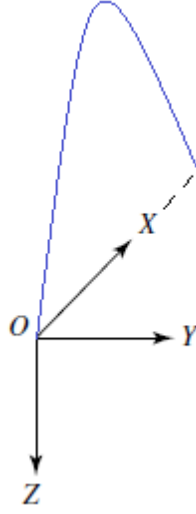


TEKNOFEST-2022 ROKET YARIŞMASI KTR AŞAMASI
ST FOCOUNT TAKIMI UÇUŞ BENZETİMİ VE RAPOR GEREKSİNİMLERİ

1 UÇUŞ BENZETİMİ GEREKSİNİMLERİ

1.1 Ateşleme Noktası Eksen Takımı



Şekil 1. Ateşleme Noktası Eksen Takımı ve Örnek Yörünge

1.2 Roket İçin Noktasal Kütle/Parçacık Varsayımı

Hesaplamalar roketin ağırlık merkezinde noktasal bir kütle/parçacık olduğu varsayılarak yapılacaktır.

1.3 Eksen hareketleri ve 2 Serbestlik Derecesi (DOF/Degree of Freedom)

Benzetimde roketin serbestlik derecesi 2 olacaktır. Yalnızca XZ eksenleri için birer doğrusal hareket serbestliği olacak ve açısal hareket bulunmayacaktır. Roket sadece XZ düzleminde hareket edecektir.

1.4 Başlangıç Koşulları

Şekil 1.1'deki eksenlerde $t=0$ için:

İlk uçuş yolu açısı/Flight path angle = $\theta_0 = 70^\circ$

$$v_{bileşke} = v = \sqrt{v_x^2 + v_z^2} = 0.0 \text{ m/s}$$

$$v_x = v \cos(\theta_0) = 0.0 \text{ m/s}$$

$$v_z = v \sin(\theta_0) = 0.0 \text{ m/s}$$

1.5 Dünyanın Dönüşü

Uçuş alçak irtifada olduğundan dünyanın dönüşü benzetime dahil edilmemiştir.

1.6 Yerçekimi İvmesi Sabiti

U.S. Standart Atmosfer Modeli'ne göre 2000 m deniz seviyesindeki 9.801 m/s^2 değeri kabul edilmiştir.

1.7 Motor İtme Kuvveti

Benzetime dahil edilmiştir. İtme değerleri M2020 için Thrustcurve.org'tan alınıp interpolasyon ile değerler aralıklara uygun olarak yerleştirilmiştir.

1.8 Aerodinamik Sürüklenme (Drag) Kuvveti

Atmosfer modeli ile benzetime dahil edilmiştir.

1.9 İtme ve Sürüklenme Kuvveti

İtme ve sürüklenme kuvvetinin hız vektörü ile çakışık olduğu varsayılmıştır.

1.10 Lift Kuvveti

Benzetime dahil edilmemiştir.

1.11 Rüzgar Etkisi

Benzetime dahil edilmemiştir.

1.12 Atmosfer Modeli

Ses hızı ve hava yoğunluğu için yüksekliğe bağlı değişken bir atmosfer modeli kullanılmıştır.

1.13 Benzetim Çözümü

For döngüsü içinde kümülatif olarak nümerik entegrasyon alınmıştır.

1.14 Benzetim Çözümü İçin Kullanılan Yazılım

Benzetim, MATLAB kodu yazılarak geliştirilmiştir.

1.15 Benzetim Çözümü Zaman Aralığı

Benzetim çözümü zaman aralığı 0.01 saniyedir.

2 RAPOR GEREKSİNİMLERİ

2.1 Kinematik ve Dinamik Denklemler

Benzetimde Kullanılacak İvme Denklemleri

1. İvme Denklemi

$$a = \frac{F_{Net}}{m}$$

Denklem 1.1

Burada F_D sürüklenme kuvveti olmak üzere Z eksenindeki ivme bulunmak istendiğinde

F_{Net} :

$$F_{Net} = F_{itki} * \sin(\theta_0) - F_D * \sin(\theta_0) - mg \text{ ise:}$$

$$a_z = \frac{F_{Net}}{m} = \frac{F_{itki} * \sin(\theta_0) - F_D * \sin(\theta_0) - mg}{m}$$

Denklem 1.2

Z eksenini yukarı yönlü negatif olduğundan F_{Net} eksi ile de çarpılabilir:

$$a_z = \frac{-F_{Net}}{m} = \frac{-F_{itki} * \sin(\theta_0) + F_D * \sin(\theta_0) + mg}{m}$$

Denklem 1.3

Burada bir diğer kritik nokta ise kütlenin yanma süresi boyunca değişken olmasıdır.

İleride anlatılmıştır.

Benzetimde Kullanılacak Hız Denklemleri

1. Hız Denklemi

İvmeli hareket için:

$$v(t) = v_0 \pm at$$

Denklem 1.4

Bu denklemde ivme (a) yerine 1.6'daki Yerçekimi İvmesi Sabiti konur ve ilk hız (v_0) yerine de v_{z0} konur. Şekil 1.1'de görüleceği gibi Z eksenini aşağı yönlü pozitif kabul edildiğinden Yerçekimi İvmesi de pozitif kabul edilmiştir. Roket yukarı çıkarken benzetimde v_{z0} negatif olacaktır.

$$v_z(t) = -v_{z0} + gt$$

Denklem 1.5

v_{z0} yerine başlangıç bileşke hızı ile ifade edilirse:

$$v_z(t) = -v_0 \sin(\theta_0) + gt$$

Denklem 1.6

Benzetimde Kullanılacak Konum Denklemleri

1. Konum Denklemi

Tepe noktasını benzetimde nümerik entegrasyon ile elde etmek için aşağıdaki konum denklemi kullanılacaktır. Bu hareket hem sabit hızlı hem de ivmeli hareket için geçerli konum denklemidir.

$$z(t) = \int_0^{t_1} v(t) dt$$

Denklem 1.7

t_1 = Tepe noktasına ulaşma süresi

$v(t)$ yerine denklem 1.3 konulursa aşağıdaki denklem elde edilir:

$$z(t) = \int_0^{t_1} -v_0 \sin(\theta_0) + gt dt$$

Denklem 1.8

t_1 'in bulunması “Benzetimin Yapısı” başlığı altında açıklanacaktır.

2. Konum Denklemi

Sabit hızlı hareket için:

$$x(t) = \int v(t) dt = \int v dt = vt$$

Denklem 1.9

Bu denklem ile X eksenindeki konuma ulaşılacak istendiğinden v yerine v_{x0} yazılır:

$$x(t) = v_{x0}t$$

Denklem 1.10

Bileşke hız ile ifade edilirse:

$$x(t) = v_0 \cos(\theta_0)t$$

Denklem 1.11

Benzetimde Kullanılacak Uçuş Yolu Açısı Denklemleri

1. Uçuş Yolu Açısı Denklemi

Uçuş yolu açısının zamana göre değişimi, v_z ve v_x 'in oranlarının tanjant ters trigonometrik fonksiyonu (arctan) sayesinde bulunabilir.

v_z 'nin denklem 1.3'e eşit olduğu ve v_x 'in de sabit olup bileşke hızın yatay bileşeni olduğu bilindiğine göre:

θ_0 = başlangıç koşulu açı değeri.

$$\theta(t) = \arctan\left(\frac{v_z}{v_x}\right) = \arctan\left(\frac{-v_0 \sin(\theta_0) + gt}{v_0 \cos(\theta_0)}\right)$$

Denklem 1.12

2.2 Atmosfer Modeli

Yükseklığe bağlı olarak hava yoğunluğunu değiştiren bir model oluşturulmuştur.

Hava yoğunluğu denklemi:

$$\rho = \frac{p}{RT}$$

Denklem 1.13

Başlangıçta $T=288.15$ Kelvin (15 Celsius) olarak varsayılmıştır.

Her 100 metrede bir 0.5 Celsius düşürülmüştür.

R: Kuru hava için spesifik gaz sabitidir ve değeri: 287.058 (J / (kg · K))

P, dinamik basınçtır ve yüksekliğe göre şu denklemden türetilmektedir:

$$h = \frac{\left(\left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{1}{5.257}} - 1\right) \times (T + 273.15)}{0.0065}$$

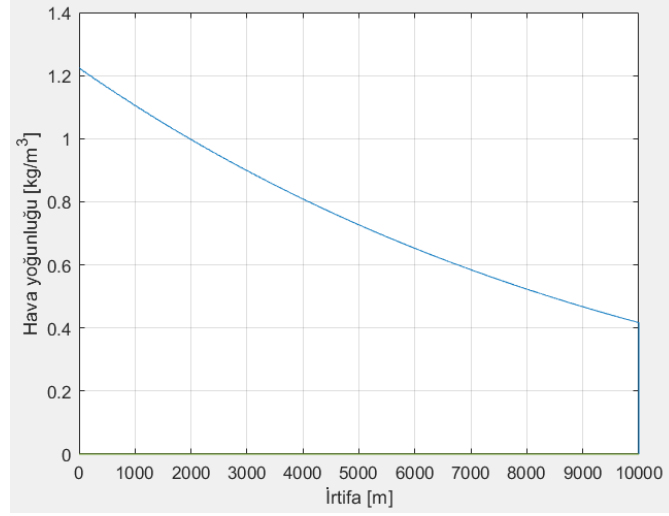
Denklem 1.14

Bu denklemden basınç elde edilirse:

$$P = \frac{P_0}{\left(\frac{0.0065 \times h}{300} + 1\right)^{5.257}}$$

Denklem 1.15

$$P_0 = 101.325 \text{ Pa}$$



Şekil 2.1

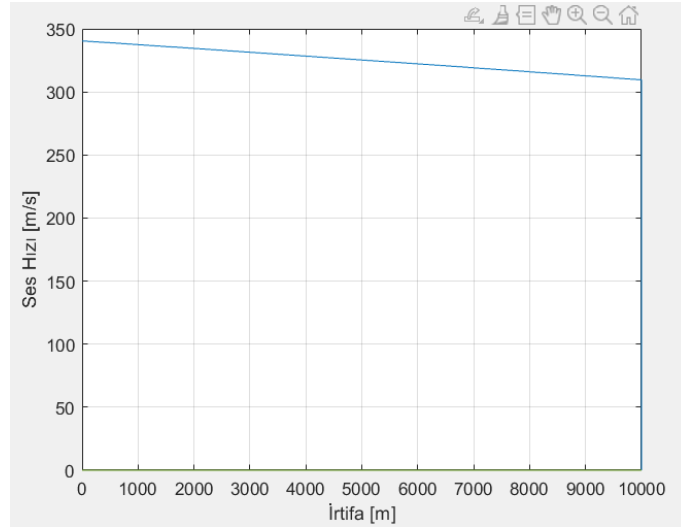
Atmosfer modelinde hava yoğunluğunun deniz seviyesinden 10000 metreye kadar olan değişimi.

Ses hızının basınca dolayısıyla yüksekliğe göre değişimi:

$$c = \sqrt{\frac{Ks}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma \times p}{\rho}}$$

$$\gamma = 1.4 \text{ (Sabit) – Denklem 1.16}$$

Basınç ve hava yoğunluğu yüksekliğe bağlı olarak yukarıda belirtildiği gibi hesaplanmıştır.



Şekil 2.2

Atmosfer modelinde ses hızının deniz seviyesinden 10000 metreye kadar olan değişimi.

2.3 Motor Modeli

Zamana Bağlı İtki Kuvveti Modeli

Thrustcurve.org'tan roketin gerçek motoru M2020 için alınan itki ve zaman değerleri:

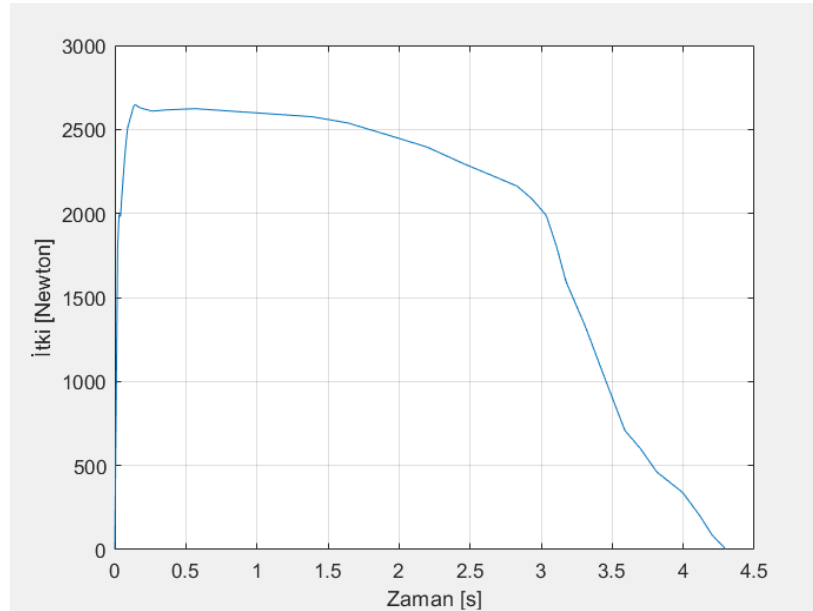
```
itki_m2020=[0 2070.11 1929.8 2147.6 2369. 2505.53 2649.45 2627.31 2608.86 2616.2  
2623.62 2575.65 2538.74 2450.18 2394.83 2295.2 2206.64 2162.36 2088.56 1988.93  
1800.74 1594.1 1335.79 1014.76 708.487 601.476 461.255 339.483 202.952 88.561 0];
```

```
zaman_verisi=[0.0 0.023 0.036 0.053 0.073 0.089 0.136 0.182 0.262 0.364 0.566 1.387  
1.639 1.986 2.198 2.457 2.708 2.831 2.933 3.036 3.109 3.175 3.307 3.45 3.589 3.698  
3.814 3.996 4.115 4.201 4.301];
```

```
t_yanma=0:0.01:4.301;
```

```
itki=interp1(zaman_verisi, itki_m2020, t_yanma);  
itki=vpa(itki)
```

Her 0.01 saniye aralıktaki itki değerine ulaşmak için MATLAB üstünde interpolasyon (ara değerlendirme) yapılmıştır.



Şekil 2.3 – Zamana bağlı itki kuvveti modeli.

Zamana Bağlı Atılan Kütle Modeli

Motorun atılan kütle debisi aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır:

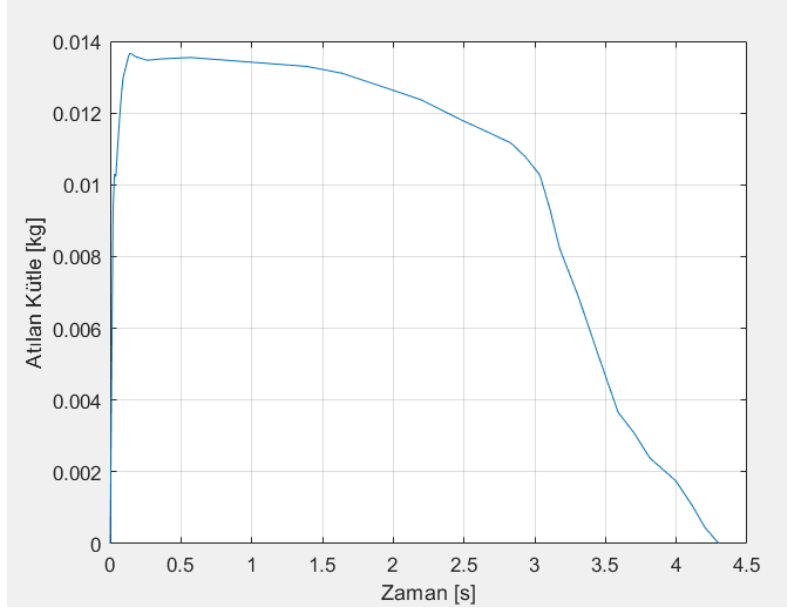
$$\dot{m} = \frac{F_{itki}}{\frac{ISP}{0.01} \times g}$$

Denklem 1.17

ISP değeri motor katalogundan alınmıştır ve değeri 197.63 sn'dir.

g , benzetimde kullanılan yerçekimi değeridir.

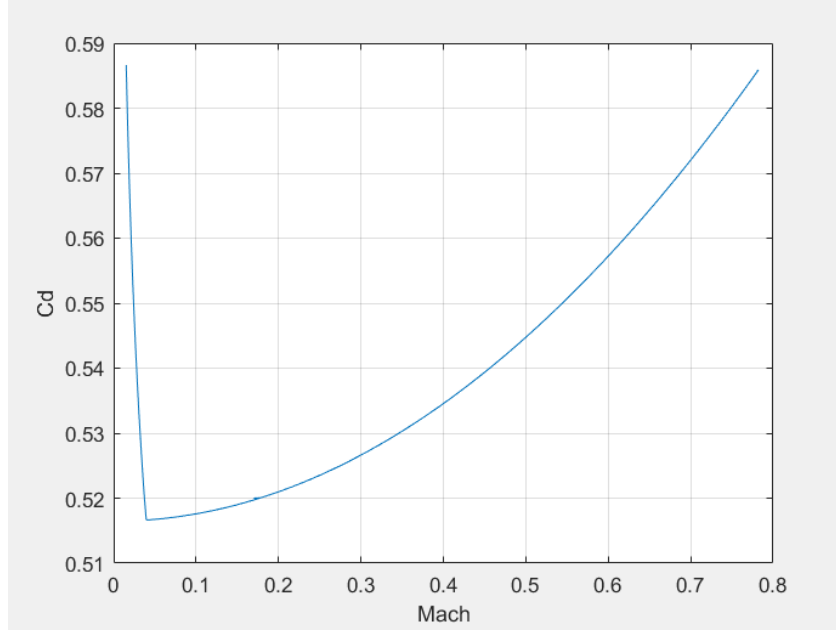
F_{itki} , motor itki kuvveti modelindeki anlık itkidir.



Şekil 2.4 – Atılan kütle ve zaman grafiği.

2.4 Aerodinamik Model

Sürüklenme katsayısı (C_d) ve mach verisi, OpenRocket'ten alınmıştır. OpenRocket, yarışmada standart bir simülasyon yazılımı olduğundan buradaki değerlerin gerçeğe yakın olduğu varsayılmıştır. Veriye 0.01 saniye aralık için interpolasyon uygulanmıştır.



Şekil 2.5 – Cd – Mach grafiği

Benzetim Yapısı

Benzetim, MATLAB programlama dilinde kodlanmıştır. Ek bir araç kullanılmamıştır.

```
clear all; clc; close all;
```

```
g=9.801; % yerçekimi ivmesi
% başlangıç koşulları
v0=0.01; % ilk bileşke hız
teta0=85; % derece
h0=0; % atış noktası rakımı
m0=28.4; % kg
my0=4.659; % yakıt başlangıç kütlesi
isp=197.6; % özgül itki
rd=0.128; % roket çapı
A=pi*(rd/2)^2;
gamma=1.4;
dt=0.01; % zaman aralığı
```

```
itki_m2020=[0 2070.11 1929.8 2147.6 2369. 2505.53 2649.45 2627.31 2608.86 2616.2
2623.62 2575.65 2538.74 2450.18 2394.83 2295.2 2206.64 2162.36 2088.56 1988.93
1800.74 1594.1 1335.79 1014.76 708.487 601.476 461.255 339.483 202.952 88.561 0];
% M2020 için thrustcurve'den alınan değerler
zaman_verisi=[0.0 0.023 0.036 0.053 0.073 0.089 0.136 0.182 0.262 0.364 0.566 1.387
1.639 1.986 2.198 2.457 2.708 2.831 2.933 3.036 3.109 3.175 3.307 3.45 3.589 3.698
3.814 3.996 4.115 4.201 4.301];
t_yanma=0:0.01:4.301;
```

```
itki=interp1(zaman_verisi, itki_m2020, t_yanma);
itki=vpa(itki);
```

```
% değerler eksik olmadığından interpolasyona gerek duyulmuyor
% m_debi=itki/(isp*g);
```

```
R=287.058; % kuru hava için zgl gaz sabiti
T=288.15; % sıcaklık
P0=101325;
m=zeros(size(t_yanma));
az_yanma=zeros(size(t_yanma));
ax_yanma=zeros(size(t_yanma));
%v_yanma=zeros(size(t_yanma));
vx_yanma=zeros(size(t_yanma));
vz_yanma=zeros(size(t_yanma));
hz_yanma=zeros(size(t_yanma)); % z eksenini
xm_yanma=zeros(size(t_yanma)); % x eksenini mesafe
p_yanma=zeros(size(t_yanma));
Fd=zeros(size(t_yanma));
dhava_yanma=zeros(size(t_yanma)); % hava yoğunluğu
```

```
m(1)=m0;
%v_yanma(1)=v0;
vz_yanma(1)=-v0*sin(deg2rad(teta0));
vx_yanma(1)=v0*cos(deg2rad(teta0));
hz_yanma(1)=-h0;
p_yanma(1)=100*((44331.514-h0)/11880.516)^(1/0.1902632); % yükseklik-basınç formülü
dhava_yanma(1)=p_yanma(1)/(R*T);
```

```
cd0_excel=[0.015235 0.015749 0.016726 0.017932 0.019357 0.020978 0.022756 0.024595
0.02654 0.028601 0.0307 0.032926 0.035139 0.037383 0.039651 0.04194 0.044248 0.04655
0.048875 0.05121 0.053556 0.055911 0.058278 0.060653 0.063036 0.065428 0.067828
0.070191 0.072566 0.074951 0.077347 0.079752 0.082219 0.084689 0.087161 0.089635
0.092111 0.094555 0.098219 0.10373 0.11203 0.12443 0.13691 0.14942 0.16196 0.1745
0.18712 0.19973 0.21235 0.22499 0.23762 0.25027 0.26292 0.27559 0.2883 0.3009 0.31367
0.3263 0.33904 0.35176 0.36444 0.3771 0.38971 0.40228 0.41479 0.42727 0.4397 0.45206
0.46436 0.47659 0.48876 0.50085 0.51287 0.52483 0.53673 0.54854 0.560 0.57184 0.58333
0.59467 0.60589 0.61701 0.62804 0.63896 0.6497 0.66047 0.6710 0.68152 0.69178 0.7018
0.71165 0.72116 0.73016 0.73835 0.74561 0.7521 0.75797 0.76321 0.76777 0.77165
0.77484 0.77733 0.77907 0.7803 0.78126 0.78189 0.78213 0.78204 0.781 0.7811 0.78038
0.77941 0.77809 0.77642 0.77434 0.77192 0.76921 0.76627 0.76335 0.76042 0.75751
0.75462 0.75174 0.74886 0.746 0.7431 0.7403 0.7375 0.73472 0.73197 0.72919 0.7264
0.72365 0.72092 0.7182 0.71552 0.71282 0.71013 0.70747 0.7048 0.70212 0.69947 0.69685
0.69422 0.69161 0.689 0.68639 0.68382 0.68127 0.67872 0.67621 0.6736 0.67115 0.66863
0.6661 0.66359 0.66109 0.65862 0.65617 0.65373 0.65128 0.64886 0.64646 0.64409 0.6417
0.63926 0.63684 0.63445 0.63206 0.62967 0.6273 0.6249 0.62259 0.62024 0.6179 0.61559
0.61327 0.61098 0.60867 0.60638 0.6041 0.60183 0.59959 0.59734 0.59504 0.59276
0.59052 0.58829 0.58608 0.58387 0.58166 0.57946 0.57727 0.57508 0.57291 0.57072
0.56853 0.56635 0.5642 0.56207 0.55991 0.55778 0.55568 0.55353 0.55138 0.54926
0.54719 0.54506 0.54295 0.54087 0.53877 0.53665 0.53456 0.53247 0.53042 0.52837
0.5263 0.52425 0.5222 0.52015 0.51812 0.5160 0.51402 0.512 0.5099 0.50799 0.50597
0.5039 0.50198 0.50001 0.49801 0.4960 0.49408 0.49211 0.49013 0.48816 0.48618 0.48422
0.48228 0.48036 0.47843 0.47649 0.47455 0.47263 0.47068 0.46877 0.46684 0.46491 0.463
0.4611 0.45919 0.45726 0.45534 0.45344 0.45155 0.44964 0.44773 0.44584 0.44398
0.44216 0.44031 0.4384 0.43656 0.43467 0.43281 0.43097 0.4291 0.4272 0.42538 0.42355
0.42174 0.4199 0.41812 0.41631 0.41449 0.41267 0.41084 0.40901 0.40721 0.40541 0.4036
0.4018 0.40001 0.39823 0.39641 0.39461 0.39283 0.39106 0.389 0.38754 0.38577 0.38404
```

0.38226 0.38047 0.37871 0.37693 0.37513 0.37337 0.37161 0.36985 0.36814 0.3664
0.36465 0.36288 0.36118 0.35949 0.35775 0.35602 0.35431 0.3526 0.3509 0.34916 0.34744
0.34569 0.34395 0.3422 0.34048 0.33878 0.3370 0.33536 0.33365 0.33191 0.33023 0.32856
0.3269 0.32523 0.32356 0.32189 0.32023 0.31853 0.31684 0.31515 0.31345 0.31179
0.31013 0.30849 0.3068 0.30511 0.30345 0.3018 0.30012 0.29846 0.2968 0.29515 0.293
0.29187 0.29024 0.28864 0.28696 0.2853 0.28366 0.28199 0.28035 0.27875 0.27714
0.27551 0.27385 0.2722 0.27062 0.26901 0.26736 0.26572 0.26414 0.26252 0.26091
0.25937 0.2578 0.25624 0.25468 0.2531 0.2514 0.24977 0.24812 0.2465 0.24487 0.24321
0.24158 0.23994 0.23832 0.23673 0.23512 0.23351 0.23195 0.23036 0.22876 0.22719
0.22561 0.22407 0.22252 0.22097 0.2194 0.2178 0.21621 0.21459 0.21292 0.21136 0.20977
0.20821 0.2067 0.20513 0.20353 0.20191 0.20034 0.19882 0.19723 0.19562 0.19408
0.19251 0.19093 0.18935 0.1878 0.18627 0.18476 0.18332 0.1818 0.18019 0.17863 0.17
0.17556 0.17409 0.17251 0.1709 0.1692 0.16777 0.16637 0.16477 0.16318 0.16159 0.16001
0.15842 0.15683 0.15531 0.1538 0.15234 0.15077 0.14925 0.14771 0.14621 0.14469
0.14327 0.14173 0.14015 0.13866 0.13711 0.13548 0.1339 0.13235 0.13079 0.12927 0.1277
0.12629 0.12484 0.12329 0.12178 0.12019 0.11865 0.11701 0.11544 0.11387 0.1123
0.11085 0.10934 0.10772 0.10623 0.1048 0.1035 0.10204 0.1005 0.099024 0.097403
0.09588 0.09441];
mach_excel=[0.58663 0.58384 0.57884 0.57317 0.56708 0.56082 0.55463 0.54885 0.5433
0.53801 0.533 0.52831 0.52395 0.51989 0.51664 0.51666 0.51668 0.5167 0.51673 .51676
0.51678 0.51681 0.51684 0.51687 0.51691 0.51694 0.51698 0.51702 0.51705 0.51709
0.51713 0.51718 0.51722 0.51727 0.51732 0.51737 0.51742 0.51747 0.51755 0.51767
0.51788 0.51821 0.51858 0.51898 0.51942 0.5199 0.52041 0.52097 0.52155 0.52218
0.52284 0.52354 0.52427 0.52504 0.52585 0.5267 0.52758 0.5285 0.52945 0.53045 0.53148
0.53254 0.53363 0.53476 0.53592 0.53711 0.53833 0.53958 0.54086 0.54216 0.54349
0.54485 0.54623 0.54764 0.54907 0.55052 0.552 0.55349 0.55499 0.55651 0.55804 0.55958
0.56114 0.56272 0.5643 0.56589 0.5675 0.56911 0.57071 0.5723 0.57388 0.57543 0.57692
0.57829 0.57952 0.58062 0.58163 0.58254 0.58334 0.58402 0.58458 0.58502 0.58533
0.58555 0.58572 0.58583 0.58587 0.58586 0.5858 0.5857 0.58556 0.58539 0.58516 0.58486
0.58449 0.58406 0.58359 0.58308 0.58257 0.58206 0.58155 0.58106 0.58056 0.58007
.57958 0.5791 0.57862 0.57815 0.57768 0.57722 0.57676 0.5763 0.57584 0.57539 0.57495
0.57451 0.57407 0.57364 0.57321 0.57278 0.57235 0.57193 0.57151 0.57109 0.57068
.57027 0.56986 0.56946 0.56907 0.56867 0.56829 0.5679 0.56751 0.56713 0.56674 0.56636
0.56599 0.56562 0.56525 0.56489 0.56452 0.56417 0.56381 0.56346 0.56312 0.56276
0.56241 0.56206 0.56172 0.56138 0.56104 0.5607 0.56037 0.56004 0.55971 0.55939
0.55906 0.55874 0.55842 0.55811 0.55779 0.55748 0.55718 0.55687 0.55656 0.55625
0.55595 0.55565 0.55536 0.55506 0.55477 0.55448 0.55419 0.55391 0.55363 0.55334
0.55306 0.55278 0.5525 0.55223 0.55195 0.55168 0.55142 0.55115 0.55088 0.55061
0.55036 0.55009 0.54983 0.54958 0.54932 0.54906 0.54881 0.54855 0.54831 0.54806
0.54781 0.54757 0.54732 0.54708 0.54684 0.5466 0.54636 .54613 0.5459 0.54566 0.54543
0.5452 0.54498 0.54475 0.54453 0.5443 0.54408 0.54386 0.54364 0.54342 0.54321 0.54299
0.54278 0.54257 0.54236 0.54215 0.54194 0.54173 0.54153 0.54132 0.54112 0.54091
.54071 0.54051 0.54031 0.54011 0.53992 0.53972 0.53953 0.53933 0.53914 0.53894
0.53876 0.53858 0.53839 0.5382 0.53802 0.53783 0.53765 0.53747 0.53729 0.5371 0.53693
0.53675 0.53658 0.5364 0.53623 0.53606 0.53589 0.53572 0.53555 0.53538 0.53521
0.53505 0.53488 0.53472 0.53455 0.53439 0.53423 0.53407 0.53391 0.53375 0.5336
0.53344 0.53329 0.53314 0.53298 0.53283 0.53268 0.53252 0.53237 0.53222 0.53207
0.53193 0.53178 0.53164 0.53149 0.53135 0.53121 0.53107 0.53093 0.53079 0.53065
0.53052 0.53038 0.53024 0.53011 0.52997 0.52983 0.5297 0.52957 0.52943 0.5293 0.52917
0.52904 0.52891 0.52879 0.52866 0.52854 0.52842 0.52829 0.52817 0.52805 0.52793
0.52781 0.52769 0.52757 0.52745 0.52733 0.52722 0.5271 0.52698 0.52687 0.52675
0.52664 0.52653 0.52642 0.52631 0.5262 0.52609 0.52598 0.52588 0.52577 0.52566
0.52555 0.52545 0.52534 0.52524 0.52514 0.52504 0.52493 0.52483 0.52474 0.52464
0.52454 0.52444 0.52434 0.52425 0.52415 0.52406 0.52397 0.52388 0.52379 0.5237 0.5236
0.52351 0.52342 0.52333 0.52323 0.52314 0.52305 0.52296 0.52288 0.52279 0.52271

```

0.52262 0.52254 0.52246 0.52237 0.52229 0.52221 0.52213 0.52205 0.52198 0.5219
0.52182 0.52174 0.52166 0.52158 0.52151 0.52143 0.52136 0.52129 0.52121 0.52114
0.52107 0.52099 0.52093 0.52085 0.52078 0.52071 0.52065 0.52058 0.52051 0.52044
0.52038 0.52032 0.52026 0.52019 0.52013 0.52006 0.52 0.51994 0.51988 0.51982 0.51976
0.5197 0.51964 0.51959 0.51953 0.51947 0.51941 0.51935 0.51929 0.51924 0.51918
0.51913 0.51908 0.51903 0.51898 0.51892 0.51887 0.51882 0.51878 0.51873 0.51868
0.51863 0.51858 0.51853 0.51848 0.51844 0.51839 0.51835 0.5183 0.51826 0.51822
0.51818 0.51813 0.51809 0.51805 0.51801 0.51796 0.51792 0.51788 0.51785 0.51781
0.51777 0.51773 0.5177 0.51767 0.51764 0.5176 0.51757 0.51753 0.5175 0.5175];
cd_index=1;
mach_sayisi_yanma=zeros(size(t_yanma));

for i=2:length(t_yanma)
    m(i)=m(i-1)-(itki(i)/(((isp/dt)*g))); % 4.23 sn boyunca kütlenin değişimi
    h_mach=sqrt((gamma*p_yanma(i-1))/dhava_yanma(i-1)); % hesaplanan mach-irtifaya
göre
    vmach=-vz_yanma(i-1)/h_mach; % m/sn'den mach'a geçiş
    mach_sayisi_yanma(i)=vmach;
    [mach, cd_index]=min(abs(mach_excel-vmach)); % en yakın mach değerinden cd
değerini bulma
    cd=cd0_excel(cd_index);
    p_yanma(i)=P0/((((-hz_yanma(i-1)*0.0065)/(T))+1)^5.257);
    dhava_yanma(i)=p_yanma(i)/(R*T);
    Fd(i)=(dhava_yanma(i)*cd*(vz_yanma(i-1)^2)*A)/2;
    Fnet_z=itki(i)*sin(deg2rad(teta0))-(Fd(i)*sin(deg2rad(teta0))+m(i)*g);
    Fnet_x=itki(i)*cos(deg2rad(teta0))-(Fd(i)*cos(deg2rad(teta0)));
    az_yanma(i)=-Fnet_z/m(i);
    ax_yanma(i)=-Fnet_x/m(i);
    vz_yanma(i)=vz_yanma(i-1)+az_yanma(i)*dt;
    vx_yanma(i)=vx_yanma(i-1)+ax_yanma(i)*dt;
    hz_yanma(i)=hz_yanma(i-1)+vz_yanma(i)*dt+(1/2)*az_yanma(i)*dt^2;
    xm_yanma(i)=xm_yanma(i-1)+xm_yanma(i)*dt+(1/2)*ax_yanma(i)*dt^2;
    T=T-(fix(abs(hz_yanma(i-1)-hz_yanma(i)))/100)*0.5;
end

az_yanma=vpa(az_yanma);
min(vz_yanma);
hz_yanma=vpa(hz_yanma);

t2=4.301:dt:50;
az=zeros(size(t2));
ax=zeros(size(t2));
vx=zeros(size(t2));
vz=zeros(size(t2));
hz=zeros(size(t2));
xm=zeros(size(t2));
p=zeros(size(t2));
FD=zeros(size(t2));
dhava=zeros(size(t2));

dhava(1)=dhava_yanma(end);
vx(1)=vx_yanma(end);
vz(1)=vz_yanma(end);
hz(1)=hz_yanma(end);
p(1)=p_yanma(end);

```

```

FD(1)=Fd(end);
m_son=m(end);
t_apogee=0;
apogee_index=0;
mach_sayisi=zeros(size(t2));
mach_sayisi(1)=mach_sayisi_yanma(end);
cd3000_excel=[0.4512 0.4099 0.3885 0.3741 0.3633 0.3542 0.3468 0.3415 0.3398 0.3805
0.4205 0.4083 0.4079 0.3990 0.3900 0.3773 0.3651 0.3535 0.3423 0.3315];

for i=2:length(t2)
    h_mach=sqrt((gamma*p(i-1))/dhava(i-1)); % hesaplanan mach-irtifaya göre
    vmach=-vz(i-1)/h_mach; % m/sn'den mach'a geçiş
    mach_sayisi(i)=vmach;
    [mach, cd_index]=min(abs(mach_excel-vmach)); % en yakın mach değerinden cd
    değeri bulma
    cd=cd0_excel(cd_index);
    p(i)=P0/((((-hz(i-1)*0.0065)/(T))+1)^5.257); % hz (yükseklik) negatif olduğundan
    pozitif çevirmek için - ile çarpılır
    dhava(i)=p(i)/(R*T);
    Fd(i)=(dhava(i)*cd*((vz(i-1))^2)*A)/2;
    Fnet_z=(Fd(i)*sin(deg2rad(teta0))+m_son*g);
    Fnet_x=(Fd(i)*cos(deg2rad(teta0)));
    az(i)=Fnet_z/m_son;
    ax(i)=Fnet_x/m_son;
    vz(i)=vz(i-1)+az(i)*dt;
    vx(i)=vx(i-1)+ax(i)*dt;
    hz(i)=hz(i-1)+vz(i)*dt+(1/2)*az(i)*dt^2;
    xm(i)=xm(i-1)+vx(i)*dt+(1/2)*ax(i)*dt^2;
    T=T-((fix(abs(hz(i-1)-hz(i))))/100)*0.5;
    if (vz(i) >= 0)
        apogee_index=i;
        t_apogee=t2(i)
        vpa(vmach)
        break
    end
end

tum_mach=[mach_sayisi_yanma, mach_sayisi];
max(tum_mach)

vzs=[vz_yanma, vz(1:apogee_index)];
vxs=[vx_yanma, vx(1:apogee_index)];

sqrt((vzs(end)^2) + (vxs(end)^2))

hson=[hz_yanma, hz(1:apogee_index)];
x_yol=[xm_yanma, xm(1:apogee_index)];

x_yol(end)
vpa(hson(end))

ts=[t_yanma, t2(1:apogee_index)];

plot(ts, hson);
xlabel("Zaman [s]");

```

```
ylabel("Z eksenı yüksekliđi [m]");  
grid on;
```

2.6 Benzetimin Doğrulanması

Doğrulama Başlangıç Koşul Değerleri

Pozisyon [m]	[0, 0, -980]
Hız (bileşke) [m/s]	2
Uçuş Yolu Açısı [derece]	85
Başlangıç Kütlesi [kg]	[0, 0, 0]
Atış Noktası Rakımı [m]	980
Başlangıç Yakıt Kütlesi [kg]	4.659
Özgöl İtke (Isp) [s]	209.5
İtke Profili Dosyası	“veri_itki_F_2022.xlsx”
Aerodinamik Veri Seti Dosyası	“veri_aero_Cd_2022.xlsx”
Roket Çapı [m]	0.14

Doğrulama Çıktısı

Maksimum Mach Sayısı [-]	1.0679
Tepe Noktası Pozisyonu [m]	[-715.3838, 0, -5743.4380] – x,y,z
Tepe Noktası Hızı (bileşke) [m/s]	25.6941
Tepe Noktası Mach Sayısı [m/s]	0.0000351
Tepe Noktası Zamanı [s]	30.38

2.7 Benzetim Sonuçları

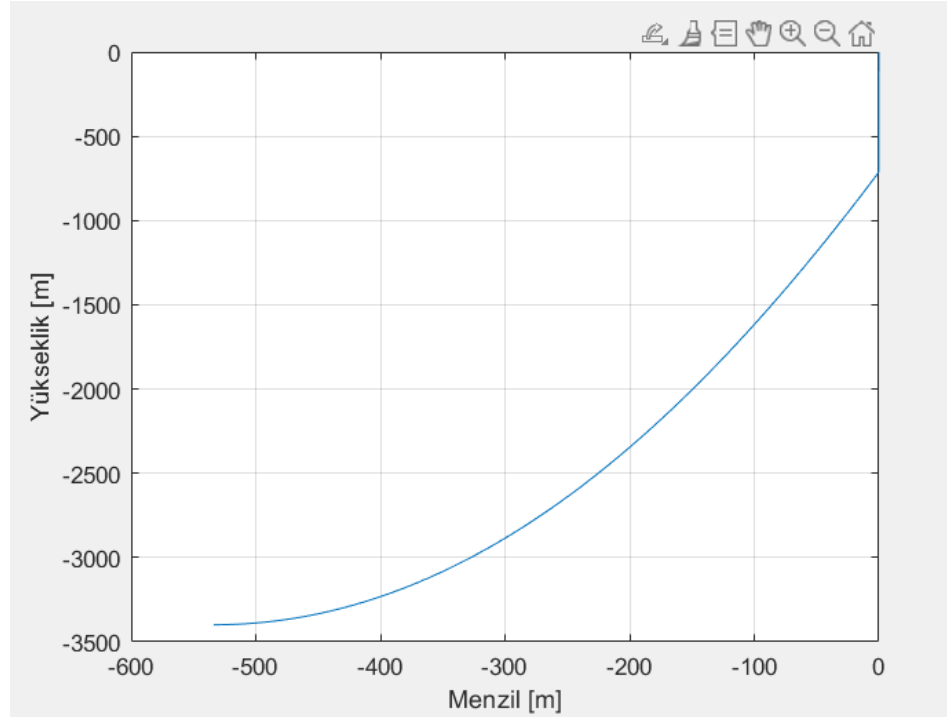
Başlangıç Koşul Değerleri

Pozisyon [m]	[0, 0, 0]
Hız (bileşke) [m/s]	0.1
Uçuş Yolu Açısı [derece]	85
Başlangıç Kütlesi [kg]	[0, 0, 0]

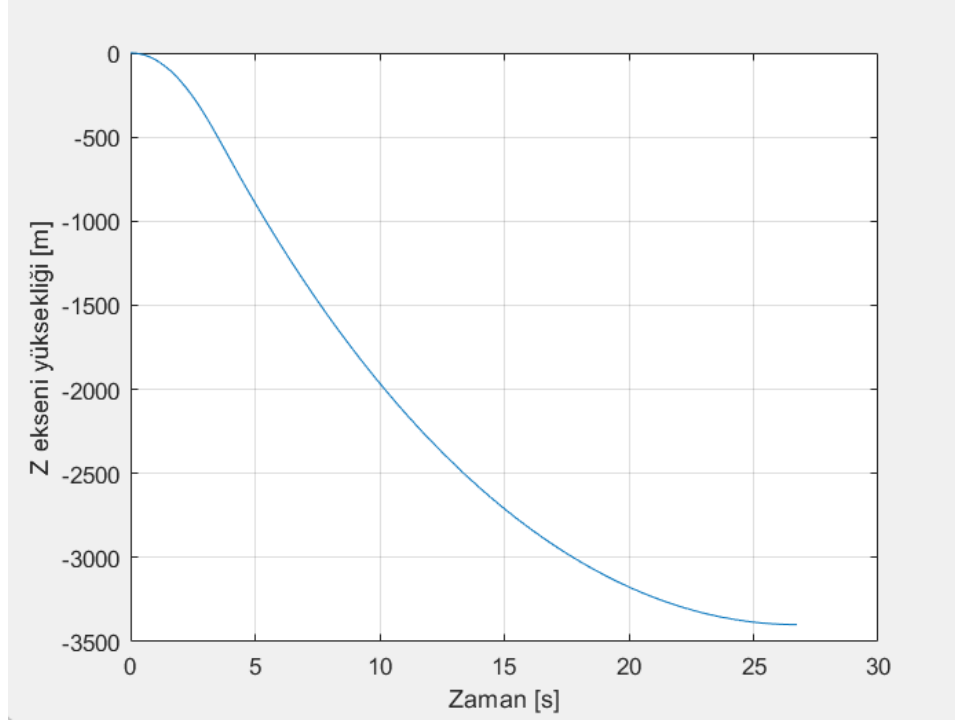
Atış Noktası Rakımı [m]	0
Başlangıç Yakıt Kütlesi [kg]	4.3
Özgöl İtki (Isp) [s]	197.6
İtki Profili Dosyası	Thrustcurve.org
Aerodinamik Veri Seti Dosyası	OpenRocket Cd-Mach verisi
Roket Çapı [m]	0.128

Benzetim Çıktısı

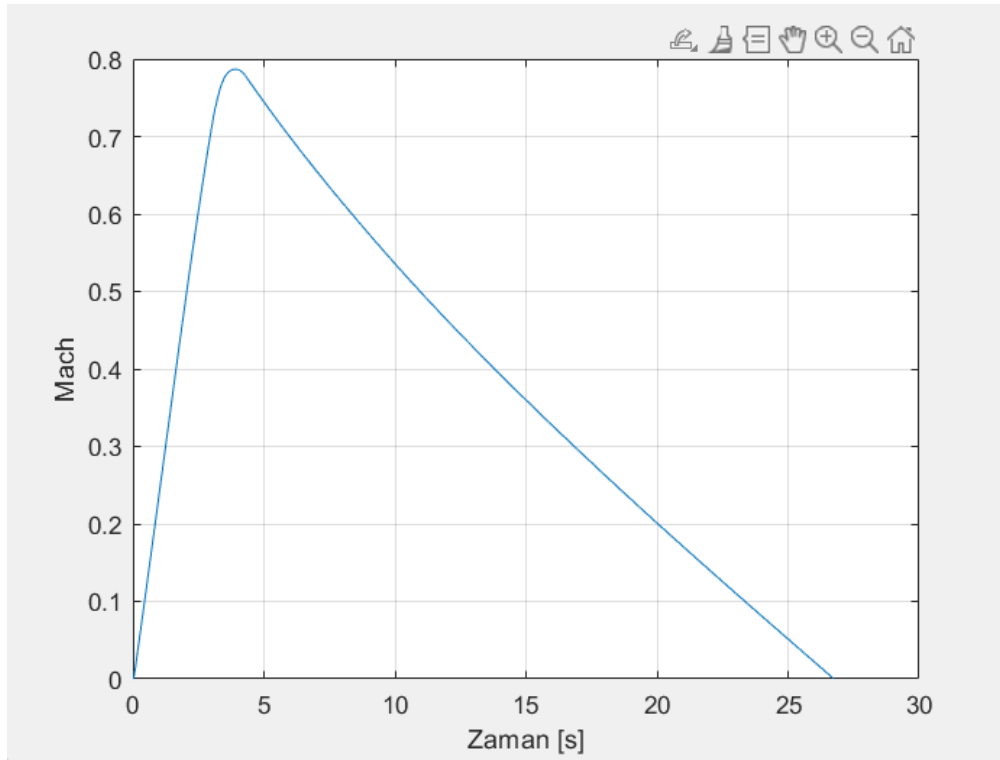
Maksimum Mach Sayısı [-]	0.7867
Tepe Noktası Pozisyonu [m]	[-533.7946, 0, -3398.7164] – x,y,z
Tepe Noktası Hızı (bileşke) [m/s]	25.6941
Tepe Noktası Mach Sayısı [m/s]	0.0001811
Tepe Noktası Zamanı [s]	22.9239



Yörünge grafiği (yükseklik - menzil)



Dikey tırmanma hızı (-Z eksenî hızı) – zaman grafiği



Mach-zaman grafiği