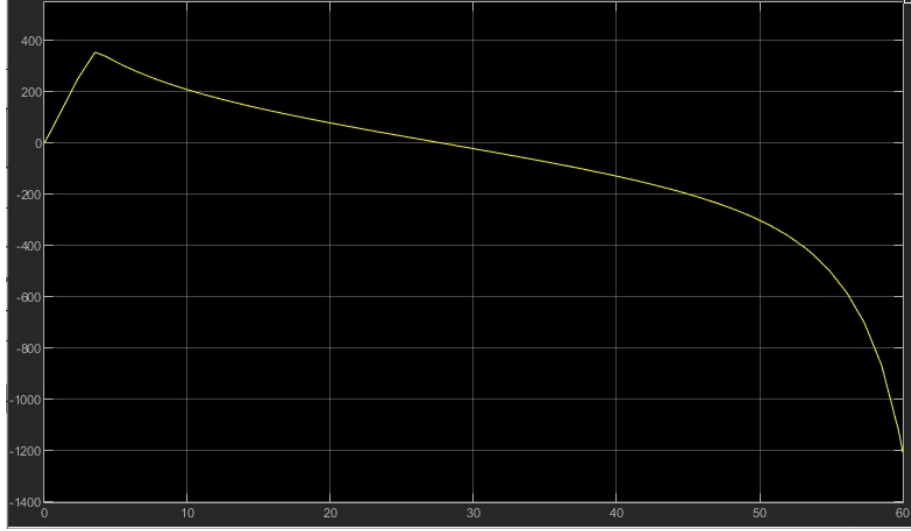
Teorik olarak uçuş benzetimi yapılan roketin verilen ve elde edilen parametreler kullanılarak Matlab Simulink ortamında blok diyagramları yardımıyla hesaplanmıştır. Hesaplamalara uygun olarak yine Matlab Simulink ortamında uçuş simülasyonu yapılarak zamana bağlı olarak irtifa ve hız değerleri grafikler üzerinden değerleri gözlemlenmiştir. Oluşturulan grafikler üzerinden maksimum yükseklik, maksimum hız değerleri analitik olarak elde edilmiştir. İrtifa ölçümü için oluşturulan blok diyagramı **Şekil 11**'de verilmiştir. Ayrıca oluşturulan bu diyagram çalıştırıldığında elde edilen irtifa-zaman grafiği **Şekil 12**'de ve elde edilen düşey hız-zaman grafiği de **Şekil 13**'de verilmiştir.



Şekil 11. İrtifa ölçümü için kullanılan blok diyagramı



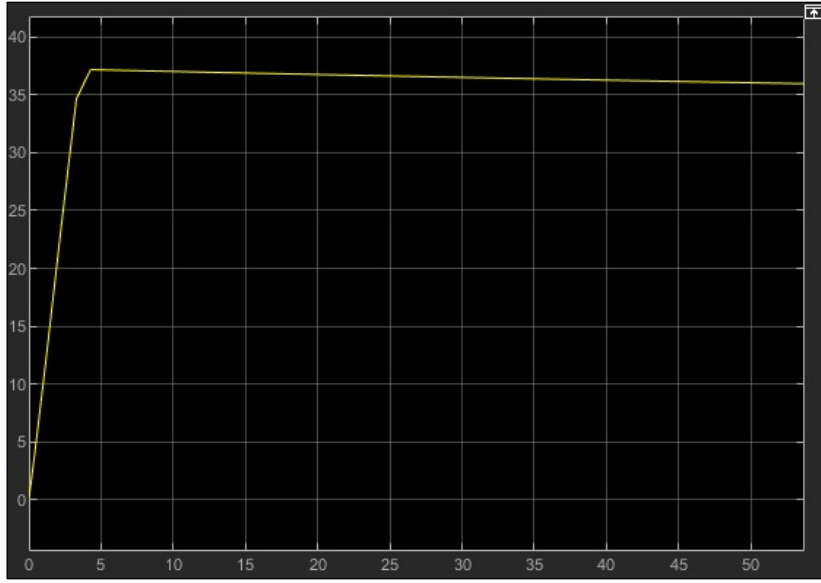
Şekil 12. İrtifa-Zaman grafiği



Şekil 13. Düşey Hız-Zaman grafiği

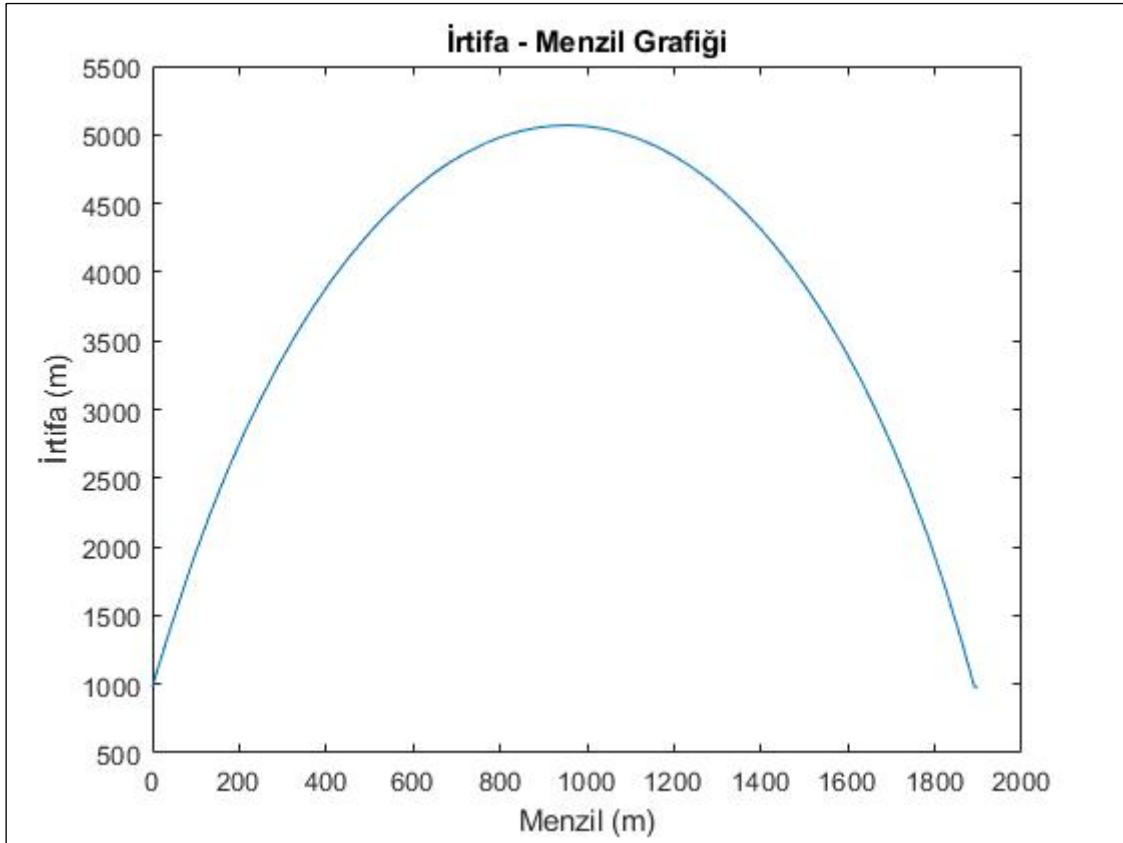
2.5.6 Menzil ölçümü (x ekseni hareketi)

Belirli bir açı ile, itki kuvveti eşliğinde hareket eden roketin uçuş zamanı boyunca z ekseni üzerinde yaptığını hareketlerine ek olarak yatay ekseninde de hareketine devam etmektedir. Yatayda yaptığı hareketinde ağırlığın bir önemi olmamaktadır. Yatay ekseninde yaptığı hareket hesaplamalarında bunun için ağırlık dikkate alınmayarak çözümler Matlab Simulink ve Microsoft Excel ortamında yapılmıştır. Çözümler için daha önce verilen parametreler ve verilen parametreler ile de istenilen çıktı değerlerine uygun olarak giriş parametreleri hesaplanmıştır. Hesaplanan giriş parametreleri Matlab Simulink ortamında blok diyagramları ile çözümü sağlanmıştır. Çözümler neticesinde yatay ekseninde zamana bağlı olarak aldığı yolu (menzil) ve yatay hızı grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen grafiklerden yatayda aldığı toplam mesafeyi ve maksimum yatay hızı saptanmıştır.

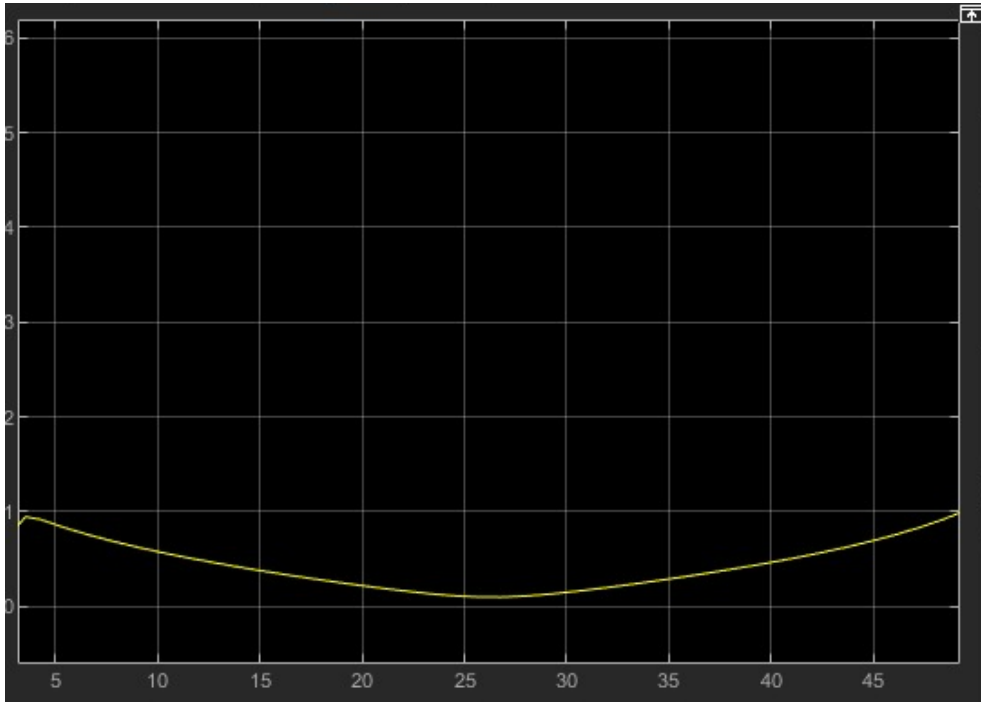


Şekil 16. Yatay Hız-Zaman grafiği

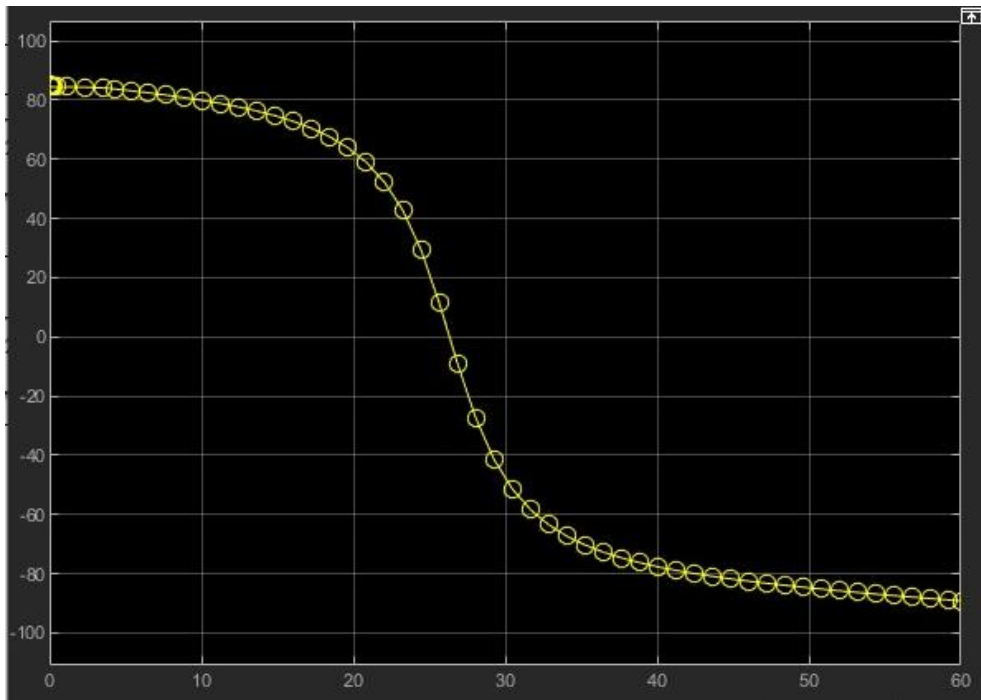
Düşey ve yatay eksenlerdeki hareketleri zamana bağlı olarak çözümleri sağlanmıştır. Tam uçuş simülasyonu benzetimi için roketin yatayda ve düşeyde aldığı yolları veren irtifa-menzil grafiği çözümü sağlanmalıdır. Bunun için elde edilen grafiklerin birlikte çözümü ile irtifa-menzil grafiği elde edilmiştir. Elde edilen yörünge grafiği **Şekil 17**'de verilmiştir.



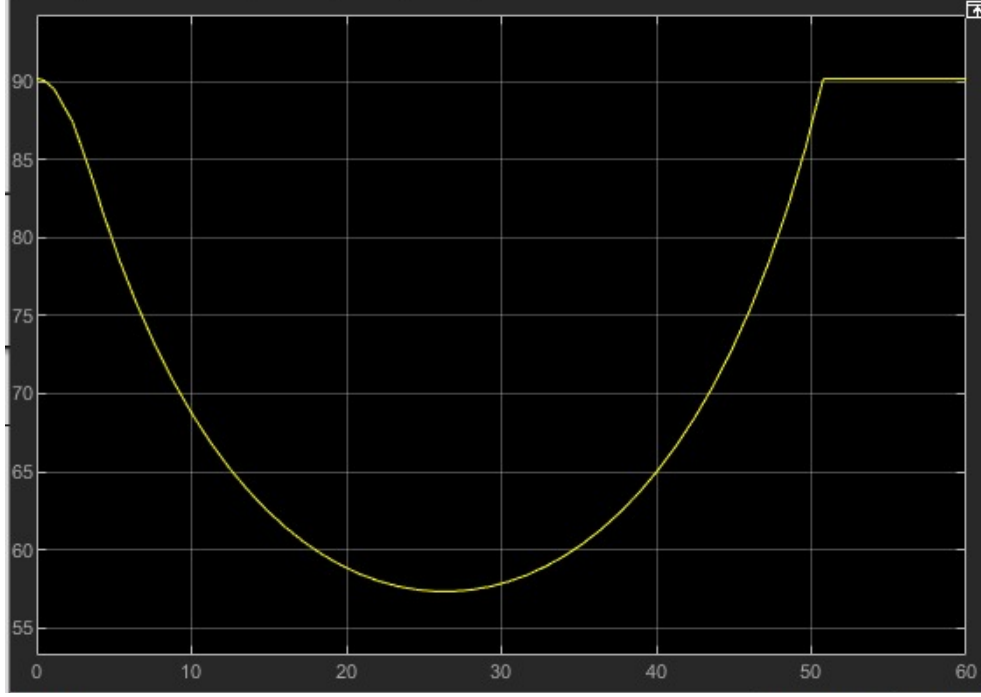
Şekil 17. İrtifa-Menzil grafiği



Şekil 18. Mach – zaman grafiği



Şekil 19. Uçuş yolu açısı – zaman grafiği



Şekil 19. Dinamik basınç – zaman grafiği

Maksimum dinamik basıncın roket için önemi nedir?

Artan yükseklikle beraber havanın yoğunluğu ve dolayısıyla basıncı azalmakta, azalan basınçla birlikte roketin maruz kalacağı direnç kuvveti de azalmaktadır. Azalan direnç kuvveti roketin uçuş irtifasının artmasına neden olmaktadır.

Maksimum dinamik basınç yüksekliği nedir?

Birçok yazar dinamik basıncı yalnızca sıkıştırılmaz akışlar için tanımlar . (Sıkıştırılabilir akışlar için, bu yazarlar darbe basıncı kavramını kullanır .) Bununla birlikte, dinamik basınç tanımını sıkıştırılabilir akışları içerecek şekilde genişletilebilir.

Söz konusu akışkan ideal bir gaz olarak kabul edilebilirse (ki bu genellikle hava için geçerlidir), dinamik basınç, akışkan basıncının ve Mach sayısının bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir .

3.Benzetim Çıktı Formatı

3.1

| | Değer |
|-----------------------------------|----------------|
| Maksimum Mach Sayısı [-] | 1.0665 |
| Tepe Noktası Pozisyonu [m] | [980, 0, 5112] |
| Tepe Noktası Hızı (bileşke) [m/s] | 36.89 |
| Tepe Noktası Mach Sayısı [-] | 0.109 |
| Tepe Noktası Zamanı [s] | 28.1 |

3.2.

| | OpenRocket Değeri (a) | Benzetim Değeri (b) | Yüzdece Fark (b-a)/a*100 |
|-------------------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Maksimum Mach Sayısı [-] | 0.79 | 0.92 | % 16.4 |
| Tepe Noktası Pozisyonu[m] | [210, 0, 4050] | [853, 0, 4876] | %306, %20 |
| Tepe Noktası hızı (bileşke)[m/s] | 8.2 | 32.46 | %295,8 |
| Tepe Noktası Mach Sayısı [-] | 0.05 | 0.096 | %92 |
| Tepe Noktası Zamanı [s] | 25.2 | 27.9 | % 10.7 |