



**TEKNOFEST-2022 ROKET YARIŞMASI TRAKYA ÜNİVERSİTESİ SİMURG
ROKET TAKIMI KTR AŞAMASI UÇUŞ BENZETİMİ RAPORU**



İçindekiler

1. UÇUŞ BENZETİMİ GEREKSİNİMLERİ	3
1.1 Eksen Takımı	3
1.2 Roketin Kütle Varsayımı	3
1.3 Benzetim Serbestlik Derecesi	3
1.4 Başlangıç Koşulları	3
1.5 Dünyanın Dönüşü	3
1.6 Yerçekimi İvmesi	3
1.7 Motor İtke Kuvveti ve Yakıt Kütlesi	3
1.8 Aerodinamik Sürüklenme (Drag) Kuvveti	3
1.9 Hücum Açısı	4
1.10 Aerodinamik Taşıma/Kaldırma (Lift) Kuvveti	4
1.12 Ses Hızı ve Hava Yoğunluğu	4
1.13 Benzetim Denklemlerinin Çözüm Yöntemi	4
1.14 Çözüm Aracı	4
1.15 Çözüm Zaman Adımı	4
2. RAPOR GEREKSİNİMLERİ	5
2.1 Kinematik ve Dinamik Denklemler	5
2.2 Atmosfer Modeli	6
2.3 Motor Modeli	7
2.4 Aerodinamik Model	8
2.5 Benzetim Yapısı	9
2.6 Benzetimin Doğrulanması	18
2.7 Benzetim Sonuçları	19
KAYNAKÇA	23

1. UÇUŞ BENZETİMİ GEREKSİNİMLERİ

1.1 Eksen Takımı

Benzetimde, roketin fırlatıldığı noktaya çakılı , X ve Y eksenleri yer yüzeyine paralel olan eksen takımı kullanılmıştır.

1.2 Roketin Kütle Varsayımı

Roket için noktasal kütle/parçacık varsayımı yapılmış olup rokete etki eden bütün kuvvetlerin kütle merkezine uygulandığı varsayımı yapılmıştır.

1.3 Benzetim Serbestlik Derecesi

Benzetim iki (2) serbestlik dereceli olarak yapılmıştır. Benzetimde X ve Z eksenleri için birer adet doğrusal hareket serbestliği olup, açısal hareket bulunmamaktadır. Roket sadece XZ düzleminde hareket etmiştir.

1.4 Başlangıç Koşulları

Benzetimin çalışması için başlangıç koşulları olarak roketin ilk pozisyon değeri (1.1 nolu maddede belirtilen eksen takımına göre), ilk bileşke hız değeri, ilk uçuş yolu açısı değeri (flight path angle), ilk toplam kütle değeri ve ateşleme noktası deniz seviyesi yükseklik değeri benzetimin çalışması için yeterli olmuştur. İlk hız vektörü elemanları uçuş yolu açısı değeri ile hesaplanıp benzetime girilmiştir.

1.5 Dünyanın Dönüşü

Uçuş alçak irtifalarda gerçekleştiğinden dolayı Dünyanın dönüşünün benzetime dahil edilmediği varsayımı yapılmıştır.

1.6 Yerçekimi İvmesi

Yerçekimi ivmesi sabit 9.801 m/s^2 olarak kabul edilmiştir. Bu değer U.S. Standart Atmosfer Modeli'ne göre 2000m deniz seviyesindeki yerçekimi ivmesi değeridir.

1.7 Motor İtki Kuvveti ve Yakıt Kütlesi

Motor itki kuvveti benzetime dahil edilmiştir. Benzetim doğrulaması için paylaşılan itki verisi, yakıt kütlesi ve Isp (specific impulse) değeri kullanılmıştır.

1.8 Aerodinamik Sürüklenme (Drag) Kuvveti

Aerodinamik sürüklenme (drag) kuvveti benzetime dahil edilmemiştir.

1.9 Hücüm Açısı

İtke ve sürüklenme kuvvetleri uygulanırken roket gövdesinin hız vektörü doğrultusu ile çakışık olduğu varsayılmıştır. Benzetimin iki serbestlik dereceli olduğu da düşünüldüğünde hücüm açısının oluşması veya hesaplanması için bir serbestlik bulunmamaktadır. Bu sebeple hücüm açısı uçuş boyunca sıfır olmuştur.

1.10 Aerodinamik Taşıma/Kaldırma (Lift) Kuvveti

Aerodinamik taşıma/kaldırma (lift) kuvveti benzetime dahil edilmiştir.

1.12 Ses Hızı ve Hava Yoğunluğu

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

1.13 Benzetim Denklemlerinin Çözüm Yöntemi

Benzetim denklemlerinin çözümünde seçilen bir sayısal/nümerik entegrasyon (Numerical Integration) yöntemi kullanılmıştır.

1.14 Çözüm Aracı

Çözüm, MATLAB ve MATLAB/Simulink aracı kullanılarak yapılmıştır.

1.15 Çözüm Zaman Adımı

Benzetim 0.01 saniye zaman adımı ile çözümlenmiştir.

2. RAPOR GEREKSİNİMLERİ

2.1 Kinematik ve Dinamik Denklemler

Benzetimde kullanılan nihai denklemler:

(F_x = x Yönündeki Kuvvet , F_z = z yönündeki hız , q = Açısal hız , m = Kütle ,

g = Yerçekimi ivmesi, (9,801) , u = x yönündeki hız , \dot{u} = x yönündeki hızın zamana bağlı

değişimi , w = z Yönündeki hız , \dot{w} = z yönündeki hızın zamana bağlı değişimi)

$$\text{İvme denklemleri : } a = \frac{(F-D)}{m(t)} - g$$

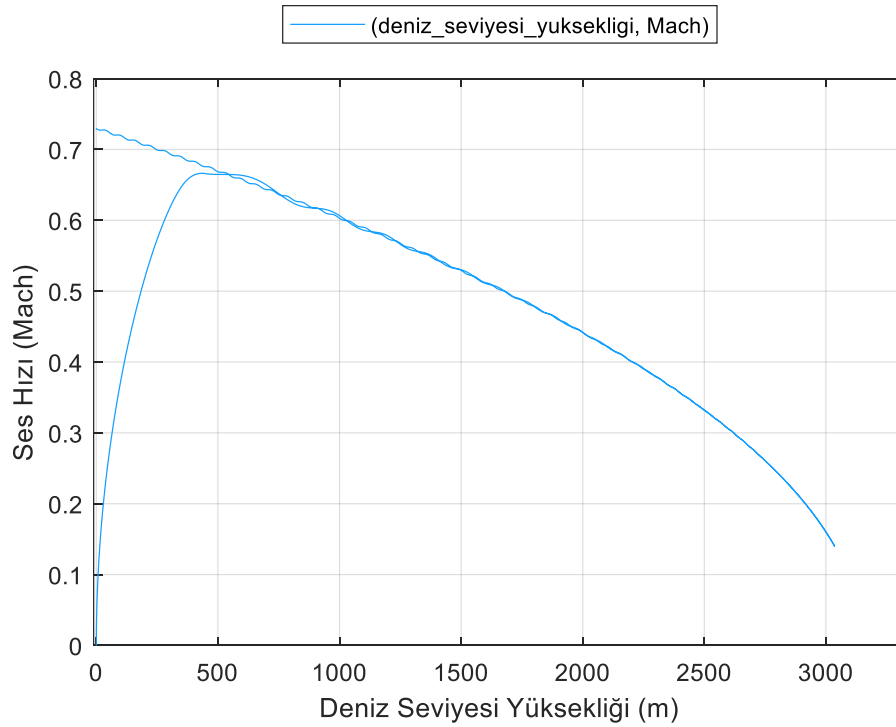
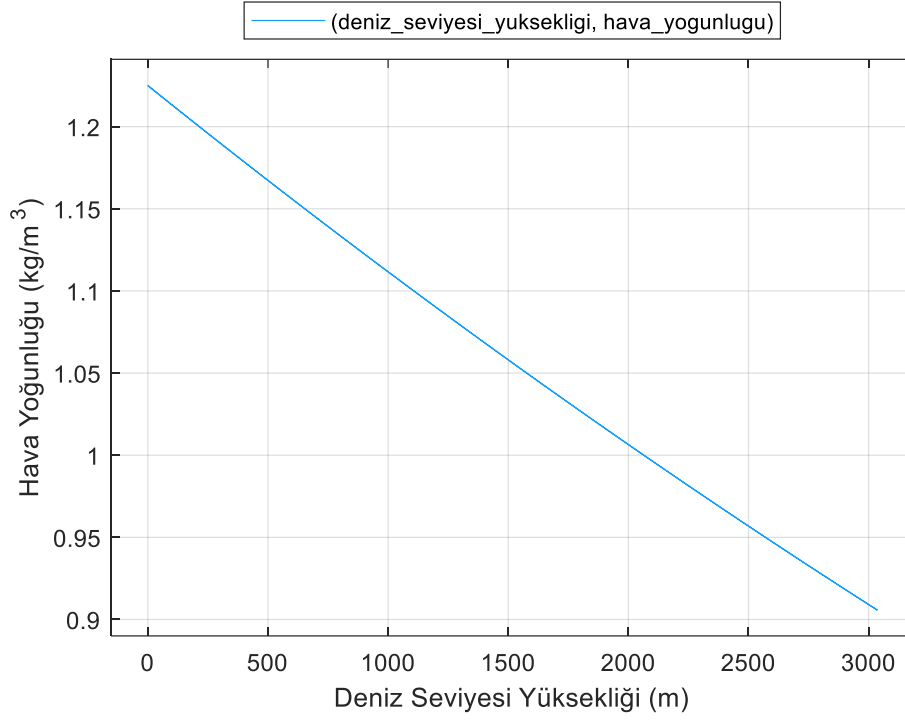
$$\text{Hız denklemleri : } A_{xb} = \dot{u} = \frac{F_x}{m} - qw - g \sin \theta , A_{zb} = \dot{w} = \frac{F_z}{m} + qu + g \cos \theta$$

$$\text{Konum denklemleri : } x = x_0 + v_{0x}t , z = z_0 + v_{0z}t - \frac{1}{2}gt^2$$

$$\text{Uçuş Yolu Açısı Hesabı Denklemleri : } v_{0x} = v_0 \cos \theta , v_{0y} = v_0 \sin \theta , \theta = \tan^{-1} \left(\frac{v_z}{v_x} \right)$$

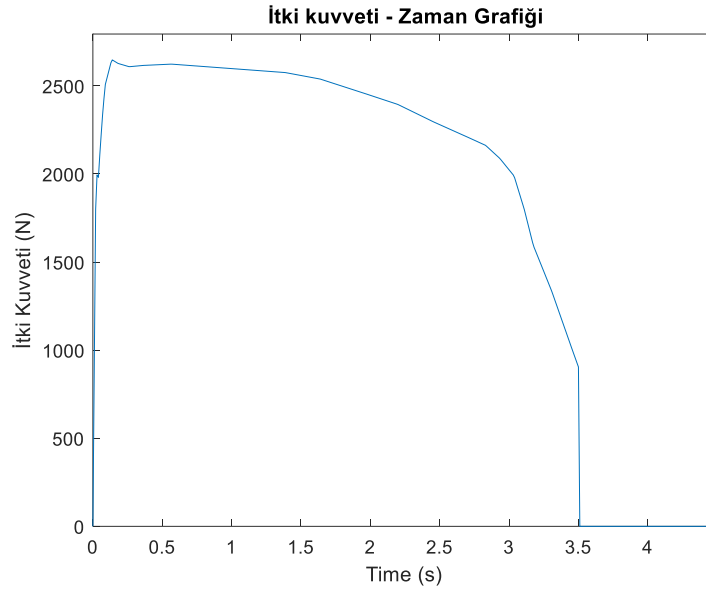
2.2 Atmosfer Modeli

MATLAB/Simulink aracının kütüphanesinde bulunan ISA Atmosfer Modeli (Uluslararası Otomasyon Topluluğu Atmosfer Modeli) kullanılmıştır. Grafiklerin oluşturulmasında bu yararlanılmıştır.



2.3 Motor Modeli

Motor verileri kullanılarak oluşturulan zamana bağlı itki kuvveti modelinde itki verisinin olmadığı ara noktalar için interpolasyon (ara değerleme) yapılmıştır.

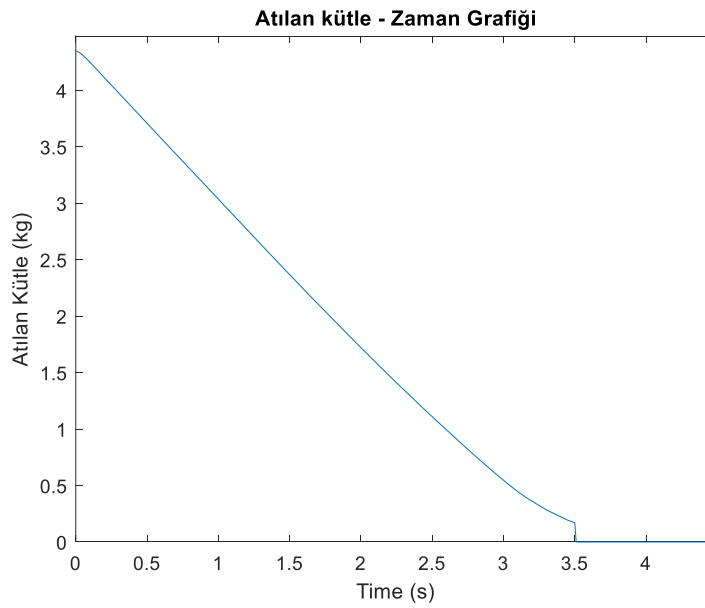


Motorun kütle debisi (\dot{m}), Isp değeri ve itki kuvveti kullanılarak hesaplanmış olup zamana bağlı atılan kütle (harcanan yakıt kütlesi) modeli oluşturulmuştur.

Hesaplama $\Delta u = Isp * g * \ln MR$ denklemi kullanılmıştır.

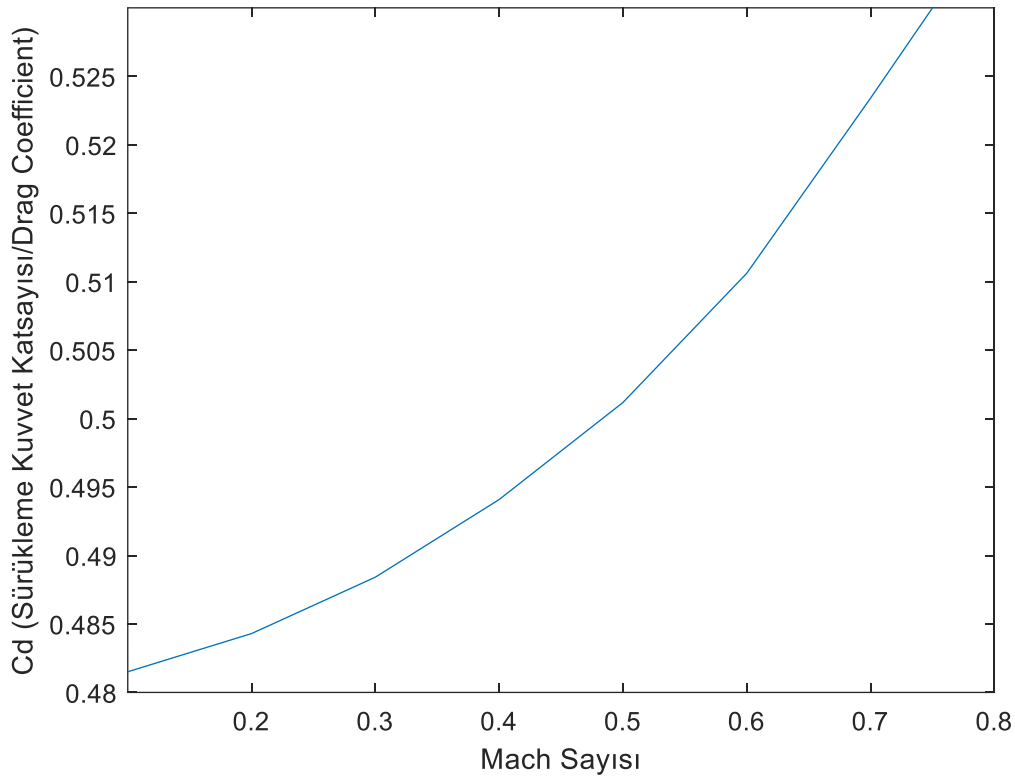
(u = hız, g = yerçekimi ivmesi, $MR = \frac{m_f}{m_e}$, m_f = roketin kütlesi + yakıt kütlesi,

m_e = roketin kütlesi)



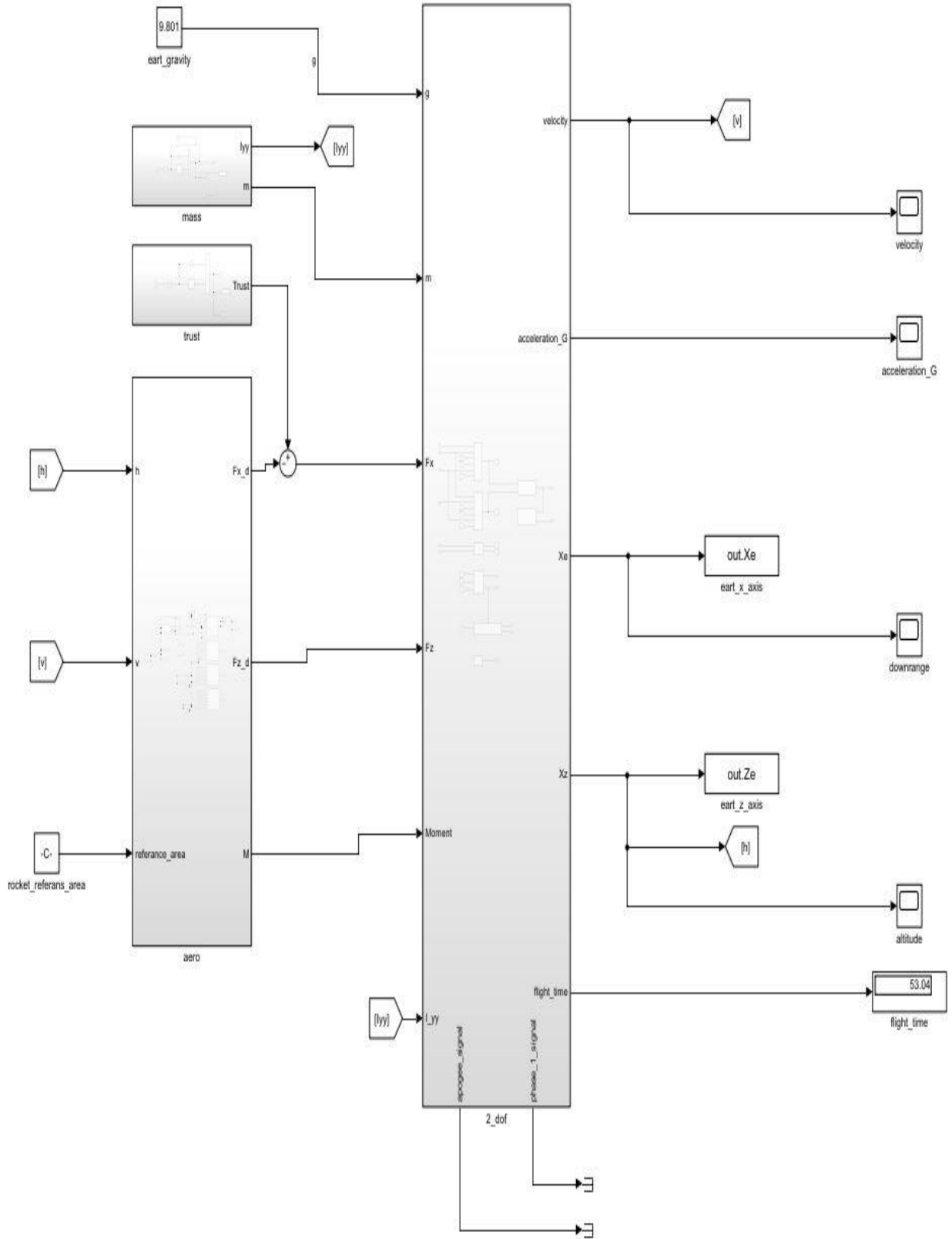
2.4 Aerodinamik Model

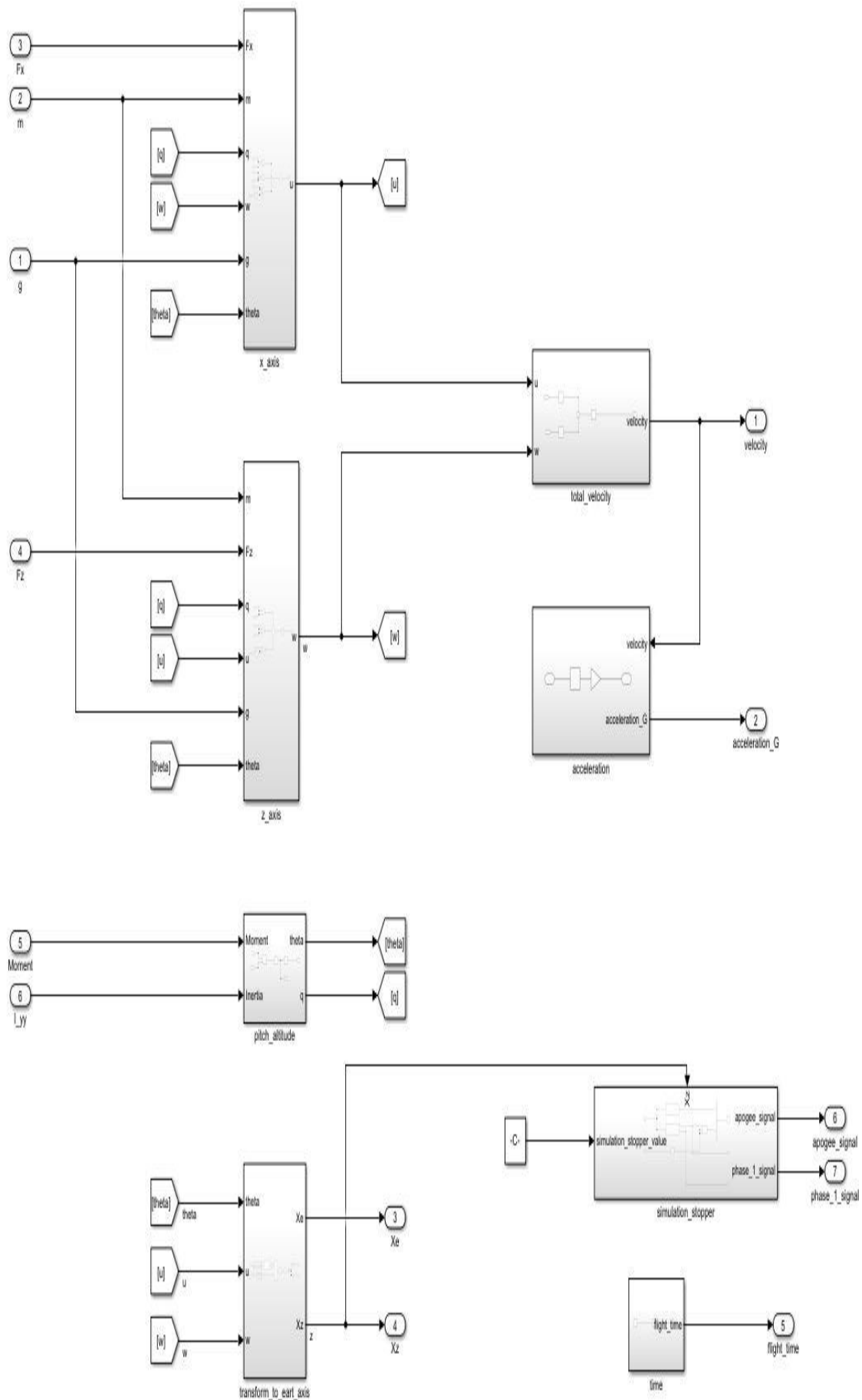
Open Rocket'ten alınan veri seti, $D/(rho * refarea * (V^2)/2)$ bu denklemde kullanılarak aerodinamik sürüklenme katsayısı (Cd) modeli oluşturulmuştur. Bu model asgari olarak Mach sayısına bağlı olup aynı zamanda yüksekliğe de bağlıdır. Girdileri D, rho, refarea, V olan model apogee'ye kadar geçerlidir. Model apogee'ye kadar geçerli olduğundan apogee sonrası için interpolasyon (ara değerlendirme) yapılmıştır. (D = sürüklenme kuvveti , rho = hava yoğunluğu refarea = roketin referans alanı V = hız)

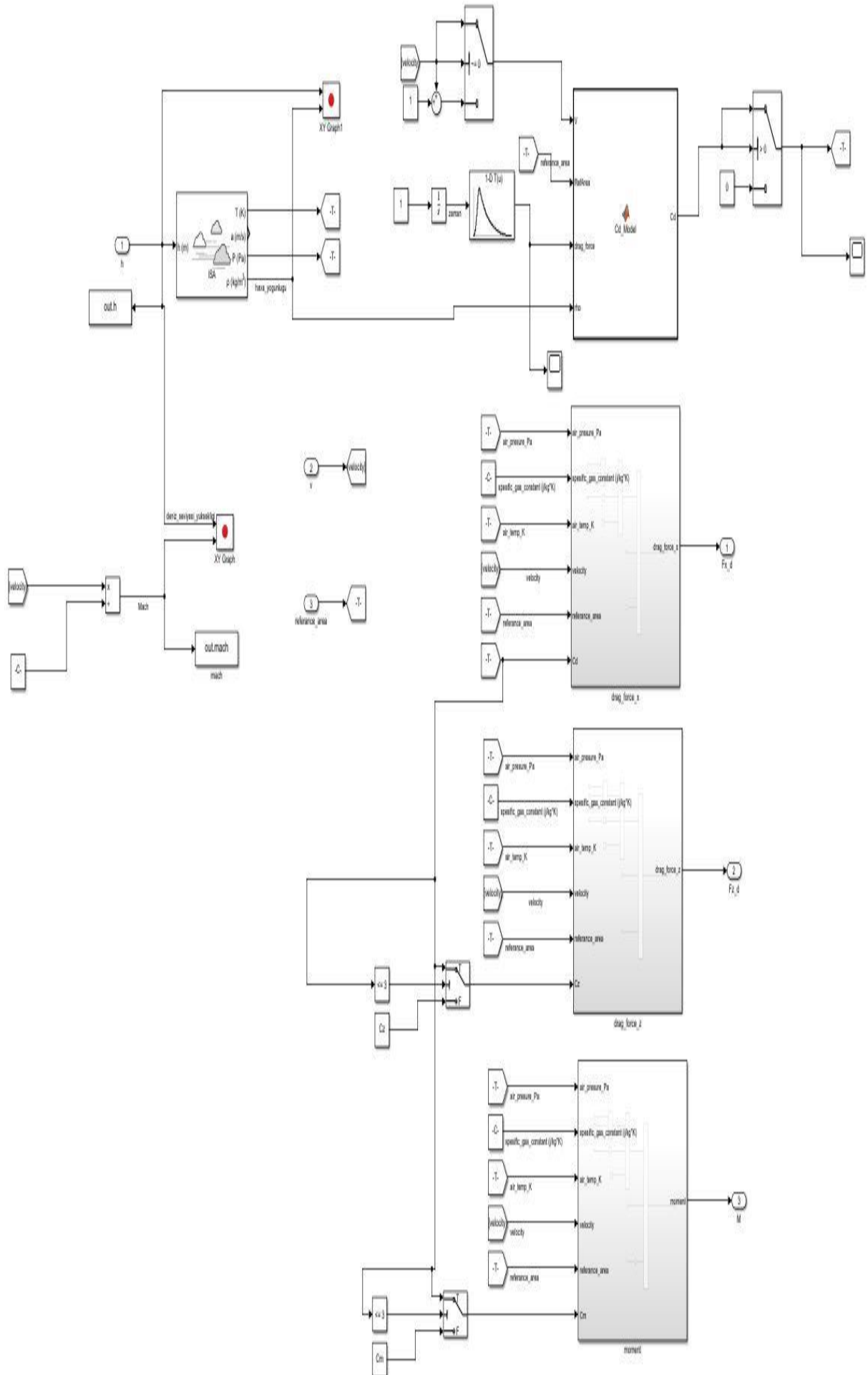


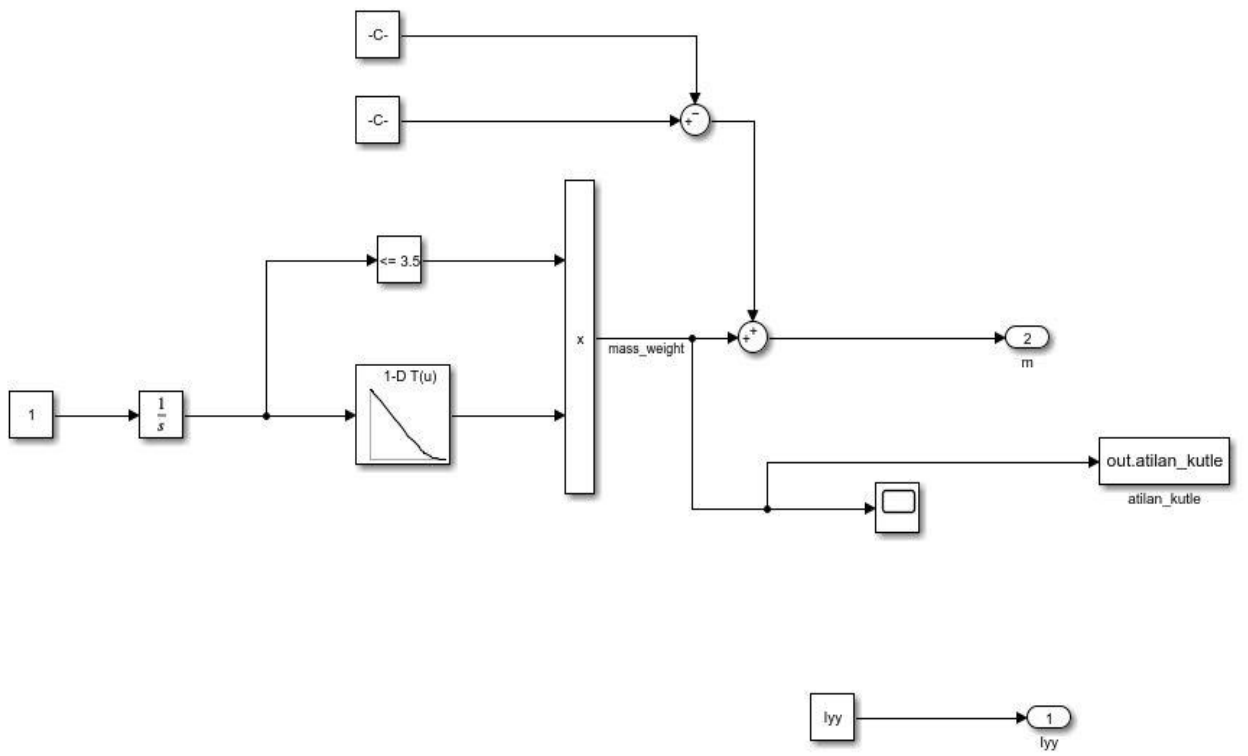
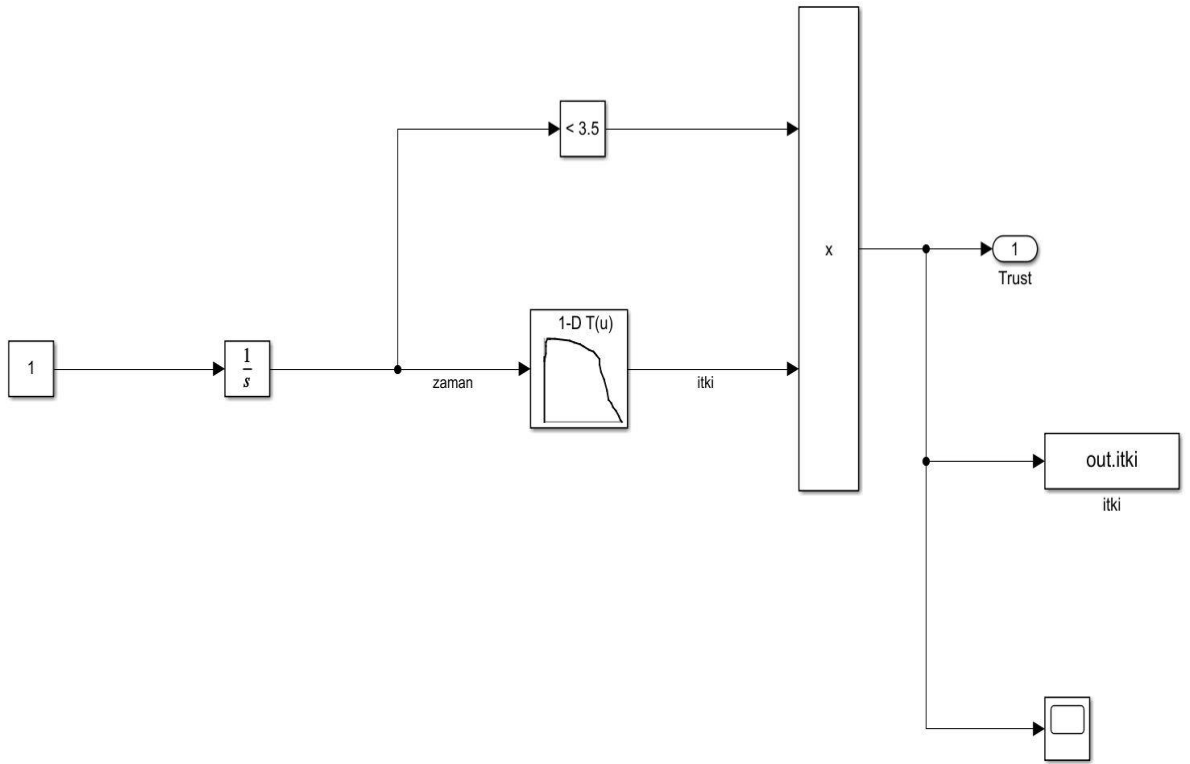
2.5 Benzetim Yapısı

Benzetim denklemlerin çözümlendiği kodlardan ve modellerden oluşmaktadır. Benzetimin çözümlenmesinde MATLAB/Simulink kullanılmıştır.









```
clear
clc
```

```
%rocket simulation.
```

```
trust_time_m2020 = [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];
trust_m2020 = [0 2070.111 1929.8890 2147.601 2369.004 2505.535 2649.446 2627.306
2608.856 2616.236 2623.616 2575.646 2538.745 2450.185 2394.834 2295.203 2206.642
2162.362 2088.561 1988.93 1800.738 1594.096 1335.793 1014.76 708.487 601.476 461.255
339.483 202.952 88.561 0.0];
```

```
% drag forces interpolated
```

```
OR_DRAG_FORCE = [0      0      0      0.000050      0.000815      0.003440
0.009421      0.020209      0.037158      0.061231      0.092684      0.129730
0.173280      0.223160      0.279110      0.340200      0.404290      0.472670
0.545170      0.626290      0.712240      0.805910      0.902930      1.002900
1.105400      1.210200      1.319300      1.432100      1.548600      1.668900
1.792900      1.920000      2.049400      2.181100      2.315200      2.451800
2.588300      2.726900      2.867800      3.011200      3.157100      3.312900
3.472100      3.713900      4.090900      4.689600      5.652400      6.696500
7.749300      8.886400      10.051000      11.393000      12.878000      14.368000
15.940000      17.641000      19.371000      21.229000      23.220000      25.314000
27.498000      29.750000      32.150000      34.701000      37.369000      40.181000
43.100000      46.214000      49.485000      52.685000      55.942000      59.254000
62.725000      66.233000      69.662000      73.214000      76.779000      80.397000
84.159000      88.042000      91.998000      96.087000      100.330000      104.740000
109.200000      113.630000      117.980000      122.360000      126.560000      130.760000
135.090000      139.600000      144.230000      149.000000      153.780000      158.480000
162.950000      167.030000      170.650000      173.930000      177.060000      180.050000
182.880000      185.290000      187.100000      188.530000      189.450000      190.110000
190.660000      191.200000      191.620000      191.760000      191.580000      191.210000
190.600000      189.970000      189.330000      188.630000      187.780000      186.700000
185.350000      183.770000      181.920000      180.210000      178.660000      177.220000
175.840000      174.360000      172.770000      171.190000      169.580000      168.050000
166.610000      165.280000      163.970000      162.600000      161.190000      159.730000
158.200000      156.780000      155.490000      154.250000      153.060000      151.750000
150.430000      149.030000      147.670000      146.340000      145.100000      143.940000
142.800000      141.650000      140.430000      139.190000      137.890000      136.670000
135.490000      134.370000      133.300000      132.300000      131.240000      130.100000
128.920000      127.810000      126.630000      125.540000      124.490000      123.490000
122.520000      121.530000      120.490000      119.510000      118.470000      117.420000
116.370000      115.330000      114.360000      113.420000      112.540000      111.660000
110.790000      109.860000      109.010000      108.010000      107.000000      105.980000
105.060000      104.240000      103.490000      102.730000      101.940000      101.030000
100.170000      99.201000      98.210000      97.308000      96.478000      95.681000
94.893000      94.147000      93.398000      92.640000      91.878000      91.086000
90.244000      89.436000      88.611000      87.828000      87.078000      86.355000
85.654000      84.961000      84.289000      83.625000      82.895000      82.216000
81.446000      80.700000      79.962000      79.252000      78.565000      77.895000
```

77.243000	76.626000	76.010000	75.393000	74.769000	74.178000
73.553000	72.886000	72.148000	71.460000	70.813000	70.195000
69.603000	69.018000	68.479000	67.943000	67.432000	66.811000
66.233000	65.647000	65.021000	64.373000	63.800000	63.199000
62.599000	62.039000	61.507000	61.002000	60.521000	60.056000
59.554000	59.051000	58.494000	57.995000	57.449000	56.845000
56.275000	55.706000	55.194000	54.704000	54.226000	53.750000
53.305000	52.894000	52.452000	52.021000	51.559000	51.047000
50.517000	50.019000	49.508000	49.031000	48.566000	48.113000
47.684000	47.270000	46.847000	46.434000	46.024000	45.584000
45.168000	44.767000	44.336000	43.893000	43.492000	43.049000
42.601000	42.176000	41.771000	41.376000	40.984000	40.591000
40.202000	39.826000	39.459000	39.084000	38.706000	38.332000
37.972000	37.613000	37.260000	36.888000	36.499000	36.139000
35.782000	35.424000	35.077000	34.709000	34.350000	33.989000
33.640000	33.297000	32.957000	32.623000	32.314000	32.028000
31.705000	31.395000	31.062000	30.737000	30.413000	30.127000
29.825000	29.518000	29.187000	28.856000	28.538000	28.200000
27.888000	27.587000	27.294000	27.006000	26.728000	26.454000
26.156000	25.882000	25.619000	25.349000	25.062000	24.792000
24.524000	24.250000	23.963000	23.709000	23.428000	23.150000
22.879000	22.610000	22.350000	22.094000	21.840000	21.592000
21.339000	21.090000	20.843000	20.608000	20.367000	20.150000
19.919000	19.673000	19.437000	19.209000	18.965000	18.753000
18.522000	18.310000	18.062000	17.831000	17.610000	17.386000
17.172000	16.957000	16.742000	16.522000	16.317000	16.109000
15.893000	15.692000	15.486000	15.292000	15.095000	14.889000
14.693000	14.499000	14.307000	14.118000	13.928000	13.753000
13.577000	13.406000	13.229000	13.051000	12.861000	12.667000
12.484000	12.307000	12.136000	11.960000	11.783000	11.616000
11.444000	11.285000	11.101000	10.921000	10.753000	10.585000
10.424000	10.263000	10.104000	9.946100	9.794100	9.640500
9.495700	9.347600	9.194400	9.051100	8.925300	8.765000
8.626700	8.510200	8.407100	8.257100	8.095000	7.968600
7.822800	7.676300	7.531500	7.386500	7.269700	7.133400
7.005800	6.870000	6.750000	6.629400	6.513100	6.401000
6.262500	6.138400	6.009600	5.884500	5.770300	5.655700
5.543100	5.431500	5.322300	5.213400	5.107000	5.005200
4.903400	4.798300	4.691100	4.588500	4.488900	4.391100
4.291600	4.195900	4.116900	4.018700	3.945100	3.854400
3.795200	3.685300	3.588200	3.524100	3.434800	3.323000
3.220600	3.141900	3.053300	2.964100	2.884300	2.804300
2.730800	2.657000	2.589300	2.511000	2.435700	2.357000
2.285900	2.217400	2.148600	2.080700	2.015700	1.949400
1.886000	1.822500	1.766200	1.703500	1.648900	1.588800
1.534500	1.484700	1.434800	1.387300	1.329000	1.277100
1.221900	1.178000	1.124800	1.074600	1.026500	0.982470
0.926510	0.884890	0.835900	0.793820	0.753440	0.723790
0.680280	0.647150	0.619620	0.587040	0.563600	0.548540
0.505340	0.485040	0.459300	0.429550	0.407130	0.384580

0.377020	0.358300	0.328710	0.305940	0.284910	0.255740
0.230830	0.231430	0.205740	0.178530	0.159240	0.134450
0.129120	0.106500	0.093485	0.080562	0.068015	0.053693
0.041384	0.029344	0.019190	0.010692	0.004848	0.001346
0.000098	-0.000010];				
OR_TIME = [0.000000	0.010000	0.020000	0.030000	0.040000	
0.050000	0.060000	0.070000	0.080000	0.090000	0.100000
0.110000	0.120000	0.130000	0.140000	0.150000	0.160000
0.170000	0.180000	0.190000	0.200000	0.210000	0.220000
0.230000	0.240000	0.250000	0.260000	0.270000	0.280000
0.290000	0.300000	0.310000	0.320000	0.330000	0.340000
0.350000	0.360000	0.370000	0.380000	0.390000	0.400000
0.410000	0.420000	0.435000	0.457500	0.491250	0.541250
0.591250	0.641250	0.691250	0.741250	0.791250	0.841250
0.891250	0.941250	0.991250	1.041300	1.091300	1.141300
1.191300	1.241300	1.291300	1.341300	1.391300	1.441300
1.491300	1.541300	1.591300	1.641300	1.691300	1.741300
1.791300	1.841300	1.891300	1.941300	1.991300	2.041300
2.091300	2.141300	2.191300	2.241300	2.291300	2.341300
2.391300	2.441200	2.491200	2.541200	2.591200	2.641200
2.691200	2.741200	2.791200	2.841200	2.891200	2.941200
2.991200	3.041200	3.091200	3.141200	3.191200	3.241200
3.291200	3.341200	3.391200	3.441200	3.491200	3.541200
3.591200	3.641200	3.691200	3.741200	3.791200	3.841200
3.891200	3.941200	3.991200	4.041200	4.091200	4.141200
4.191200	4.241200	4.291200	4.341200	4.391200	4.441200
4.491200	4.541200	4.591200	4.641200	4.691200	4.741200
4.791200	4.841200	4.891200	4.941200	4.991200	5.041200
5.091200	5.141200	5.191200	5.241200	5.291200	5.341200
5.391200	5.441200	5.491200	5.541200	5.591200	5.641200
5.691200	5.741200	5.791200	5.841200	5.891200	5.941200
5.991200	6.041200	6.091200	6.141200	6.191200	6.241200
6.291200	6.341200	6.391200	6.441200	6.491200	6.541200
6.591200	6.641200	6.691200	6.741200	6.791200	6.841200
6.891200	6.941200	6.991200	7.041200	7.091200	7.141200
7.191200	7.241200	7.291200	7.341200	7.391200	7.441200
7.491200	7.541200	7.591200	7.641200	7.691200	7.741200
7.791200	7.841200	7.891200	7.941200	7.991200	8.041200
8.091200	8.141200	8.191200	8.241200	8.291200	8.341200
8.391200	8.441200	8.491200	8.541200	8.591200	8.641200
8.691200	8.741200	8.791200	8.841200	8.891200	8.941200
8.991200	9.041200	9.091200	9.141200	9.191200	9.241200
9.291200	9.341200	9.391200	9.441200	9.491300	9.541300
9.591300	9.641300	9.691300	9.741300	9.791300	9.841300
9.891300	9.941300	9.991300	10.041000	10.091000	10.141000
10.191000	10.241000	10.291000	10.341000	10.391000	10.441000
10.491000	10.541000	10.591000	10.641000	10.691000	10.741000
10.791000	10.841000	10.891000	10.941000	10.991000	11.041000
11.091000	11.141000	11.191000	11.241000	11.291000	11.341000
11.391000	11.441000	11.491000	11.541000	11.591000	11.641000

[illegible]


```
D = 0.118; %rocket dia.  
ramp_angle= 85; %initial degree for rocket launch ramp.  
initial_weight = 29.923; %launch weight.(kg)  
Cz = 0.02; %radial coeeficient.  
Cm = 0.745; %rotational moment of coeeficient.
```

```
drague_prachute_Cd = 1.5;  
drague_prachute_D=1.1;  
phase_1_delay=2;
```

```
Iyy = 15.44; %moment of inertia from solidworks.
```

```
%simulation settings
```

```
simulation_stopper_value=0; %0=ground hit detected stoper, 1=opogee detected stopper.
```

```
Xe = out.Xe;  
Ze = out.Ze;  
plot(Ze,Xe)
```

2.6 Benzetimin Doğrulanması

Benzetim Tablo 1 ve Tablo 2 ‘ deki veriler kullanılarak tepe noktasına kadar çalıştırılmıştır.

Tablo 1. Doğrulama Çalışması Başlangıç Koşul Değerleri

	Değer
Pozisyon [m]	[0.0.0]
Hız (bileşke) [m/s]	2
Uçuş Yolu Açısı [derece]	85

Tablo 2. Doğrulama Çalışması Diğer Verileri

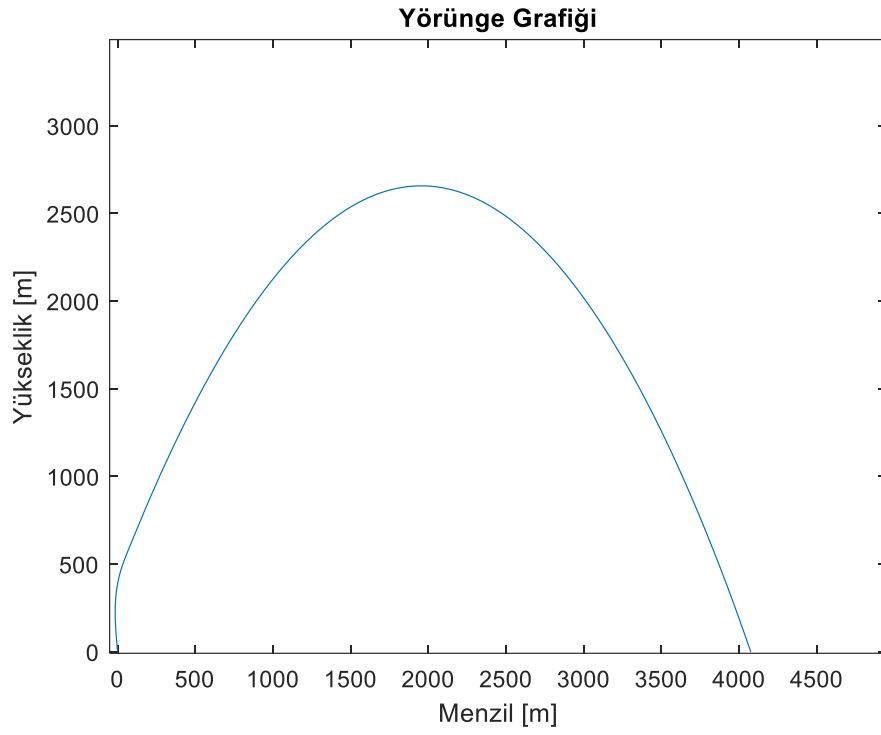
	Değer
Başlangıç Kütlesi [kg]	25
Atış Noktası Rakımı [m]	980
Başlangıç Yakıt Kütlesi [kg]	4.659
Özgül İtki (Isp) [s]	209.5
İtki Profili Dosyası	“veri_itki_F_2022.xlsx”
Aerodinamik Veri Seti Dosyası	“veri_aero_Cd_2022.xlsx”
Roket Çapı [m]	0.14

Benzetim sonucu ile çıktı tablosu ve yörünge grafiği aşağıda paylaşılmıştır.

Tablo 3. Doğrulama Benzetim Çıktı Verileri

	Değer
Maksimum Mach Sayısı [-]	0.72
Tepe Noktası Pozisyonu [m]	[1944 , 0, 2657]
Tepe Noktası Hızı (bileşke) [m/s]	91.76
Tepe Noktası Mach Sayısı [-]	0.27
Tepe Noktası Zamanı [s]	24

Tablo 4. Yörünge Grafiği (yükseklik-menzil)



2.7 Benzetim Sonuçları

Tablo 5 ' te bulunan Simurg Roket Takımının roket verileri ile benzetim koşturulmuştur.

Tablo 5. Başlangıç Koşul Değerleri

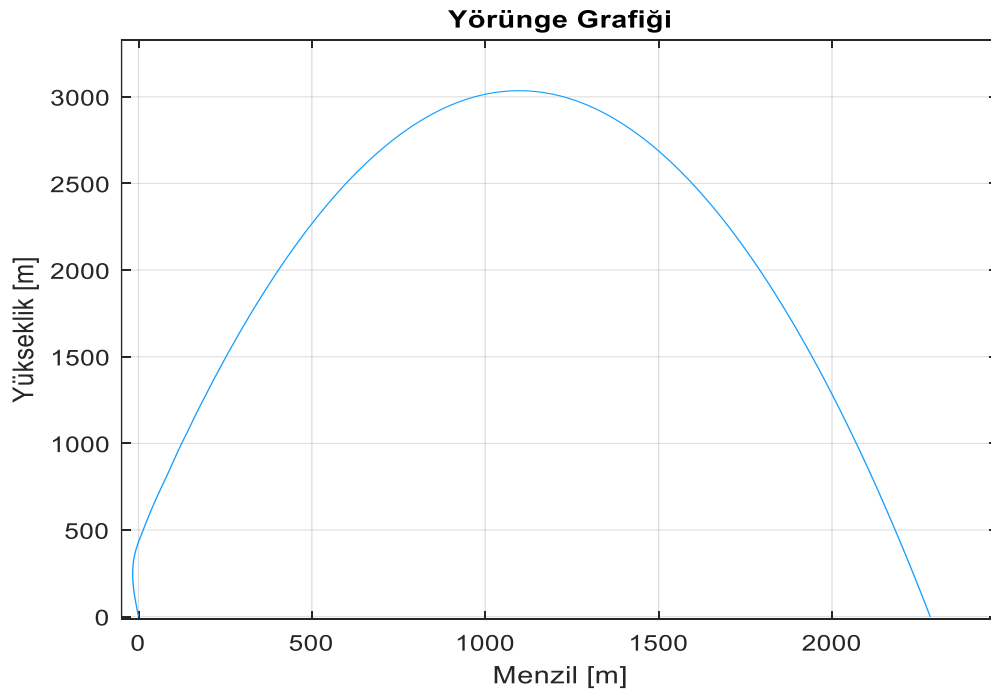
	Değer
Pozisyon [m]	[0.0.0]
Hız (bileşke) [m/s]	2
Uçuş Yolu Açısı [derece]	85
Başlangıç Kütlesi [kg]	29.923
Atış Noktası Rakımı [m]	980

Tablo 5. Benzetim Çıktı ve Karşılaştırma Verileri

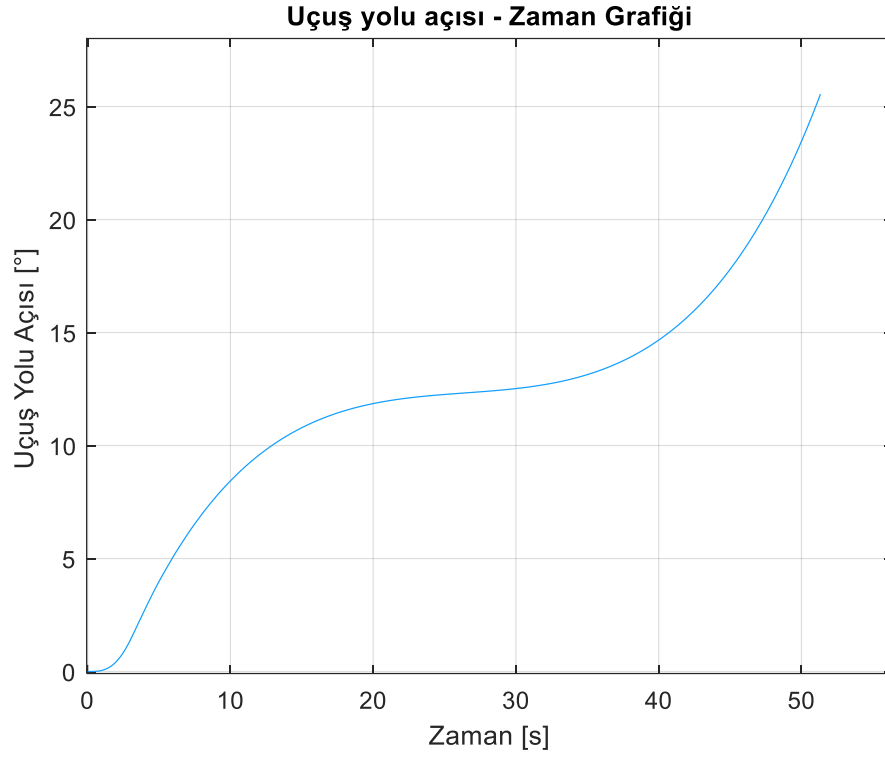
	OpenRocket Değeri (a)	Benzetim Değeri (b)	Yüzdece Fark (b-a)/a*100
Maksimum Mach Sayısı [-]	0.750	0.735	%2
Tepe Noktası Pozisyonu [m]	[260 , 0, 3062]	[1077, 0, 3034]	[817, 0, -28]
Tepe Noktası Hızı (bileşke) [m/s]	8.0685	47	%483
Tepe Noktası Mach Sayısı [-]	0.024	0,14	%483
Tepe Noktası Zamanı [s]	25,7	27	%5.3

Benzetimler arasındaki yüzdece farkların olası nedenleri yapılan bazı varsayımlar ve başlangıç koşullarındaki farklılıklardır. Hızdaki farkın yüksek olmasının sebebi de yapılan varsayımdan kaynaklanmaktadır.

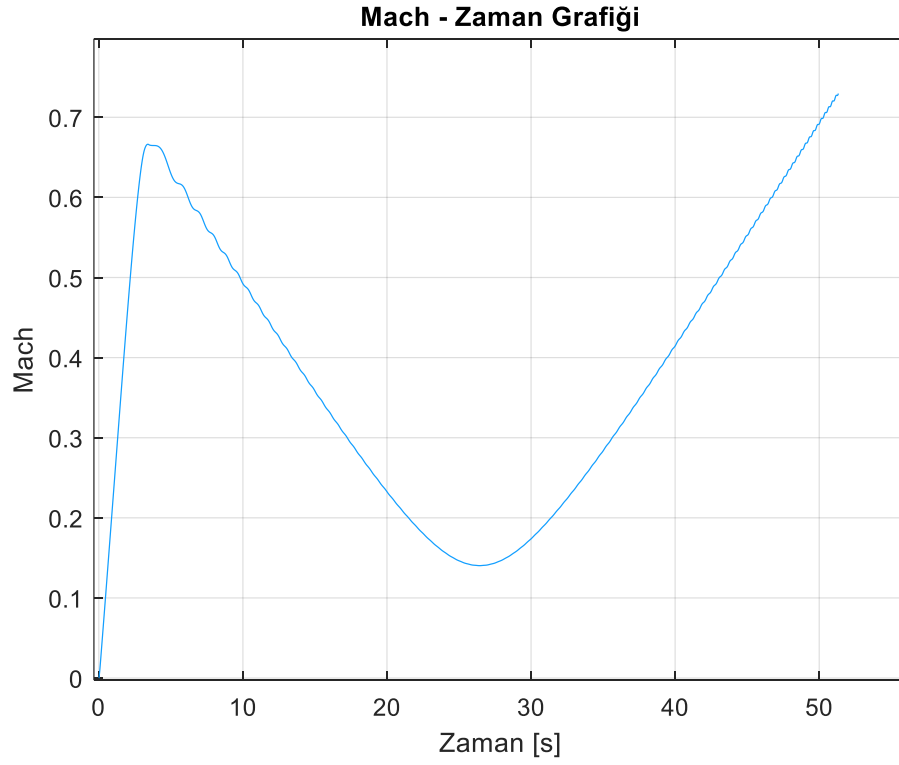
Tablo 6. Yörünge Grafiği



Tablo 7. Uçuş yolu açısı - Zaman Grafiği

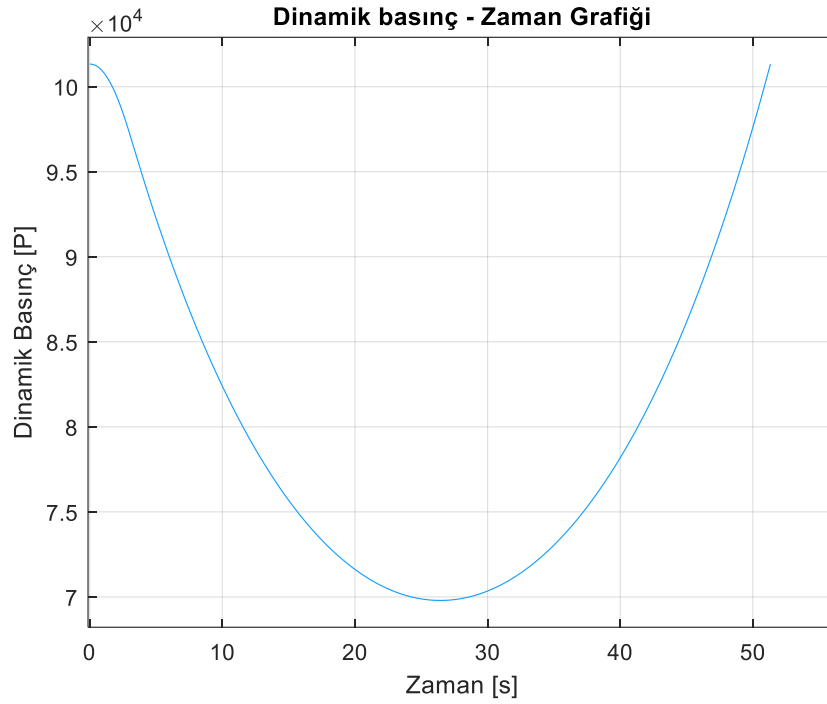


Tablo 8. Mach - Zaman Grafiği



Maksimum mach yüksekliği 522 metredir.

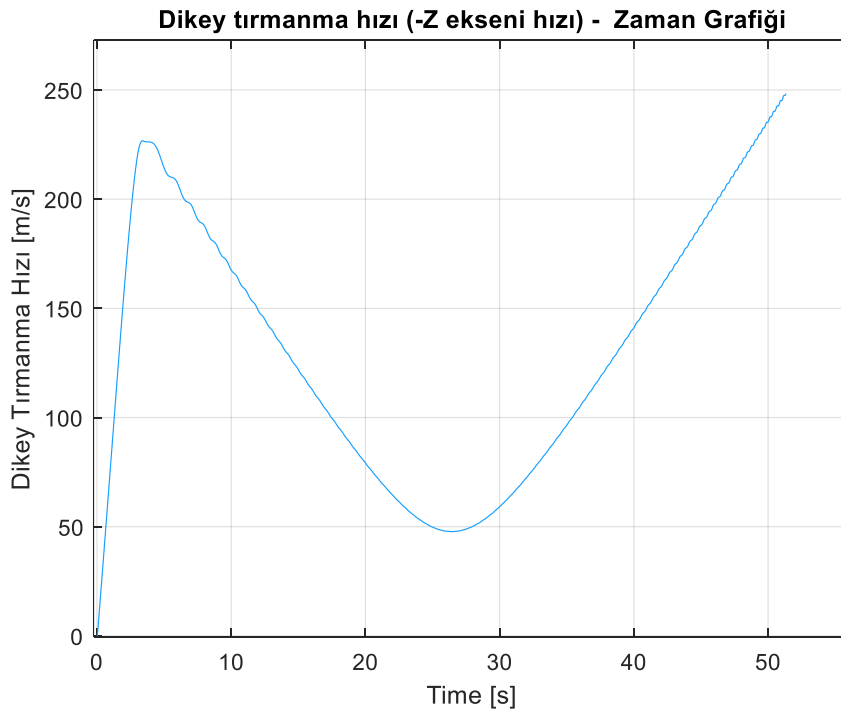
Tablo 8. Dinamik basınç – Zaman Grafiği



Maksimum dinamik basınç yüksekliği sıfırdır.

Maksimum dinamik basınç, roketin aerodinamik sürüklenme katsayısına etki ettiğinden dolayı roketin maksimum hızını ve maksimum yüksekliğini etkiler. Bu nedenle maksimum dinamik basınç roketin uçuş sonuçları için önemli faktörlerden biridir.

Tablo 9. Dikey tırmanma hızı (-Z eksenli hızı) – Zaman Grafiği



KAYNAKÇA

Missile Guidance and Control System [George M. Siouris]

Aircraft Control and Simulation [Stevens, Lewis]

Flight Trajectory Simulation of a Single Stage Sounding Rocket

<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/rocket/rktpow.html>

<https://www.mathworks.com/help/aeroblks/3dofbodyaxes.html>