

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİR GAZ TÜRBİNİ ENERJİ ANALİZİNİN
MATLAB/ SIMULINK İLE MODELLENMESİ

RİDVAN BAYDAR

HAZİRAN 2018

Makina Anabilim Dalında Rıdvan BAYDAR tarafından hazırlanan BİR GAZ TÜRBİNİ ENERJİ ANALİZİNİN MATLAB/SIMULINK İLE MODELLENMESİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ali ERİŞEN
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Dr. Öğr. Üy. Zühtü Onur PEHLİVANLI
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. İbrahim UZUN
Üye : Dr. Öğr. Üy. Kadir YEŞİLYURT
Üye(Danışman) : Dr. Öğr. Üy. Zühtü Onur PEHLİVANLI
...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

BİR GAZ TÜRBİNİ ENERJİ ANALİZİNİN MATLAB/SİMULİNK İLE MODELLENMESİ

BAYDAR, Rıdvan

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üy. Zühtü Onur PEHLİVANLI

Haziran 2018, 152 sayfa

Bu tez çalışmasında, C++ ile durum ve izantropik denklemlerine göre enerji analizi yapılmış olan Brayton çevrimli bir gaz türbini, Matlab/Simulink programı yardımıyla modellenerek enerji analizi yapılmıştır.

Modelin kompresör kısmında, havanın mükemmel gaz olduğu ve izantropik koşullarda dört farklı sıkıştırma oranında sıkıştırıldığı kabul edilerek kompresör çıkış sıcaklıkları ve kompresör verimindeki değişimler incelenmiştir.

Yanma odasında, mol yüzdeleri bilinen doğalgazın nemli hava ile kararlı akışlı tepkime reaksiyonunda, stokiometrik yanmanın gerçekleştiği kabul edilerek farklı sıkıştırma oranlarında yanma odasından transfer edilen özgül ısı enerjisi miktarı değişimi incelenmiştir.

Türbin kısmında atık gazların mükemmel gaz olduğu ve türbinin izantropik koşullarda genişlediği kabul edilerek sıkıştırma oranlarının türbin verimine etkisi incelenmiştir.

Modelde elde edilen sonuçlar literatür çalışmasının sonuçlarıyla karşılaştırılarak modelin doğruluğu test edilmiştir. Yapılan karşılaştırmalarda hazırlanan modelin iyi

uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Gaz türbini enerji analizinde hızlı ve doğru sonuç alabilmek için kullanılabilecek bir model geliştirilmiştir.



Anahtar Kelimeler: Gaz türbini, simulink ile modelleme, Brayton çevrimi, enerji analizi, enerji santralleri.



ABSTRACT

MODELING A GAS TURBINE ENERGY ANALYSIS WITH MATLAB/SIMULINK

BAYDAR, Rıdvan

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Machine, M. Sc. Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Zühtü Onur PEHLİVANLI

June 2018, 152 pages

In this thesis study, a Brayton cycle gas model with energy analysis based on state and isentropic equations with C ++ is modeled by Matlab / Simulink program and energy analysis is performed.

In the compressor section of model, the assumption that the air is excellent gas and compressed at four different compression ratios under isentropic conditions, the changes in compressor outlet temperatures and compressor efficiency are investigated.

In the combustion chamber, the variation of the specific heat energy transferred from the combustion chamber at different compression ratios was considered in stoichiometric reaction with humid air in molar percentages.

The impact of compression ratios on turbine efficiency has been examined in the turbine section, assuming that the exhaust gases are excellent gas and the turbine expands in isentropic conditions.

The validity of the model was tested by comparing the results obtained in the model with those of the literature study. It has been seen that the model prepared in the comparative studies gives good harmonious results. A model that can be used to

obtain fast and accurate results in energy analysis of gas turbines has been developed.



Keywords: Gas turbine, modeling with simulink, Brayton cycle, energy analysis, power plants.



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, beni destekleyen ve cesaretlendiren başından beri beni yönlendiren ve destekleyen bu yüksek lisans tez çalışmasını yöneten, olumlu eleştiri ve önerileri ile katkıda bulunan, her fırsatta yardımını esirgemeyen değerli hocam Sn. Dr. Öğr. Üy. Zühtü Onur PEHLİVANLI'ya, derslerini dinlemekten büyük zevk ve feyiz aldığım Makina Mühendisliği A. D. Başkanı ile hocalarıma, yüksek lisans sürecinde yardım ve anlayışlarını gördüğüm Kırıkkale Çevre ve Şehircilik İl Müdürü Sn. Uğur ATAR ve mesai arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bugünlere gelmemde katkıları olan anne ve babama, kardeşlerime ve bana sabır gösteren ve yanımda olan eşime, çocuklarıma sevgilerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER DİZİNİ.....	xv
KISALTMALAR DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ	1
2. ENERJİ	12
2.1. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Göre Enerji Santralleri.....	13
2.1.1. Hidroelektrik Enerji Santralleri	13
2.1.2. Rüzgâr Enerjisi Santralleri.....	14
2.1.3. Jeotermal Enerji Santralleri.....	15
2.1.4. Güneş Enerjisi Santralleri.....	16
a.) Konsantre Edilmiş Güneş Enerjisi Santralleri.....	16
b.) Fotovoltaik Güneş Elektrik Santralleri.....	17
2.1.5. Biyokütle Enerji Santralleri.....	17
2.1.6. Dalga Enerjisi Santralleri.....	18
2.1.7. Hidrojen Enerjisi Santralleri.....	20
2.2. Yenilenemeyen Enerji Kaynakları	21
2.2.1. Fosil Yakıtlı Enerji Santralleri.....	21

2.2.2. Nükleer Enerji.....	22
2.3. Gaz Türbinli Enerji Santralleri.....	22
2.4. Gaz Türbin Çevrimi	23
2.4.1. Komprosör.....	24
2.4.2. Yanma Odası.....	24
2.4.3. Gaz Türbini	24
2.5. Gaz Türbin Çevriminin Enerji Analizi.....	24
2.5.1. Kompresör Analizi.....	26
a.) İzantropik Koşullarda Kompresör Çıkış Sıcaklığının Belirlenmesi.....	28
b.) Kompresör Özgül İşinin Belirlenmesi.....	29
c.) Kompresörde Entropi Değişimi.....	31
d.) Kompresör Verimi.....	32
2.5.2. Yanma Odası Analizi.....	33
a.)Yanma.....	34
b.) Teorik Hava Yakıt Oranı.....	35
c.) Gaz Karışımının Molekül Kütlesi.....	36
d.) Doğalgazın Nemli Hava İle Yakılması.....	36
e.) Kararlı Akım Sistemlerinde Yanma Enerji Analizi.....	37
2.5.3. Gaz Türbin Analizi.....	39
a.) Türbin Çıkışı Teorik Sıcaklığının Belirlenmesi.....	39
b.) Türbin İş.....	40
c.) Türbin Verimi.....	43
d.) Brayton Çevrimi Isıl Verimi.....	43
2.6. Modelleme, Simülasyon ve Optimizasyon	45
2.7. Matlab ve Simulink	46

3. MODEL ÇALIŞMASI	48
3.1.Modelin Amaçları	50
3.2. Modelin Hazırlanmasında Yapılan Kabuller	50
3.3. Modelin Oluşturulması	50
3.4. Hava ve Gaz Girişi Bloğu	51
3.5. Kompresör Bloğu	58
3.5.1. Kompresör a. Altblok	59
3.5.2. Kompresör b. Altblok	68
3.6. Yanma Odası Bloğu	69
3.6.1. Yanma Odası a. Altblok	70
3.6.2. Yanma Odası b. Altblok	73
3.6.3. Yanma Odası c. Altblok	75
3.7. Gaz Türbin Bloğu	79
3.7.1. Gaz Türbin a. Altblok	79
3.7.2. Gaz Türbin b. Altblok	80
3.8. Model Simülasyon Sonuçlarının Literatür Çalışmasıyla Karşılaştırılması	86
4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	91
KAYNAKLAR	94
EKLER	100

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL	Sayfa
2.1. Hidroelektrik santrali uygulama şeması	14
2.2. Rüzgar türbininde elektrik üretimi.....	14
2.3. Jeotermal yoluyla elektrik enerjisi üretimi temsili şeması	15
2.4. Konsantre güneş enerjisi santral şeması.....	16
2.5. Gün ışığından PV ile elektrik enerjisi üretim santrali.....	17
2.6. Gönen biyokütle santrali	18
2.7. a.) Dalga enerjisinden elektrik enerjisi üretilen santral, b.) Wells Türbini.....	19
2.8. Hidrojenden sıcak su ve elektrik enerjisi üretimi.....	20
2.9. Gaz türbinlerinin performanslarının zamanla gelişimi	22
2.10. Gaz Türbinli Santrallerin Kısımları.....	23
2.11. Bir açık gaz türbin çevrimi akış şeması, P-V diyagramı ve T-S diyagramı.....	24
2.12. Geliştirilen modelden elde edilen Brayton çevrimli gaz türbininin P-V diyagramı	26
2.13. Kompresöre hava giriş ve çıkışı	27
2.14. Teorik ve gerçek Brayton Çevrimi T-S diyagramı	32
2.15. Yanma odası akışının şematik gösterimi.....	38
2.16. Gaz türbini şematik gösterimi.....	40
3.1. Model algoritması.....	49
3.2. Gaz türbin çevrim modeli bileşenleri ve verilerin iletimi	51
3.3. Hava ve gaz girişi blok kapsamı şematik gösterimi	53
3.4. Kompresör bloğu şematik gösterimi	59
3.5. Kompresör a. altblok şematik gösterimi	59
3.6. Kompresör gerçek çıkış sıcaklığının sıkıştırma oranına göre değişimi	63
3.7. Kompresör veriminin sıkıştırma oranına göre değişimi	63

3.8. Sıkıştırma oranı 6 için çevrimin P-V diyagramı	65
3.9. Sıkıştırma oranı 10 için çevrimin P-V diyagramı	66
3.10. Sıkıştırma oranı 12 için çevrimin P-V diyagramı.....	66
3.11. Sıkıştırma oranı 16 için çevrimin P-V diyagramı	67
3.12. Yanma odası bloğunun şematik gösterimi	70
3.13. Yanma odası a. altblok şematik gösterimi	71
3.14 Yanma odası b. altblok şematik gösterimi	73
3.15. Yanma odası c. altbloğun şematik gösterimi	76
3.16. Yanma odasından transfer edilen özgül ısı enerjisinin sıkıştırma oranına göre değişimi.....	78
3.17. Gaz türbin altbloğu şematik gösterimi	79
3.18. Gaz türbin b. altblok şematik gösterimi	81
3.19. Kompresör teorik çıkış sıcaklığı, yanma odası çıkış sıcaklığı ve gaz türbin teorik çıkış sıcaklığının sıkıştırma oranlarına göre değişimi	88
3.20. Türbin çıkışı gerçek sıcaklığının sıkıştırma oranına göre değişimi	89
3.21. Türbin veriminin sıkıştırma oranına göre değişimi	89

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Havanın fiziksel özellikleri.....	52
3.2. Modelde kullanılan 1 kmol doğalgazı oluşturan bileşenlerin mol yüzde miktarları.....	52
3.3. Proses işletme verileri.....	52
3.4. Giriş sıcaklığında havanın doyma basıncının değeri	54
3.5. Havanın molar bileşimi ve molekül kütlesi.....	55
3.6. Giriş havasının özgül entalpi ve entropi değerleri.....	56
3.7. Havanın özgül entalpi ve entropisinin tablo ve model değerleri.....	56
3.8. Hava ve gaz girişi e. bloğuna girenler ve elde edilen değerler	58
3.9. Kompresör a.1. altblok modeline girilen veriler ve elde edilen değerler.....	60
3.10. Kompresör a.2. altbloğu kapsamında tanımlanan ve hesaplanan değerler.....	61
3.11. Kompresör a.3. altblok modelinin çalıştırılması ile elde edilen değerler.....	62
3.12. Kompresör b. altbloğunda elde edilen değerler.....	69
3.13. Kompresör b. bloğunda elde edilen değerler.....	69
3.14. Çevrimde kullanılan doğalgaz bileşenlerinin polinom katsayıları.....	71
3.15. Doğalgaz bileşenlerinin kompresör gerçek çıkış sıcaklıklarındaki özgül entalpileri.....	72
3.16. Doğalgaz bileşenleri ile su buharının oluşum entalpileri	72
3.17. Doğalgaz bileşenlerinin referans sıcaklığındaki özgül entalpileri	73
3.18. Adyabatik alev sıcaklığında ürünlerin özgül entalpileri	74
3.19. Adyabatik alev sıcaklığına göre atık gaz karışımının özgül entalpileri.....	75
3.20. Reaktanların karışım olarak özgül entalpileri	77
3.21. Yanma odasından transfer edilen özgül ısı enerjisi miktarları.....	77
3.22. Gaz türbin çıkışı teorik sıcaklıkları.....	80
3.23. Ürünlerin ayrı ayrı ve karışım olarak türbin girişinde özgül entalpileri.....	82

3.24. Türbin çıkışı gerçek sıcaklığına göre ürünlerin ayrı ayrı ve karışım halinde özgül entalpileri.....	83
3.25. Türbin çıkışı teorik sıcaklığına göre ürünlerin ayrı ayrı ve karışım halinde özgül entalpileri.....	85
3.26. Gaz türbininin teorik ve özgül işinin sıkıştırma oranlarına göre değişimi.....	85
3.27. Kompresör çıkışında elde edilen değerlerin karşılaştırılması.....	86
3.28. Türbin çıkışı teorik sıcaklıklarının karşılaştırılması.....	87



SİMGELER DİZİNİ

$\overline{c_v}$	Sabit hacimde molar özgül ısı katsayısı (kJ/kmol.K)
$\overline{c_p}$	Sabit basınçta molar özgül ısı katsayısı (kJ/kmol.K)
e	Özgül enerji (kJ/kg)
φ	Bağıl nem oranı (%)
h	Özgül entalpi (kJ/kg)
h_2	Kompresör teorik çıkış sıcaklığında havanın özgül entalpisi (kJ/kg)
h_{2g}	Kompresör gerçek çıkış sıcaklığında havanın özgül entalpisi (kJ/kg)
$\overline{h_3}$	Adyabatik alev sıcaklığında ürün özgül entalpisi (kJ/kmol)
$\overline{h_4}$	Türbin teorik çıkış sıcaklığında özgül entalpi (kJ/kmol)
$\overline{h_{4g}}$	Türbin gerçek çıkış sıcaklığında ürün özgül entalpisi (kJ/kmol)
$\overline{h}$	Molar özgül entalpi (kJ/kmol)
$\overline{h_{o1}^*}$	Bileşiklerin oluşum entalpisi (kJ/kmol)
$\overline{h^*}$	Bileşiklerin referans sıcaklığındaki entalpisi (kJ/kmol)
i	Bileşen
k	Havanın adyabatik üssü
k_m	Ürün gazının adyabatik üssü
m	Kütle (kg)
M	Molekül kütlesi (kg/kmol)
M_m	Karışımın molekül kütlesi (kg/kmol)

η_c	Kompresör verimi (%)
η_t	Türbin verimi (%)
η_{th}	Çevrim ısı verimi (%)
n	Mol miktarı (kmol)
p_c	Sıkıştırma oranı
P_1	Giriş basıncı (kPa)
P_2	Kompresör çıkışı basıncı (kPa)
P_v	Havadaki su buharının kısmi basıncı (kPa)
P_{doy}	Havadaki su buharının doyma basıncı (kPa)
q	Özgül ısı enerjisi (kJ/kg), (kJ/kmol)
$q_{çıkış}$	Yanma odasından transfer edilen özgül ısı enerjisi (kJ/kmol)
R_u	Üniversal gaz sabiti (kJ/kmol.K)
$\bar{s}^o$	Molar özgül entropi (kJ/kmol.K)
$\bar{s}_1$	Kompresör girişinde molar özgül entropisi (kJ/kmol.K)
$\bar{s}_2$	Kompresör çıkışında molar özgül entropisi (kJ/kmol.K)
T_1	Giriş sıcaklığı (K)
T_2	Kompresör çıkışı teorik sıcaklığı (K)
T_{2g}	Kompresör çıkışı gerçek sıcaklığı (K)
T_3	Adyabatik alev sıcaklığı (K)
T_4	Türbin çıkışı teorik sıcaklığı (K)
T_{4g}	Kompresör çıkışı gerçek sıcaklığı (K)
T_{ref}	Referans sıcaklık (K)
u	Özgül iç enerji (kJ/kg), (kJ/kmol)
V_1	Giriş hacmi (m ³)
V_2	Çıkış hacmi (m ³)
v	Özgül hacim (m ³)
w	Özgül iş (kJ/kg), (kJ/kmol)
$w_{akış}$	Kontrol hacmine giren yada çıkan akışkanın sahip olduğu enerji (kJ/kg)

w_c	Kompresörün tükettiği teorik özgül iş (kJ/kg)
w_{cg}	Kompresörün tükettiği gerçek özgül iş (kJ/kg)
w_t	Türbinin ürettiği teorik özgül iş (kJ/kg)
w_{tg}	Türbinin ürettiği gerçek özgül iş (kJ/kg)
y_i	Mol oranı



KISALTMALAR DİZİNİ

DGBMK	Doğalgaz bileşenlerinin molekül kütleleri
DGKMK	Doğalgaz karışım molekül kütlesi
DGBOE	Doğalgaz bileşenlerinin oluşum entalpileri
DGYB	Doğalgaz yüzde olarak bileşenleri
FI	Bağıl nem miktarı
h1_hava	Havanın giriş sıcaklığında özgül entalpisi
h2g_H2O	Subuharının kompresör çıkışı gerçek sıcaklığında özgül entalpisi
h_2g_hava_N2	Azot gazının kompresör çıkışı gerçek sıcaklığında özgül entalpisi
h_2g_hava_O2	Oksijen gazının kompresör çıkışı gerçek sıcaklığında özgül entalpisi
h2g_CH4	Metan gazının kompresör çıkışı gerçek sıcaklığında özgül entalpisi
h2g_C2H6	Etan gazının kompresör çıkışı gerçek sıcaklığında özgül entalpisi
h2g_y_CO2	Karbondioksit gazının kompresör çıkışı gerçek sıcaklığında özgül entalpisi
h2g_y_N2	Azot gazının kompresör çıkışı gerçek sıcaklığında özgül entalpisi
h3_N2	Azot gazının adyabatik alev sıcaklığında özgül entalpisi
h3_H2O	Subuharının adyabatik alev sıcaklığında özgül entalpisi
h3_CO2	Karbondioksit gazının adyabatik alev sıcaklığında özgül entalpisi
h3_y	Atık gazının karışım halinde adyabatik alev sıcaklığında özgül entalpisi
h3_tg	Atık gazının karışım halinde türbin girişinde (adyabatik alev sıcaklığında) özgül entalpisi

h4g_N2	N2 gazının türbin çıkışı geçek sıcaklığında özgül entalpisi
h4g_CO2	CO2 gazının türbin çıkışı geçek sıcaklığında özgül entalpisi
h4g_H2O	H2O ' nun türbin çıkışı geçek sıcaklığında özgül entalpisi
h4g	Ürünlerin türbin çıkışı geçek sıcaklığında özgül entalpisi
h4_N2	N2 gazının türbin çıkışı teorik sıcaklığında özgül entalpisi
h4_CO2	CO2 gazının türbin çıkışı teorik sıcaklığında özgül entalpisi
h4_H2O	H2O ' nun türbin çıkışı teorik sıcaklığında özgül entalpisi
h4	Ürünlerin türbin çıkışı teorik sıcaklığında özgül entalpisi
href_H2O	Subuharının referans sıcaklığında özgül entalpisi
h_ref_hava_N2	Azot gazının referans sıcaklığında özgül entalpisi
h_ref_hava_O2	Oksijen gazının referans sıcaklığında özgül entalpisi
h_ref_CH4	Metan gazının referans sıcaklığında özgül entalpisi
h_ref_C2H6	Etan gazının referans sıcaklığında özgül entalpisi
h_ref_y_CO2	Karbondioksit gazının referans sıcaklığında özgül entalpisi
h_ref_y_N2	Azot gazının referans sıcaklığında özgül entalpisi
h_sb_yanma	Yanma odasına giren subuharının toplam özgül entalpisi
h_hava_yanma	Yanma odasına giren havanın toplam özgül entalpisi
h_yakıt_yanma	Yanma odasına giren doğalgazın toplam özgül entalpisi
h_giren_top	Yanma odasına girenlerin toplam özgül entalpisi
H2O_OE	Subuharının oluşum entalpisi
HBMK	Hava bileşenlerinin molekül kütleleri
HMK	Havanın molekül kütlesi
HYB	Havanın yüzde olarak bileşenleri
HY_teorik	Teorik hava yakıt oranı
nc	Komprör verimi
nt	Türbin verimi
pc	Kompresör sıkıştırma oranı
q_çıkış	Yanma odasından transfer edilen özgül ısı enerjisi
S_kat	Stokiyometrik yanma denklemi katsayıları
s1_hava	Havanın giriş sıcaklığında özgül entropisi

T_{ref}	Referans sıcaklık
w_{cevrin}	Çevrimin net gerçek özgül işi
w_{ca}	Kompresör gerçek özgül işi
w_{ta}	Türbin gerçek özgül işi



1. GİRİŞ

Ülkelerin ve toplumların gelişme düzeylerinin göstergelerinden birisi de enerji tüketimleridir. Nüfusun artması, kentleşme, sanayileşme ve teknolojik gelişmeler paralelinde enerji talebi de artar. Artan bu enerji talebini karşılamak için öteden beri farklı enerji üretim yöntemleri geliştirilmiş olup bu yöntemler arasından enerji talebinin karşılanmasında gaz türbin tabanlı teknolojiler önemli bir rol oynarlar [1].

Gaz türbin teknolojileri elektrik üretiminde, uçak, helikopter ve deniz araçları gibi araçların güç üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu makineler gün geçtikçe gelişmekte ve karmaşık hale gelmektedir. Bu durumda da donanım testlerinin maliyeti yükselmektedir [2].

Özellikle kombine çevrim santralleri gibi büyük sistemlerin ilk yatırım ve işletme maliyetleri yüksek meblağlara mal olduğundan kurulması planlanan sistemlerin hangi koşullarda ne kadar verimli olabileceği hususunda, çok zaman ve para harcamadan doğru sonuçlara ulaşmak büyük önem arzeder. Bunun yanı sıra, kurulu proseslerin rekabetçi piyasa koşullarında verimi yüksek sistemlere dönüştürülmesi, sanal ortamlarda gerçek şartlara uygun matematik modelleri yapılarak rasyonel olup olmayacaklarının analizi de önemlidir.

Analiz çalışmalarında farklı programlama dilleri kullanılmakta olup bunlardan birisi de Matlab/Simulink'tir. Bu dil bir simülasyon (benzetim) aracı olarak geliştirilen gerçek zamanlı modeller ile sistemlerin doğrulanması, testlerinin yapılmasını mümkün hale getirmiştir [3]. Bu dilin dışında pek çok farklı dil ve programlar vasıtasıyla benzer simulasyon teknikleri geliştirilmeye devam etmektedir.

Yapılan literatür taramalarında, optimizasyon (en iyileme) ve modelleme konularında geliştirilen farklı yöntemlerde, gaz türbin tabanlı enerji üretim santrallerinde ortam sıcaklığı, havadaki nem oranı, kompresörün sıkıştırma oranı gibi giriş parametrelerini değişken kabul ederek termodinamik denklemlerine uygun algoritmaların geliştirildiği ve yapılan analizlerle yanma odasında üretilen ısı enerjisi, türbin giriş

sıcaklığı, baca gazı sıcaklığı, kompresör ve türbin verimleri, sistemin ısı verimi gibi santral performans değerlerinin değişimi ve bu değerlerin gerçek saha değerleri ile karşılaştırıldığı görülmektedir.

A. M. Ahmed ve M. Tariq, C++ yazılımı ile Brayton esaslı gaz türbin çevrimini modellemişler ve gerçekçi parametrelerle basit gaz türbini çevrimi hesaplamaları yapmışlardır. Sıkıştırma oranları, ortam sıcaklığı ve türbin giriş sıcaklığı parametrelerinin çevrim verimliliğinde artış anlamına gelmediğini, ancak yapılan işin arttığını doğrulamışlardır. Ancak aynı koşullarda ara soğutmalı (intercooling) ve rejeneratif gaz türbinli proseslerin ısı verimini artırmada bu parametrelerin önemli olduklarını kurdukları model ile göstermişlerdir [4].

M. M. Rahman ve diğerleri, Matlab ile bir gaz türbin santral modeli geliştirerek sıkıştırma oranının, ortam sıcaklığının, hava/yakıt oranının ve aynı zamanda izantropik verimin termal verimlilik üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir [5].

J.N.Rai ve diğerleri, MATLAB/Simulink Tabanlı Simülasyon yazılımını kullanarak kombine çevrim santralının performans analizini Brayton ve Rankine çevrimlerini birleştirerek modellemişlerdir. Giriş sıcaklığının düşürülmesinin gaz türbin verimliliğini artırdığını, gaz türbin verimliliğinin artırılmasının kombine çevrimin genel verimini artıracağı anlamına gelmediğini, gaz türbin verimliliğinin artırılmasının belirli bir çıkış sıcaklığı için buhar türbininin daha düşük buhar giriş sıcaklığına neden olacağından buhar türbini verimini azaltacağını ve bunun da kombine çevrimin genel verimliliğinde düşüğe neden olacağını, yakıt miktarının artırılması ile daha yüksek gaz türbin çıkış sıcaklığı elde edilebildiğini ancak bunun da türbin kanatlarının mukavemet limitlerini zorlayarak türbin bileşenlerinin hasar görmesine neden olacağını, türbinde sıcaklığın fazla hava akışı ile kontrol edilebileceğini göstermişlerdir [6].

A. K. Tiwari ve diğerleri, ortam sıcaklığının kombine çevrim santralının performansına etkisini incelemişler ve kombine çevrim verimindeki net azalmanın %

0.04 olduğunu ve farklı santral bileşenlerindeki ekserji tahribatındaki değişimin, ortam sıcaklığındaki her 1 °C artmada % 0.35'e kadar çıktığını belirtmişlerdir [7].

M.Kıyan ve diğerleri, Şanlıurfa'da sera uygulamaları için hibrit (güneş ve fosil yakıtlı) bir ısıtma sisteminin modelini ve simülasyonunu Matlab/Simulink ile yapmışlardır. Bu modelin farklı tip güneş seralarının ısıtma sistemlerinin tasarlanmasında güneş kollektörü ile termal depolama boyutlarının optimize edilmesinde kullanılabildiğini göstermişlerdir [8].

M. Fallah ve diğerleri, yaptıkları çalışmada dört farklı gaz türbini sistemini ekserji analizi yönünden karşılaştırılmışlardır. Bu türbinler: basit gaz türbini, evaporatif giriş hava soğutuculu gaz türbini, buhar enjeksiyonlu gaz türbini ve buharlaştırıcı giriş hava soğutuculu buhar enjeksiyonlu gaz türbinidir. Analiz, mühendislik metodu ve termodinamik çevrim metodu temelinde gerçekleştirilmiştir. Bu karşılaştırmalarda, türbin giriş sıcaklığı, ısı oranı ve ortam sıcaklığı parametreleri sistemin ana parametreleri olarak seçilmiş ve türbin kanat soğutması tüm sistemlerde dikkate alınmıştır. Sonuç olarak, maksimum net çalışma koşulunda, yanma odasının en yüksek ekserji yıkımına (ve dolayısıyla optimizasyon önceliğine) sahip olduğunu, bunu ısı geri kazanım ünitesi, türbin ve kompresörün izlediğini, ayrıca, maksimum verimlilik koşulunda optimizasyon önceliği sırasının yanma odası, türbin, ısı geri kazanım ünitesi ve kompresörü olduğu sonucuna varmışlardır [9].

T. K. Ibrahim ve M. M. Rahman, kombine çevrimli gaz türbin santralleri için Matlab'de bir model geliştirmişler ve sıkıştırma oranları, hava/yakıt oranı ve aynı zamanda izantropik verimliliklerin, kombine çevrimli gaz türbin santralının genel termal verimliliğini güçlü bir şekilde etkilediğini ifade etmişlerdir [10].

M.Kiriş, Çorum'da kurulu doğalgaz türbinini 1. ve 2. Yasa kapsamında -2,7 °C ve 7,5 °C aralığındaki dış hava sıcaklığında EES ve TRNSYS programları ile analiz etmiş, artan dış hava sıcaklıklarında kompresörün tükettiği güç, türbinin ürettiği güç ve yanma odasından verilen ısı miktarının azaldığını, çevrimin maksimum ısı veriminin % 50 civarında olduğunu, termodinamiğin II. kanunu açısından sonuçlar

incelendiğinde; kompresör, türbin ve yanma odasında üretilen entropi miktarlarında azalma olduğunu tespit etmiş, kompresör, türbin ve yanma odasının ekserji verimlerinde fazla değişiklik olmadığını görmüş, maksimum ekserji veriminin % 91 ile kompresörde, minimum ekserji veriminin ise % 11,5 ile boilerde meydana geldiğini ve türbinde üretilen güç ve kompresörün tükettiği güç kıyaslandığında EES'den elde edilen sonuçlarla TRNSYS'den elde edilen sonuçlar arasında çok iyi bir uyum olduğunu tespit etmiştir [11].

A. O. Ong'iro ve diğerleri Aspen Plus yazılımı ile kombine çevrimli güç santralini simule etmişler ve entegre gazlaştırma kombine çevrimi ve nemli havalı entegre gazlaştırma türbin çevriminin bilgisayar simülasyon modellerini geliştirmişlerdir. Bu modelleri kütle, enerji ve ekserji dengelerini kurarak gerçekleştirebildiklerini belirtmişlerdir. Tasarım ve performans parametrelerindeki değişikliklerle entegre gazlaştırma kombine çevrim ve nemli havalı entegre gazlaştırma türbin çevrim verimliliği, emisyonları ve ekonomileri üzerindeki etkilerini incelemede kullanılabildiklerini belirtmişlerdir. Hazırlanan modellerin esnek çevrim konfigürasyonlarında giriş ve bileşen performans verilerinde istenilen değişiklikleri kolaylıkla yerine getirebildiğini belirtmişlerdir [12].

D. K. Mohanty ve V. Venkatesh, Matlab ile kombine bir çevrim santralinin gaz ve buhar taraflarını entegre ederek enerji kaybını en aza indirebilmek için modelin buhar kısmını maksimum sıcaklık ve basınç, türbin giriş sıcaklığı ve Brayton çevriminin basınç oranı, net çıkış işi ve kombine çevrimin termal verimliliği gibi çeşitli parametrelere etkisini simülasyonla incelemişler ve;

a-)sabit basınç oranı, türbin giriş sıcaklığı için, iş ve ısı verimliliğinin maksimum çevrim basıncı ve buhar türbininin maksimum sıcaklığından güçlü bir şekilde etkilendiğini,

b-) sabit maksimum çevrim basıncı ve maksimum buhar türbini sıcaklığı için, çıkış işinin basınç oranından çok fazla etkilenmediğini, ancak benzer çalışma koşullarında,

verimliliğin hem basınç oranı hem de türbin giriş sıcaklığından önemli ölçüde etkilendiği,

c-) sabit türbin giriş sıcaklığı ve basınç oranı için, hem maksimum çalışma basıncı hem de buhar türbin çevrimi maksimum sıcaklığının maksimum çevrim basıncı ile etkili şekilde arttığını, bununla birlikte buhar türbin çevrimi maksimum sıcaklığının çıkış işinde önemli bir artışın oluştuğu,

d-) Maksimum çevrim basıncı ve buhar türbini maksimum sıcaklığı sabit tutulduğunda, hem çıkış işi hem de termal verimin, basınç oranından çok fazla etkilenmediğini, ancak türbin giriş sıcaklığından önemli ölçüde etkilendiği belirtilmiştir [13].

H. G. Arangi ve diğerleri, UniGraphics-x yazılımı ile soğutmalı ve soğutmasız kompresör modelini geliştirmişler ve bu modeli ANSYS ile analiz ederek saha sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Yaptıkları modelin sonuçları ile saha değerlerinin yaklaşık olarak eşit olduğunu belirtmişlerdir [14].

N. Farouk ve diğerleri, ortam sıcaklığının gaz türbin enerji santralini performansına etkisini araştırmışlar havanın kütle akış hızındaki azalmaya bağlı olarak gücün azaldığını, buna bağlı olarak havanın yoğunluğunun sıcaklık arttıkça azalmasından dolayı yüksek sıcaklıktaki havayı sıkıştırmak için daha fazla güç gerektiğini ve bununla verimde azalmaya neden olduğunu belirtmişlerdir [15].

M. M. A. Al-Sood ve diğerleri, geri dönüşsüz, rejeneratif, ara soğutma ve yeniden ısıtılmalı gaz türbin çevriminin performansını maksimum yapan optimum çalışma parametrelerini belirlemeye çalışmışlar, bu amaçla iki kademeli kompresör ve türbin kullanmışlardır. Optimum koşulların minimum sıcaklığın 302 K ile 315 K arasında maksimum sıcaklığın ise 1320 K ve 1360 K arasında iken gerçekleştiğini ve bunun da meteorolojik etkilerin dikkate alınması gerektiğini gösterdiğini belirtmişlerdir. Tüm performans parametrelerinin optimallliğini sağlamak için gaz türbini döngüsündeki maksimum basınç değerinin 1449 kPa ila 2830 kPa aralığında

seilebildiğini, son olarak, ısı değiştiricilerin optimum ısıl kapasitesinin 20,7 ila 29,6 kW/K arasında değiştiğini belirtmişlerdir [16].

P. Ahmadi ve I. Dincer, ek bir ateşleme sistemine sahip bir kombine çevrim santralin (CCPP), enerji ve ekserji analizini önce termodinamik olarak sonra genetik algoritmali optimizasyon yöntemi ile optimal tasarımı belirlemeye çalışmışlardır. Tasarım parametrelerini en uygun şekilde bulmak için termo-ekonomik bir yöntem kullanmışlardır. Talep edilen g ve yakıt maliyetindeki değişikliklerin etkilerini üç farklı çıkış g (yani 160, 180 ve 200 MW) dikkate alarak incelemişlerdir. Model sonuçları ile gerçek veriler arasındaki ortalama farkın yaklaşık % 1.41 olduğunu belirtmişlerdir [17].

S. V. Usov ve A. A. Kudinov, Thermolib yazılım paketi ve Matlab Simulink yardımıyla bir kombine çevrim santralinin matematik modelini oluşturarak deneysel test sonuçları ile gerçek sonuçları karşılaştırmışlar, türbini çıkışındaki ürünlerin karakteristik sıcaklık eğrisinin deneysel (saha) olana kıyasla biraz düşük olduğunu (bunun nedeninin modeldeki izantropik değerin sabit olarak kabul edilmesi ve egzoz genişlemesinin doğal bir çevrede adım adım değerren izantropik değerden gerçekleşmesi olarak izah edilebileceğini), yüksek ve orta basınç buhar devrelerinin parametrelerinin gerçek değerlerin biraz üstünde kaldığını, seçilen karmaşıklık derecesinde, Thermolib yazılım paketi tarafından geliştirilen CCP-200 modelinin özelliklerinin, deneysel (saha) garanti testleri sırasında alınan CCP-200 buhar-gaz g üretim ünitesinin gerçek özelliklerine hemen hemen denk geldiğini belirtmişlerdir [18].

M.H. Gobran, çalışmasında tek milli enerji üreten gaz türbini makinesinin performans analizini yapmak için Matlab Simulink ile iki model geliştirerek kullanmışlar, birinci modelde makinenin çalıştırılması sırasında yüksüz % 65 ile % 100 arasında değerren hız, diğerinde ise %100 sabit hızdaki yüksek performans alınacak çalışma noktasını belirlemeye çalışmışlar. Ayrıca ortam sıcaklığının tasarım koşullarındaki motor performans parametreleri üzerindeki etkileri araştırmışlardır. Sonuç olarak, artan ortam sıcaklığı ile maksimum motor göçünde, yakıt debisi ve

termal verimliliğin azaldığının açıkça görüldüğünü, kompresör çıkış sıcaklığı ve türbin çıkış sıcaklığının, artan ortam sıcaklığı ile artarken türbin giriş sıcaklığının biraz azaldığını, kompresör basınç oranı ve hava akış hızının, artan ortam sıcaklığı ile azaldığını belirtmişlerdir. Simulink modeli sonuçları ile saha verilerinin uyumlu olduğunu ve hazırlanan makine simülasyonunun uygun olduğunu belirtmişlerdir [19].

J.A. G. Bustamante ve diğerleri, yaptıkları çalışma ile doğalgaz kullanan bir santral prosesinin Matlab ile dinamik simülasyonunu (zamana göre değişen sistemleri temsil eden simülasyonlar) yapmışlardır. Model bir doğal gaz tedarik hattının bir kombine santralin çalışmasını sağlamaya dönüktür. Proses kurulumu aşamalarında karşılaşılan problemleri göz önünde bulundurmuşlar, kütle, momentum ve enerji korunum denklemlerinin birebir modelleri, hal denklemleri ve Matlab Simulink yazılım ortamında geliştirilmiş ve uygulanmıştır ve böylece süreç ve kontrol tekniklerini kapsayan gerçek bir entegre tasarım platformu sağlanmıştır, geliştirilen model, bir buharlı elektrik santralinde bir kazanı besleyen doğal gaz hattındaki geçişlerin analizine uygulanmıştır. Boru kesit modeli, usulüne uygun olarak kontrastlı boru yazılımı ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak doğrulanmıştır ve gaz sayacı modelinin sonuçları, imalatçı tarafından sağlanan kalibrasyon eğrileri ile karşılaştırılmıştır ve önerilen çözümün, proses sistemlerinin dinamik bir analizini yapmamıza ve endüstriyel projeler için makul bir maliyetle düzenleme ve kontrol sistemlerini tasarlamasına ve böylece dinamik analiz kullanımını yaygınlaştırmamıza izin vermesi gerektiğini belirtmişlerdir [20].

E. Alcalá ve diğerleri, hava yastıklarının piroteknik gaz jeneratörleri için analitik Matlab / Simulink modelini geliştirmişler, bu model ile hava yastığı şişiricilerinin davranışını hesaplamışlar ve yaptıkları modelin en avantajlı özelliğinin herhangi bir ara dosya olmaksızın ticari çarpışma simülasyon yazılımına bağlanabilmesi olduğunu ve blok modelleme tekniği kullanılarak geliştirilmiş olmasından dolayı yeni yetenekler kazanmak için diğer blok modellerine kolayca geliştirilip tamamlanabilmesi ve eklenmesi olduğunu belirtmişlerdir [21].

J.H. Shazly ve diğerkleri, MATLAB kullanarak bir güneş enerjili düşük sıcaklıklı Stirling motorunun ısı analizi için simülasyon, tasarım ve termal analizi yapmışlardır. Bu çalışma ile maksimum 900 W/m^2 güneş yoğunluğunda veya $8,55 \text{ J/s'lik}$ ısı girişinde, motorda $64.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ısı kaynağı sıcaklığı ve $51.52 \text{ }^\circ\text{C}$ ısıtma kabı için hava sıcaklığı ile 126 d/d'da 0.5171 W'lık bir maksimum şaft gücü üretildiğini belirtmişlerdir [22].

180 MW'lık Garri 2 kombine çevrim santralının tüm bileşenlerinin ekserji analizi 2. yasa doğrultusunda yapılmış olup toplam ekserji yıkımının %63 oranında olduğu, en büyük ekserji yıkımlarının sırasıyla gaz ve buhar türbinlerinde meydana geldiğinin tespit edildiği belirtilmiştir [23].

S. Lim ve diğerkleri, Simulink kullanarak CO_2 emisyonunu azaltmak için , aralıklı çalışan ısı pompalı bina ısı şebekesi sisteminin dinamik modellenmesi çalışmasını yapmışlardır. Çalışmada karmaşık enerji ağı sistemi için ısı akışını ve sıcaklık değişimini tahmin edebilen sayısal bir model geliştirmişler, bu modeller borular ve binaların özel koşulları için ayrı ayrı geliştirilmiştir. Boru modelinde, akışsız durum için dominant iletim ısı transfer modeli inşa edilmiştir. Sonuç olarak; borudaki enerji kaybının toplam enerji tüketiminin % 10'u, her binada gerçekleşen kaybın, yapının büyüklüğü ile doğru orantılı olduğunu, toplam enerji kaybının% 38 ile havalandırma kaybı olduğunu , boru ısı kaybının güçlü bir yalıtımı gerekli kıldığını ve oluşturulan kodun deneysel verilerle doğrulandığını belirtmişlerdir [24].

T. K. S. Ritschel ve diğerkleri, dinamik süreçlerin simülasyonu ve optimizasyonu için ThermoLib ile bir termodinamik blok kütüphanesi üretmişlerdir. Üretilen bu bloklar ile verimli dinamik simülasyon ve optimizasyon için 1. ve 2. türevleri sağlayabilmesi, buhar ve sıvı faz termodinamik özelliklerini hesaplamak için kübik denklemler kullanabilmesi böylece analitik türevler yardımı ile sonlu fark yaklaşımlarına kıyasla hesaplama performansını 12-35 arasında bir faktörle geliştirmesi, örnek bir dinamik optimizasyon çalışmasına uygulanması ile 1. ve 2. türev yada gradyanların iyi bir hesaplama performansı için kullanılabilir olduğunu ifade etmişlerdir [25].

J. Sousa ve diğeri, NASA tarafından geliştirilen roketlerde kullanılan dönel patlatma yakıcı ile bir gaz türbini motorunun termodinamik analizini NASA tarafından geliştirilen Matlab- Simulink yazılımı ile geliştirilen T-MATS blok kütüphaneleri üretilip kullanarak modellemişlerdir. Türbin blok modülü ile önce süpersonik geçişin başlamasını sağlamışlar ve daha sonra tek boyutlu analiz, hız üçgenleri ve yeni kayıp korelasyonları kullanarak güç hesabını ve çıkış koşullarını belirlemişlerdir. Motor verimliliğinin nihai değerlerinde azaltılmış modellerle ilişkili belirsizliklerin etkilerini ölçmek için bir belirsizlik yayılım çalışması yapılmıştır. Çalışma, motorun eşleşme koşullarını belirlemek için saatte yüzlerce simülasyonun yapılmasını sağlayan basitleştirilmiş bir model sunmuştur. Konvansiyonel yakıcıya karşılık dönen bir patlayıcı yakıcı ile donatılmış gaz türbini mukayesesi, düşük basınç oranlarında basınç kazanımlı yanmanın potansiyel faydalarını göstermiştir. Verim kazancı, düşük basınç oranlarında % 5'in üzerindedir, ancak bu kazanç yüksek sıkıştırma oranlarında kaybolur. Son olarak, bu modelin, küçük elektrik tesislerini boyutlandırmak veya gelişmiş termodinamik çevrimlerle birleştirilmiş küçük uçakların yörüngesini optimize etmede kullanılabilir olduğu belirtilmiştir [26].

A. Chaibakhsh ve S. Amirkhani, ağır hizmet sektöründe kullanılan gaz türbinlerinin geçici davranışları için bir simülasyon modeli geliştirmişlerdir. Kompresör ve türbin verimlilikleri, kompresör sıkıştırma oranı ve soğutma süreçleri de dahil olmak üzere ana değişkenlerin dinamiklerini tanımlamak için yeni yarı deneysel korelasyonlar önerilmiştir. Modellerin bilinmeyen parametreleri, genetik algoritma tabanlı bir optimizasyon süreci ile elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ağır iş gaz türbini ünitesinin düşük hesaplama maliyetleriyle dinamik geçiş davranışını simüle ederek geliştirilen modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini gösterdiğini belirtmişlerdir [27].

L. Shu-ying ve diğeri, çalışmalarında gaz türbini ekipmanlarının yurtiçinde ve yurtdışında entegre simülasyon teknolojisi geliştirme durumunu özetlemişler, mevcut yerel araştırmalardaki eksikliklerin karşılaştırmalı analizini yapmışlar, ülkelerindeki gaz türbini ekipmanı ile ilgili entegre simülasyon alanında gelişim yönünü tahmin etmeye çalıştıklarından bahsetmişlerdir [28].

R. A. Roberts and S. M. Eastbourn, hesaplamalı verimli dinamik turbofan motor modeli için modelleme teknikleri üzerinde Matlab Simulink ile turbofan motor modeli geliştirmişlerdir. Yeni motor modeline sahip T2T modeli, ticari çalışmalar ve araç seviyesinde tasarım optimizasyonu yapabilecek düzeyde olduğunu belirtmişlerdir [29].

W.Z. Tao ve diğerleri, Simulinkle denizcilikte kullanılan gaz türbini modelini yapmışlar ve Simulink / Fluent işbirlikli simulasyon ile genel performans eşleştirme analizine dayanarak, özel olarak yakıcıların çalışma koşullarının gözlemlenmesini sağlayabileceğini göstermenin mümkün olduğunu ve bu nedenle, yakıcıların yapısal optimizasyon tasarımı için etkili bir teknik araç temin edilmekte olduğunu belirtmişlerdir [30].

F.A. Roldan ve diğerleri C++ programlama dili ile bir gaz türbininin enerji analizini 0-24 saat periyodunda türbin bileşenlerinin sıkıştırma oranlarına ve tüketilen yakıt miktarına göre santralin ısı verimliliğini, spesifik güç ve diğer parametreler ve performansların değişimini elde etmişlerdir. Elde ettikleri değerleri saha değerleri ile karşılaştırdıklarını ve sonuçların güvenilir olduğunu belirtmişlerdir [31].

Yatırım maliyetlerinin düşük olması, kısmen verimli çalışmaları ve çevreye etkilerinin az olması gibi nedenlerle doğalgazlı türbin sistemleri son yıllarda elektrik üretiminde ve kojenerasyon sistemlerinde çokça tercih edilmektedir.

Günümüzde enerji üretimi alanında kurulacak prosesin verimliliğini arttırmaya dönük çalışmaların yanı sıra atık arıtma ve esnek enerji yönetim sistemlerinin analizlerinde önem kazanmıştır.

Enerji üretimi alanında maliyetleri düşürmek ve daha kısa sürede prosesin yapılmasını yada hazır proseslerin verimliliğinin geliştirilmesini sağlamak amacıyla rekabetçi piyasa koşullarında bilgi üreterek inavosyonu mümkün kılan farklı yaklaşımlar geliştirilmektedir.

Bu fikir doğrultusunda yapılan bu tez çalışmasında, açık Brayton çevrimli türbin sisteminde doğalgaz,nemli hava ve yanma sonu ürünlerinin mükemmel gaz olarak izantropik koşullarda sıkıştırılması ve genişlemesi kabulleri ile bu enerji analizi Matlab/Simulink ortamında modellenmiştir.

Açık çevrim boyunca akışkan olarak sadece hava kabulü ile performans analizleri yapılabilirken, bu çalışmada modelin prosesi gerçek koşullarda temsil etmesini sağlamak amacıyla yanma odasına kadar hava ve doğalgaz bileşenlerini, yanma odasından sonra da atık gazları mükemmel gaz kabul ederek modelleme yapılmıştır.

Yapılan bu çalışmada, Kırıkkale Meteoroloji Müdürlüğünden alınan atmosfer havası değerleri modelin giriş değerleri olarak alınarak, Matlab/Simulink ortamında Brayton çevrimli bir gaz türbininin, dört farklı kompresör sıkıştırma oranlarındaki nemli hava ile farklı doğal gaz bileşenlerinin yakılması ve yanma ürünlerinin türbinde genişlemesi doğrultusunda enerji analizi için gerekli termodinamik denklemlerinin matematik modeli yapılmış ve [31]'de yapılan çalışmanın sonuç değerleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan modelin simülasyonu neticesinde türbin bileşenlerinin parametre ve performans analiz değerleri, literatür ile iyi uyumlu sonuçlar vermiştir.

2. ENERJİ

Sistemlerde değişiklikler yaparak iş yapma imkanı elde ettiğimiz enerji, BTU, joule, Newton-metre ve kalori gibi birimlerle ölçölür.

Enerjinin, ısı, kinetik, mekanik, elektrik, manyetik, nükleer vb. birçok çeşidi vardır. Nükleer hariç, enerji çeşitler arasında dönüşüm halindedir [32].

Birçok cihaz yada makine, çalışabilmek ya da iş yapabilmek için enerjiye ihtiyaç duyar. Örneğin, aracımıza benzin koyduğumuzda içerdği kimyasal enerji motor yardımıyla önce ısı sonra da hareket enerjisine dönüştürölür. Araç bu enerji sayesinde hareket eder. Evlerimizde kullandığımız şofbenler, yakıtın bünyesinde barındırdığı kimyasal enerjiyi eşanjörde suya transfer ederek amaca uygun sıcak kullanım suyu temin etmektedir.

Enerji, doğal ya da yapay yöntemler yoluyla veya kurulan prosesler aracılığıyla üretilir ve insanların gereksinimlerini karşılarırken hayattaki birçok zorluk ve zahmeti ortadan kaldırılarak ihtiyaç ve istekler yerine getirilmiş olur.

Enerji kaynaklarını yenilenebilir veya yenilenemez enerji kaynakları olmak üzere iki başlık altında toplayabiliriz. Bu kaynaklardan uygun prosesin kurularak işletilmesi ile enerji üretimi yapılan işletmelere enerji üretim santralleri denilmektedir. Enerji üretim santralleri sadece elektrik enerjisi yada ısı enerjisi üretmekte kullanıldığı gibi ısı ve elektrik üretiminin birlikte yapıldığı birleşik (kombine) güç santralleri de kullanılmaktadır.

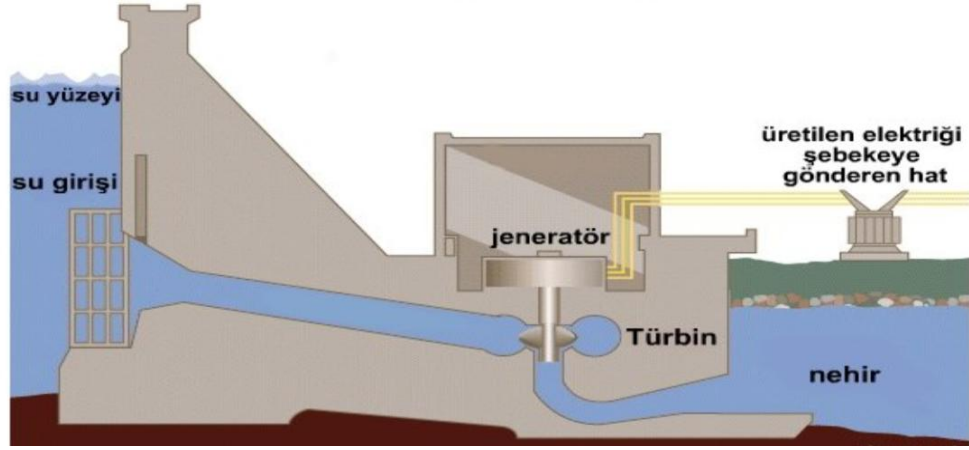
2.1. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Göre Enerji Santralleri

Doğada sürekliliği olan kaynaklardan yararlanarak enerji üretmek için kurulan proseslere yenilenebilir enerji santralleri denilmektedir [33]. Yenilenebilir enerji santrallerini kendi arasında yedi başlık altında toplayabiliriz. Bunlar:

- Hidroelektrik enerji santralleri
- Rüzgar enerji santralleri
- Jeotermal enerji santralleri
- Güneş enerji santralleri
- Biyokütle enerji santralleri
- Dalga enerji santralleri
- Hidrojen enerji santralleri

2.1.1. Hidroelektrik Enerji Santralleri

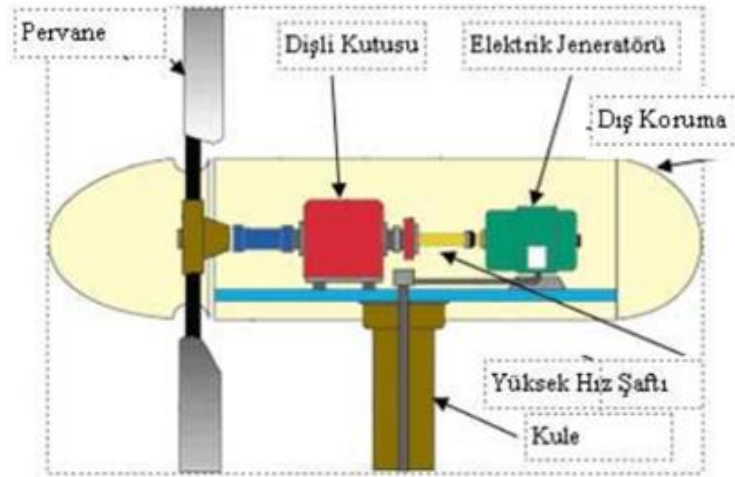
Suya akış yönünde önüne set yapılarak yükseklik kazandırılıp suyun potansiyel enerjisi kinetik enerjiye dönüştürülmek suretiyle elektrik enerjisi üretilmektedir. Eskiden benzer enerji dönüşümünden yararlanarak tahıl öğütme amacıyla su değirmenleri geliştirilmiştir. Bu santrallerde sadece elektrik enerjisi üretilir. Çevreye zarar vermezler. Şekil 2.1.'de bir hidroelektrik santralinin çalışma şeması verilmiştir.



Şekil 2.1. Hidroelektrik santrali uygulama şeması

2.1.2. Rüzgâr Enerjisi Santralleri

Atmosferdeki basınç değişimleri ile hava molekülleri yüksek basınçlı ortamdan alçak basınçlı ortama hareket ederek kinetik enerji kazanmış olur. Hareket halindeki bu moleküller uygun biçim verilmiş rüzgâr türbini kanatlarına çarptırılarak önce mekanik sonra elektrik enerjisi üretilir. Bir rüzgar türbininde yer alan ekipmanlar ve elektrik üretimi Şekil 2.2.'de gösterilmiştir.

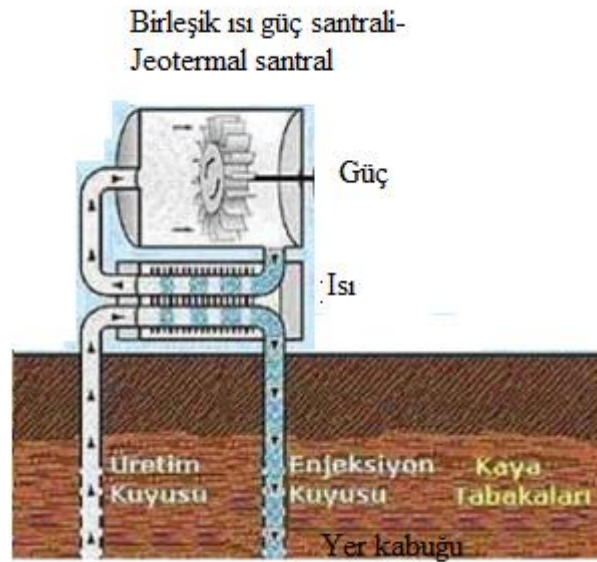


Şekil 2.2. Rüzgar türbininde elektrik üretimi

Rüzgârın hareket enerjisinden geçmişte yel değirmenleri ile yelkenli gemilerin kullanımında yararlanılmıştır. Bu santrallerde sadece elektrik enerjisi üretilip çevreye zarar vermezler.

2.1.3. Jeotermal Enerji Santralleri

Yer kabuğunun çeşitli derinliklerinde sıcaklığı sürekli 20° C’den fazla olan ve erimiş mineral, çeşitli tuzlar ve gazlar içerebilen basıncı ve sıcaklığı yüksek değerlerdeki su ve buhar bulunmaktadır. Bu yüksek sıcaklıktaki su veya buharın yeryüzüne çıkarılarak kinetik enerjisinden elektrik enerjisi üretilen santrallere jeotermal enerji santralleri denilmekte olup bölgesel merkezi ısıtma sistemlerinde de kullanılan bir enerji kaynağıdır. Bu santrallerle hem ısı hem de elektrik enerjisi üretmek mümkündür. Çevreye zarar vermezler. Şekil 2.3.’te bir jeotermal enerji santrali çalışma şeması verilmiştir.



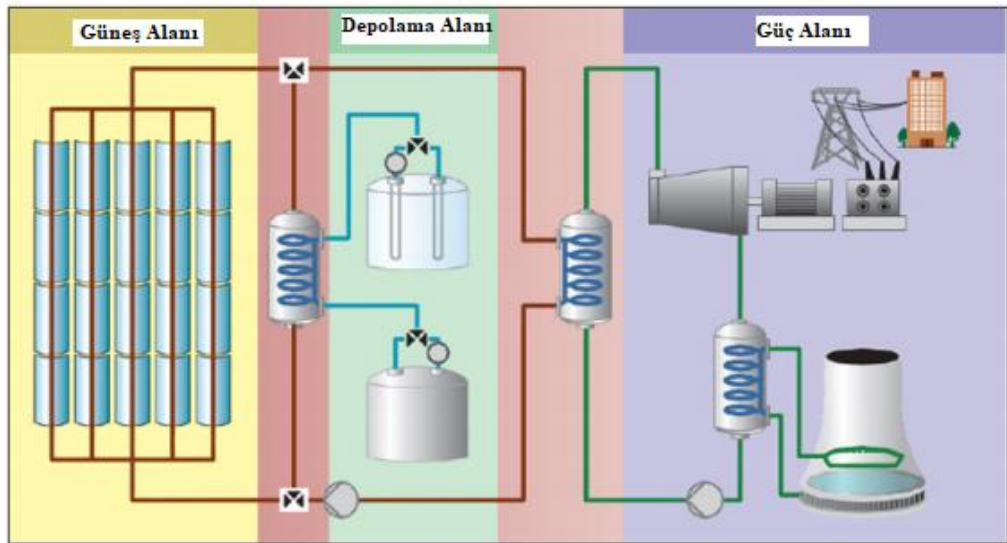
Şekil 2.3. Jeotermal yoluyla elektrik enerjisi üretimi temsili şeması

2.1.4. Güneş Enerjisi Santralleri

Güneş büyük bir enerji kaynağıdır. Işığından ve ısısından elektrik enerjisi üretilmektedir. Güneş enerjisi santralleri, dünya çapında en hızlı büyüyen yenilenebilir enerji kaynaklarından olup güneş ışığı doğrudan ya da dolaylı yöntemle elektrik enerjisine dönüştürülür. Emisyon üretilmediğinden çevreye zarar vermezler. En çok şu iki yöntemle gün ışığını elektrik enerjisine dönüştüren santraller kurulmaktadır.

a.) Konsantre Edilmiş Güneş Enerjisi Santralleri

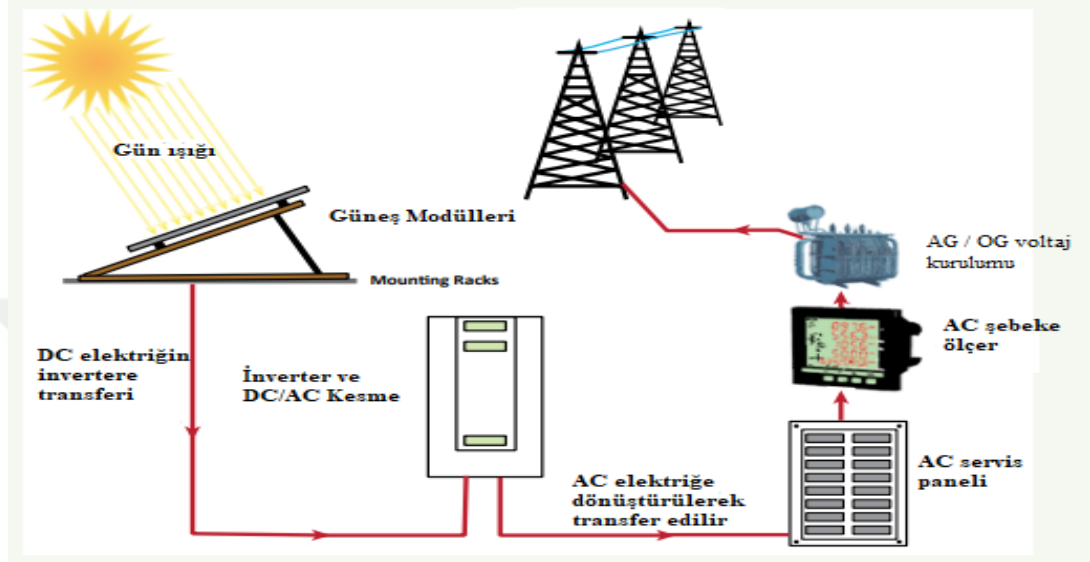
Kurulan aynalarla güneş ışığı ısı transferi ortamına odaklandırılarak buhar üretilir. Üretilen buhar türbinden geçirilerek elektrik enerjisi üretilmekte olup bir örnek şema Şekil 2.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Konsantre güneş enerjisi santral şeması [34].

b.) Fotovoltaik Güneş Elektrik Santralleri

Fotovoltaik ya da güneş pilleri ile gün ışığı doğrudan elektrik enerjisine yarı iletken maddeler aracılığıyla dönüştürülür. Şekil 2.5.'te gün ışığının fotovoltaik paneller aracılığı ile elektrik enerjisi üretim santrali şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Güneş ışığından PV ile elektrik enerjisi üretim santrali [35].

2.1.5. Biyokütle Enerji Santralleri

Biyolojik canlı (bitki ve hayvan) madde (kütle) atıklarının kimyasal dönüşümü sonucu üretilen gazların (biyogaz) yakılması ile elektrik enerjisi üretilmektedir. Örneğin, bazı büyük şehir belediyeleri şehir çöplerinden bu yöntemle ürettikleri çöp gazlarından elektrik üretimi yapabilmektedirler.

Bir başka termik kaynakta “biyodizel” dir. Biyodizel; kolza (kanola), ayçiçek, soya, aspir gibi yağlı tohum bitkilerinden elde edilen yağların veya hayvansal yağların bir katalizör eşliğinde kısa zincirli bir alkol ile (metanol veya etanol) reaksiyonu sonucunda açığa çıkan ve yakıt olarak kullanılan bir üründür. Evsel kızartma yağları

ve hayvansal yağlar da biyodizel hammaddesi olarak kullanılabilir. Atmosfere emisyon bırakır. Bu santrallerle hem ısı hem de elektrik enerjisi üretimi yapılabilmektedir. Ülkemizde ilk olarak 2016 yılında kurulan 700 ton atıktan 720MW enerji üretme kapasiteli Gönen Biyokütle Santralinin resmi Şekil 2.6.'da görülmektedir.



Şekil 2.6. Gönen biyokütle santrali

2.1.6. Dalga Enerjisi Santralleri

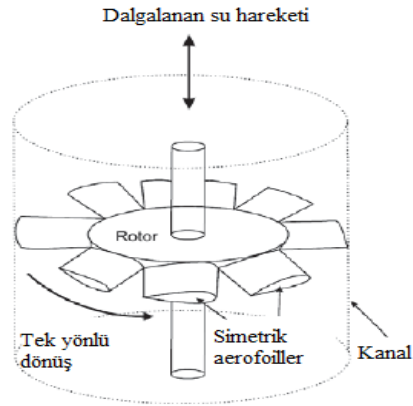
Kullanım yerinin kıyı şeridi, kıyıya yakın, kıyıdan uzak olma durumlarına göre farklı sistemlerden oluşan deniz dalgasındaki kinetik enerjiden elektrik enerjisi üreten sistemlerdir.

Salınımlı su kolonu (Oscillating water column-OWC) adı verilen ve kıyı şeridi uygulamalarında görülen bir örnek dalga enerji santrali Şekil 2.7.a.'da gösterilmektedir. Bu sistemlerde su kolonu ve onun üzerinde bir hava kolonu vardır. En alttaki kapı suyun içeri girmesini sağlar. Su tarafından sıkıştırılan hava dar kısımdan geçerek çıkıştaki türbini hareket ettirir. Dalga geri çekilirken içerdeki havayı boşaltacak bu hareket türbinin yeniden hareket etmesini sağlayacaktır. Bu

sistemde normal bir türbin yerine aynı yönde dönmeye devam eden özel geliştirilmiş Wells türbini kullanılarak her zaman tek yöne doğru dönüş sağlanır ve daha verimli bir şekilde enerji üretilmesini sağlar. Çevreye zararı olmayıp örnek santral ve Wells türbin şemaları sırasıyla Şekil 2.7. a. ve b.’de gösterilmektedir.



a.) Dalgalarla çalışan bir türbin



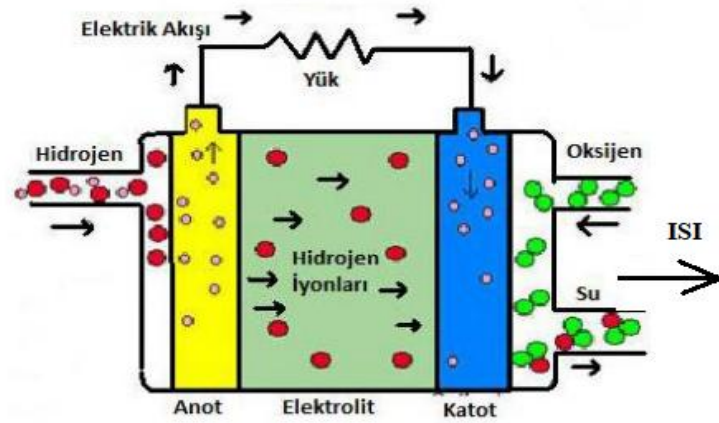
b.) Wells Türbini

Şekil 2.7. Dalgalarla çalışan bir türbin [36].

2.1.7. Hidrojen Enerjisi Santralleri

Bu santrallerde verimi yüksek tutabilmek için, önce güneş enerjisinden yararlanarak yakıt (H_2) elde edilir. Bunun için su elektroliz ile bileşenlerine ayrılır.

Daha sonra hidrojen enerjisinden ısı enerjisi ve elektrik enerjisi üretimi için yakıt hücresinde hidrojen ve oksijen bir araya getirilir. Piller ile karıştırılmış olan bu yakıt hücreleri kimyasal bir tepkimeye uğrayarak elektrik enerjisi üretimi gerçekleşir. Hidrojen varoldukça elektrik üretimi de devam eder.



Anot reaksiyonu: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

Katot reaksiyonu: $1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O + ISI$

Şehil 2.8. Hidrojenden sıcak su ve elektrik enerjisi üretimi[37].

Bu santrallerle hem ısı hem de elektrik enerjisi üretimi yapılabilir. Çevreye zarar vermezler.

2.2. Yenilenemeyen Enerji Kaynakları

Kullanıldıkça biten ve yerine yenilerinin gelmesi uzun zaman periyotları gerektiren doğal kaynaklar (fosil yakıtlar) ve radyoaktif elementler yenilenemeyen enerji kaynaklarıdır. Fosil yakıtlar hidrokarbon bileşikleri olduğundan yandıklarında çevreye atık verdiklerinden zararları vardır. Atmosfere salınan atık gazların sera etkisi yaptığı bilinmektedir.

2.2.1. Fosil Yakıtlı Enerji Santralleri

Kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil yakıtlar en çok termik santrallerde elektrik enerjisi üretmek için kullanılmaktadır. Günlük hayatta kullandığımız benzin, mazot, LPG, plastik, boya, teflon gibi maddeler petrol kaynaklıdır.

Kömür, petrol, doğalgaz gibi binlerce yılda oluşmuş fosil yakıtlar insanlığın gelişmesi ile hızla azalırken atıkları ile hava, su ve toprak kirliliğine yol açarlar. Fosil yakıtlardaki karbon yanma tepkimeleri ile atmosferde CO₂ ve CO bileşiklerinin birikmesine neden olur. Bu gazların çevreye zararları vardır. Havada çok fazla birikmesi sera etkisine ve küresel ısınmaya neden olması açısından oldukça tehlikelidir. Ayrıca fosil yakıtların yakılması ile asit yağmuru meydana gelmektedir.

Fosil yakıtlar kullanarak enerji üreten santrallere termik santral de denilmekte olup kullandıkları yakıtın türüne göre:

- Kömürlü termik santraller
- Gaz türbinli santraller
- Dizel santraller

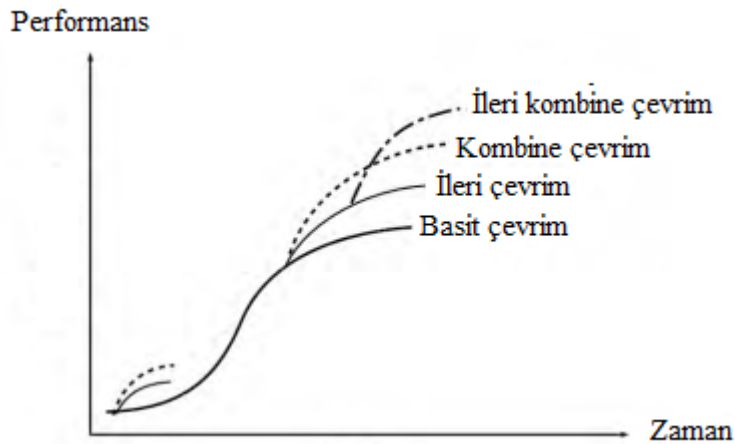
olarak sıralanabilir. Bu santrallere birleşik ısı-güç (kombine) santralleri de denilmektedir.

2.2.2. Nükleer Enerji

Uranyum, plütonyum gibi radyoaktif elementlerin çekirdeklerindeki proton ve nötronları tutan enerjinin ortaya çıkarılması esasına dayanır. Dünyadaki elektriğin %20 si nükleer santrallerde üretilir. Nükleer santraller dünyanın pek çok yerinde bulunmasının yanında atmosferin kirlenmesine sebep olur. Bu santrallerde elektrik üretimi ucuzdur fakat santralin maliyeti oldukça pahalıdır.

2.3. Gaz Türbinli Enerji Santralleri

Başlangıçta, gaz türbinleri verimsiz, hantal ve güvenilirmez makinelerdir. Performanslarını iyileştirmek için, yeniden ısıtma, ara soğutma veya geri kazanma gibi modifikasyonlar uygulanmıştır. Gaz türbininin tarihi gelişimi, S-eğrisi prensibine uygun bir şekilde Şekil 2.9.'da gösterildiği gibi gerçekleşmiştir.



Şekil 2.9. Gaz türbinlerinin performanslarının zamanla gelişimi

Daha sonra Rankine çevrimi ile birleştirilmesi yaklaşımı benimsenmiş ancak, 1960'larda endüstriyel gaz türbinlerinde jet motor teknolojisi elde edilen başarılarından faydalandırılmaya dönük çalışmalar yapılmış ve 1970'lerde yaşanan

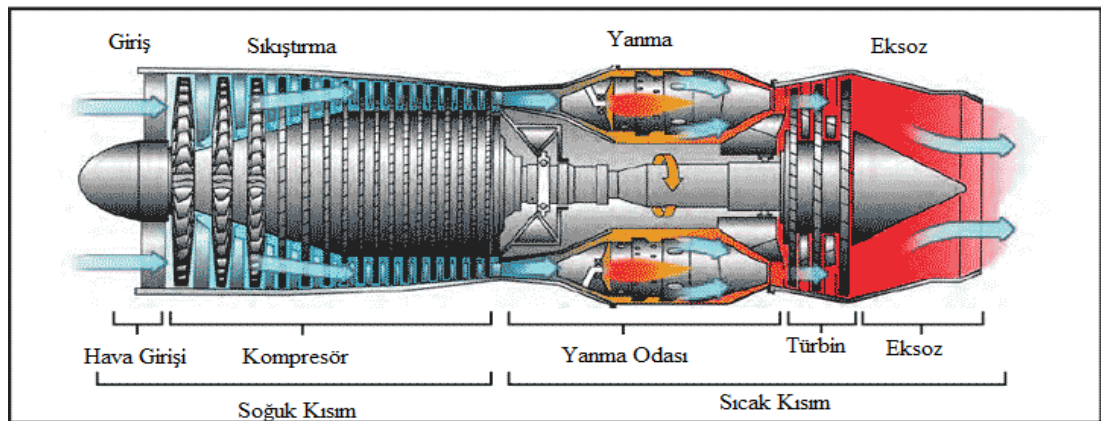
petrol krizinden sonra, enerji santrallerinin verimliliği, öncelikli olarak, mevcut buhar santralleri yeniden formüle edilerek ve daha sonra özel olarak tasarlanmış gaz ve buhar türbini tesisleri ile birleştirilerek, kombine çevrim santralleri haline getirilerek ortak bir enerji santrali yapılandırması halini almıştır [38].

Bu santraller anlık enerji taleplerine daha hızlı tepki verdiğiinden hızla yayılmış ve ülkemizde de sayıları gün geçtikçe artmaktadır.

2.4. Gaz Türbin Çevrimi

Brayton Çevrimi de denilen gaz türbini çevrimi atmosfer koşullarındaki havanın bir kompresör aracılığıyla emilmesi ve sıkıştırılması, yanma odasında yakıtla yakılması ve yanmış gazların türbinden geçirilip dışarı atılması işlemlerini kapsar. Gaz türbinleri üç ana bileşenden oluşur. Bunlar: kompresör, yanma odası ve gaz türbini.

Kompresör ile türbin aynı eksen üzerindedir. Şekil 2.10.'da bir gaz türbininin kesiti verilmiştir.



Şekil 2.10. Gaz türbinin kesit görünümü

2.4.1. Kompresör

Atmosfer koşullarında emdiği havayı sıkıştırır. Sıkıştırma neticesinde havanın basıncı ve sıcaklığı artar. Sıkıştırmanın izantropik koşullarda olduğu kabul edilir.

2.4.2. Yanma Odası

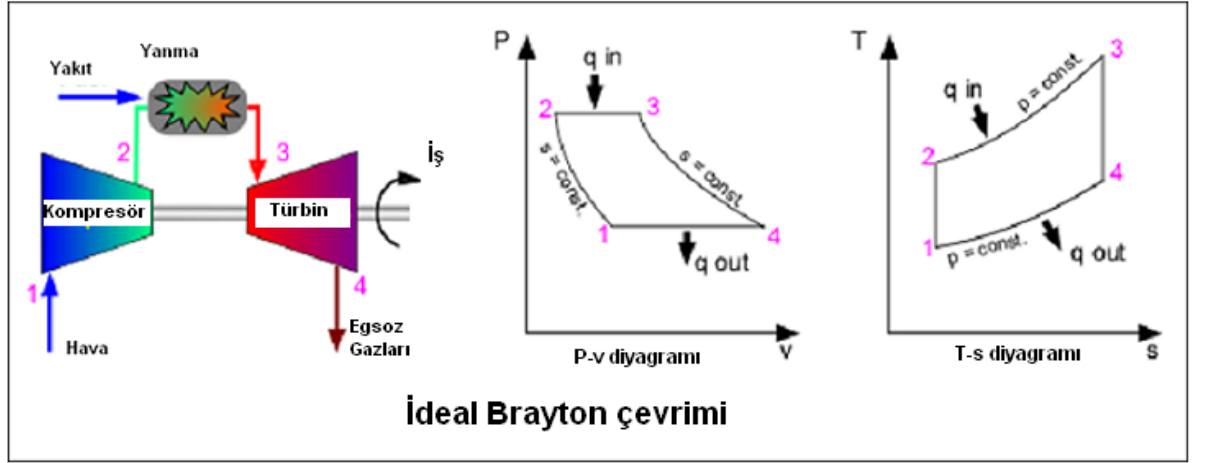
Kompresörden gelen sıkıştırılmış hava ile yakıt ayarlanan oranlarda yakılır. Yanmanın sabit basınç koşullarında olduğu kabul edilir. Yanma sonucu yanma odasında sıcaklığı yüksek atık gazlar üretilmiş olur.

2.4.3. Gaz Türbini

Basıncı yüksek atık gazın türbin kanatlarına çarptırılmasıyla türbinden mekanik enerji elde edilir. Gaz türbinindeki genişlemenin izantropik olduğu kabul edilir.

2.5. Gaz Türbin Çevriminin Enerji Analizi

Gaz türbin çevriminin Brayton çevrimine göre gerçekleştiği kabul edilir. Şekil 2.11.'de bir açık gaz türbin çevrimi akış şeması ile P-V diyagramı ve T-S diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.11. Bir açık gaz türbin çevrimi akış şeması, P-V diyagramı ve T-S diyagramı.

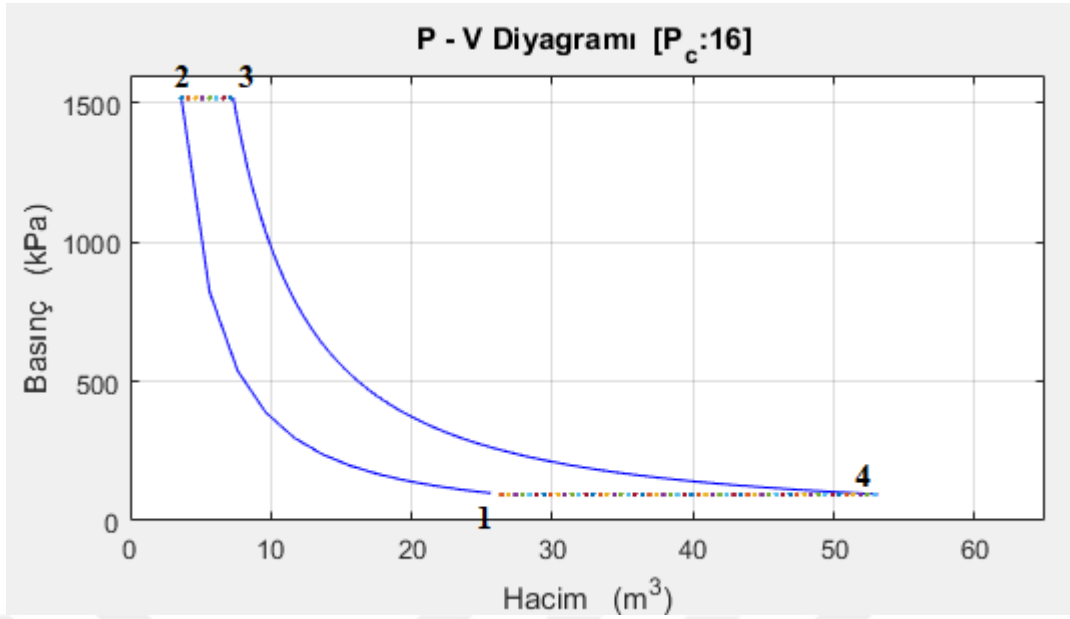
Brayton çevriminde;

- 1-2 arası kompresörde izantropik sıkıştırma (Sabit entropi durumu)
- 2-3 arası yanma odasında sabit basınçta ısı transferi
- 3-4 arası gaz türbininde izantropik genişleme, (Sabit entropi durumu)
- 4-1 arası atmosfere sabit basınçta ısı transferi gerçekleştirilir.

Çevrim sonunda atık gazlar dışarı atılır, yerine bir sonraki çevrim başlangıcı olarak taze hava alınır. Mekanik çevrim devam ederken çevrimin akışkanı tam bir çevrim gerçekleştirmediği için gaz türbinli Brayton çevrimi bir açık çevrimdir.

Kompresör girişinde hava atmosfer koşullarında (T_1) sıcaklığında ve (P_1) atmosfer basıncındadır. Kompresörde havanın mükemmel gaz olduğu ve izantropik olarak sıkıştırıldığı kabul edilir.

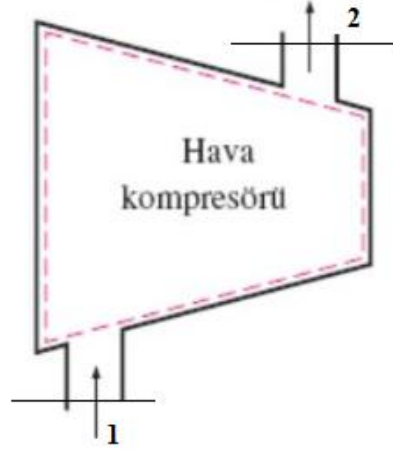
Yapılmış olan simülasyon modelinin çalıştırılması ile kompresör sıkıştırma oranı 16 için elde ettiğimiz bir Brayton çevriminin P-V diyagramı örneği Şekil 2.12.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Geliştirilen modelden elde edilen Brayton çevrimli gaz türbininin P-V diyagramı

2.5.1. Kompresör Analizi

Kompresörler havayı sıkıştırarak basıncını artırırlar. Kompresör analizlerinde, havanın mükemmel gaz olduğu ve gerçekleşen sıkıştırma işleminin izantropik (tersinir adyabat) koşullarda yapıldığı kabul edilerek hesaplamalar kolaylaştırılır. Ayrıca kompresörler Şekil 2.13.'de gösterildiği gibi sürekli akışlı açık sistemler olarak kabul edilerek analizleri yapılır. Kompresörler sıkıştırma işini yaparken iş tüketirler.



Şekil 2.13. Kompresöre hava giriş ve çıkışı

Enerjinin korunumu kanununu diferansiyel formda kompresöre uygularsak

$$dq - dw = du \quad (1)$$

olup, izantropik koşullarda $q=\text{sabit}$ ve $dq=0$ olduğundan denklem

$$du + dw = 0 \quad (2)$$

olur. Yani izantropik koşullarda kompresörün tükettiği iş sıkıştırılan havanın iç enerjisindeki değişime eşittir. Kompresörde sıkıştırılan havanın hacminin dv kadar değişimi ile ortaya çıkan iş ise

$$dw = p \cdot dv \quad (3)$$

olarak ifade edilir.

a.) İzantropik Koşullarda Kompresör Çıkış Sıcaklığının Belirlenmesi

Kompresörlerin basınç oranı $p_c = \frac{p_2}{p_1}$ ile ifade edilir. Mükemmel gazların durum

denklemini

$$p \cdot v = R_u \cdot T \quad (4)$$

ile ifade edilir. Sabit hacimli bir sistemin iç enerjisinin değişimi

$$du = \overline{c_v} \cdot dT \quad (5)$$

ile ifade edilir. (3) ve (5) nolu denklemleri (2) de yerine yazılırsa

$$\overline{c_v} \cdot dT + p \cdot dv = 0 \quad (6)$$

elde edilir. (4) nolu denklemden $p = \frac{R_u \cdot T}{v}$ (6) nolu denklemde yerine yazılır ve her

iki taraf $T \cdot R_u$ ile bölünür ve ardından integre edilirse

$$\int \frac{\overline{c_v}}{R_u} \cdot \frac{dT}{T} = - \int \frac{dv}{v}$$

elde edilir. Burada $\overline{c_v} = \text{sabit}$, $R_u = \text{sabit}$ olduğu dikkate alınır.

$$\left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\overline{c_v}}{R_u}} = \frac{v_1}{v_2} \quad (7)$$

elde edilir.

$$k = \frac{\overline{c_p}}{\overline{c_v}} \quad (8)$$

kabul edilerek (8) nolu denklemde her iki tarafı $\overline{c_v}$ ile böler ve düzenlersek

$$k = 1 + \frac{R_u}{\overline{c_v}}$$

elde edilir ve yeniden düzenlersek $\frac{\overline{c_v}}{R_u} = \frac{1}{k-1}$ (7) de yerine yazılarak düzenlenirse

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = \frac{P_2}{P_1} \quad (9)$$

elde edilir. $p_c = \frac{P_2}{P_1}$ dikkate alındığında

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = p_c$$

ve yeniden düzenlenirse

$$T_2 = T_1 \cdot (p_c)^{\frac{k-1}{k}} \quad (K) \quad (10)$$

elde edilir. (10) numaralı denklem izantropik koşullarda kompresörden çıkan sıkıştırılmış havanın teorik sıcaklığını Kelvin derece olarak verir.

b.) Kompresör Özgül İşinin Belirlenmesi

Kompresör, Şekil 2.13.'de gösterildiği gibi sürekli akışlı açık sistem olup kompresöre birim kütle için enerji dengesi uygulanırsa,

$$q - w + w_{akış} = u \quad (11)$$

$$q-w=u + w_{akış} \quad (12)$$

Burada w: mil işi, $w_{akış}$ ise kontrol hacmine giren yada çıkan akışkanın sahip olduğu enerjidir.

$$w_{akış} = p.v \quad (kJ/kg) \quad (13)$$

yerine yazılırsa, $q-w=u+pv$ ve $q=0$ alınırsa, ayrıca $u+pv=h$ olduğundan

$$-w=h \quad (14)$$

elde edilir. Kompresör için gerekli özgül iş; kompresöre giren havanın çıkış ve giriş özgül entalpileri arasındaki farka eşit olup

$$w_c = h_2 - h_1 \quad (kJ/kg) \quad (15)$$

ile hesaplanabilir. Buradaki

$$h = u + pv \quad (kJ/kg) \quad (16)$$

ifadesine özgül entalpi denilir ve akışkanın iç enerjisi ile basınç ve hacim değişiminden kaynaklı akış enerjisi toplamıdır. Kompresöre giren hava atmosfer koşullarında (25°C ve 1 atm) kabul edilir. Akışkanların birim kütlesinin tuttuğu ısı kapasitesine özgül ısı katsayısı, belirli bir sıcaklıkta sahip olduğu ısı enerjine de entalpi denilir ve kompresöre giren havanın sabit sıcaklıktaki özgül entalpisi;

$$h= C_p . T \quad (17)$$

olarak ifade edilebilir. Burada, C_p ya da $\overline{C_p}$: havanın özgül ısı katsayıları olup

(kJ/kg.K) ya da (kJ/kmol.K) dir. $\overline{C_p}$ havanın molar özgül ısısı, ya tablolardan

okunabilir ya da a, b, c ve d polinom katsayıları olmak üzere

$$\overline{C_p} : a + b.T + c.T^2 + d.T^3 \text{ (kJ/kmol.K)} \quad (18)$$

ile hesaplanabilir. Havanın özgül entalpisi de ya tablolardan okunabilir yada (18) nolu denklemle hesaplanan özgül ısı kullanılarak molar entalpi

$$\overline{h} = \overline{C_p} \cdot T \text{ (kJ/kmol)} \quad (19)$$

ile hesaplanır.

c.) **Kompresörde Entropi Değişimi**

Büyük sıcaklık değişimleri olan hal değişimlerinde mükemmel gazların özgül ısıları sıcaklık aralığında doğrusal değişmiyorsa özgül ısının sabit olduğu kabulü ile entropi;

$$\overline{s}^o = \int_0^T C_p(T) \frac{dT}{T} \quad (20)$$

integrali ile belirlenir. Hal değişiminde entropi değişimi ise

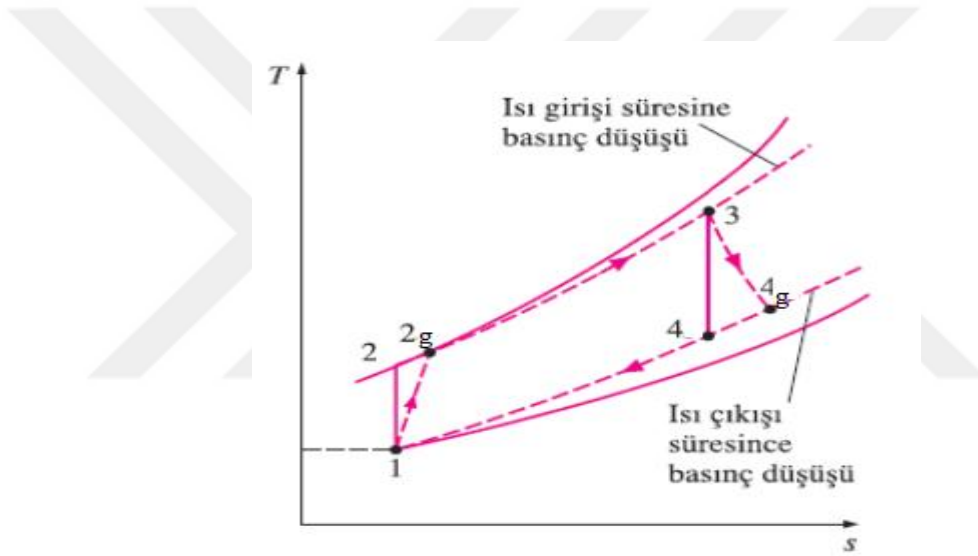
$$\overline{s}_2 - \overline{s}_1 = \overline{s}_2^o - \overline{s}_1^o - R_u \ln \frac{P_2}{P_1} \text{ (kJ/kmol.K)} \quad (21)$$

ile hesaplanır.

d.) Kompresör Verimi

Brayton çevriminde kompresörün havayı izantropik sıkıştırdığı ve atık gazlarında gaz türbininde izantropik genişlediği kabul edilmektedir ancak gerçek uygulama koşullarında kompresör ve türbinde kayıplar nedeniyle izantropik koşullardan biraz sapma meydana gelmekte bu da gerçek şartlarda kompresör ve gaz türbininin veriminin düşmesine neden olmaktadır.

Teorik ve gerçek şartlardaki Brayton Çevriminin T-S diyagramı Şekil 2.14.'te verildiği gibi 2,3 ve 4 noktalarında yani kompresör sıkıştırması, kompresör çıkışı, türbin giriş ve çıkışında farklılıklar dikkate alınmalıdır.



Şekil 2.14. Teorik ve gerçek Brayton Çevrimi T-S Diyagramı

Brayton çevrime göre kompresör özgül işi (15) numaralı denklem ile verilmişti. Ancak gerçek koşullardaki Brayton çevrimi göz önüne alındığında kompresör gerçek özgül işi;

$$w_{cg} = h_{2g} - h_1 \quad (\text{kJ/kg}) \quad (22)$$

olur. Kompresörün teorik iş miktarı kayıplardan dolayı birebir gerçekleşmez. Gerçek iş miktarının teorik iş miktarına oranlanması ile kompresör verimi

$$\eta_c = \frac{w_c}{w_{cg}} = \left(\frac{h_2 - h_1}{h_{2g} - h_1} \right) \quad (\%) \quad (23)$$

ile hesaplanır.

2.5.2. Yanma Odası Analizi

Yanma odasında yakıtın nemli hava ile yakılması sonucu atık gazlar ile ısı enerjisi üretilir. Yanma olayı kimyasal bir reaksiyondur. Yakıt olarak hidrokarbon bileşiği olan petrol türevi gazlar ya da doğal gaz kullanılabilir. Doğal gaz çevrim santrallerinde yakıt olarak farklı oranlarda bileşenlerden oluşan doğal gaz kullanılır. Doğal gaz metan gazı ağırlıklı olup farklı oranlarda diğer hidrokarbon bileşenlerini bünyesinde barındırır.

Botaş verilerine göre ülkemizde kullanılan doğal gaz metan (CH_4), etan (C_2H_6), propan (C_3H_8), bütan (C_4H_{10}), pentan (C_5H_{12}), karbon dioksit (CO_2), nitrojen (N_2) gibi gazların farklı oranlardaki bileşimidir.[39]

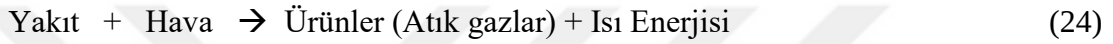
Hava ile doğal gaz yakıldığında, havadaki ve doğal gazdaki nitrojen gazı reaksiyona girmeden çıkar ve yanma sonucu üretilecek ısı enerjisine bir katkısı olmaz. Hava içerisinde her zaman bir miktar su buharı bulunur. Dolayısıyla yanma reaksiyonlarında bu su buharı dikkate alınır.

Yanma işleminde yanmaya giren hava ve yakıt reaktan, yanma sonucunda ortaya çıkan atık gazlara ürünler denir. Atık gazların basıncı ve sıcaklığı yüksektir. Bundan istifade edilerek türbin kanatları ve mili döndürülerek aynı mil üzerindeki jeneratörden elektrik enerjisi üretilir. Yine atık gazların sıcaklığından yararlanmak için direkt olarak atmosfere bırakmak yerine ısı geri kazanım ünitelerinde su buharı

üretiminde kullanılarak santralin verimi yükseltilir, bu arada atık gazların ısısı alınarak sıcaklığı düşürülmüş vaziyette atmosfere bırakılır. [39]

a.) Yanma

Yakıtın yakılmasında hava kullanılmaktadır. Hava genel olarak hacimce %21 O₂ ile %79 N₂ dan oluşur. Bileşenlerinin hacim olarak oranlanması ile birim yakıt miktarı ile yanmaya iştirak eden hava, 1 kmol O₂ ve 3,76 kmol N₂ ile birlikte 4,76 kmol olur. En genel halde yanmayı



denklemleri ile ifade edebiliriz. Yanma denklemi bir kimyasal reaksiyon denklemidir. Birim hacim ya da birim kütle yakıtın yakılması için gerekli hava miktarına stokiometrik hava miktarı ya da teorik hava miktarı denilmektedir. Stokiometrik yanmada tüm reaktanların kayıpsız olarak atık gazlara dönüştüğü kabul edilir ve meydana gelen yanmaya tam yanma denir. Tam yanma da ürünler CO₂, H₂O ve N₂ dir.

Birim yakıtın tam yanması için gerekli hava miktarından daha az hava yanmaya katılırsa eksik yanma meydana gelir, CO₂ gazının bir kısmı CO olarak kalır ve bir miktar O₂ yanmamış olarak ürünlerde bulunur. Bu durum çevreye zarar, sistemde kurum oluşması ve enerji kaybı nedeniyle ısı veriminin düşmesine neden olduğundan istenmeyen bir durumdur.

Birim yakıtın tam yanması için gerekli hava miktarından daha fazla hava, yanma odasına gönderilirse yanma odasında üretilen ısı enerjisi miktarında düşme meydana gelir ve bu da ısı verimini düşürür. Atık gazların sıcaklığı ise yüksek olur. Gaz türbin kanatlarının ısı mukavemet limitleri nedeniyle atık gaz sıcaklığı sınırlandırılır.

Yanma olayı kimyasal bir reaksiyon olup yakıt için gerekli hava miktarı ile elde edilen yanma ürünleri reaksiyon denklemleri aracılığı ile belirlenebilmektedir. Reaksiyon denklemlerinde reaktan ve ürünlerin miktarları kütlenin korunumu kanunu gereği değişmez. Yani her bir elementin toplam kütlesi değişmez. Ancak reaktanlar ürüne dönüşürken kimyasal olarak yapıları değişerek yeni bileşiklere dönüşürler. Reaksiyonda toplam madde miktarı sabit kalır.

Yakıtın ve havanın farklı tür ve miktarda bileşenlerinin hacimsel ya da kütesel olarak yanma denklemlerine girmesinden dolayı reaksiyon denklemlerinde reaktan ve ürünlerin katsayılarının denkleştirilmesi sağlandıktan sonra hava, yakıt ve ürün miktarları belirlenir.

b.) Teorik Hava Yakıt Oranı

Tam yanma denkleminde birim yakıt için gerekli hava miktarını

$$\text{HY oranı} = \frac{m_{\text{hava}}}{m_{\text{yakıt}}} \quad \left(\frac{\text{kg hava}}{\text{kg yakıt}} \right) \quad (25)$$

ile hesaplayarak belirleriz. Burada, m : kütle (kg) olup madde miktarıdır. Havanın ve doğalgazın kütleleri sırasıyla

$$m_{\text{hava}} = n_{\text{hava}} \cdot M_{\text{hava}} \quad (26)$$

$$m_{\text{yakıt}} = \sum_1^i (n_{\text{yakıt}} \cdot M_{\text{yakıt}}) \quad (27)$$

ile hesaplanır ve (25) numaralı denklemde yerine yazılarak verilen 1 kg doğal gaz için gerekli hava miktarı belirlenmiş olur.

c.) Gaz Karışımının Molekül Kütlesi

Karışımı oluşturan bileşenlerin mol miktarlarının karışımın mol miktarına oranlanması ile bileşenlerin mol oranı belirlenir.

$$y_i = \frac{n_i}{n_m} \quad (28)$$

Karışımın molekül kütlesi bileşenlerin mol oranlarının molekül kütleleri ile çarpımlarının toplamıdır.

$$M_m = \sum_i^k y_i \cdot M_i \quad (\text{kg/kmol}) \quad (29)$$

d.) Doğalgazın Nemli Hava İle Yakılması

Havada daima bir miktar su buharı bulunur. Yanma reaksiyonlarında hava ile birlikte bu su buharı da yanmaya katıldığı için hesaba katılması gerekir. Bunun için yanma denkleminde reaktanlara su buharı eklenir. Ancak su buharının mol miktarının belirlenmesi gerekir.

Atmosfer havasında su buharının miktarı hidrometrelerle bağıl nem (ϕ) olarak ölçülmektedir. Havadaki su buharının doyma basıncı hazır tablolardan yararlanılarak belirlenir. Havadaki su buharının kısmi basıncı ise

$$P_v = \phi \cdot P_{\text{sat}} \quad (\text{kPa}) \quad (30)$$

ile hesaplanır. Havadaki su buharının mol miktarı, su buharı ile nemli havanın kısmi basınç oranına eşit olup

$$\frac{P_v}{P} = \frac{n_{\text{subuhar}}}{n_{\text{top}}}$$

denkleminde $n_{\text{subuharı}}$ çekilerek bulunur. Burada

$$n_{\text{top}} = a_k \cdot (1 + 3.76) \quad (\text{kmol}) \quad (31)$$

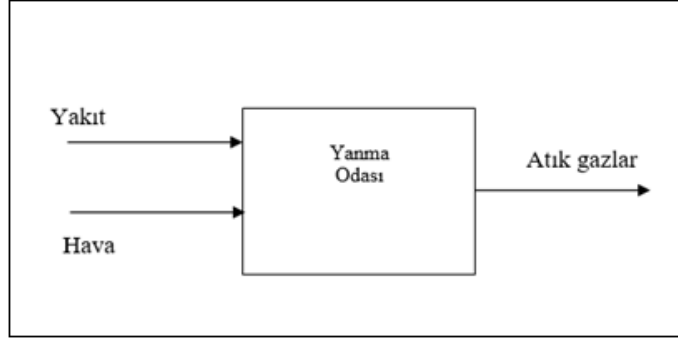
dir. a_k katsayısı kurulacak yanma denkleminde havanın katsayısıdır. Yanma denkleminde reaktan ve ürünlerin katsayıları denkleme kütlenin korunumu kanunu uygulanarak belirlenir. Bulunan $n_{\text{subuharı}}$ değeri tam yanma denkleminde girenlere ve ürünlere eklenerek denklem yeniden düzenlenir ve böylece doğalgazın nemli hava ile stokiometrik yanma denklemi elde edilir.

e.) Kararlı Akım Sistemlerinde Yanma Enerji Analizi

Bazı kimyasal reaksiyonlar sonucunda çevreye ısı enerjisi verilir. Bu reaksiyonlar ekzoterm reaksiyon olarak tanımlanır. Bazı reaksiyonlarda gerçekleşebilmesi için dışardan enerji alır. Bunlara da endoterm reaksiyonlar denilir. Sabit basınç altında meydana gelen reaksiyonda absorbe edilen ya da açığa çıkan ısı enerjisi entalpi olarak tanımlanır ve entalpi değeri reaktif miktarına bağlıdır [40].

Yanmaya giren yakıt ve havadaki bileşik moleköl atomları birbirlerine bağlarla bağlıdır. Yanma reaksiyonu esnasında bu bağlar kırılır ve farklı olarak yeni bağlar kurulur. Reaktanların moleköl bağları ve bağ enerjileri ile ürünlerin moleköl bağları ve bağ enerjileri birbirinden farklıdır.

Herhangi bir tepkimenin entalpisi reaktan bileşenlerinin oluşum entalpilerinden hesaplanabilir. Bir mol bileşiğin standart şartlarda (1 atm, 25°C de) kendi kimyasal bileşiminden kaynaklı sahip olduğu entalpiye oluşum entalpisi denilir ve bu koşullarda kararlı yapıdaki elementlerin oluşum entalpileri sıfır alınır. Entalpi, sıcaklığın bir fonksiyonu olduğundan ve yanma işlemine giren ve çıkan gazlar mükemmel gaz kabul edildiğinden, kararlı yapıdaki elementler ile bileşiklerin entalpileri, polinom katsayıları kullanılarak verilen sıcaklık için hesaplanabilir ya da tablolardan okunabilir.



Şekil 2.15. Yanma odası akışının şematik gösterimi.

Yanma odasına giren reaktanların ve yanma odasında oluşan ürünlerin potansiyel ve kinetik enerjilerindeki değişim ihmal edilir ve Şekil 2.15.'te gösterilen bir yanma odasına birim hacim ya da kütle için, kimyasal reaksiyon gerçekleşen bir kararlı akışlı açık sisteme enerji dengesi uygulanırsa; yanma odasına giren enerji yanma odasından çıkan enerjiye eşit olması gerektiğinden;

$$e_g = e_{\dot{c}} \quad (32)$$

$$q_g + w_g + \sum n_r (\bar{h}_{ol}^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_r = q_{\dot{c}} + w_{\dot{c}} + \sum n_p (\bar{h}_{ol}^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_p \quad (33)$$

olup eşitliğin sol tarafı 1 kmol için ısı, iş ve kütle tarafından transfer edilen enerjiyi, sağ tarafı da ısı, iş ve kütle tarafından ürünlerden elde edilen enerjiyi ifade etmektedir. Bileşiklerin oluşum entalpileri, duyulur entalpileri ve referans entalpileri termodinamik tablolardan veya polinom katsayıları kullanılarak hesapla belirlenebilir. (33) numaralı denklemde, yanma odasına yakıt ve hava ile birlikte ısı ve iş enerjisi girmediğinden $q_g = 0$, $w_g = 0$ alınır. Ayrıca yanma odasından çevreye iş çıkışı da yoktur. $w_{\dot{c}} = 0$ dır. Buna göre (33) numaralı denklem yeniden düzenlenirse yanma odasından transfer edilen ısı enerjisi:

$$q_{\text{ç}} = \sum n_r (\overline{h_{ol}^{\circ}} + \overline{h} - \overline{h^{\circ}})_r - \sum n_p (\overline{h_{ol}^{\circ}} + \overline{h} - \overline{h^{\circ}})_p \quad (\text{kJ}) \quad (34)$$

ile bulunur. Burada

$$h_{\text{ürün}} = \sum n_p (\overline{h_{ol}^{\circ}} + \overline{h} - \overline{h^{\circ}})_p \quad (\text{kJ}) \quad (35)$$

ürünlerin toplam özgül entalpisi ve

$$h_{\text{reaktan}} = \sum n_r (\overline{h_{ol}^{\circ}} + \overline{h} - \overline{h^{\circ}})_r \quad (\text{kJ}) \quad (36)$$

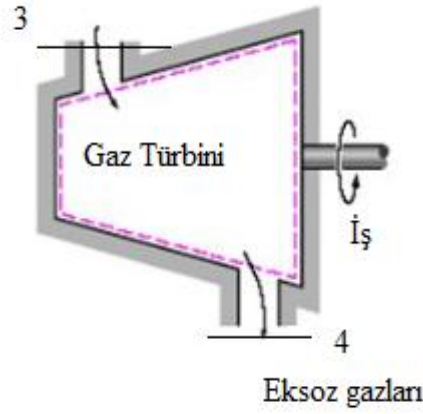
reaktanların toplam özgül entalpidir.

2.5.3. Gaz Türbin Analizi

Gaz türbinleri kompresörler gibi sürekli akışlı açık sistemlerdir. Yanma odasındaki tepkime reaksiyonu ile hava ve doğalgaz yakılır, ortaya çıkan yanma ürünleri gaz türbinine sevk edilir. Gaz türbininde çevreye ısı kaybı olmadığı kabulü ile izantropik genişleme olduğu varsayılır. Ayrıca hesaplamaları kolaylaştırmak için ürünlerin mükemmel gaz olduğu kabul edilir.

a.) Türbin Çıkışı Teorik Sıcaklığının Belirlenmesi

Genişlemenin izantropik şartlarda meydana geldiği ve atık egzoz gazlarının mükemmel gaz davranışında olduğu kabul edilerek Şekil 2.16.'da şematik görünümü verilen türbine enerji dengesi uygulanır.



Şekil 2.16. Gaz türbini şematik gösterimi

Türbin giriş ve çıkış arasındaki sıcaklık ilişkisi (9) ve (10) numaralı denklemlerin türbine uygulanması ile

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = \frac{P_2}{P_1} = p_c = \frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (37)$$

$$T_4 = T_3 \cdot \left(\frac{1}{p_c}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (K) \quad (38)$$

ile hesaplanır.

b.) Türbin İş

Gaz türbinlerinde üretilen iş; gaz türbinlerinin kararlı akışlı açık sistem olduğu ve atık gazların mükemmel gaz olduğu kabulü ile türbine enerji dengesi uygulanarak belirlenir. Gaz türbinine giren ve çıkan enerjiler göz önüne alınırsa :

$$q - w + w_{akış} = u$$

$$q - w = u + w_{akış} = h$$

$$q-w=h_{\dot{c}}-h_g \quad (39)$$

$$w_{akış} = p.v \quad (kJ) \quad (40)$$

kararlı akışlı açık sistemde özgül akış işidir.

$$q-w=h$$

olup gaz türbininin izantropik koşullarda $q=0$ alınır

$$-w=h=u+pv \quad (kJ)$$

elde edilmiş olur. Sistemden dışarıya iş verilmesi durumunda işaret notasyonunda türbin özgül iş miktarını pozitif işaretli alabiliriz.

$$w=h=u+pv \quad (kJ) \quad (41)$$

Burada h entalpi; akışkanın iç enerjisi ile basınç ve hacim değişimi kaynaklı enerji toplamıdır. Dolayısıyla izantropik genişleyen gaz türbininin özgül işi; türbinden geçen akışkanın (atık gaz) özgül entalpisindeki değişime eşit olur.

Türbin akışkanı atık gazlar olup miktarları stokiometrik denklemdeki ürünler kısmında belirlenmiştir. Türbine giren ve çıkan gazların her bir bileşeninin türbin giriş, türbin çıkış sıcaklıklarında sahip oldukları entalpi değerleri

$$h = C_p \cdot T \quad (kJ/kg) \quad (42)$$

olup buradaki C_p (özgül ısı katsayısı) atık gazların her birinin özgül ısısı tablolardan okunabilir yada polinom katsayıları kullanılarak (18) ve (19) numaralı denklemler yardımıyla kütleli yada molar olarak hesaplanabilir.

Gaz türbininde atık gazlar farklı oranlarda bulunduğundan karışım halindeki özgül entalpilerinin belirlenmesi gerekir. Bileşenleri mükemmel gaz kabul edilen bir gaz karışımının özgül entalpisi; ürünlerin mol oranları ile özgül entalpilerinin çarpımlarının toplamıdır.

$$h_m = \sum_i^n y_i \cdot \bar{h}_i \quad (\text{kJ}) \quad (43)$$

Burada y_i ürünlerin mol oranları olup stokiometrik denklemde ürünlerin her birinin ayrı ayrı katsayılarının toplam ürün katsayılarına oranlanması ile (28) numaralı denklemde belirtildiği gibi belirlenir. Gaz türbinini özgül işinin belirlenmesi için gaz türbinine enerji dengesi uygulanırsa

$$e_g - e_{\dot{c}} = \Delta e_{\text{sis}} \quad (44)$$

olup ve kararlı akışlı sistemlerde $\Delta e_{\text{sis}} = 0$ olduğundan

$$e_g = e_{\dot{c}} \quad (45)$$

elde edilir. $e_g = h_g$ ve $e_{\dot{c}} = h_{\dot{c}} + w_t$ yerine konulursa

$$h_g = h_{\dot{c}} + w_t \quad (46)$$

ve düzenlenirse

$$w_t = h_g - h_{\dot{c}} \quad (\text{kJ}) \quad (47)$$

ya da

$$w_t = h_3 - h_4 \quad (\text{kJ}) \quad (48)$$

olur. Böylece türbine giren ve çıkan atık gazların karışım halindeki özgül entalpileri farkından türbin özgül işi belirlenir.

c.) Türbin Verimi

İdeal koşullardaki Brayton çevriminde gaz türbininde atık gazların izantropik genişlediği kabul edilmektedir ancak gerçek uygulama koşullarında kompresör ve türbinde bir miktar basınç kayıpları gerçekleşmesi nedeniyle izantropik koşullardan biraz sapma meydana gelmekte bu da gerçek şartlarda gaz türbininin veriminin düşmesine neden olmaktadır.

İdeal ve gerçek şartlardaki Brayton çevriminin T-S diyagramı Şekil 2.14.'te verildiği gibi 3 ve 4 noktalarında yani türbin giriş ve çıkışında farklılıklar dikkate alınmalıdır.

İdeal Brayton çevrime göre türbin özgül işi (48) nolu denklem ile verilmiştir. Ancak gerçek Brayton çevrimi göz önüne alındığında türbin gerçek özgül işi;

$$w_{tg} = h_3 - h_{4g} \quad (\text{kJ}) \quad (49)$$

olur. Dolayısıyla mükemmel koşullardaki gaz türbini işinin gerçek şartlarda elde edilen türbin iş miktarına oranlanması ile türbin verimi

$$\eta_t = \frac{w_{ta}}{w_t} = \left(\frac{h_3 - h_{4g}}{h_3 - h_4} \right) \quad (\%) \quad (50)$$

hesaplanır.

d.) Brayton Çevrimi Isıl Verimi

Çevrimin net özgül işi, türbinden elde edilen özgül iş ile kompresörde tüketilen özgül iş farkıdır.

$$w_{net} = w_t - w_c \quad (\text{kJ}) \quad (51)$$

veya

$$w_{\text{net}} = q_g - q_c \quad (52)$$

şeklinde ifade edilir. Burada sırasıyla, q_g çevrime giren özgül ısı enerjisi q_c çevrimden çıkan özgül ısı enerjisidir ve

$$q_g = h_3 - h_2 = C_p (T_3 - T_2) \quad (\text{kJ}) \quad (53)$$

$$q_c = h_4 - h_1 = C_p (T_4 - T_1) \quad (\text{kJ}) \quad (54)$$

olarak ifade edilirler.

Çevrimin ısı verimi, çevrimden elde edilen net iş miktarının yanma odasına giren reaktanların sahip olduğu enerji miktarına oranlanması ile elde edilir.

$$\eta_{\text{th}} = \frac{w_{\text{net}}}{q_g} \quad (55)$$

veya

$$\eta_{\text{th}} = \frac{q_g - q_c}{q_g} \quad \text{dir.} \quad (56)$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{q_g - q_c}{q_g} = 1 - \frac{q_c}{q_g} \quad (57)$$

$$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{q_c}{q_g} = 1 - \frac{c_p (T_4 - T_1)}{c_p (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \cdot \left(\frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1} \right) \quad (58)$$

$$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{1}{p_c^{\left(\frac{k-1}{k} \right)}} \quad (59)$$

olur.

2.6. Modelleme, Simülasyon ve Optimizasyon

Simülasyon (benzetim) bir öğretim metodu olup gerçek olayların anlaşılmasına dönük bilgisayar ortamında gerçek koşullara uygun yapılan modellerin analiz edilerek olayın tüm yönleri ile anlaşılmasıdır. Birçok alanda simülasyon teknikleri geliştirilerek kullanılmakta olup bunlardan bazıları şunlardır:

- Askeri harp eğitimi
- Tıp ve medikal eğitimi
- Uçakların uçurulmasında pilot eğitimleri,
- Karmaşık problemlerin çözümlenmesi,
- Karmaşık proseslerin ar-ge çalışmaları.

Matematikçi Neumann tarafından II. Dünya Savaşında geliştirilerek ve daha sonra Monte Carlo Metodu adı verilen simülasyon ile teknik askeri operasyon planlamaları yapılmış ve uygulanmıştır. 1950'li yıllardan sonra bilgisayarların geliştirilmesine paralel olarak simülasyon programları geliştirilmiştir [41].

Simülasyon modelleri belli başlı dört grupta sınıflandırılmaktadır. Bunlar:

- Statik simülasyon :Belirli bir andaki sistemi temsil eder.
- Dinamik simülasyon: Zamana göre değişen sistemlerin analizini ifade eder.
- Deterministik simülasyon: Rassal değişken (belirli değerleri belirli olasılıklarla alan değişken) içermeyen modelleri göz önüne alır.
- Stokastik (belirli bir düzeni olmayan) simülasyon: Girdi olarak bir veya daha fazla rassal değişkeni göz önüne alır [42].

Mühendislik uygulamalarında simülasyonlar yardımıyla göz önüne alınan olay yada tasarım ile ilgili olarak hangi durumlarda ne olur? sorularına cevaplar aranarak kestirimler yapılır [43]. Bu tür kestirimler yapılarak yapılan analizler duyarlılık analizi olarak ifade edilir.

Simülasyon sürecinde önce başlangıç koşulları girilerek parametrik analiz (on-design) yapılır, doğrulamaları yapıldıktan sonra performans analizine (off-design) geçilerek simülasyon aracılığıyla prosesin istenen amaçlar doğrultusunda karakteristikleri elde edilir. Ayrıca amaç fonksiyonları kullanılarak karakteristiklerden en iyi değerlerin elde edildiği optimizasyon çalışmaları yapılabilir [44].

2.7. Matlab ve Simulink

Matlab (MATrix LABoratory); Clever Moler tarafından ABD’de 1985 yılında Fortran dili ile geliştirilmiş daha sonraları C ++ ile geliştirilmiş bir sayısal analiz programıdır. Mathworks firması ürünüdür [45].

Matlab kullanarak sayısal hesaplamalar, veri analizi, programlama ve algoritma geliştirme, uygulama geliştirme ve yükleme, modellemeler, grafiklendirme, prototipleme, simülasyon, optimizasyon, yapay zeka gibi alanlarda kullanılacak şekilde araçlar geliştirilmiştir [46,47].

Simulink, dinamik simülasyonlar için sinyal yönelimli grafik programlama ortamıdır. Bloklar sinyallerle bağlanır. Modelde kullanılacak her türlü veri tabanları model içerisine katılır [48]. Geçmişte, dinamik bir sistemin bilgisayar modelini geliştirmeye yönelik ortak bir yaklaşım olarak blok diyagramı ile işe başlanırdı. Daha sonra, blok diyagram bir programlama dilinin kaynak koduna çevrilirdi. Simulink ile, modelin bir programlama dilinde yeniden yazılmasındaki çabaların tekrarlanması ortadan kaldırılır ve programın blok diyagramı olması, programın blok şemasını doğru bir şekilde uygulanmadığı riskini ortadan kaldırır. Simulink, mühendislerin blok şema notasyonu kullanarak dinamik sistemlerin bilgisayar modellerini oluşturmalarını sağlayan bir Matlab eklentisidir.

Bununla birlikte, matematik modeli yapılacak denklemler için Simulink blok kütüphanelerindeki bloklar direkt kullanılabildiği gibi, ortaya çıkan duruma göre kod

yazılarak kullanıcı tanımlı fonksiyon blokları da kullanılabilmekte ve gerekirse Matlab ortamında hazırlanan fonksiyonlar ile kullanıcı tanımlı fonksiyon bloğu irtibatlandırılarak birlikte çalıştırılabilmektedir.

Simulink ortamındaki bloklar kütüphanelerde mevcut olduğu gibi, istenilirse modelci tarafından amaca uygun yeni oluşturulan blokların biraraya getirilmesi ile yeni kütüphaneler oluşturularak benzer simülasyonların hazırlanmasında kolaylık sağlanabilmektedir. Termodinamik alanında Mathworks ile NASA tarafından geliştirilen T-MATS kütüphane modülleri [49] ve Mathworks ile EUTech Scientific Engineering GmbH tarafından geliştirilen ThermoLib kütüphaneleri [25] oldukça gelişmiş kimyasal veri tabanlı modüller olup internet ortamında kullanıma açıktır. Bu yazılımlar kapsamında oluşturulmuş kütüphane bloklarında iletimle ve taşınım ile ısı transferi hesaplamalarında kullanılmak üzere bloklar mevcuttur.

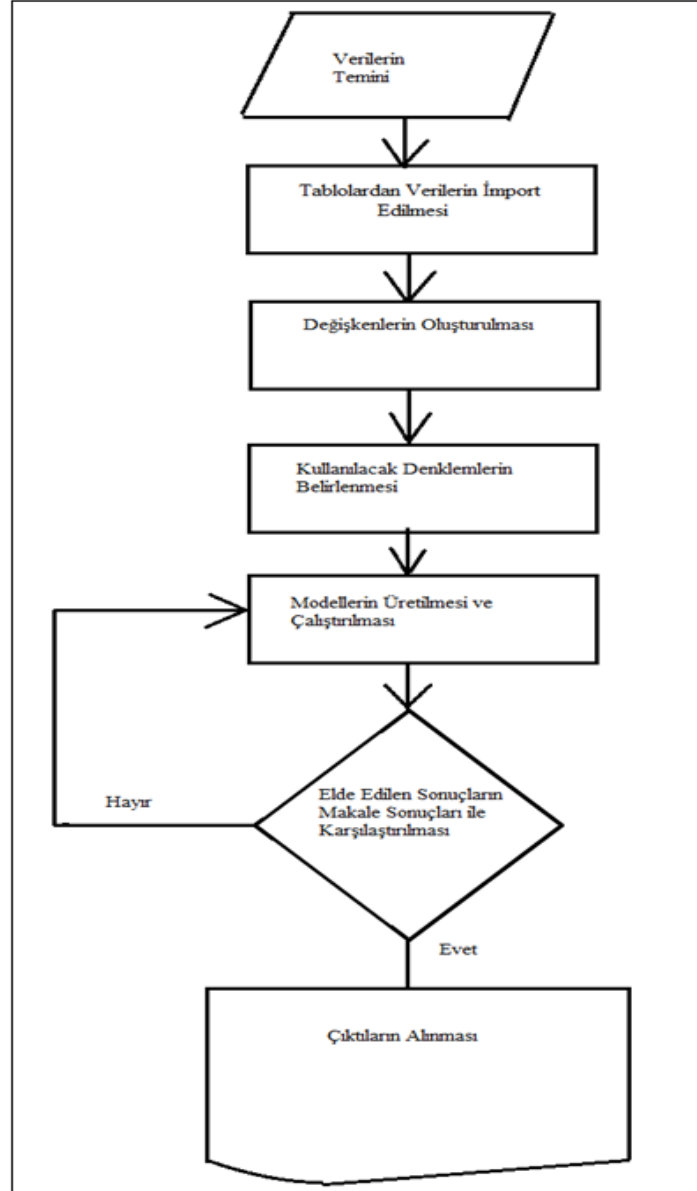
3. MODEL ÇALIŞMASI

Bu modelleme çalışması ile Brayton çevrimli gaz türbininde dört farklı sıkıştırma oranında enerji analizinin simülasyonu yapılmıştır. Kırıkkale Meteoroloji Müdürlüğü'nün 16.07.2018 günü atmosfer değerleri gaz türbininin giriş verileri olarak alınmıştır. Çevrime uygun termodinamik denklemler doğrultusunda Simulink blok kütüphanesindeki bloklar ile model oluşturulmuş ve önce parametre analizi (off design) yapılarak kompresör çıkış sıcaklığı, türbin çıkış sıcaklığı, bu sıcaklıklara göre çevrim akışkanlarının özgül entalpileri, nemli hava ile doğalgazın stokiometrik yanma denklem katsayıları belirlenmektedir. Ardından bu parametreler yardımıyla performans analizi (on design) yapılarak çevrimin farklı sıkıştırma oranlarındaki davranışı (kompresör verimi, türbin verimi) ve P-V diyagramları elde edilerek literatürde verilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Bir modelleme işinde parametre ve performans verilerinin bilgisayara yaptırılması için adım adım birtakım işlemler yapılmıştır. Bu işlemler yapılırken, amaçlanan hedeflere en kısa yoldan ulaşmak, problemi iyice irdeleyerek yazılacak en az kodlama ve en az hata ile hızlı programla kodları yazabilmek, bloklar arasında gerekli veri alışverişini yapmak gibi hususlar göz önünde bulundurulmuştur. Bu amaçla genel anlamda izelenen yolu genel olarak ifade eden algoritma Şekil 3.1.'de verilmiştir.

Modellemede, önce çevrimi oluşturan ana bileşenlerin her biri bir altmodel olarak kabul edilmiştir. Ardından bu altmodellerde elde edilmek istenen parametre ve performans verilerini belirlemek için kullanılacak sabitler, değişkenler, başlangıç koşulları gibi veriler belirlenmiştir. Daha sonra gerçek çevrime veya termodinamik denklemlere uygun bloklardan oluşan model oluşturulmuştur. Bu bloklar kapsamında Simulink kütüphanesinde mevcut olmayan blokların yerine kullanıcı tanımlı fonksiyon bloklarına kodlar yazılmıştır.

Oluşturulan bloklar birbirleriyle irtibatlandırılmıştır. Her aşamada model çalıştırılarak elde edilen değerlerin doğruluğu kontrol edilmiş, programlama ve modellemede ortaya çıkan hata mesajları uygun çözümler üretilerek aşılmıştır.



Şekil 3.1. Model algoritması

3.1. Modelin Amaçları

Bu model ile kompresörün dört farklı sıkıştırma oranına göre;

- Kompresör çıkış sıcaklığı değişimi,
- Kompresör verimi değişimi,
- Kompresörde oluşan özgül entropi değişimi,
- Yanma odası çıkış sıcaklığı değişimi,
- Yanma odasından transfer edilen özgül ısı enerjisi değişimi,
- Türbin verimi değişimi belirlenmesi ve
- literatürde elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması amaçlanmıştır.

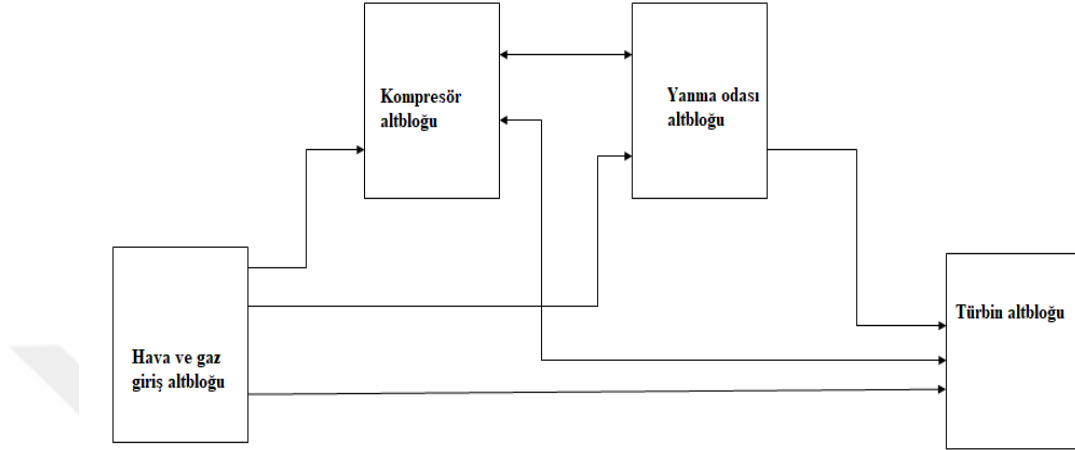
3.2. Modelin Hazırlanmasında Yapılan Kabuller

- Çevrim boyunca madde akışının sürekli olduğu,
- Akışkanların potansiyel ve kinetik enerjilerindeki değişim olmadığı,
- Yanma odasında tam yanma gerçekleştiği,
- 1 kmol yakıt için stokiometrik yanma denkleminin oluşturulduğu,
- Çevrimde yanma odasına kadar hava, yanma odasında hava, su buharı ile doğalgaz bileşenleri, gaz türbini giriş ve çıkışında yanma ürünlerinin çevrim akışkanı olduğu,
- Havanın, nemin, doğalgaz bileşenlerinin ve yanma ürünü bileşenlerin çevrim boyunca mükemmel gaz davranışı sergiledikleri kabul edilmiştir.

3.3. Modelin Oluşturulması

Amaçları gerçekleştirmek için model, gerçek proseste olayların gerçekleşme sırasına ve koşullarına mümkün olduğu kadar benzemesi için 3 ana alt blok (kompresör, yanma odası ve gaz türbini) ile hava ve gaz girişi altbloğu olmak üzere toplam dört ana altbloğun birleşiminden oluşturulmuştur. Şekil 3.2.'de görüldüğü üzere modelin

alt bileşenleri arasında bilgi alışverişleri olduğu oklarla gösterilmiş olup modelin genel görünümü ekte verilmiştir. (Bkz. EK 1)



Şekil 3.2. Gaz türbin çevrim modeli bileşenleri ve verilerin iletimi

Şekil 3.2.'de modelin temel dört ana bileşeni ile ilgili olarak oluşturulmuş modeller ve altblokları anahatları ile gösterilmiş ve bu modellere girilen ve elde edilen veriler ilgili başlıkların altında ve model görünümleri de eklerde verilmiştir.

3.4. Hava ve Gaz Girişi Bloğu

Bu blok içerisinde modelde kullanılacak işletme verileri olarak Kırıkkale Meteoroloji Müdürlüğü'nün web adresinden 16.07.2018 günü saat 14.16 verileri girilmiştir. Model ekte verilmiştir. (Bkz. EK 2) Çevrime giren havanın fiziksel özellikleri Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge3.1. Havanın fiziksel özellikleri

Sıcaklık (K)	Basınç (kPa)	Bağıl nem (%)
301.45	93.452	27

Modelde kullanılan doğalgaz bileşenlerin yüzde oranları Çizelge 3.2. de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Modelde kullanılan 1 kmol doğalgazı oluşturan bileşenlerin mol yüzde miktarları

Gaz Bileşenleri	Miktar (%)
Metan	88.29
Etan	8.14
Karbondioksit	3.23
Azot	0.34

Modelde kullanılan diğer proses işletme verileri Çizelge 3.3.'de verilmiştir.

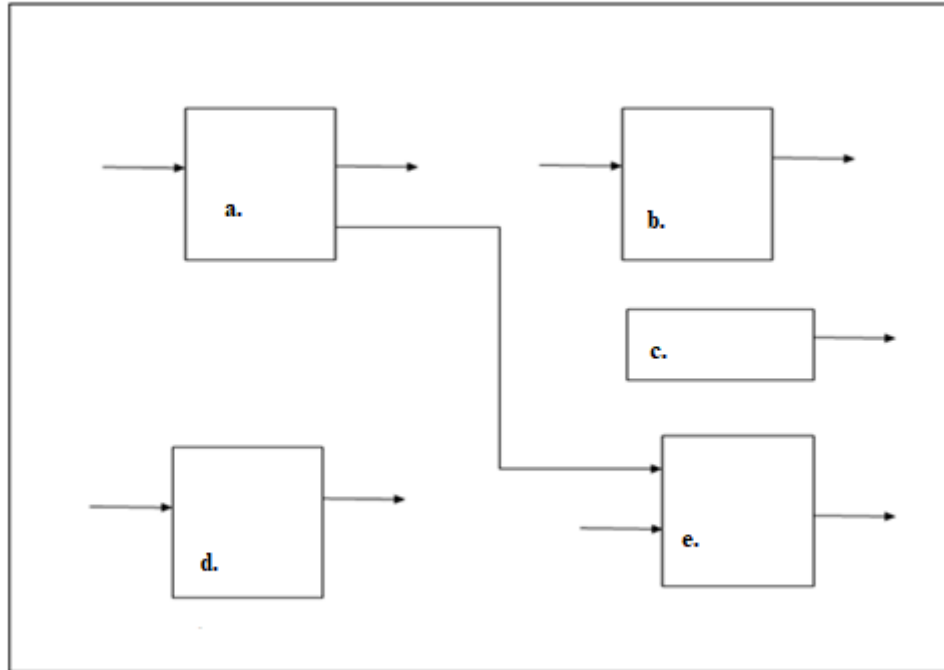
Çizelge 3.3. Proses işletme verileri

Sıkıştırma Oranları	Kompresör gerçek çıkış sıcaklıkları (K)	Adyabatik alev sıcaklıkları (K)	Türbin gerçek çıkış sıcaklıkları (K)
6	551.8	1170	814.11
10	649.29	1255	795.77
12	687.55	1285	788.93
16	751.95	1340	782.74

Çevrime giren nemli hava ile doğalgaz yakılmıştır. Hava ve gaz girişi bloğunun temsili şeması Şekil 3.3.'de gösterilmiştir. Bu blok, beş altbloktan oluşmakta olup aşağıdaki işlemleri yapılmaktadır:

- Havadaki su buharının doyma basıncı belirlenmesi, (Şekil 3.3.a.)
- Havayı oluşturan bileşenlerin mol oranları ile havanın molekül kütlesi hesaplanması, (Şekil 3.3.b.)
- Referans sıcaklığının modele girilmesi, (Şekil 3.3.c.)
- Havanın özgül entalpisi belirlenmesi, (Şekil 3.3.d.)
- Nemli havanın stokiometrik yanma denkleminin katsayıları ve hava/yakıt oranı hesaplanması, (Şekil 3.3.e.) .

Bu altblok kapsamında yapılan işlemler ve elde edilen değerler aşağıda belirtilmiştir.



Şekil 3.3. Hava ve gaz girişi blok kapsamı şematik gösterimi

a. Altblok:

Şekil 3.3.'te a. ile gösterilmiş olan bu altblok kapsamında çevrime giren havadaki su buharının doyma basıncı bulunmuştur. Bu işlem için önce termodinamik tablolarından alınan veriler excelde tablo haline getirilmiş, sonra Matlab ortamına aktarıldıktan sonra T_sb.mat ve P_doy.mat isimleri ile kaydedilmiş, ve daha sonra .mat dosyaları interpolasyon modeline bağlanarak hava giriş sıcaklığındaki değere karşılık havadaki su buharının doyma basıncı belirlenmiştir. Veri dosyaları 21x1 boyutlu olup 5 K aralıklarla 278 K ile 373 K arası sıcaklık değerleri ile bu sıcaklıklara karşılık gelen doyma basıncı değerlerinden oluşturulmuştur. Model ekte verilmiş olup (Bkz EK 3) elde edilen değerler Çizelge 3.4.'te gösterilmiştir.

Çizelge3.4. Giriş sıcaklığında havanın doyma basıncının değeri

Girilen Veriler		Elde Edilen Değerler	
Sıcaklık (K)	301.45	Doyma basıncı (kPa)	3.913
Bağıl Nem (%)	27		

b. Altblok:

Hava, hacimce %21 oksijen ve %79 azot gazlarının karışımı olarak kabul edilmiştir. Şekil 3.3.'te b. ile gösterilmiş olan bu altblok kapsamında, havayı oluşturan oksijen ve azot gazı bileşenlerinin hacimlerinin oranlanması ile hava 1 kmol O₂ ile 3,76 kmol N₂ olmak üzere toplam 4,76 kmol olarak yanma reaksiyon denkleminde kullanılmıştır.

Ayrıca havanın molekül kütlesi kullanıcı tanımlı fonksiyon bloğuna girilen kodların çalıştırılması ile belirlenmiştir.

Model ekte verilmiştir. (Bkz. EK 4) Çalıştırılması ile elde edilen değerler Çizelge 3.5.'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. Havanın molar bileşimi ve molekül kütlesi

Girilen Veriler			Elde Edilen Değerler		
Hava bileşenlerinin molekül kütleleri (kg/kmol)	O ₂	31.999	Yanma denklemi için hava bileşenlerinin katsayıları	O ₂	1,0
	N ₂	28.013		N ₂	3.76
Havanın yüzde bileşenleri (%)	O ₂	21	Havanın molekül kütlesi (kg/kmol)		28.85
	N ₂	79			

c. Altblok:

Şekil 3.3.'te c. ile gösterilmiş olan bu altblok kapsamında, modelin ilerleyen aşamalarında yanma analizinde reaktanların ve ürünlerin referans sıcaklığında entalpi değerlerine ihtiyaç duyulacağı için referans sıcaklığı (298 K) modele burada girilmiştir. Model ekte verilmiştir. (Bkz. EK 5)

d. Altblok:

Şekil 3.3.'te d. ile gösterilmiş olan bu altblok kapsamında, havanın çevrime giriş sıcaklığına göre özgül entalpisi ile özgül entropisi belirlenmiştir. Bu işlem için önce termodinamik tablolarından alınan veriler excelde tablo haline getirilmiş, sonra Matlab ortamına aktarılan edilerek T_hava.mat ve h_hava.mat ve s_hava.mat isimleri ile kaydedilmiş, ve daha sonra da oluşturulan interpolasyon modeline .mat dosyaları bağlanmış ve giriş sıcaklığındaki değere karşılık havanın özgül entalpi ve entropi

değerleri belirlenmiştir. Veri dosyaları 69x1 boyutlu olup 10 K aralıklarla 200 K ile 1000 K arası sıcaklık değerleri ile bu sıcaklıklara karşılık gelen havanın özgül entalpi ve özgül entropi değerlerinden oluşturulmuştur.

Model ekte verilmiştir. (Bkz. EK 6) Elde edilen değerler Çizelge 3.6.'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Giriş havasının özgül entalpi ve entropi değerleri

Girilen Veriler		Elde edilen değerler	
Sıcaklık (K)	301.45	Havanın özgül entalpisi (kJ/kg)	301.647
		Havanın özgül entropisi (kJ/kg)	1.7068

Modelin kullanılması ile elde edilen hava özgül entalpi ve entropi değerleri termodinamik tablolarında verilen değerlerle uyumlu olduğu Çizelge 3.7.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7. Havanın özgül entalpi ve entropisinin tablo ve model değerleri

	T(K)	h(kJ/kg)	s(kJ/kgK)
Tablo değerleri	300	300.19	1.70203
	305	305.22	1.71865
Model değerleri	301.45	301.647	1.7068

e. Altblok:

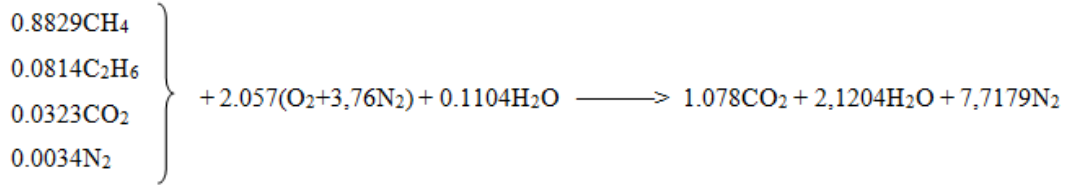
Şekil 3.3.'te e. olarak gösterilmiş olan bu altblok kapsamında,

- Oluşturulmuş olan kullanıcı tanımlı fonksiyon bloğuna Çizelge 3.2.'de verilen 1 kmol doğalgazın mol yüzde miktarları, bu bileşenlerin molekül

kütleleri ve yukarıdaki a. ve b. altbloklarda elde edilen veriler (hava bileşenlerinin molekül kütleleri, hava bileşen mol katsayıları, giriş havasındaki su buharının doyma basıncı, hava giriş basıncı ve bağıl nem miktarı) girilmiş ve doğalgazın nemli hava ile stokiometrik yakılması işleminde yanma denkleminin katsayıları ile

- hava / yakıt oranı elde edilmiştir.

Bu çalışmada 1 kmol doğalgazın 0.8829 kmol CH₄, 0.814kmol C₂H₆, 0.0323 kmol CO₂ ve 0.0034 kmol N₂ ‘den meydana geldiği ve bu yakıtın %27 bağıl nemli hava ile yakıldığı göz önüne alınarak stokiometrik yanma denkleminin katsayıları kütlenin korunumu kanununa göre denkleştirilerek katsayıları ile birlikte



elde edilmiştir. Stokiometrik yanma denkleminin katsayıları yukarıda verilen denklem doğrultusunda hazırlanmış ve ekte gösterilmiştir. (Bkz. EK 7). Bloğa giren veriler ve modelin çalıştırılması ile elde edilen veriler Çizelge 3.8. ile verilmiştir.

Stokiometrik yanma denklemine havadaki nemin mol miktarı olan $n_{\text{subuharı}}$ belirlenmiştir. Bulunan bu değer yanma denklemine eklenerek denklem yeniden düzenlenmiş ve katsayılar hesaplatılmıştır.

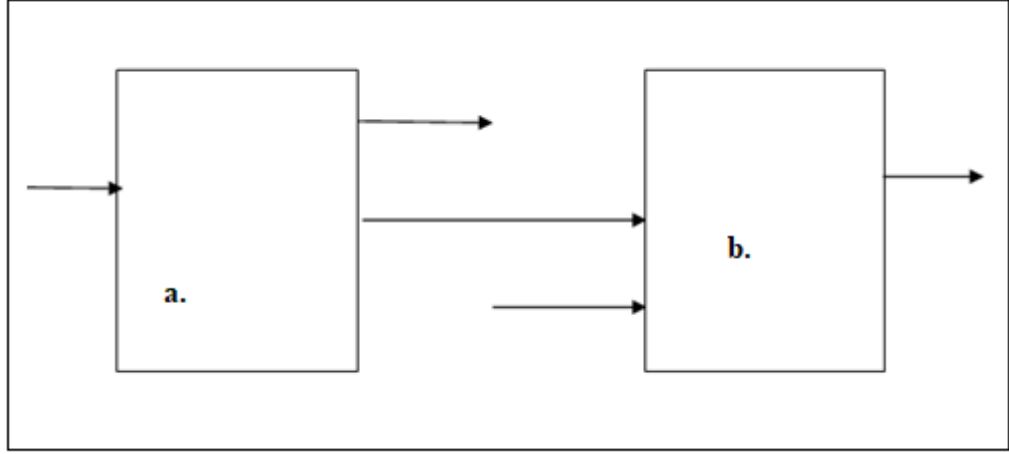
Çizelge 3.8. Hava ve gaz girişi e. altbloğa girenler ve elde edilen değerler

Girilen Değerler			Elde Edilen Değerler		
Doğalgaz bileşenlerinin molekül kütleleri (kg/kmol)	CH₄	16.043	Yanma denklem katsayıları	a_k	2.0507
				n_{subuhar1}	0.1104
	C₂H₆	30.070		d	1.0780
	CO₂	44.009		f + n_{subuhar1}	2.1204
				r	7.7179
	N₂	28.013	Doğalgazın molekül kütlesi (kg/kmol)		18.13
			Teorik hava / yakıt oranı (kg hava/ kg doğalgaz)		15.54

3.5. Kompresör Bloğu

Bu blok izantropik koşullarda havanın sıkıştırıldığı bloktur. Blok modeli ekte verilmiştir. (Bkz. EK 8). Şekil 3.4.'de temsili şemada gösterildiği gibi iki ana altbloktan meydana gelmekte olup bu bloklarda sırasıyla şu işlemler yapılmaktadır:

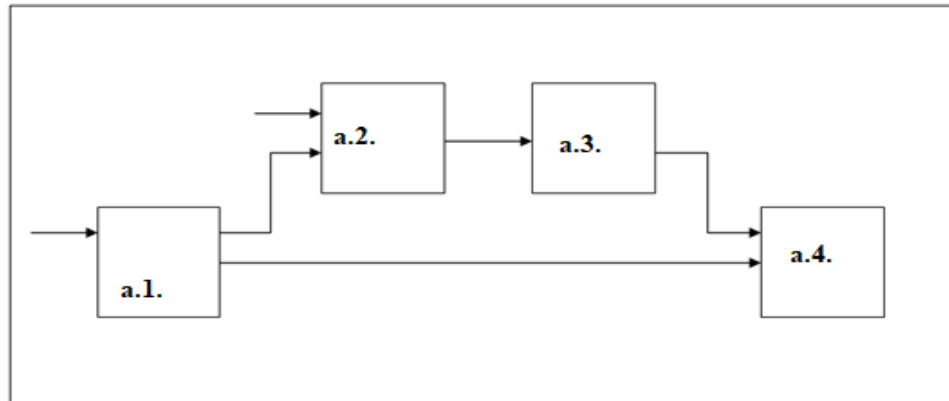
- Şekil 3.4.a.'da kompresör teorik ve gerçek çıkış sıcaklıklarına göre havanın özgül entalpi değerleri, kompresör teorik ve gerçek özgül iş miktarı ve kompresör verimi belirlenir.
- Şekil 3.4.b.'de referans sıcaklığına ve kompresör gerçek çıkış sıcaklıklarına göre su buharı, oksijen ve azot gazının özgül entalpileri belirlenir.



Şekil 3.4. Kompresör bloğu şematik gösterimi

3.5.1. Kompresör a. Altblok

Şekil 3.4.'te a. ile gösterilen bu altblok kendi içerisinde 3 adet altblok ve 1 adet kullanıcı tanımlı fonksiyon bloğu olmak üzere dört adet altbloktan oluşmakta olup genel şeması Şekil 3.5.'de verilmiştir. Bloğun modeli ekte verilmiştir. (Bkz. EK 9)



Şekil 3.5. Kompresör a. altblok şematik gösterimi

a.1. Altblok:

Şekil 3.5.'teki a.1. altbloğuna adyabatik üs değeri ile kompresör sıkıştırma oranları girilerek ve model ortamına import edilen termodinamik tablo değerleri kurulan interpolasyon modeli ile kompresör teorik çıkış sıcaklığı ve entropi değişimi belirlenmiştir. Model kapsamı ekte verilmiştir. (Bkz. EK 10.a., EK10. b., EK 10. c.)

Sırasıyla, EK 10.a'da a.1. altbloğunun genel görünümü, EK 10.b.'de kompresör çıkışı teorik sıcaklığı ve EK 10.c.'de de kompresördeki entropi değişiminin hesaplandığı matematik modeller gösterilmiştir.

Kompresördeki özgül entropi değişiminin belirlenmesi için T_hava.mat ve s_hava.mat dosyalarındaki veriler interpolasyona tabi tutulmuştur. Bu denklemlere göre hazırlanan modelin çalıştırılması ile elde edilen değerler Çizelge 3.9.'da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Kompresör a.1. altblok modeline girilen veriler ve modelden elde edilen değerler

Girilen Değerler		Elde Edilen Değerler	
k	Kompresör sıkıştırma oranları	Kompresör Çıkışı Teorik Sıcaklığı (K)	Kompresörde Meydana Gelen Entropi Değişimi (kJ/kg.K)
1.4	6	502.97	0.00454
	10	582.01	0.00943
	12	613.13	0.01182
	16	665.66	0.01638

a.2. Altblok:

Şekil 3.5.'teki a.2. altbloğuna kompresör çıkış teorik sıcaklıkları ile kompresör çıkışı gerçek sıcaklıkları girilerek bu sıcaklıklarda havanın özgül entalpi değerleri, modele aktarılan T_hava.mat ve h_hava.mat dosyalarındaki verilerin interpolasyonu ile belirlenmiştir. Model ekte verilmiştir. (Bkz. EK 11). Modelin çalıştırılması ile elde edilen değerler Çizelge 3.10.'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.10. Kompresör a.2. altbloğu kapsamında tanımlanan ve hesaplanan değerler

Girilen Değerler			Elde Edilen Değerler		
k	Kompresör Sıkıştırma Oranları	Kompresör Çıkışı Gerçek Sıcaklığı (K)	Kompresör Çıkışı Teorik Sıcaklığı (K)	Havanın Teorik Özgül Entalpisi (kJ/kg)	Havanın Gerçek Özgül Entalpisi (kJ/kg)
1.4	6	551,8	502.97	506.1	557.4
	10	649,29	582.01	588.1	659.1
	12	687,55	613.13	620.8	699.9
	16	751,95	665.66	676.5	769.4

a.3. Altblok:

Şekil 3.5.'teki a.3. altbloğu kapsamında sırasıyla kompresör teorik ve gerçek özgül iş miktarları ile kompresör verimi belirlenmiştir. Bu blok kapsamında ayrıca, modelin ilerleyen safhasında elde edilerek bu altbloğa gönderilen türbin özgül gerçek iş verileri kullanılarak çevrimin özgül net gerçek iş miktarı belirlenmiştir. Model görünümü ekte verilmiştir. (Bkz. EK 12) Modelin çalıştırılması ile elde edilen sonuçlar Çizelge 3.11.'de verilmiştir.

Çizelge 3.11. Kompresör a.3. altblok modelinin çalıştırılması ile elde edilen değerler

Girilen Değerler	Elde Edilen Değerler		
Sıkıştırma Oranı	Kompresör teorik özellik iş miktarı (kJ/kg)	Kompresör gerçek özellik iş miktarı (kJ/kg)	Kompresör verimi (%)
6	204.43	255.79	79.92
10	286.50	357.44	80.15
12	319.18	398.25	80.15
16	374.86	467.77	80.14

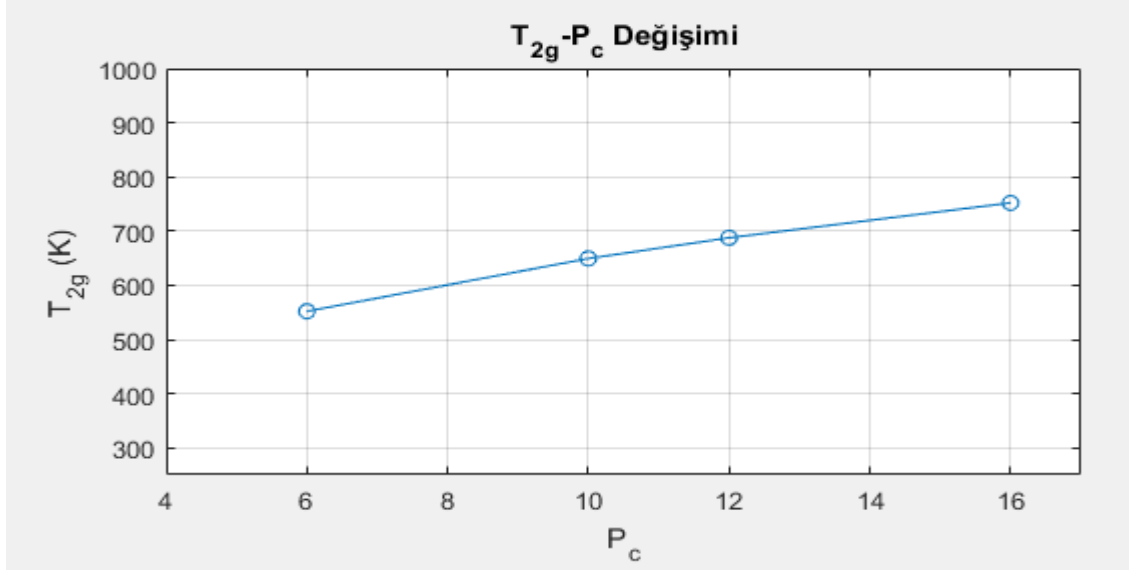
Bu alt blok kapsamındaki türbin çıkış verileri ise modelin türbin altbloğu kısmında detaylı verilmiştir.

a.4. Altblok:

Şekil 3.5.'teki a.4. altbloğu kapsamında, yukarıda elde edilen veriler kullanıcı tanımlı fonksiyon bloğunda veri olarak kullanılarak Matlab kodları ile

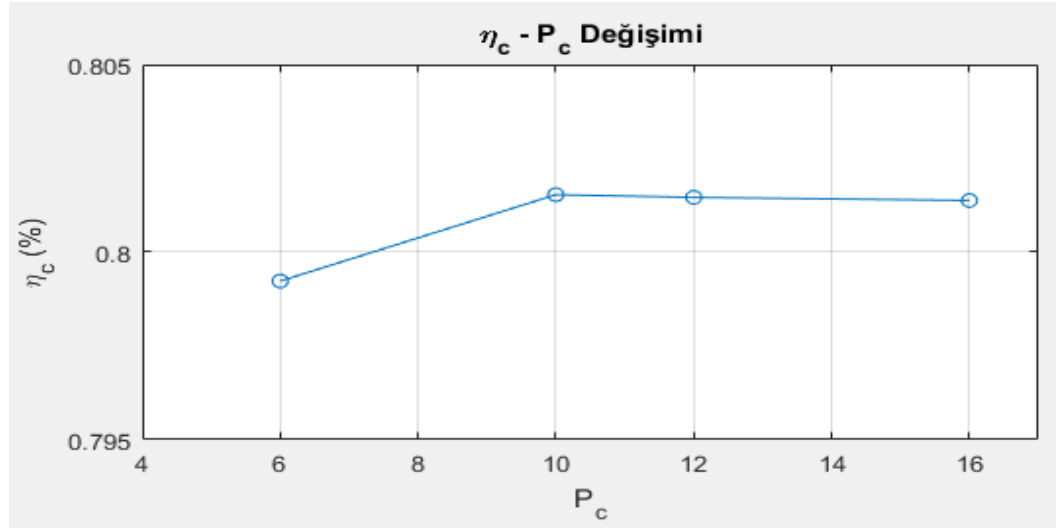
- (T_{2g} - p_c) değişimi,
- (η_c - p_c) değişimi,
- (T_2 - p_c) değişimi,
- (T_3 - p_c) değişimi,
- (T_4 - p_c) değişimi,
- (T_{4g} - p_c) değişimi
- (η_t - p_c) değişimi
- Çevrimin P-V diyagramları.

elde edilmiştir: Oluşturulan modelin şematik gösterimi ekte verilmiştir. (Bkz. EK 13) Kompresör gerçek çıkış sıcaklığının sıkıştırma oranlarına bağlı değişimi Şekil 3.6.'da gösterilmiş olup sıkıştırma oranı arttıkça kompresör gerçek çıkış sıcaklığı artmıştır.



Şekil 3.6. Kompresör gerçek çıkış sıcaklığının sıkıştırma oranına göre değişimi

Kompresör veriminin sıkıştırma oranına göre değişimi Şekil 3.7.'de verilmiş olup kompresör sıkıştırma oranı arttıkça kompresör verimi sıkıştırma oranı 6-10 arasında artış gösterirken sıkıştırma oranının 10-16 değerleri arasında sabit bir seyir izlemiştir.



Şekil 3.7. Kompresör veriminin sıkıştırma oranına göre değişimi

Gerçek koşullarda kompresördeki ısı kayıpları nedeniyle bir miktar basınç kaybı ve özellikle tersinmezlikler nedeniyle kompresörün tükettiği gerçek iş miktarı izantropik koşullardaki teorik özgül iş miktarından daima bir miktar fazladır [32]. Bu nedenle kompresöre verilen gerçek özgül işin izantropik koşullardaki teorik özgül işin ne kadarına denk geldiğini belirlemek için kompresör verimi belirlenmiştir.

Şekil 3.7.'de gösterildiği üzere, kompresör verimi önce az bir miktar artmış sonra sabit kalmıştır. Bunun en önemli nedeni artan sıkıştırma oranlarına paralel olarak kompresör gerçek çıkış sıcaklığının teorik çıkış sıcaklığından fazla olmasıdır. Bu durum havanın gerçek koşullarda özgül entalpisinin teorik koşullara nazaran fazla olmasına neden olur. Çünkü entalpi sadece sıcaklığın bir fonksiyonudur. Kompresör gerçek çıkış sıcaklığında elde edilen özgül iş teorik çıkış sıcaklığında elde edilen özgül işten fazla olmuştur. Havanın kompresör girişindeki özgül entalpileri sabit olup teorik ve gerçek özgül iş miktarları oranlandığında kompresör veriminin genelde sabit kaldığı, çok bariz bir değişim olmadığı Çizelge 3.11.'de ve Şekil 3.7.'de elde edilmiştir.

Modelde kompresör a.4. altbloğu kapsamında yapılmış olan kompresör teorik çıkış sıcaklığı, adyabatik alev sıcaklığı ve türbin teorik çıkış sıcaklıklarının sıkıştırma oranlarına bağlı değişimi bu tezde türbin altblok kısmında gösterilmiştir.

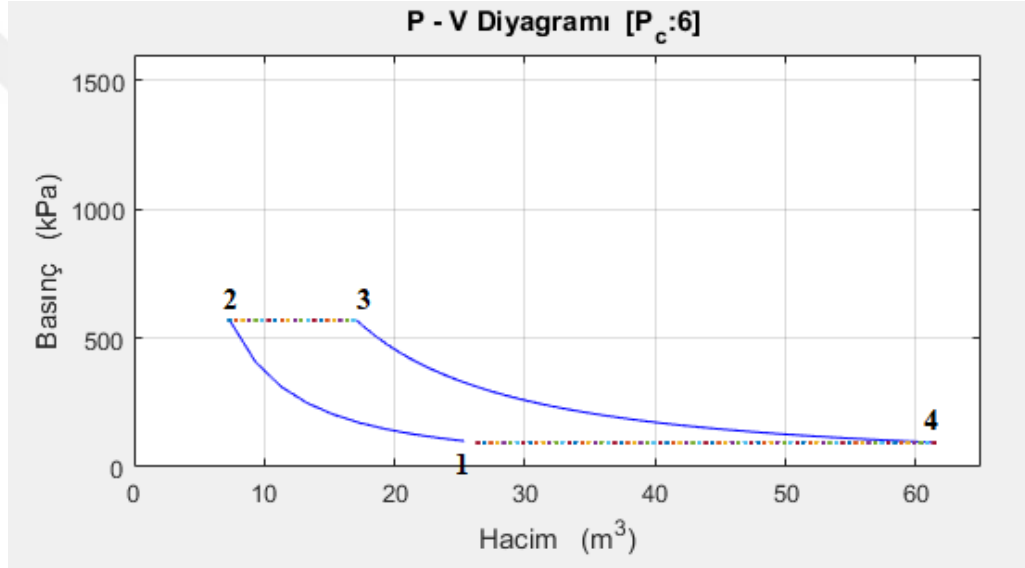
P-V Diyagramları:

Dört farklı sıkıştırma oranları için çevrimin P-V diyagramları Matlab ortamında oluşturulan pv.m dosyası ile buradaki kullanıcı tanımlı fonksiyon altbloğu irtibatlandırılarak elde edilmiştir. Çevrim üzerinde sıkıştırma oranının etkisinin anlaşılabilirliğine katkı sağlaması için diyagramlar aynı aralık değerleri üzerine çizdirilmiştir.

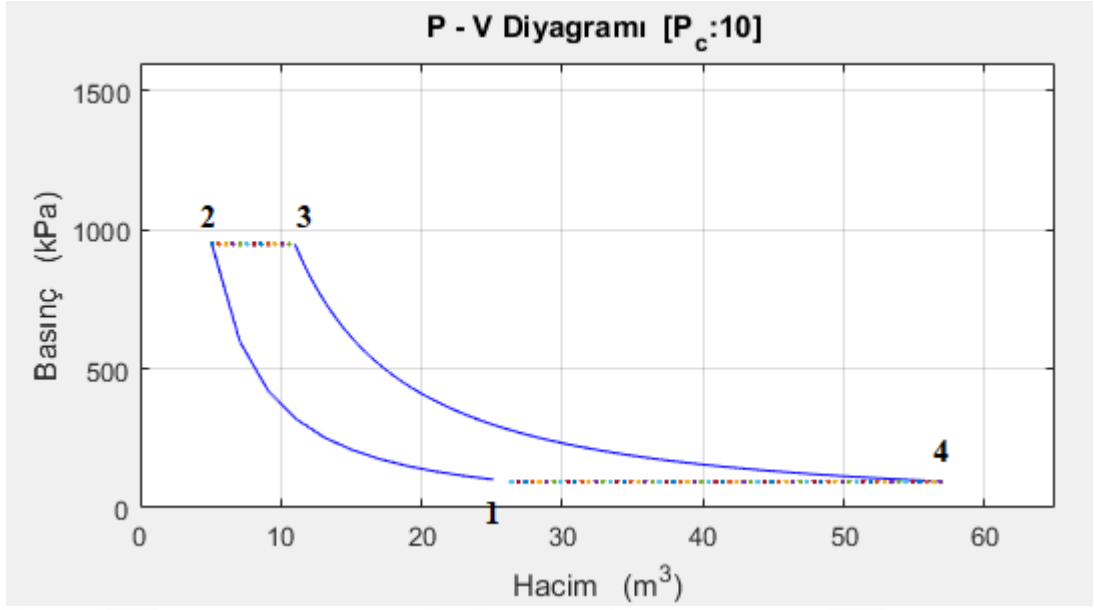
P-V diyagramlarının elde edildiği fonksiyona giriş verileri olarak atmosfer havasının sıcaklığı, basıncı, kompresör sıkıştırma oranı ile adyabatik alev sıcaklık değerleri

kullanılmıştır. Kodlamada, havanın adyabatik üs katsayısı 1.4 ve universal gaz sabiti için 8.314 sabitleri kullanılmıştır.

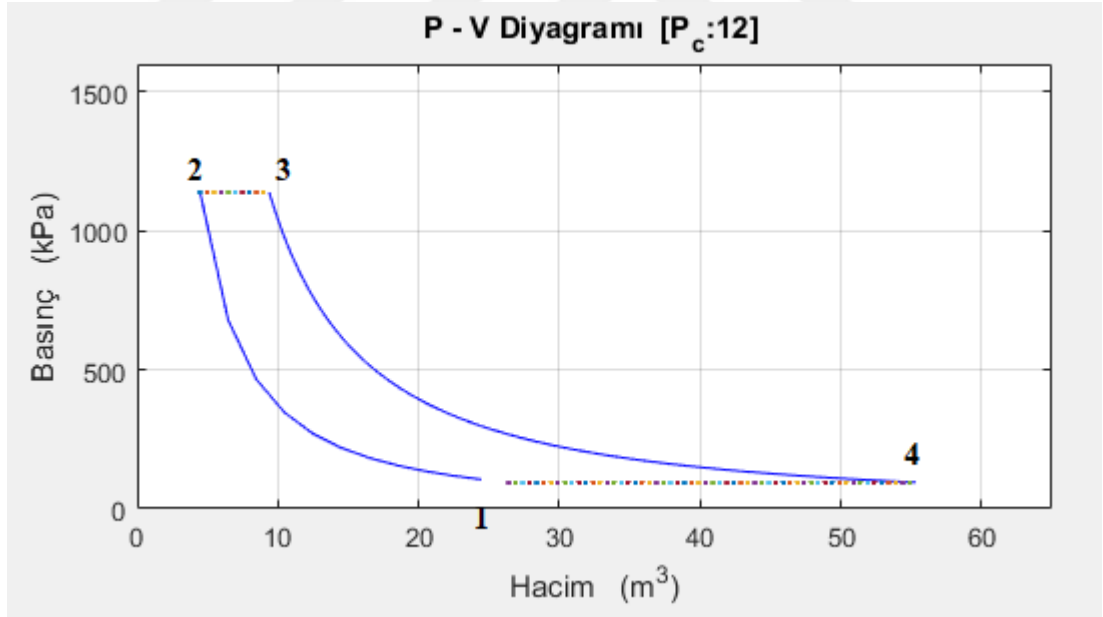
Havanın mükemmel gaz olduğu ve sırasıyla kompresörde izantropik sıkıştırma, yanma odasında sabit basınçta yanma ve türbinde izantropik genişleme proseslerinin meydana geldiği kabul edilerek oluşturulan kodlamalarla çevrimdeki her noktaya karşılık gelen hacim ve basınç değerleri belirlenerek P-V diyagramları çizdirilmiştir. Elde edilen diyagramlar Şekil 3.8 – 3.11’de verilmiştir.



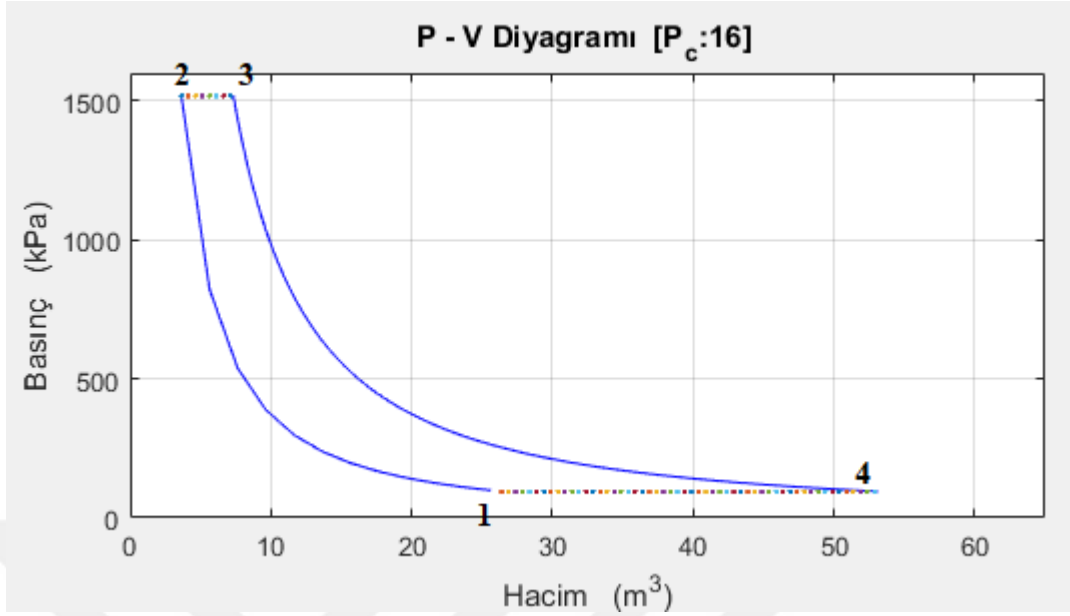
Şekil 3.8. Sıkıştırma oranı 6 için çevrimin P-V diyagramı



Şekil 3.9. Sıkıştırma oranı 10 için çevrimin P-V diyagramı



Şekil 3.10. Sıkıştırma oranı 12 için çevrimin P-V diyagramı



Şekil 3.11. Sıkıştırma oranı 16 için çevrimin P-V diyagramı

Diyagramlar birlikte değerlendirildiğinde sıkıştırma oranı arttıkça kompresör çıkışındaki basınç artmakta, hacim azalmaktadır.

Çevrimin sıcaklık limitleri, türbin kanatlarının ısı mukavemet limitleridir. Yani yanma odası sıcaklıklarının türbin kanatlarının mukavemetini olumsuz etkilememesi gerekmektedir. Yanma odası adyabatik alev sıcaklıkları (T_3) Çizelge 3.3.'den alınmıştır. Bu değerlerden de anlaşılacağı gibi P-V diyagramlarında sıkıştırma oranındaki artışa paralel olarak adyabatik alev sıcaklığının arttığı görülmüştür.

Ayrıca sıkıştırma oranı arttıkça kompresör sıkıştırma eğrisi (1-2) ile türbin genişleme eğrisinin (3-4) birbirlerine yakınlığı görülmüştür. Bu durum izantropik sıkıştırma ya da genişleme prosesinde kodlamada kullanılan denklemler üzerinden değerlendirildiğinde, (10) numaralı denklemi gereği, üssün sabit kalması durumunda sıkıştırma oranı artarken elde edilen T_2 değerinin de artması gerektiğini ve ayrıca türbin çıkışında (38) numaralı denklemi gereğince, üssün sabit kalması durumunda

sıkıştırma oranı artarken sıkıştırma oranının tersinin azalmasını ve dolayısıyla T_4 değerinin de azalmasını gerektirmektedir.

3.5.2. Kompresör b. Altblok

Şekil 3.4.'te b. ile gösterilen bu altblok ile yanma reaksiyonuna girecek olan havanın bileşenleri ile su buharının kompresör gerçek çıkış sıcaklıkları ve referans sıcaklığına göre özgül entalpilerinin belirlenmesi işlemleri için önce termodinamik tablolarından alınan veriler excelde tablo haline getirilmiş, sonra Matlab ortamına aktarılmış, daha sonra oluşturulan interpolasyon modeline bağlanmış ve kompresör gerçek çıkış sıcaklıkları ve referans sıcaklığına göre subuharının oksijenin ve azot gazlarının özgül entalpi değerleri belirlenmiştir. Burdaki .mat veri dosyaları 80x1 boyutlu olup 10 K aralıklarla 220 K ile 1000 K arası sıcaklık değerleri ve bu sıcaklıklara karşılık gelen su buharı, oksijen ve azot gazlarının özgül entalpi değerlerini kapsamaktadır. Modelin görünümü ekte verilmiştir. (Bkz. EK 14).

Kompresör gerçek çıkış sıcaklıklarında havanın bileşenleri ile su buharının özgül entalpi değerleri Çizelge 3.12.'de ve referans sıcaklığındaki havanın bileşenleri ile su buharının özgül entalpi değerleri de Çizelge 3.13.'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.12. Kompresör b. altbloğunda elde edilen değerler

Tanımlanan Değerler		Elde Edilen Özgül Entalpi Değerleri (kJ/kmol)		
Kompresör sıkıştırma oranları	Kompresör gerçek çıkış sıcaklıkları (K)	Hava Bileşenleri		Su Buharı
		O ₂	N ₂	H ₂ O
6	551.8	16394.88	16117.82	18665.44
10	649.3	19520.92	19053.49	22203.87
12	687.5	20773.15	20222.03	23622.86
16	752.0	22909.13	22209.65	26051.30

Çizelge 3.13. Kompresör b. bloğunda elde edilen değerler

Girilen Değer	Elde Edilen Özgül Entalpi Değerleri (kJ/kmol)		
Referans Sıcaklığı (K)	Hava Bileşenleri		Su buharı
	O ₂	N ₂	H ₂ O
398	8677	8665	9899

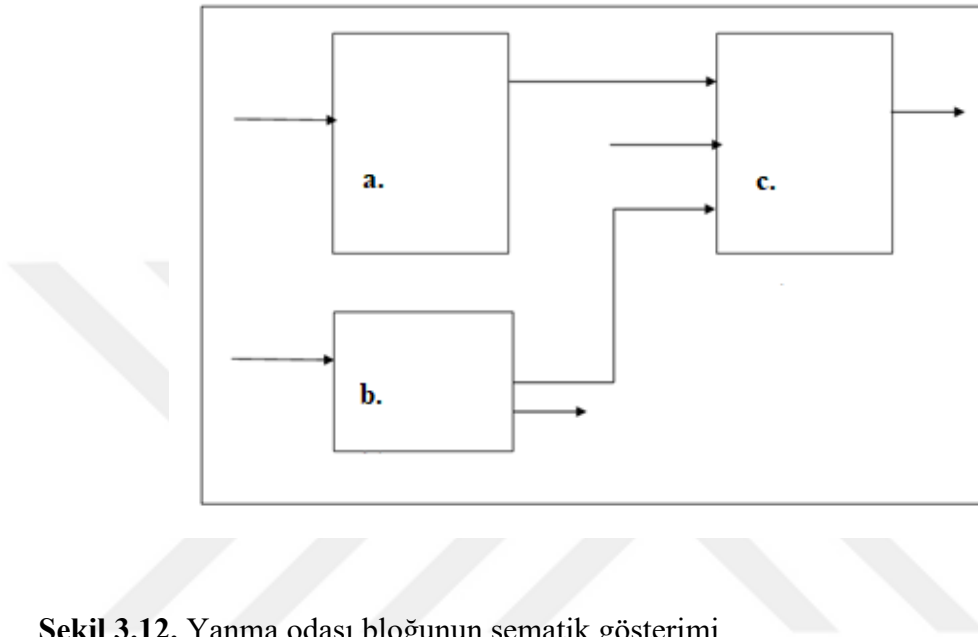
3.6. Yanma Odası Bloğu

Bu blok ile, yanmaya katılan reaktanların ve yanmadan sonra ortaya çıkan ürünlerin bileşen bazında kararlı akışlı tepkime reaksiyonuna göre modelleri oluşturulmuştur. Modelin genel görünümü ekte verilmiştir. (Bkz. EK 15).

Yanma odası bloğu Şekil 3.12.'de gösterildiği gibi üç ana altbloktan oluşturulmuştur. Bu altblokların kapsamında hazırlanan modeller yardımıyla sırasıyla şu işlemler yapılmıştır:

- Şekil 3.12.a.'da gösterilen altblok ile referans sıcaklığında ve kompresör gerçek çıkış sıcaklıklarında doğalgaz bileşenlerinin özgül entalpileri hesaplanmıştır.

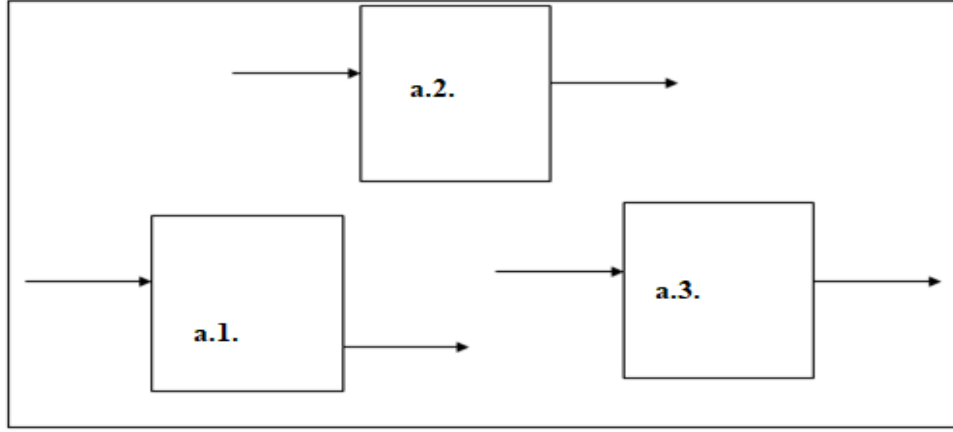
- Şekil 3.12.b.'de gösterilen altblok ile adyabatik alev sıcaklıklarında ürünlerin özgül entalpileri hesaplanmıştır.
- Şekil 3.12.c.'de gösterilen altblok ile reaksiyon yanması enerji analizi ile yanma odasından transfer edilen özgül ısı enerjisi miktarı hesaplanmıştır.



Şekil 3.12. Yanma odası bloğunun şematik gösterimi

3.6.1. Yanma Odası a. Altblok

Bu blok kendi içerisinde 3 adet altbloktan oluşmakta olup genel görünüm şeması Şekil 3.13.'de verilmiştir. Blok modeli ekte verilmiştir. (Bkz. EK 16)



Şekil 3.13. Yanma odası a. altblok genel şematik gösterimi

a.1. Altblok:

Şekil 3.13.'te gösterilen a.1. altbloğunda doğalgaz bileşenlerinin kompresör gerçek çıkış sıcaklıklarında özgül entalpileri hesaplanmıştır. Bu amaçla oluşturulmuş olan kullanıcı tanımlı fonksiyon bloğuna (18), (19) numaralı denklemlere uygun kodlamalar yapılmıştır. Model ekte verilmiştir. (Bkz. EK 17). Denklemlerde kullanılan doğalgaz bileşenlerinin polinom katsayıları Çizelge 3.14.'te ve elde edilen değerler Çizelge 3.15.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.14. Çevrimde kullanılan doğalgaz bileşenlerinin polinom katsayıları [32]

Madde	Formül	a	b	c	d	Sıcaklık aralığı (K)
Metan	CH ₄	19,89	5,024. 10 ⁻²	1,269. 10 ⁻⁵	-11,01.10 ⁻⁹	273-1500
Etan	C ₂ H ₆	6,90	17,27.10 ⁻²	-6,406.10 ⁻⁵	7,285.10 ⁻⁹	273-1500
Karbon dioksit	CO ₂	22,26	5,981.10 ⁻²	-3,501.10 ⁻⁵	7,469.10 ⁻⁹	273-1800
Azot	N ₂	28,90	-0,157.10 ⁻²	0,808.10 ⁻⁵	-2,873.10 ⁻⁹	273-1800

Çizelge 3.15. Doğalgaz bileşenlerinin kompresör gerçek çıkış sıcaklıklarındaki özgül entalpileri

Girilen Veriler		Elde Edilen Değerler			
Kompresör sıkıştırma oranları	Kompresör gerçek çıkış sıcaklıkları (K)	Özgül Entalpi Değerleri (kJ/kmol)			
		CH ₄	C ₂ H ₆	CO ₂	N ₂
6	551.8	27383.90	46304.10	25304.50	16560.04
10	649.3	35611.23	61046.39	31412.04	19803.55
12	687.5	39089.21	67190.76	33868.61	21112.02
16	752.0	45238.88	77930.44	38059.27	23360.37

a.2. Altblok:

Şekil 3.13.'te gösterilen a.2. altbloğunda doğalgaz bileşenlerinin oluşum entalpi değerleri ile su buharının oluşum entalpi değeri modele girilmiştir. Girilen bu değerler Çizelge3.16.'de verilmiştir. Model ekte verilmiştir. (Bkz. EK 18)

Çizelge 3.16. Doğalgaz bileşenleri ile su buharının oluşum entalpileri

Doğalgaz Bileşenlerinin Oluşum Entalpileri (kJ/kmol)				Su buharının Oluşum entalpisi (kJ/kmol)
CH ₄	C ₂ H ₆	CO ₂	N ₂	H ₂ O
-74850	-84680	-393520	0	-241820

a.3. Altblok:

Şekil 3.13.'te gösterilen a.3. altbloğunda doğalgaz bileşenlerinin referans sıcaklığında özgül entalpileri belirlenmiştir. Bu amaçla oluşturulmuş olan kullanıcı

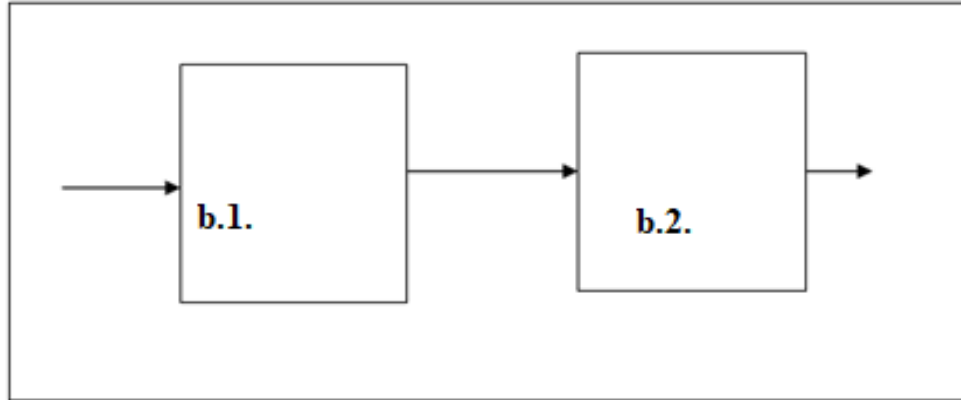
tanımlı fonksiyon bloğuna (18), (19) numaralı denklemlere uygun kodlar girilmiştir. Model ekte verilmiştir. (Bkz. EK 19). Altbloğun çalıştırılması ile elde edilen sonuçlar Çizelge3.17.'de verilmiştir.

Çizelge 3.17. Doğalgaz bileşenlerinin referans sıcaklığındaki özgül entalpileri

Referans Sıcaklığı (K)	Elde Edilen Özgül Entalpi Değerleri (kJ/ kmol)			
	CH ₄	C ₂ H ₆	CO ₂	N ₂
398	10637.73	15764.84	11077.26	8663.88

3.6.2. Yanma Odası b. Altblok

Şekil 3.12.'de verilmiş olan yanma odası b. altblok kendi içerisinde 2 adet altbloktan oluşmakta olup şematik görünümü Şekil 3.14.'de verilmiştir. Blok modelin genel görünümü ekte verilmiştir. (Bkz. EK 20)



Şekil 3.14 Yanma odası b. altblok şematik gösterimi

b.1. Altblok:

Şekil 3.14.'te verilmiş olan b.1. altbloğuna adyabatik alev sıcaklıkları veri olarak girilmiştir. Yanma sonucu elde edilen ürünlerin (CO_2 , H_2O ve N_2) adyabatik alev sıcaklıklarında özgül entalpilerini belirlemek için önce termodinamik tablolarından alınan veriler excelde tablo haline getirilmiş, sonra Matlab ortamına aktarılarak T_yanma.mat, h3_CO2_yanma.mat, h3_H2O_yanma.mat ve h3_N2_yanma.mat isimleri ile kaydedilmiş, sonra oluşturulan interpolasyon modeline bağlanmış ve adyabatik alev sıcaklıklarına göre ürün gazlarının özgül entalpi değerleri belirlenmiştir. Burdaki .mat veri dosyaları 51x1 boyutlu olup 20 K aralıklarla 1000 K ile 2000 K arası sıcaklık değerleri ve bu sıcaklıklara karşılık gelen ürün gazlarının özgül entalpi değerlerini kapsamaktadır.

Modelin görünümü ekte verilmiştir. (Bkz. EK 21) Elde edilen sonuçlar Çizelge 3.18.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.18. Adyabatik alev sıcaklığında ürünlerin özgül entalpileri

Girilen Veriler		Elde Edilen Özgül Entalpi Değerleri (kJ/kmol)		
Sıkıştırma oranları	Adyabatik Alev Sıcaklıkları (K)	CO_2	H_2O	N_2
6	1170	52163.00	43075.50	35767.00
10	1255	56960.00	46800.75	38637.50
12	1285	58666.25	48135.75	39658.50
16	1340	61813.00	50612.00	41539.00

b.2. Altblok:

Şekil 3.14.'te verilmiş olan b.2. altblokta ürünlerin özgül entalpileri karışım özgül entalpisine dönüştürülmektedir. Bu amaçla oluşturulan kullanıcı tanımlı fonksiyonda

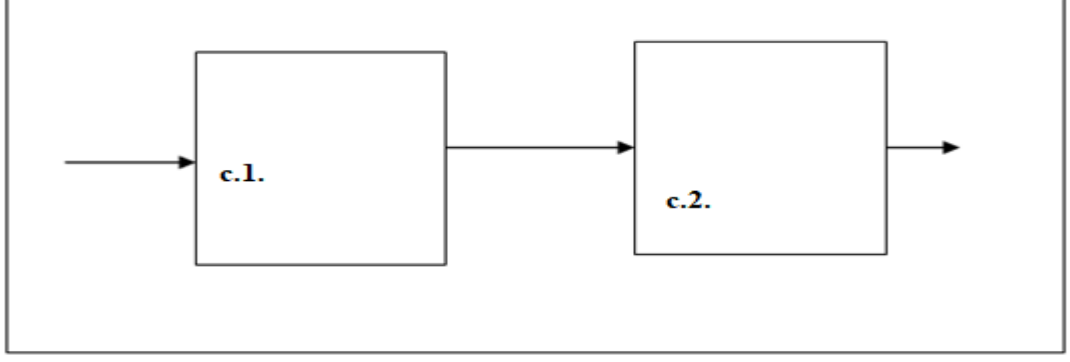
geliştirilen kodların çalıştırılması ile elde edilen değerler Çizelge 3.19.'da verilmiştir. (35) numaralı denkleme uygun kodlamalar yapılmıştır. Model ekte verilmiştir. (Bkz. EK 22)

Çizelge 3.19. Adyabatik alev sıcaklığına göre atık gaz karışımının özgül entalpileri

Girilen Değerler		Elde Edilen Değerler
Kompresör Sıkıştırma Oranları	Adyabatik Alev Sıcaklıkları(K)	Ürünlerin Karışım Olarak Özgül Entalpi Değerleri (kJ/kmol)
6	1170	-613158.64
10	1255	-577934.11
12	1285	-565384.02
16	1340	-542227.60

3.6.3. Yanma Odası c. Altblok

Şekil 3.12.'de verilmiş olan c. altblok kendi içerisinde 2 adet altbloktan oluşmakta olup genel şeması Şekil 3.15.'de gösterilmiştir. Blok modeli ekte verilmiştir. (Bkz. EK 23)



Şekil 3.15. Yanma odası c. altbloğun şematik gösterim

c.1. Altblok:

Yanma odasında kararlı akışlı yanma olduğu ve yanmaya giren ve çıkanların mükemmel gaz davranışı yaptıkları kabul edilmiştir. Şekil 3.15.'te gösterilmiş olan c.1. altbloğunda yanma odasına girenlerin (doğalgaz, hava, su buharının karışım olarak) kompresör gerçek çıkış sıcaklıklarına göre ayrı ayrı özgül entalpileri ile karışım olarak toplam özgül entalpileri kullanıcı tanımlı fonksiyon bloğuna girilen kodların çalıştırılması ile hesaplanmıştır. (36) numaralı denkleme uygun kodlamalar yazılmıştır. Model ekte verilmiştir. (Bkz. EK 24). Elde edilen sonuçlar Çizelge 3.20.'de verilmiştir.

Formüllerde kullanılan mol katsayıları stokiometrik yanma denklemine göre yapılan modelin çalıştırılması ile elde edilen katsayılar olup Çizelge 3.8.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.20. Reaktanların karışım olarak özgül entalpileri

Girilen Değerler		Elde Edilen Özgül Entalpi Değerleri (kJ)			
Kompresör Sıkıştırma Oranları	Kompresör Gerçek Çıkışı Sıcaklığı (K)	Doğalgaz	Hava	Su buharı	Girenlerin Toplam Özgül Enerjisi
6	551,8	-67930,42	73322,84	-25729.03	-20336.62
10	649,3	-59258,18	102380,74	-25338.39	17784.16
12	687,5	-55603,53	113963,45	-25181.74	33178.18
16	752,0	-49156,77	133677,23	-24913.64	59606.82

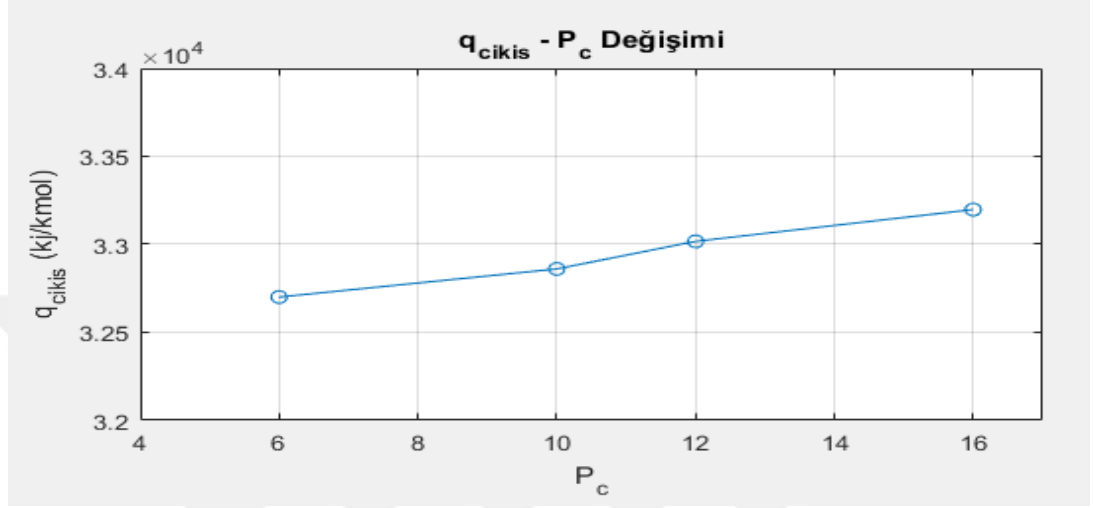
c.2. Altblok:

Bu altblok ile c.1. altbloktan hesaplanmış olan girenlerin toplam özgül enerjilerinden b.2. altbloкта hesaplanmış olan ürünlerin toplam özgül enerjileri çıkarılarak yanma odasından transfer edilen özgül ısı enerjisi molar olarak bulunduktan sonra doğalgaz karışımının molekül kütlesine bölünerek kütleli olarak hesaplanmıştır. Doğalgaz karışımının molekül kütlesi Çizelge 3.8.'de verilmiştir. Kodlar (34) numaralı denkleme uygun yazılmıştır. Model ekte gösterilmiştir. (Bkz. EK 25) Altbloğun çalıştırılması ile elde edilen sonuçlar Çizelge 3.21.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.21. Yanma odasından transfer edilen özgül ısı enerjisi miktarları

Girilen Değerler		Elde Edilen Değerler (kJ)		
Kompresör Sıkıştırma Oranları	Reaktanların Toplam Özgül Enerjisi	Ürünlerin Toplam Özgül Enerjisi	Yanma Odasından Transfer Edilen Özgül Isı Enerjisi	
			kJ/kmol	kJ/kg
6	-20336.62	-613158.64	592822.02	32700.57
10	17784.16	-577934.11	595718.27	32860.33
12	33178.18	-565384.02	598562.20	33017.20
16	59606.82	-542227.60	601834.43	33197.70

Yanma odasından (yanma odası c.2. altblok) transfer edilen özgül ısı enerjisinin sıkıştırma oranına göre değişimi Şekil 3.16.'da verilmiştir.



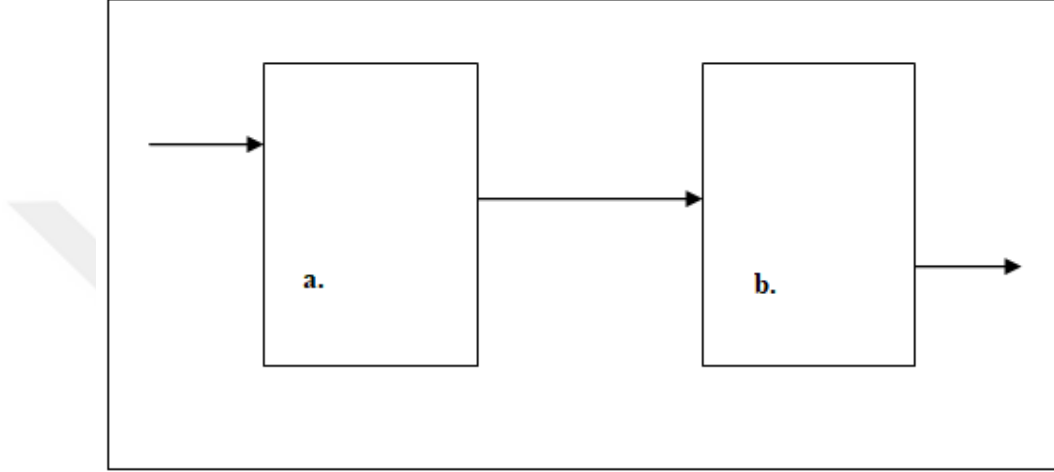
Şekil 3.16. Yanma odasından transfer edilen özgül ısı enerjisinin sıkıştırma oranına göre değişimi

Entalpinin sıcaklığın bir fonksiyonu olması ve sıcaklığın basınçla doğru orantılı artmasından dolayı sıkıştırma oranı arttıkça yanma odasından transfer edilen özgül ısı enerjisi miktarı da artmıştır.

Ayrıca, doğalgazın bileşenlerinden CO_2 ile N_2 'nin hidrokarbon olmamasından dolayı yanma sonucu elde edilen özgül ısı enerjisi bir miktar düşük çıkmıştır. Doğalgaz bünyesinde CO_2 ile N_2 yerine ısı değeri yüksek hidrokarbon bileşeni gazların bulunması durumunda yanma sonucunda elde edilecek özgül ısı enerjisi miktarı bir miktar daha yüksek olacaktır.

3.7. Gaz Türbin Bloğu

Bu blok ürünlerin izantropik koşullarda genişlediği bloktur. Blok modeli ekte verilmiştir. (Bkz. EK 26). Şekil 3.17.'de temsili şemada gösterildiği gibi iki ana altbloktan oluşturulmuş olup bu bloklarda sırasıyla şu işlemler yapılmıştır:



Şekil 3.17. Gaz türbin altbloğu şematik gösterimi

- Şekil 3.17. a. altbloкта türbin teorik çıkış sıcaklığı hesaplanmıştır .
- Şekil 3.17. b. altbloкта ürünlerin adyabatik alev sıcaklığında özgül entalpileri, türbin teorik ve gerçek çıkış sıcaklıklarında ürünlerin özgül entalpileri, türbin gerçek işi ve türbin verimi belirlenmiştir.

3.7.1. Gaz Türbin a. Altblok

Şekil 3.17.'de gösterilen a. altbloкта izantropik koşullarda türbin teorik çıkış sıcaklığı modellenerek hesaplanmıştır. Model ekte verilmiştir. (Bkz. EK 27). Ürünlerin mükemmel gaz davranışı yaptıkları kabul edilmiştir. Ürünlerin adyabatik üs katsayısı

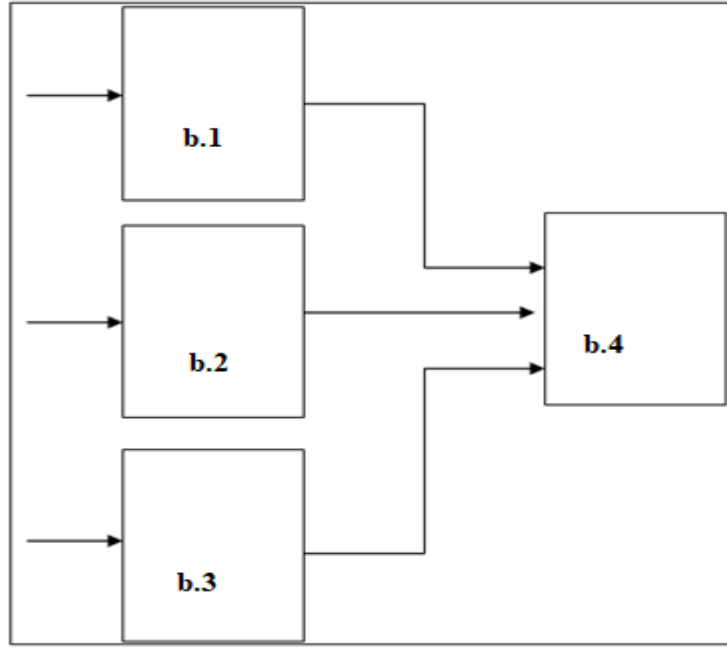
k_m : 1,33 olarak literatürden alınmıştır. (38) numaralı denklem modellenmiştir. Modelin çalıştırılması ile elde edilen değerler Çizelge 3.22.'de verilmiştir.

Çizelge 3.22. Gaz türbin çıkışı teorik sıcaklıkları

Girilen Değerler		Elde Edilen Değerler
Kompresör Sıkıştırma Oranları	Adyabatik Alev Sıcaklıkları (K)	Gaz Türbin Çıkışı Teorik Sıcaklığı (K)
6	1170	750.1
10	1255	708.8
12	1285	693.6
16	1340	673.5

3.7.2. Gaz Türbin b. Altblok

Şekil 3.17.'de gösterilen b. altblok kendi içerisinde 4 adet altbloktan oluşturulmuş olup genel şeması Şekil 3.18.'de verilmiştir. Blok modeli ekte verilmiştir. (Bkz. EK 28). Çizelde 3.3.'den alınan türbin gerçek çıkış sıcaklıkları bu altbloğa dışardan veri olarak girilmiştir.



Şekil 3.18. Gaz türbin b. altblok şematik gösterimi

b.1. Altblok:

Şekil 3.18.'de gösterilen b.1. altblok ile ürünlerin (türbin girişinde) adyabatik alev sıcaklığında özgül entalpilerini belirlemek için önce termodinamik tablolarından alınan veriler excelde tablo haline getirilmiş, sonra Matlab ortamına aktarılarak T_yanma.mat, h₃CO₂_yanma.mat, h₃H₂O_yanma.mat ve h₃N₂_yanma.mat isimleri ile kaydedilmiş, sonra oluşturulan interpolasyon modeline bağlanmış ve adyabatik alev sıcaklıklarına göre ürün gazlarının özgül entalpi değerleri belirlenmiştir. Buradaki .mat veri dosyaları 51x1 boyutlu olup 20 K aralıklarla 1000 K ile 2000 K arası sıcaklık değerleri ve bu sıcaklıklara karşılık gelen ürün gazlarının özgül entalpi değerlerini kapsamaktadır. Ardından, kullanıcı tanımlı fonksiyon bloğuna bu veriler girilerek gaz türbin girişinde ürünlerin karışım olarak toplam özgül entalpileri hesaplanmıştır. Modelin görünümü ekte verilmiştir. (Bkz. EK 29)

Ürünlerin mol oranları, her bir ürünün mol sayısının (n_i) stokiometrik yanma denkleminde elde edilen ürünlerin toplam mol sayısına (n_m) oranlanması ile elde edilmiştir. Stokiometrik yanma denklemindeki ürün mol katsayıları Çizelge 3.8.'de verilmiştir. Ürünlerin karışım halindeki özgül entalpisi (43) numaralı denkleme göre kodlanarak hesaplanmıştır.

Modelin çalıştırılması ile ürünlerin adyabatik alev sıcaklığındaki özgül entalpileri ve karışım olarak atık gazın özgül entalpileri belirlenerek Çizelge 3.23.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.23. Ürünlerin ayrı ayrı ve karışım olarak türbin girişinde özgül entalpileri

Girilen Değerler		Elde Edilen Özgül Entalpi Değerleri (kJ/kmol)			
Kompresör Sıkıştırma Oranları	Adyabatik Alev Sıcaklıkları (K)	Ürünler olarak			Karışım olarak
		CO ₂	H ₂ O	N ₂	
6	1170	52163.00	43075.50	35767.00	38805.73
10	1255	56960.00	46800.75	38637.50	42032.50
12	1285	58666.25	48135.75	39658.50	43182.16
16	1340	61813.00	50612.00	41539.00	45303.43

b.2. Altblok:

Şekil 3.18.'de gösterilen b.2. altblok kapsamında ürünlerin ayrı ayrı ve karışım olarak türbin gerçek çıkış sıcaklığında özgül entalpilerini hesaplanmıştır.

Önce, ürünlerin türbin gerçek çıkış sıcaklığında özgül entalpilerini bulmak için önce termodinamik tablolarından alınan veriler excelde tablo haline getirilmiş, sonra Matlab ortamına aktararak T_H₂O.mat, h_CO₂.mat, h_H₂O.mat ve h_N₂.mat isimleri ile kaydedilmiş, sonra oluşturulan interpolasyon modeline bu veri dosyaları

bağlanmış ve türbin gerçek çıkış sıcaklıklarına göre ürün gazlarının özgül entalpi değerleri belirlenmiştir. Burdaki .mat veri dosyaları 80x1 boyutlu olup 10 K aralıklarla 220 K ile 1000 K arası sıcaklık değerleri ve bu sıcaklıklara karşılık gelen ürün gazlarının özgül entalpi değerlerini kapsamaktadır. Modelin görünümü ekte verilmiştir. (Bkz. EK 30.a) . Ardından, kullanıcı tanımlı fonksiyon bloğuna bu veriler (ürün gazlarının özgül entalpi değerleri) girilerek gaz türbin gerçek çıkış sıcaklığında ürünlerin karışım olarak toplam özgül entalpileri hesaplanmıştır. Modelin görünümü ekte verilmiştir. (Bkz. EK 30.b)

Ürünlerin mol oranları, her bir ürünün mol sayısının (n_i), stokiometrik yanma denkleminde elde edilen ürünlerin toplam mol sayısına (n_m) oranlanması ile elde edilmiştir. Stokiometrik yanma denklemi ürün mol katsayıları Çizelge 3.8.'de verilmiştir.

Ürünlerin karışım halindeki özgül entalpisi (43) numaralı denkleme göre kodlanarak hesaplanmıştır.

Modelin çalıştırılması ile ürünlerin türbin gerçek çıkış sıcaklığındaki özgül entalpileri ve atık gazın karışım olarak özgül entalpileri belirlenerek Çizelge 3.24.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.24. Türbin çıkışı gerçek sıcaklığına göre ürünlerin ayrı ayrı ve karışım halinde özgül entalpileri

Girilen Değerler		Elde Edilen Özgül Entalpi Değerleri (kJ/kmol)			
Kompresör Sıkıştırma Oranları	Gaz türbin çıkışı gerçek sıcaklıkları (K)	Ürünler olarak			Karışım olarak
		CO ₂	H ₂ O	N ₂	
6	814.11	32906.90	28443.47	24156.46	25853.29
10	795.77	31961.58	27732.72	23580.33	25214.55
12	788.93	31610.32	27468.81	23364.51	24976.01
16	782.74	31294.01	27230.49	23170.76	24761.51

b.3. Altblok:

Şekil 3.18.'de gösterilen b.3. altblok kapsamında ürünlerin ayrı ayrı ve karışım olarak türbin teorik çıkış sıcaklığındaki özgül entalpilerini belirlenmiştir. Ürünlerin türbin teorik çıkış sıcaklığında özgül entalpilerini bulmak için önce termodinamik tablolarından alınan veriler excelde tablo haline getirilmiş, sonra Matlab ortamına aktarılarak $T_{H_2O}.mat$, $h_{CO_2}.mat$, $h_{H_2O}.mat$ ve $h_{N_2}.mat$ isimleri ile kaydedilmiş, sonra oluşturulan interpolasyon modeline bağlanmış ve türbin gerçek çıkış sıcaklıklarına göre ürün gazlarının özgül entalpi değerleri belirlenmiştir. Burdaki .mat veri dosyaları 80x1 boyutlu olup 10 K aralıklarla 220 K ile 1000 K arası sıcaklık değerleri ve bu sıcaklıklara karşılık gelen ürün gazlarının özgül entalpi değerlerini kapsamaktadır. Modelin görünümü ekte verilmiştir. (Bkz. EK 31)

Ürünlerin mol oranları, her bir ürünün mol sayısının (n_i) stokiometrik yanma denkleminde elde edilen ürünlerin toplam mol sayısına (n_m) oranlanması ile elde edilmiştir. Stokiometrik yanma denklemi ürün mol katsayıları Çizelge 3.8.'de verilmiştir.

Ürünlerin karışım halindeki özgül entalpisi (43) numaralı denkleme göre kodlanarak hesaplanmıştır.

Modelin çalıştırılması ile ürünlerin türbin çıkışı teorik sıcaklığındaki özgül entalpileri ve karışım olarak atık gazın özgül entalpileri belirlenerek Çizelge 3.25.'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.25. Türbin çıkışı teorik sıcaklığına göre ürünlerin ayrı ayrı ve karışım halinde özgül entalpileri

Girilen Değerler		Elde Edilen Özgül Entalpi Değerleri (kJ/kmol)			
		Ürünler ayrı olarak			Karışım olarak
Kompresör Sıkıştırma Oranları	Gaz türbin çıkışı teorik sıcaklıkları (K)	CO ₂	H ₂ O	N ₂	
6	750.1	29633.32	25980.26	22151.66	23634.15
10	708.8	27562.34	24418.86	20875.03	22223.76
12	693.6	26810.99	23850.27	20408.86	21709.54
16	673.5	25819.54	23100.23	19792.13	21029.91

b.4. Altblok:

Şekil 3.18.'de gösterilen b.4. altbloğu kapsamında hazırlanan model ile gaz türbininin teorik ve gerçek özgül iş miktarları ile verimi hesaplanmıştır. (48), (49) ve (50) numaralı denklemlere göre modelleme yapılmıştır. Modelin görünümü ekte verilmiştir. (Bkz. EK 32) Modelin çalıştırılması ile elde edilen sonuçlar Çizelge 3.26.'da verilmiştir.

Çizelge 3.26. Gaz türbininin teorik ve gerçek özgül işinin sıkıştırma oranlarına göre değişimi

Girilen Değerler	Elde Edilen Değerler		
	Türbin Özgül İşleri (kJ/kmol)		Verim (%)
	Teorik	Gerçek	
6	15171.58	12952.44	85,37
10	19808.74	16817.95	84,90
12	21472.63	18206.15	84,79
16	24273.52	20541.92	84,63

3.8. Model Simülasyon Sonuçlarının Literatürle Karşılaştırılması

Kompresör:

Kompresör çıkışında; kompresör a.4. altblokta elde ettiğimiz simülasyon değerleri ile literatürde verilen sonuçların aynı değerler olduğu Çizelge 3.27.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.27. Kompresör çıkışında elde edilen değerlerin karşılaştırılması

Sıkıştırma oranları	T ₂ (°K)		η _c (%)	
	Simülasyon değerleri	Literatür değerleri	Simülasyon değerleri	Literatür değerleri
6	502.97	502.47	79.92	80.00
10	582.01	581.43	80.15	
12	613.13	612.52	80.15	
16	665.66	664.99	80.14	

Kompresörde mükemmel gaz davranışı yaptığı kabul edilen havanın tersinir izantropik koşullarda sıkıştırılması ile havanın özgül hacmi azalırken yoğunluğu artar. Buna paralel olarak havanın iç enerjisindeki artış nedeniyle sıcaklığı da yükselir. Bu sıcaklığa paralel olarak havanın entalpisi de artar. Bu nedenle sıkıştırma oranı arttıkça kompresörde teorik çıkış sıcaklığının arttığı görülmektedir.

Kompresörlerde gerçek çalışma koşullarda sürtünme ve tersinmezlikler söz konusudur. Bu nedenle kompresör gerçek çıkış sıcaklık değeri teorik çıkış sıcaklık değerinden bir miktar fazla olacağından kompresörde verim söz konusu olacaktır. Artan sıkıştırma oranlarına paralel olarak teorik ve gerçek çıkış sıcaklık değerlerinin ve entalpi değerlerinin de artması nedeniyle kompresör veriminin sabit kaldığı görülmektedir. Sonuç literatürdeki sonuç değerleri ile iyi uyumludur.

Türbin:

Gaz türbin a. altblok modelinin simülasyonu ile elde edilen türbin teorik çıkış sıcaklıkları ve literatürdeki türbin teorik çıkış sıcaklıkları Çizelge 3.28.'de karşılaştırılmış olup değerler arasındaki farklılık yaklaşık 0.00155 mertebelerinde olup değerler birbirine yakın elde edilmiştir.

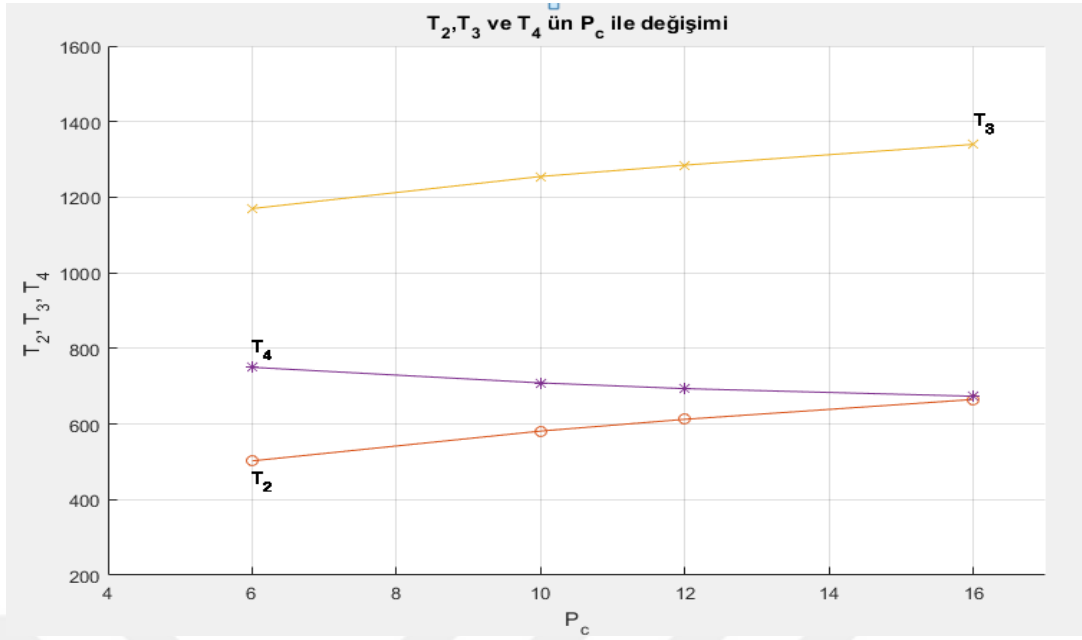
Çizelge 3.28. Türbin çıkışı teorik sıcaklıklarının karşılaştırılması

Kompresör Sıkıştırma Oranları	Makaleden Verilen Türbin Teorik Çıkışı Sıcaklıkları (K)	Modelden Elde Edilen Türbin Teorik Çıkış Sıcaklıkları (K)	Hata (%)
6	748.93	750.1	0.155
10	707.39	708.8	0.198
12	692.16	693.6	0.208
16	671.89	673.5	0.239

Ayrıca, b.4. altbloğun simülasyonu sonucu Çizelge 3.26.'da gösterilen türbin verim değerleri ile literatürde türbin verimi olarak 0,83 verildiği dikkate alındığında türbin verimlerinin birbirine çok yakın değerler olduğu görülmüştür.

Diğer Parametreler :

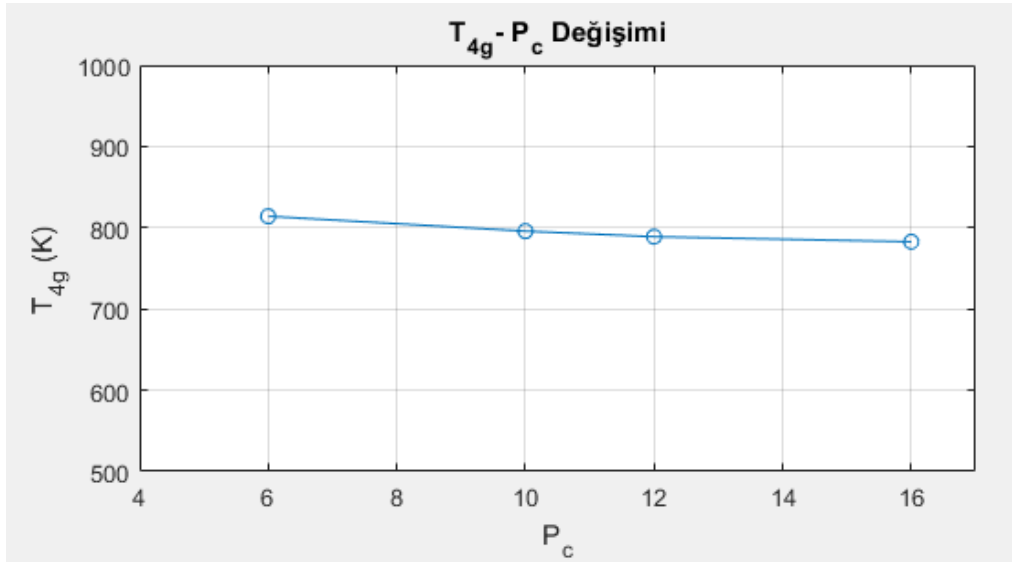
Türbin teorik çıkış sıcaklığı belirlendikten sonra kompresör teorik çıkış sıcaklığı, ve adyabatik alev sıcaklığının sıkıştırma oranlarına göre değişimini veren grafik modelin kompresör a.4. altblok kapsamında kodlanmıştır. Bu altbloğun çalıştırılması ile anılan sıcaklıkların sıkıştırma oranlarına göre değişimi Şekil 3.19.'da verilmiştir.



Şekil 3.19. Kompresör teorik çıkış sıcaklığı, yanma odası çıkış sıcaklığının ve gaz türbin teorik çıkış sıcaklığının sıkıştırma oranlarına göre değişimi

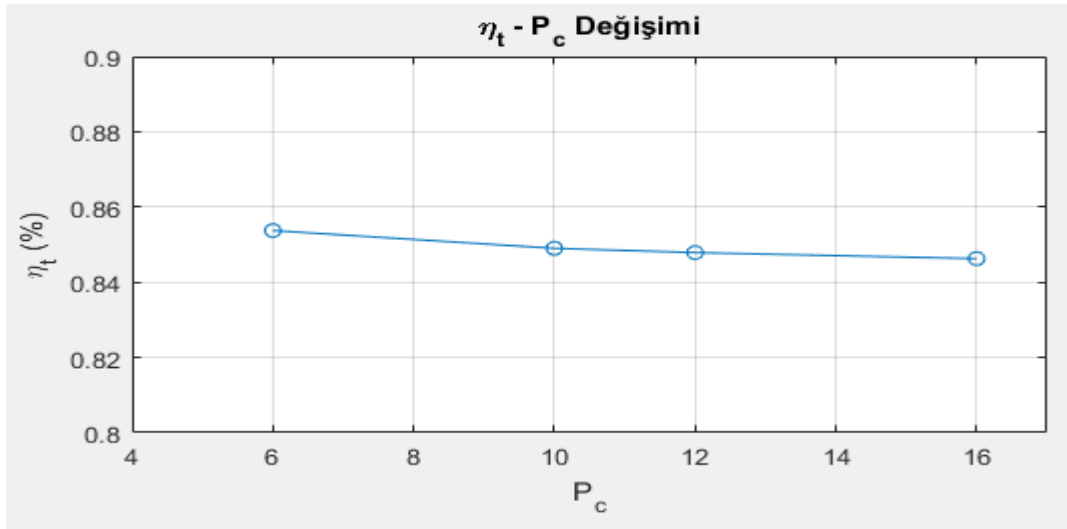
Şekil 3.19.'da gösterdiği gibi sıkıştırma oranı arttıkça kompresör teorik çıkış sıcaklığı (T_2) ve yanma odası çıkış sıcaklığı (T_3) artmış, gaz türbin teorik çıkış sıcaklığı sıkıştırma oranının tersi ile orantılı olması nedeniyle (T_4) azalmıştır. Yine bu grafik literatürde elde edilen sonuçlarla uyumluluk sağlamıştır.

Türbin gerçek çıkış sıcaklığının sıkıştırma oranına göre değişimi Şekil 3.20.'de gösterilmiştir. Türbin çıkışı gerçek sıcaklığının sıkıştırma oranına göre çok az değiştiği, artan sıkıştırma oranına göre türbin gerçek çıkış sıcaklığının azalma eğilimi gösterdiği ve literatürde verilen sonuçlara yakın olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.20. Türbin çıkışı gerçek sıcaklığının sıkıştırma oranına göre değişimi

Kompresör a.4. altblok kapsamında kullanıcı tanımlı fonksiyon bloğuna girilen kodlar yardımıyla türbin gerçek çıkış sıcaklığının sıkıştırma oranına göre değişimi elde edilmiş ve Şekil 3.21.'de verilmiştir.



Şekil 3.21. Türbin veriminin sıkıştırma oranına göre değişimi

Şekil 3.21.'de gösterildiği üzere, türbin veriminde çok az miktarda azalma oluşmuştur. Bunun en önemli nedeni artan sıkıştırma oranlarına paralel olarak türbin gerçek çıkış sıcaklığının teorik çıkış sıcaklığından fazla olması ve bunun neticesinde de ürünlerin gerçek koşullardaki özgül entalpilerinin, teorik koşullara nazaran fazla olmasıdır. Entalpi sıcaklığın bir fonksiyonudur. Türbin gerçek çıkış sıcaklığında elde edilen özgül iş miktarı, teorik çıkış sıcaklığında elde edilen özgül iş miktarından az olmuştur. Ürünlerin türbin girişindeki özgül entalpileri sabit olup (50) numaralı denklem doğrultusunda gerçek ve teorik özgül iş miktarları oranlandığında türbin veriminin azalacağı görülmektedir. Yapılan modelin simülasyonu ile elde edilmiş sonuç literatürdeki sonuç değerleri ile iyi uyumludur.



4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, bir gaz türbininin enerji analizi Matlab/Simulink ile modellenerek simüle edilmiş, türbin bileşenlerinin parametre ve performans analizleri yapılmış ve elde edilen değerler literatür çalışmasının sonuçları ile mukayese edilmiş ve literatürde verilen sonuç değerleri ile iyi uyum gösterdiği görülmüştür.

Sıkıştırma oranı arttıkça kompresör ve türbin verim değerlerinde bariz bir artış olmadığı görülmüştür. Ayrıca adyabatik alev sıcaklığının artması ve türbin kanatlarının ısıl dayanım limitlerinin olması nedeniyle zorluklar ortaya çıkacağı düşünülmektedir. Dolayısıyla burda göz önüne alınmış olan dört farklı sıkıştırma oranından yanma odasında elde edilen sıcaklığın türbin kanatlarının ısıl mukavemet limitine uygun olması nedeniyle en uygun sıkıştırma oranının 10 olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmada literatürden farklı olarak, model ile kompresörün dört farklı sıkıştırma oranında, doğalgazın dört farklı bileşenden meydana geldiği kabulü ile bir kmol doğalgazın %27 nemli hava ile stokiometrik yanması durumunda yanma odasından transfer edilen özgül ısı enerjisi miktarları hesaplanmış, çevrimin P-V diyagramları çizdirilmiştir.

Gaz türbin sistemlerinde verimi yüksek tutmak için diğer parametreler sabit tutulmak kaydı ile kompresör ve türbinde tersinmezliklerin azaltılması, yanma odasına sevk edilen doğalgazın ısıl değerleri yüksek bileşenlerden oluşturulması ile yanma odasında yüksek sıcaklıklara ulaşmak mümkündür. Bu yüksek sıcaklıklarda ısıl mukavemet limiti yüksek türbin kanatlarına ihtiyaç ortaya çıkmaktadır. Bunun için türbin kanatlarının ya ısıl mukavemeti yüksek malzemeden yapılması ya da soğutmalı kanat üretilmesi önerilmektedir.

Modelin simülasyonu ile elde edilen kompresör ve gaz türbini teorik çıkış sıcaklıkları ile kompresör ve türbin verim değerleri, literatürde elde edilen sonuçlara çok yakın olduğu görüldüğünden, hazırlanan bu model, Brayton çevrimli gaz türbin bileşenlerinin enerji analizlerinde hızlı ve doğru sonuçlar elde etmede, hangi giriş değerrinin değişiminde ne tür değişikliklerin ortaya çıkacağı ile ilgili hızlı ve doğru kestirimler yapmanın mümkün olduğu duyarlılık analizlerinde kullanılabilecektir. Böylece, yanmaya giren doğalgazın bileşenlerinin ısı değerleri ile hava ve nem miktarlarının takibi ve yanmadan elde edilen ürünlerin analizinin yapılması ile türbin kanatlarının ısı mukavemetine sıkıntı doğurmasını engelleme imkanı sağlanabilir. Farklı gaz bileşenleri, nem oranları, yakıtın ve havanın farklı sıcaklıklarda proseste işletme koşullarına etkilerine önceden müdahale imkanı elde edilmiş olur.

Yapılan bu modele ara yüz eklenerek doğalgazın farklı olası tüm bileşenlerini kapsayacak şekilde ek bileşenler dahil edildiğinde tüm farklı bileşenli doğalgaz kullanımlarında enerji, ekserji ve emisyon analizleri yapılabilir.

Modele ek modeller eklenerek değişen hava sıcaklığının, nem oranının etkileri incelenebilir. Ayrıca modelin ucu açık olmasından dolayı, kumanda modeli ilave edilerek ve çevrim noktalarındaki basınç ve diğer işletme verileri temin edilerek dinamik modelleme ile I. ve II yasa analizleri ile açık türbin proseslerinin gerçek zamanlı testleri yapılabilir. Ayrıca farklı işletme koşullarında (nem oranının değişimi, atmosfer basınç ve sıcaklığının değişimi, gaz bileşenlerinin mol oranlarının değişim gibi) kısa zamanda ve gerçek koşullara uygun enerji ve ekserji analizleri yapılabilir. Böylece gaz türbin santrallerinin sistem verimlerini yükseltici tedbirlerin iyileştirilmesi yapılarak varsa proses dizaynındaki sorunlar tespit edilebilir.

Günümüzde endüstride bilgi güç ile eş anlamlıdır. Piyasadaki firmaların pazar paylarını ellerinde tutabilmelerinin en önemli yollarından birisi sürekli yeni bilgiler üretmek ve bu bilgiler doğrultusunda yeni model ürünleri piyasaya sürebilmektir. Bu modelleme ile mevcut bir gaz türbin proses bileşeninin kapasite değişimi gündeme geldiğinde hızlı ve düşük maliyetli analizler yapılarak prosesin ya da bileşenin

duyarlılık analizleri yapılabilecektir. Prosesle entegre modeller ile prosesin işletme veri kayıtları tutularak istatistik çalışmalarında kullanılabilir.

Model, karmaşık ve uzun hesaplama gerektiren termodinamik proseslerin eğitim ve öğretiminde, proseslerin işletme koşullarına kısa sürede hakim olabilmek amacıyla işletmelerde çalışan teknik personelin eğitilmesinde kullanılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] Hoque, M. J., Exergetic and Power Augmentation Analyses of Gas Turbine with Air Bottoming Combined Cycle, Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, Bangladesh University of Engineering and Technology, 2016.
- [2] Chapman, J. W., Lavelle, T. M., Litt, J. S., Practical Techniques for Modeling Gas Turbine Engine Performance, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [3] Kolassa, C., Rendel, H., Rumpe, B., Evaluation of Variability Concepts for Simulink in the Automotive Domain, Proceedings of 48th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Kauai-Hawaii- USA,, pp 5373-5382, 2015.
- [4] Ahmed, A. M., Tariq, M., Thermal Analysis of a Gas Turbine Power Plant to Improve Performance Efficiency, International Journey of Mechanical Engineering and Technology, 4, 6, 43-54, 2013.
- [5] Rahman, M. M., Ibrahim, T.K., Abdalla A.N., Thermodynamic Performance Analysis of Gas-Turbine Power-Plant, International Journal of the Physical Sciences, 6, 14, 3539-3550, 2011.
- [6] Rai, J.N., Hasan, N., Arora, B.B., Garai, R., Kapoor, R., Performance Analysis of CCGT Power Plant using MATLAB/Simulink Based Simulation, International Journal of Adcevement in Research and Technology, 2, 5, 285-290, 2013.

- [7] Tiwari, A. K., Hasan, M. M., İslam, M., Effect of Ambient Temperature on the Performance of a Combined Cycle Power Plant, Transactions of the Canadian Society for Mec. Eng., 37,4, 1177-1188, 2013.
- [8] Kıyan, M., E. Bingol, Melikoglu, M., Albostan A., Modelling and simulation of a hybrid solar heating system for greenhouse applications using Matlab/Simulink, Energy Conversation and Management, 72, 147-155, 2013.
- [9] Fallah, M., Siyahi, H., Ghiasi, A. R., Mahmoudi, S.M.S., Yari, M., Rosen, M.A., Comparison of different gas turbine cycles and advanced exergy analysis of the most effective, Energy, 116, 701-715, 2016.
- [10] Ibrahim, T. K., Rahman, M. M., Effect of Compression Ratio on Performance of Combined Cycle Gas Turbine, International Journal of Engineering, 2, 1, 9-14, 2012.
- [11] Kiriş, M., Gaz Türbini Çevriminin Teorik ve Deneysel Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi, 2016.
- [12] Ong'iro, A. O., Ugursal, V. I., Al Taweel, A. M., Simulation of Combined Cycle Power Plants Using the Aspen Plus Shell, Heat Recovey Systems and CHP, 15, 2, 105-113, 1995.
- [13] Mohanty, D. K., Venkatesh, V., Performance Analysis of a Combined Cycle gas Turbine Under Varying Operating Conditions, MEIJ, 1, 2, 11-25, August 2014
- [14] Arangi, H. G., Sivaram, P., Haribabu, N., Analysis of Inlet Air Temperature Effect On Gas Turbine Compressor Performance, IRJET, 2, 8, 845-853, 2015.
- [15] Farouk, N., Sheng, L., Hayat, Q., Effect of Ambient Temperature on the Performance of Gas Turbines Power Plant, IJCSI, 10, 1, 439-442, 2013.

- [16] Al-Sood, M. M., Matrawy, K. K., Abdel-Rahim, Y. M., Optimum Operating Parameters of an Irreversible Gas Turbine Cycle, *Journal of Engineering Sciences*, 40, 6, 1695-1714, 2012.
- [17] Ahmadi, P., Dincer, I., Thermodynamic Analysis and Thermoeconomic Optimization of a Dual Pressure Combined Cycle Power Plant with a Supplementary Firing Unit, *Energy Conversion and Management*, 52, 2296-2308, 2011.
- [18] Usov, S. V., Kudinov, A. A., Development of the CCP-200 Mathematical Model for Syzran CHPP using the Thermolib Software Package, *Thermal Engineering*, 63, 4, 253-259, 2016.
- [19] Gobran, M.H., Off-Design Performance of Solar Centaur-40 Gas Turbine Engine Using Simulink, *Ain Shams Engineering Journal*, 4, 285-298, 2013.
- [20] Gonzalez-Bustamantea, J.A., Salaa, J.M., Lopez-Gonzales, L.M., Miguez, J.L., Flores, I., Modelling and Dynamic Simulation of Processes with MATLAB, An Application of a Natural Gas Installation in a Power Plant, *Energy*, 32, 1271-1282, 2007.
- [21] Alcalá, E., Martínez, L., Rodríguez, C. J., López, A., Neira, F., Analytical Matlab/Simulink Model of Pyrotechnical Gas Generators for Airbags, *International Journal of Crashworthiness*, 4, 6, 641-657, 2009.
- [22] Shazly, J.H., Hafez, A.Z., El Shenawy, E.T., Eteiba, M.B., Simulation, design and thermal analysis of a solar Stirling engine using MATLAB, *Conversion and Management*, 79, 626-639, 2014.
- [23] Exergy analysis of Garri “2” 180MW combined cycle power plant, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 960-969, 2017.

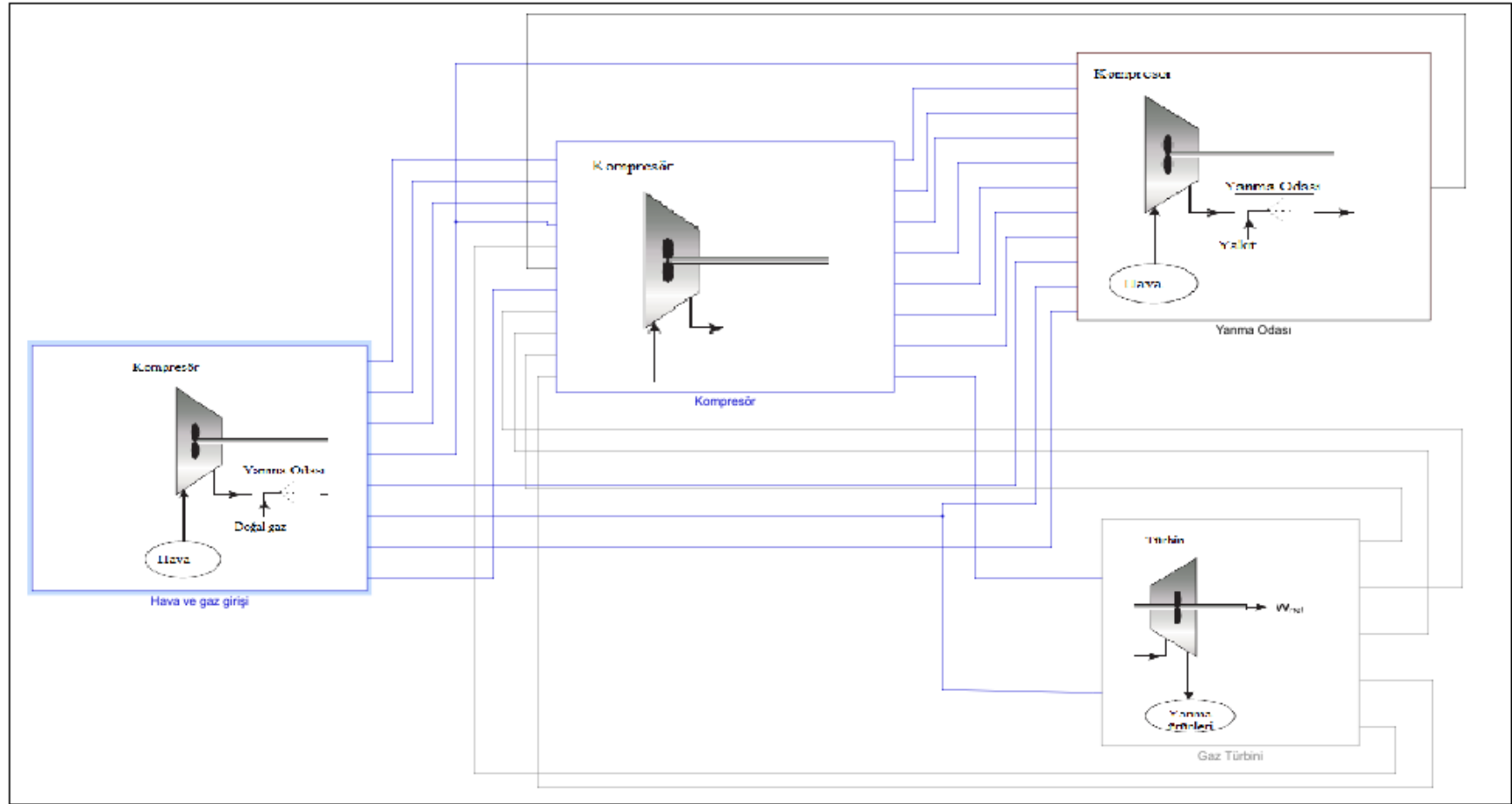
- [24] Lim, S., Park, S., Chung, H., Kim, M., Baik, Y.J., Shin, S., Dynamic Modeling of Building Heat Network System Using Simulink, *Applied Thermal Engineering*, 84, 375-389, 2015.
- [25] Ritschel, T. K. S., Gaspar, J., Jørgensen, J. B., A Thermodynamic Library for Simulation and Optimization of Dynamic Processes, *IFAC Papers Online*, 50-1, 3542-3547, 2017.
- [26] Sousa, J., Paniagua, G., Morata, E. C., Thermodynamic Analysis of a Gas Turbine Engine with a Rotating Detonation Combustor, *Applied Energy*, 195, 247-256 2017.
- [27] Chaibakhsh, A., Amirkhani, S., A simulation model for transient behaviour of heavy-duty gas turbines, *Applied Thermal Engineering*, 132, 115-127, 2018.
- [28] Shu-Ying, L., Tie-lei, L., Zhi-Tao, W., Summarize of Technological Development about Integrated Simulation of Gas Turbine Equipment, *Applied Mechanics and Materials*, 347-357, 3885-3889, 2013.
- [29] Roberts, R. A., Eastbourn, S. M., Modeling Techniques for a Computational Efficient Dynamic Turbofan Engine Model, *International Journal of Aerospace Engineering*, Article ID: 283479, 2014.
- [30] Tao, W.Z., Li, J., Lei, L. T., Ying, L. S., Research on Simulink/Fluent Collaborative Simulation Zooming of Marine Gas Turbine, *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, Article ID: 8324810, 2017
- [31] Roldan, F. A., Sierra, E., Guerrero C. A., Modelado del ciclo Bray ton de una turbina a gas en Colombia mediante ecuaciones de estado y relaciones isentrópicas, *Studiositas*, ISSN: 2215-728x, 2011.

- [32] Çengel, Y.A., Boles, M.A., Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, İzmir Güven Kitabevi, Beşinci Baskı, 52-69, 2008.
- [33] <http://www.yegm.gov.tr/> (Erişim Tarihi:14.05.2018)
- [34] Anonim, Technology roadmap concentrating solar power, IEA, www.iea.org/publications/freepublications/publication/csp_roadmap.pdf (Erişim Tarihi: 11.03.2018)
- [35] Anonim, Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants In partnership with A Project Developer's Guide, www.ifc.org./wps/wcm/connect/f05d3e00498e0841bb6fbbe54d141794/IFC+Solar+Report_Web+08+05.pdf?MOD=AJPERES ((Erişim Tarihi: 12.03.2018)
- [36] Carija, Z., Kranjcevic, L., Banic, V., Cavrak, M., Numerical Analysis of Wells Turbine for Wave Power Conversion, Engineering Review, 32, 3, 141-146, 2012.
- [37] Bulgurcu, H., Yakıt Pilleri, www.deneysan.com/mwg-internal/de5fs23hu73ds/progress?id=VjA1Aflob-dldukdGMmHj97ereLkvNdovnojLGRGkU (Erişim Tarihi 05.05.2018)
- [38] Korobitsyn, M.A., New And Advanced Energy Conversion Technologies Analysis Of Cogeneration, Combined And Integrated Cycles, Doktora Tezi, Twente Üniversitesi, 1998.
- [39] O. Çankaya, Doğalgaz Yanması Üzerine Parametrik Bir Çalışma, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniv, 2009.
- [40] J.B.Jones, R.E.Dugan; Engineering Thermodynamics, 540-572, 1. Baskı, Beta Basım, Kırklareli, 2003.

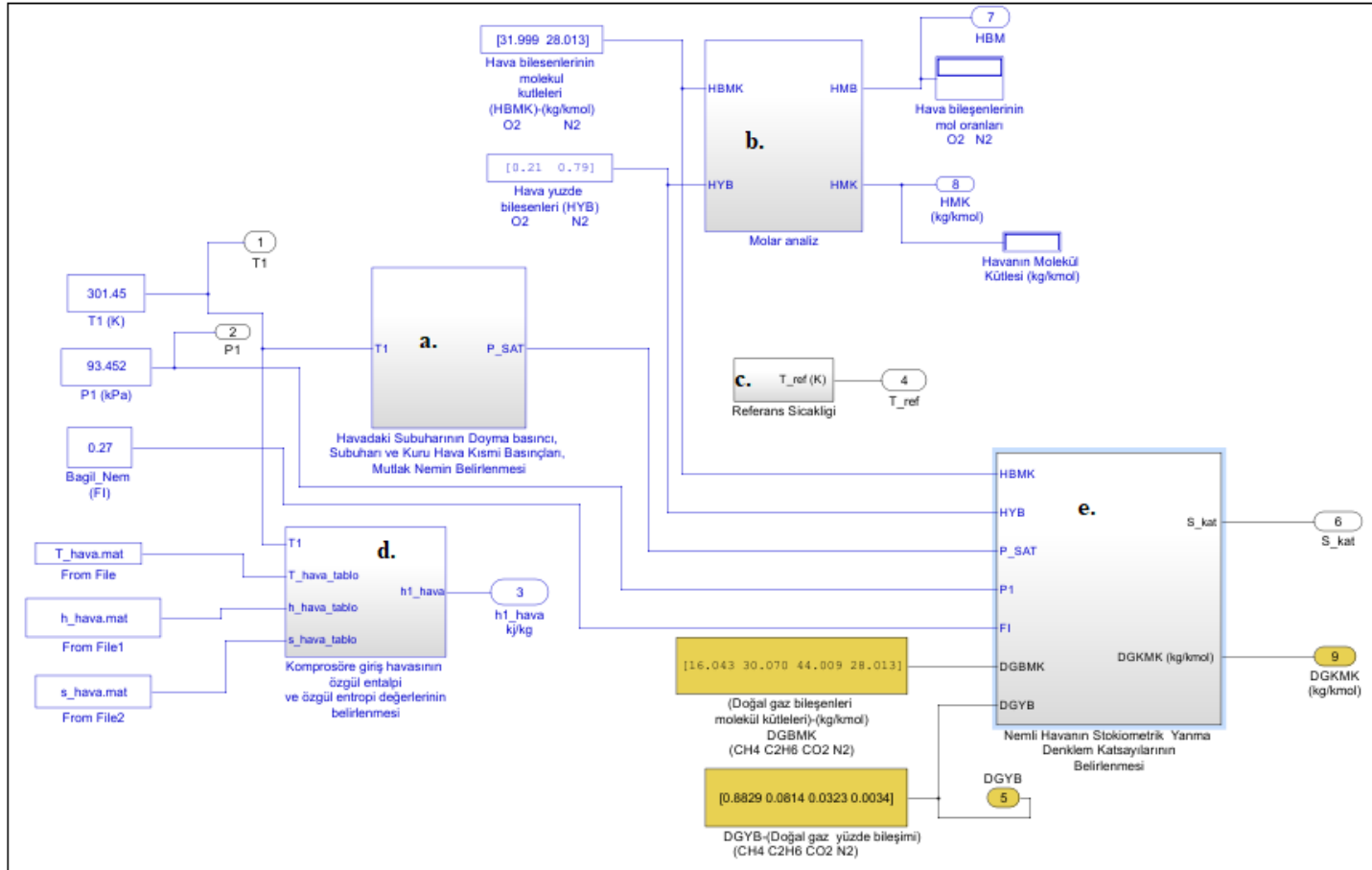
- [41] Koçak, N.N., Pınar,S., Kasapoğlu, C., Pekdoğru, A., Benzetim (Simülasyon) Yöntemi, [www. Coursehero.com/file/27565084/BENZETİMdoc/](http://www.Coursehero.com/file/27565084/BENZETİMdoc/) (Erişim Tarihi: 14.04.2018)
- [42] Öztürk, L., Monte Carlo Simülasyon Metodu ve Bir İşletme Uygulaması, Doğu Anadolu Bölge Araştırmaları, İnönü Üniversitesi, 2004
- [43] Yavuz, S., Sistem Simülasyonu, www.yildiz.edu.tr/~smyavuz/Ssim082/08-1.pdf , (Erişim Tarihi: 15.04.2018)
- [44] Turan, Ö., Orhan, İ., Karakoç, T.H., Yüksek Bypasslı Turbofan Motorlarının Performans Analizleri İle İlgili Bilgisayar Yazılımı Geliştirme, Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1, 1 , 21-40, 2012.
- [45] <http://mathworks.com> (Erişim muhtelif tarihler)
- [46] Yüksel, İ., Matlab ile Mühendislik Sistemlerinin Analizi ve Çözümü, 296-323, IV. Baskı, DORA Basım-Yayın Dağıtım, 2014.
- [47] C.Kubat, Matlab Yapay Zeka ve Mühendislik Uygulamaları, 751-762, I.Baskı, Abaküs Kitap Yayın, 2015.
- [48] G. Manente, Modeling, Simulation and Optimization of Energy Systems Using Matlab/Simulink, www.dalspace.library.dal.ca/bitstream/handle/10222/36255/bregaw-mohamed-masc-ece-august-2013.pdf?sequence=1, (Erişim Tarihi: 03.01.2018)
- [49] Toolbox for the Modeling and Analysis of Thermodynamic Systems Workshop Ohio Aerospace Institute, <https://ntrs.nasa.gov.tr/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20150007892.pdf> (Erişim Tarihi: 10.05.2018)

EKLER

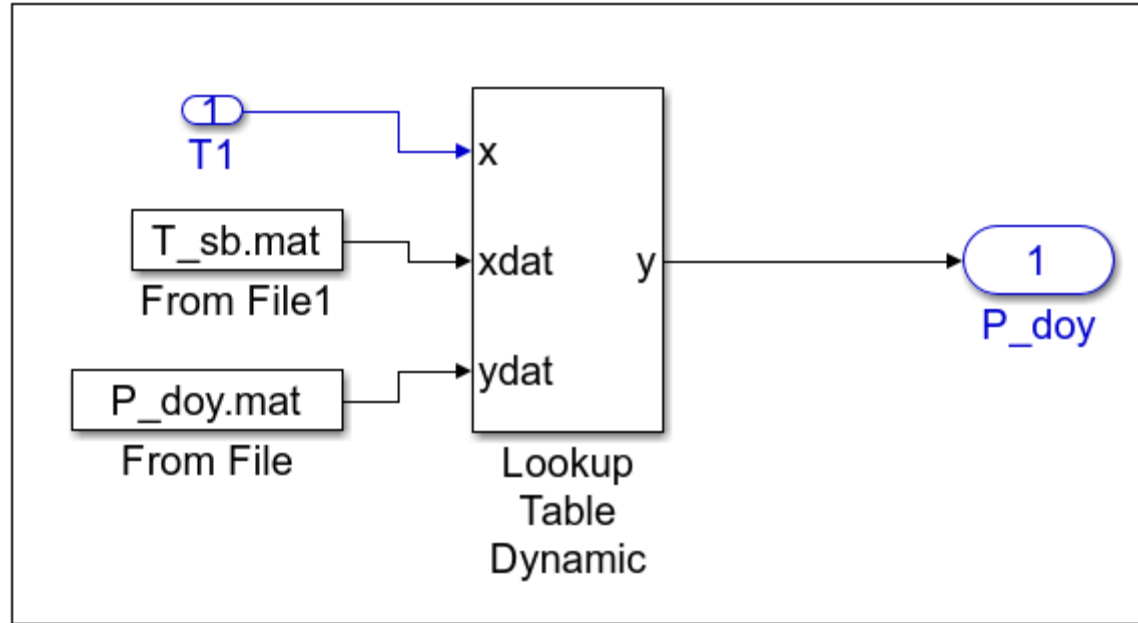




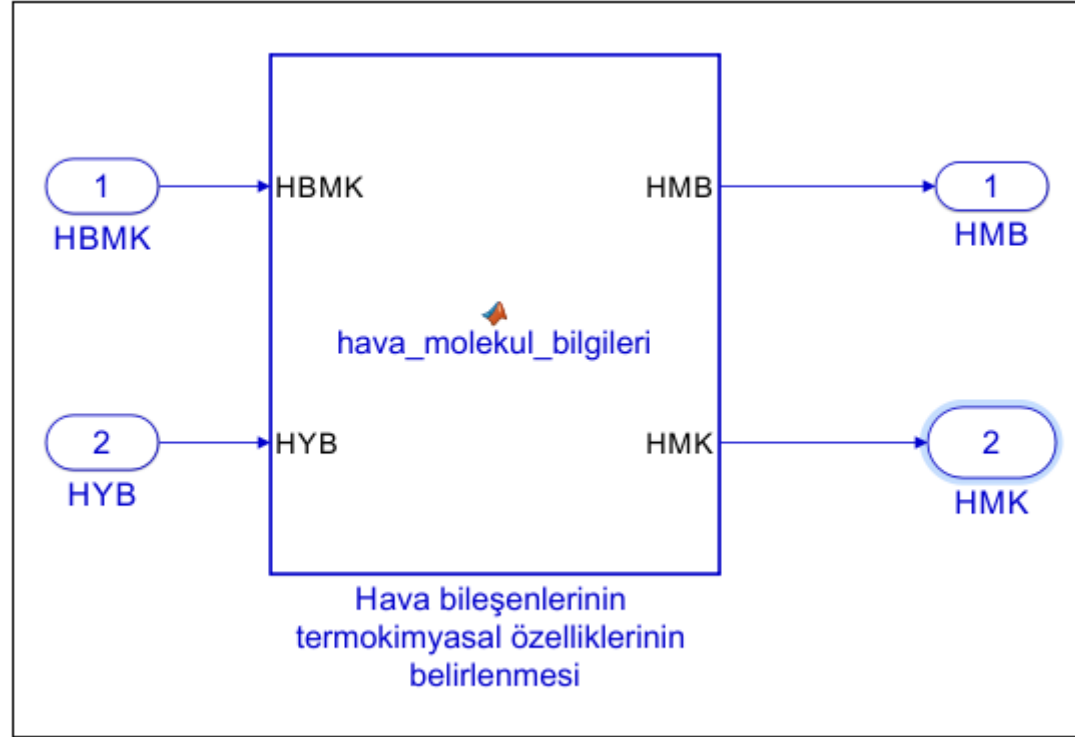
EK 1 : Modelin genel görünümü



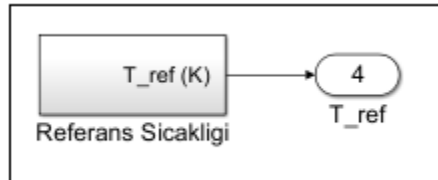
EK 2 : Hava ve gaz girişi blok modeli a., b., c., d.,ve e. olarak belirtilen beş altbloktan oluşur.



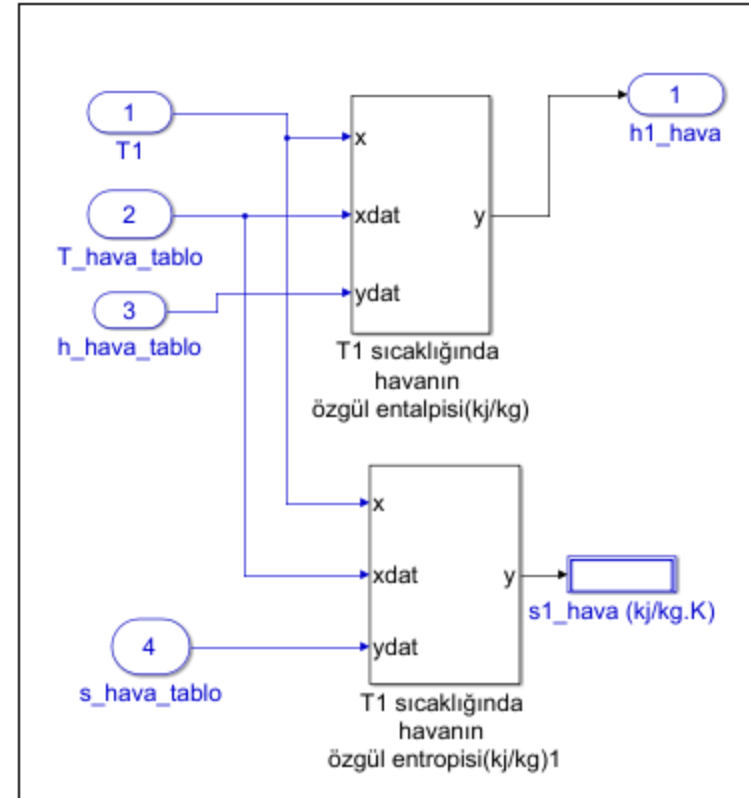
EK 3 : Hava ve gaz girişi a. altblok modeli



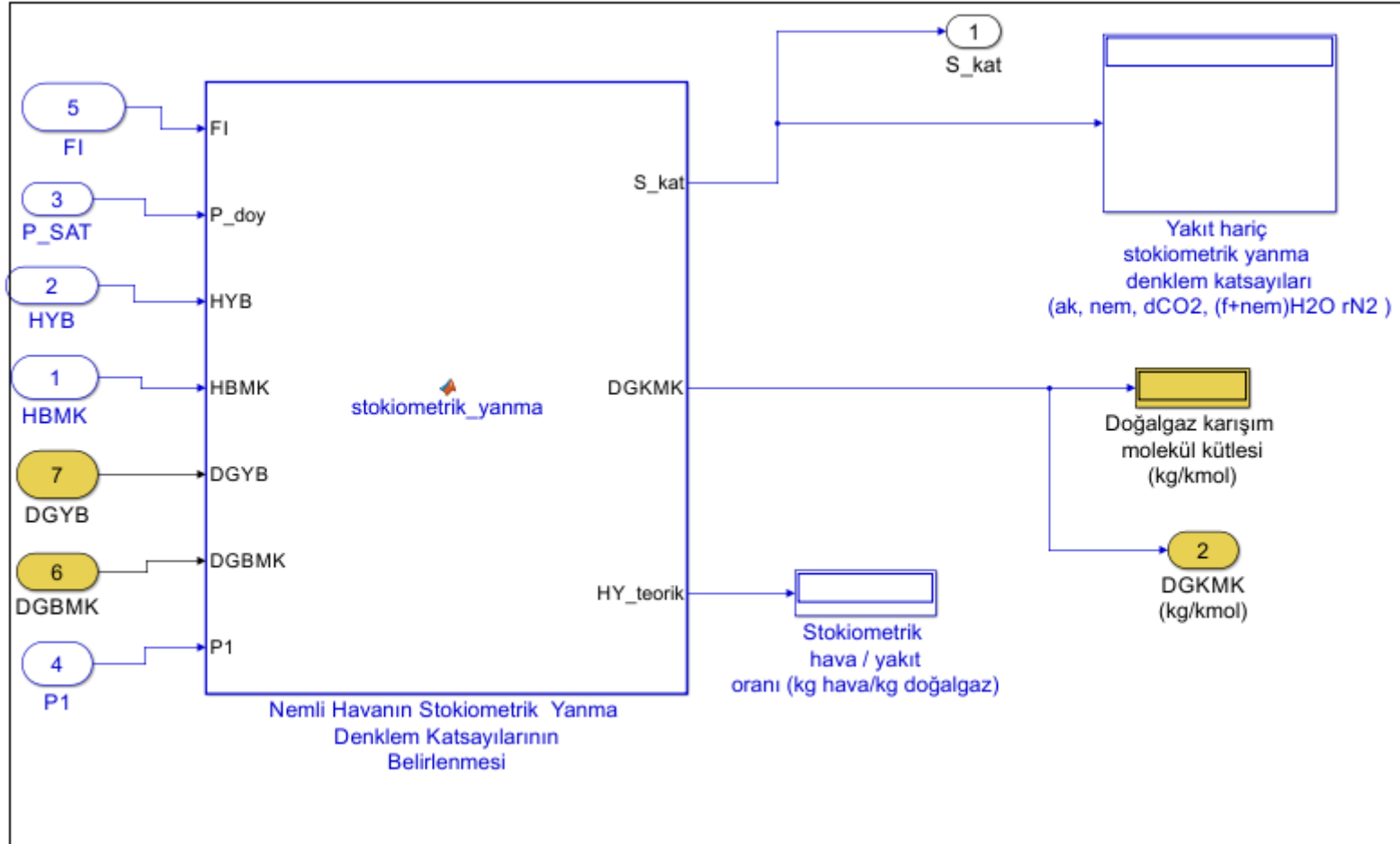
EK 4 : Hava ve gaz girişi b. altblok modeli



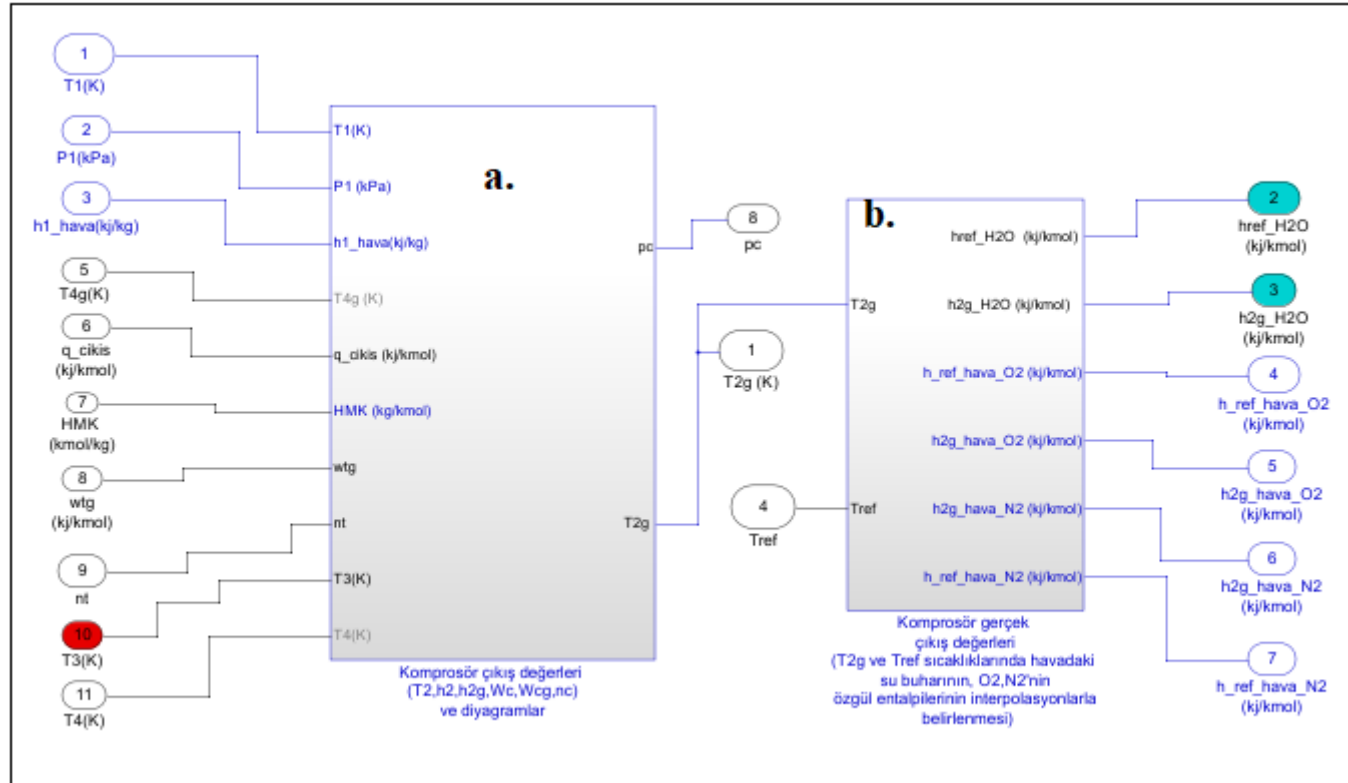
EK 5 : Hava ve gaz girişi c. altblok modeli



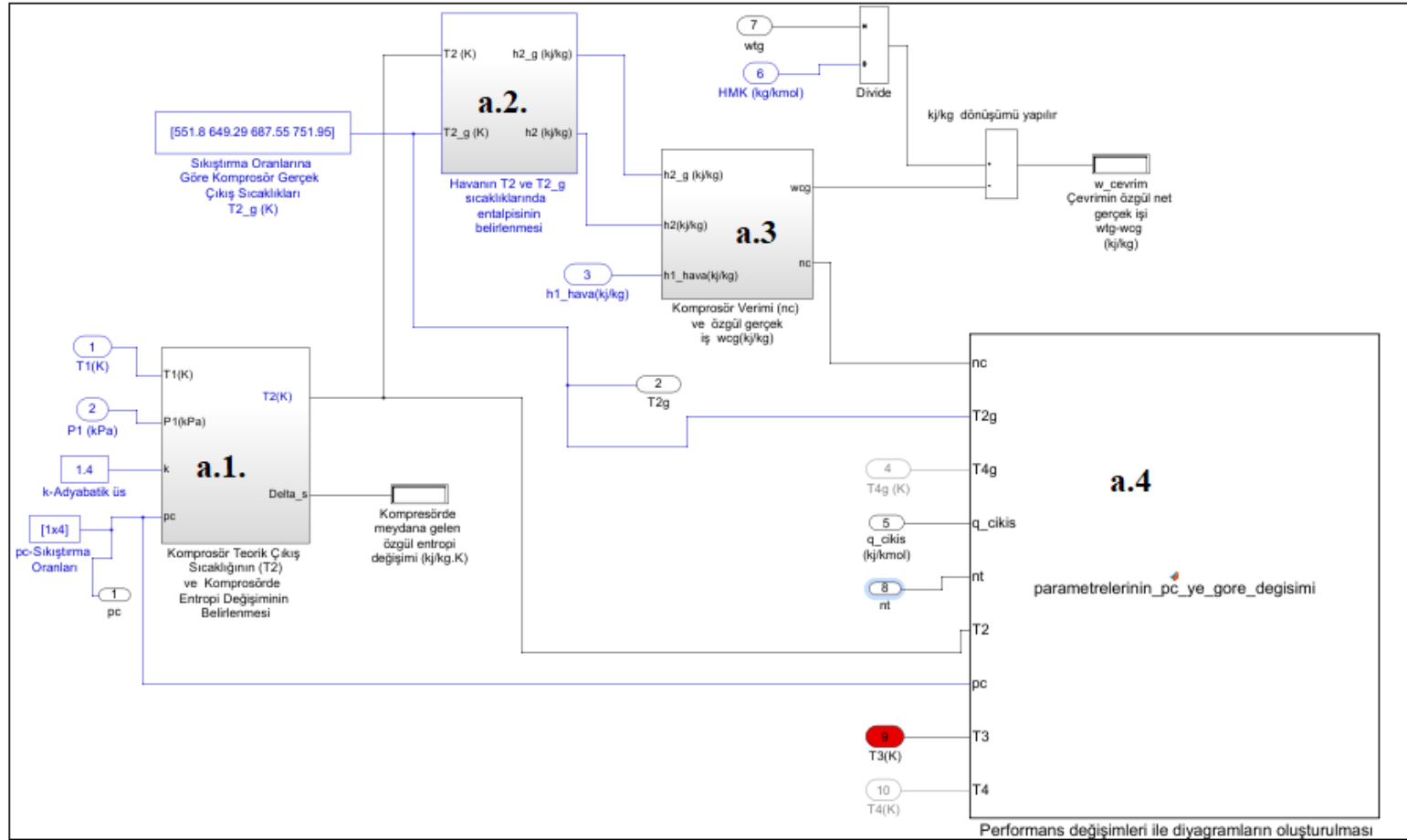
EK 6 : Hava ve gaz girişi d. altblok model



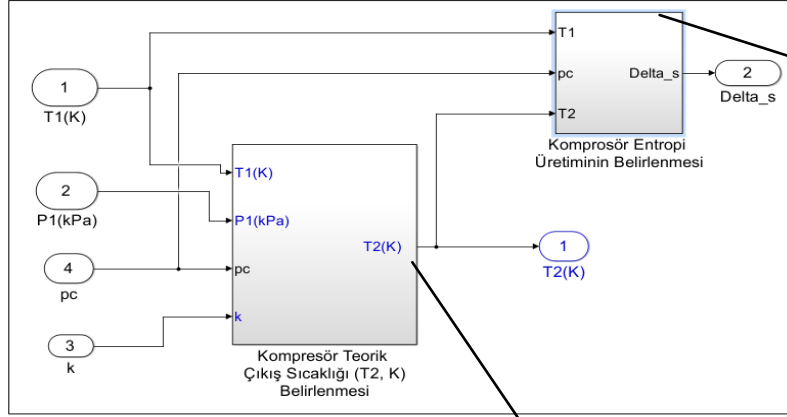
EK 7 : Hava ve gaz girişi e. altblok modeli



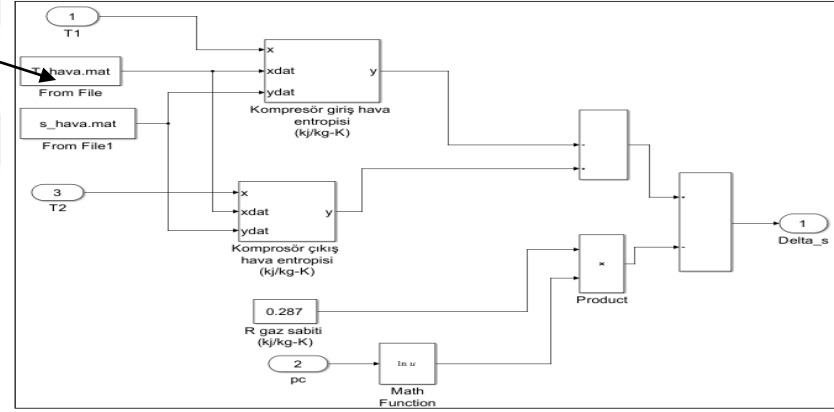
EK 8 : Kompresör blok modeli a., ve b. olarak belirtilen iki altbloktan oluşur.



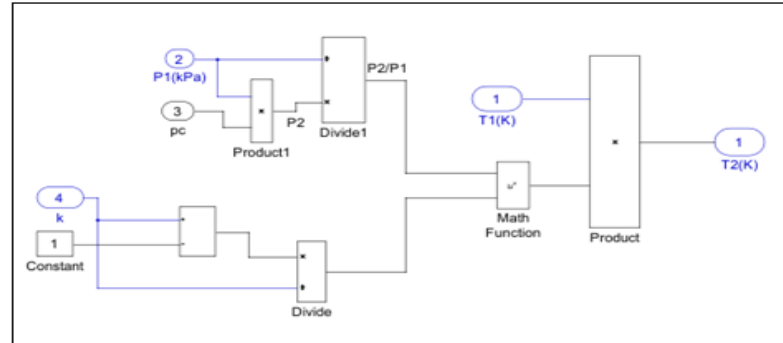
EK 9 : Kompresör a. blok modeli kendi içerisinde dört altbloktan oluşur. (a.1. altblok, a.2. altblok, a.3.altblok, a.4.altblok)



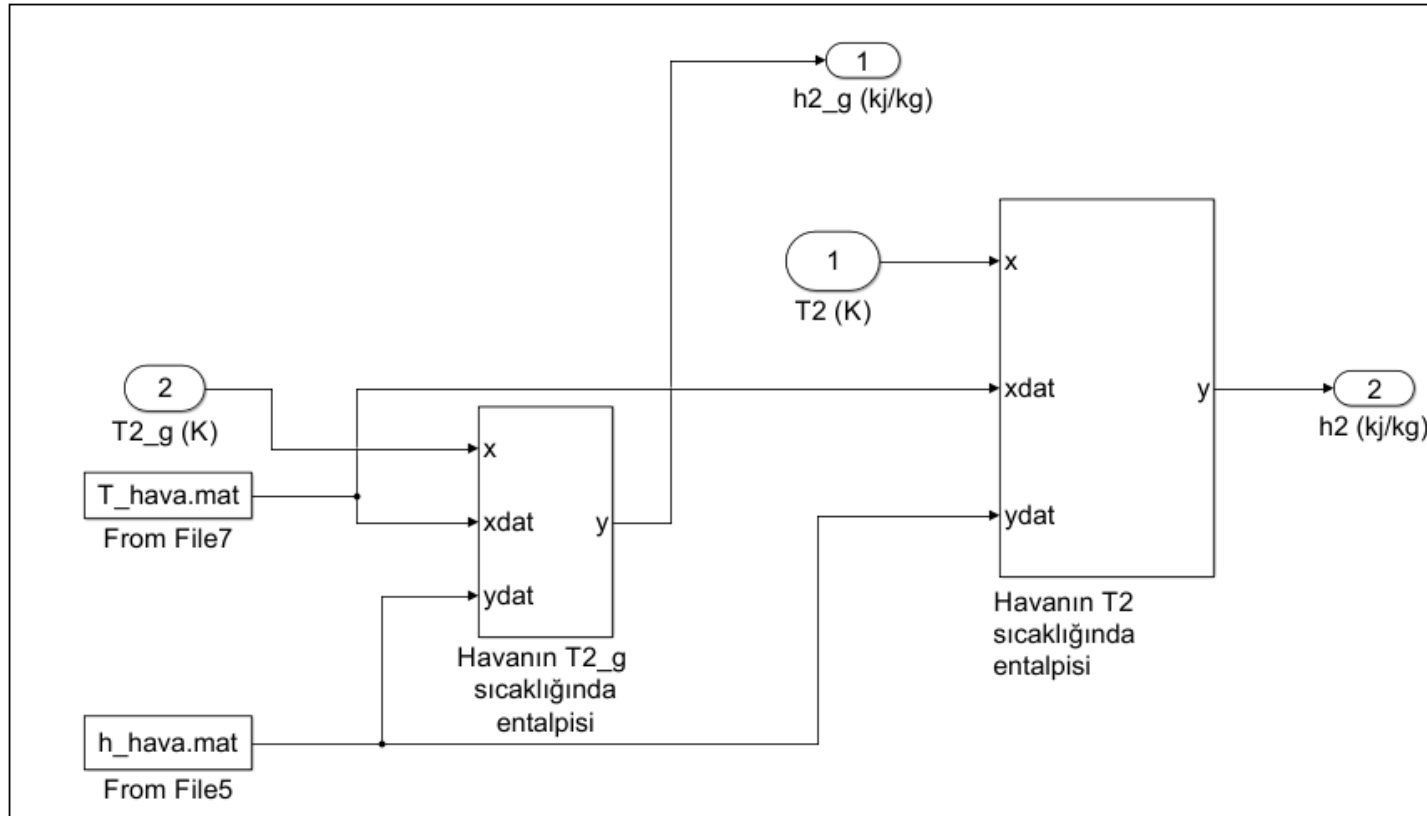
EK 10. a.) Kompresör a.1. altblok modeli



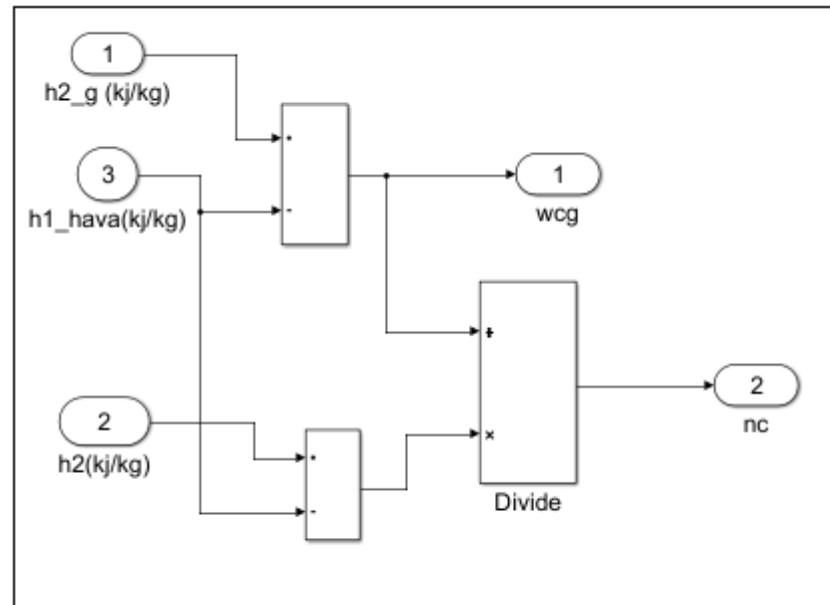
EK 10.c.) Kompresör a.1. altbloкта entropi değişiminin belirlendiği model



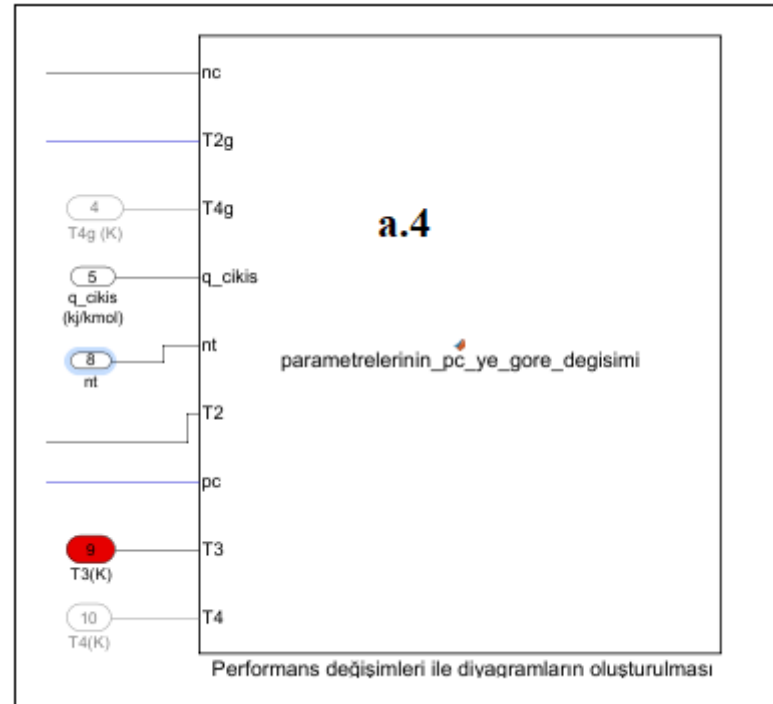
EK 10.b.) Kompresör a.1. altbloкта kompresör teorik çıkış sıcaklığının belirlendiği model



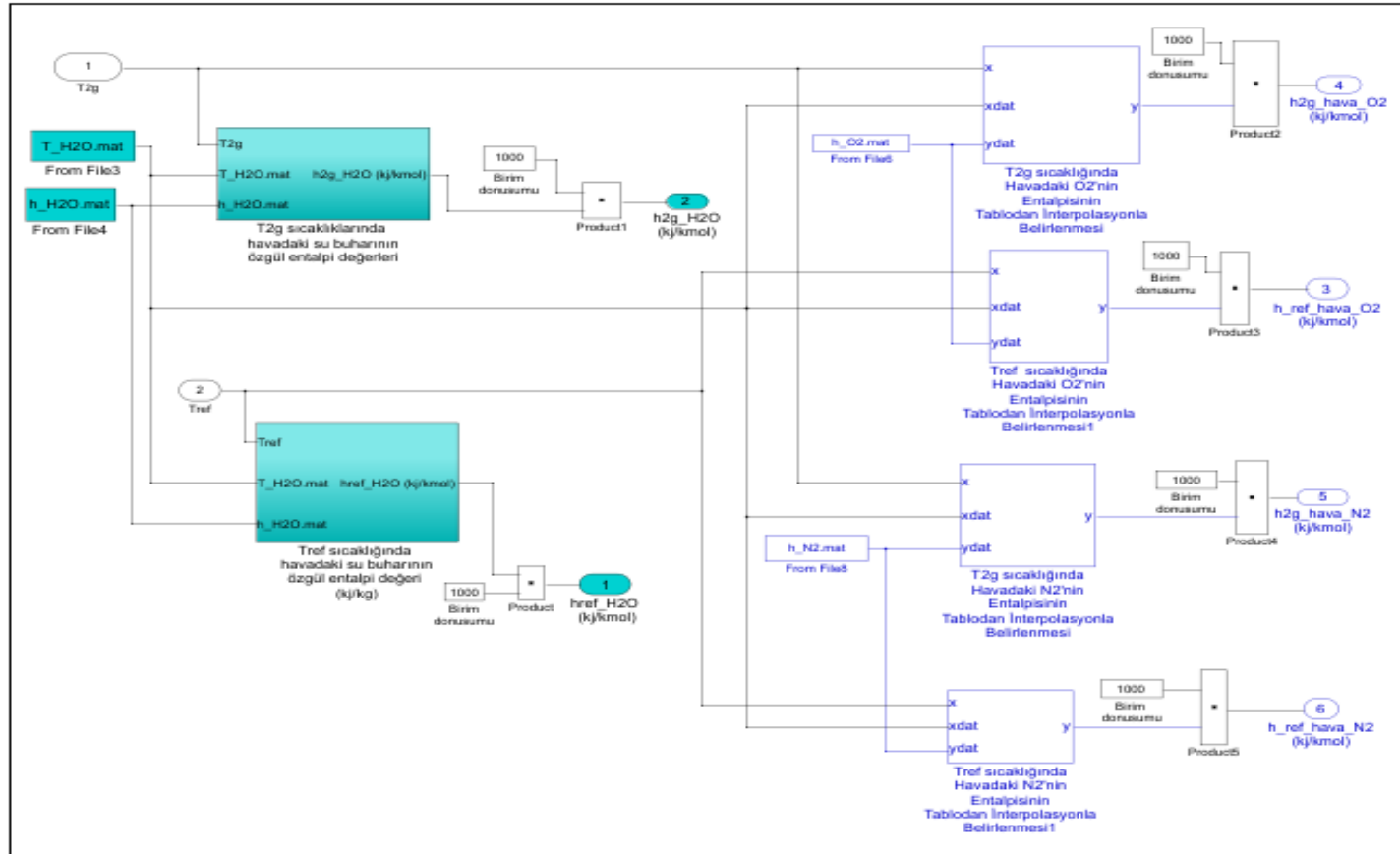
EK 11 : Kompresör a.2. altblok modeli



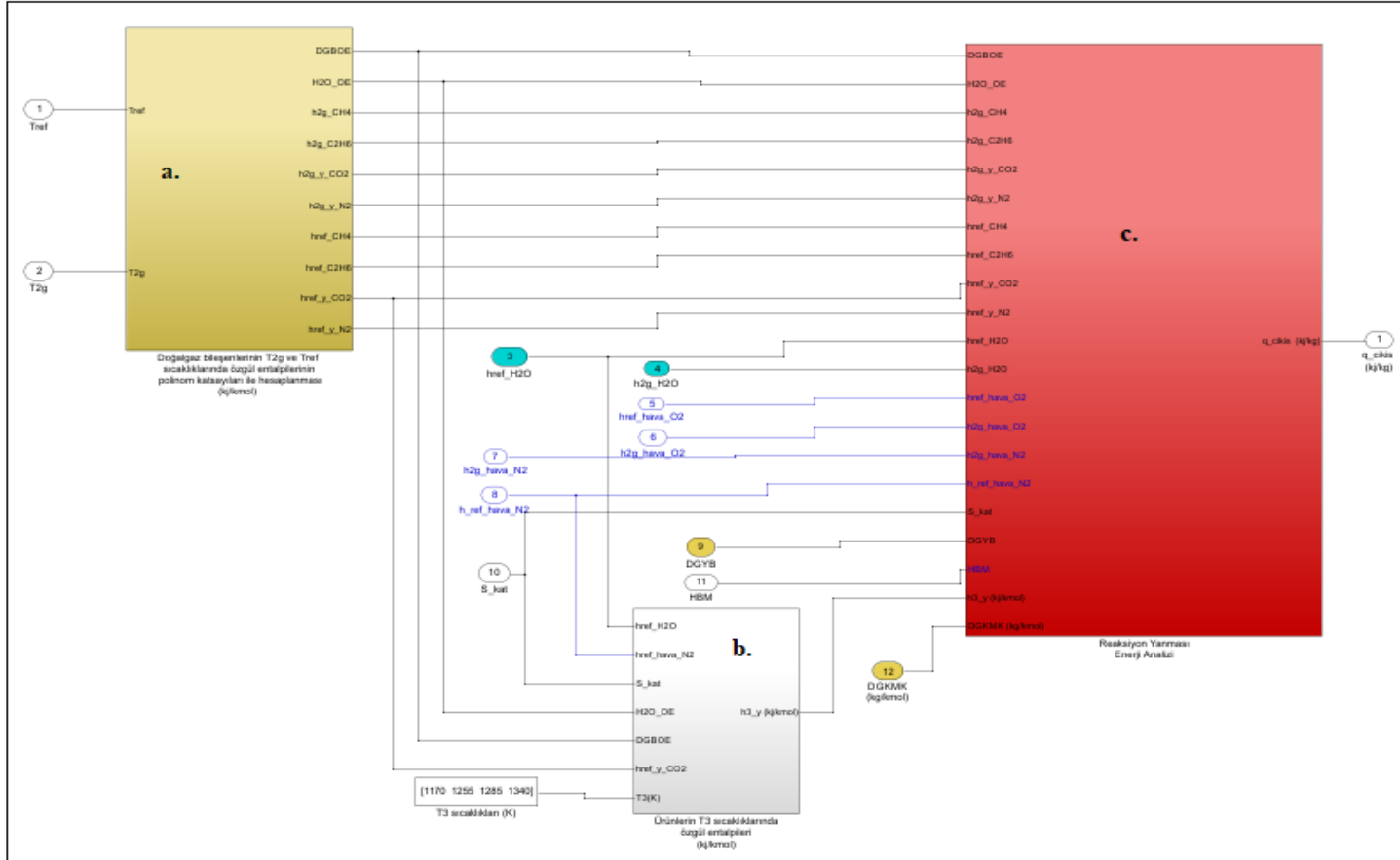
EK 12 : Kompresör a.3. altblok modeli



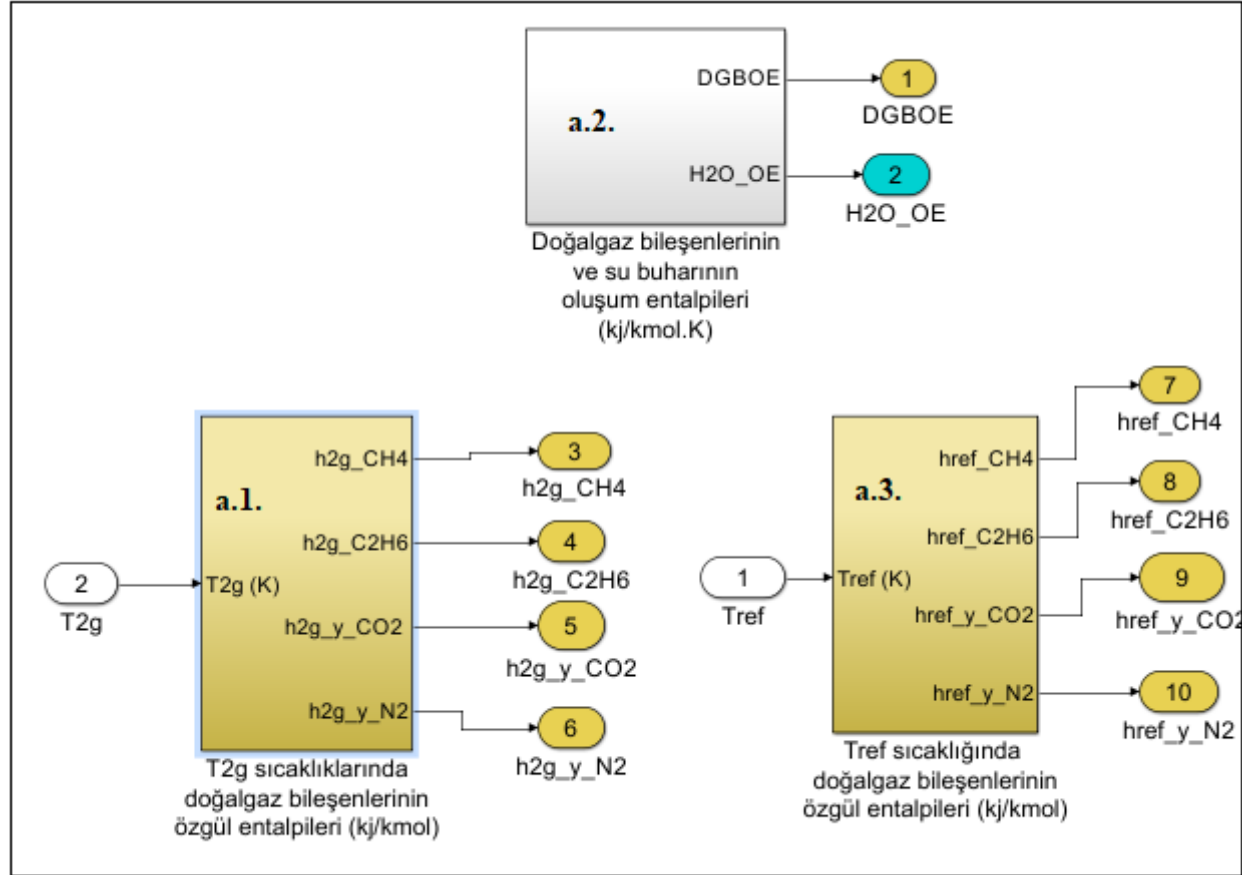
EK 13 : Kompresör birinci blok 1.d. altblok modeli



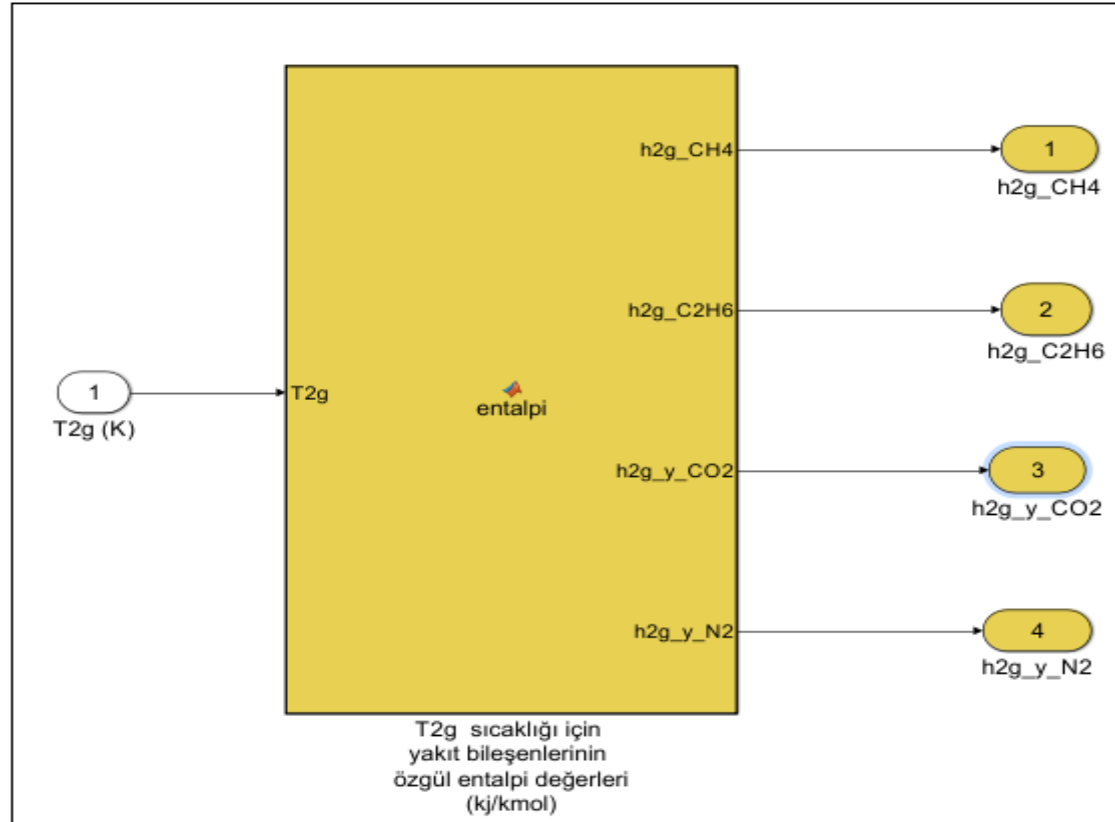
EK 14 : Kompresör b. altblok modeli



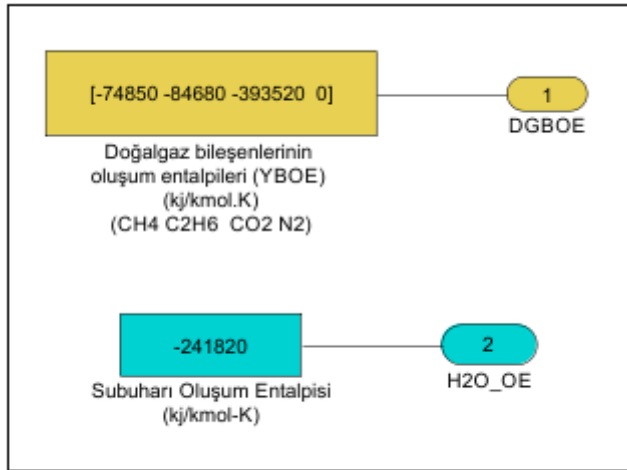
EK 15 : Yanma odası blok modeli, a., b. ve c. altblok olarak belirtilen üç altbloktan oluşur.



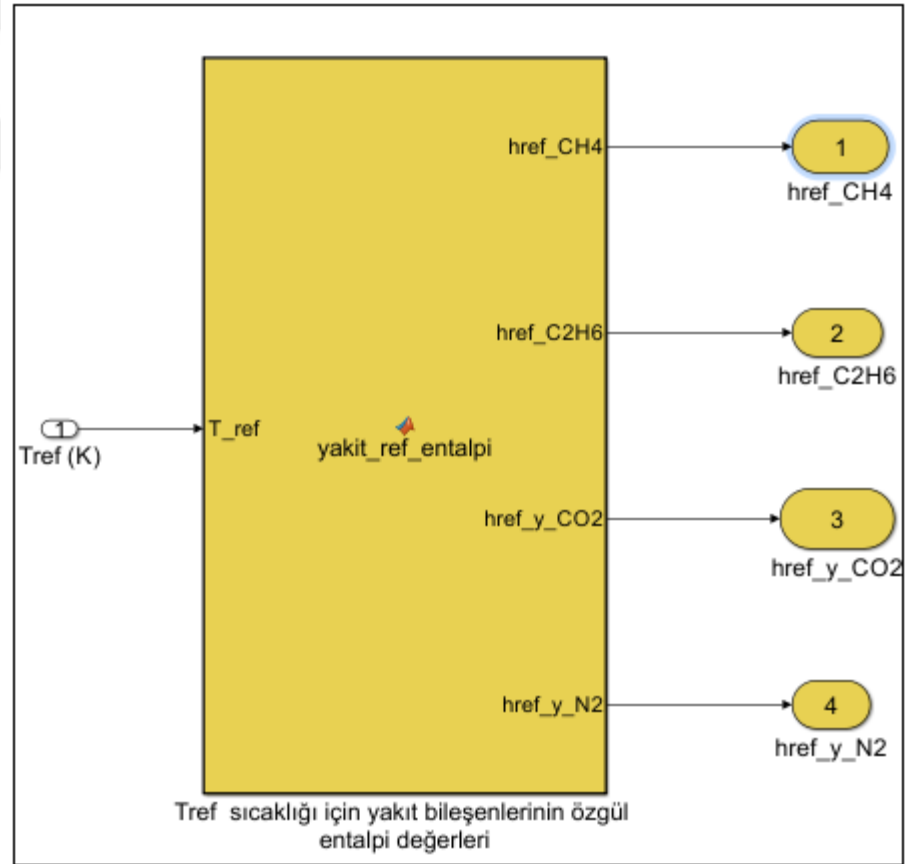
EK 16 : Yanma odası a. altblok modeli kendi içerisinde üç altbloktan oluşur. (a.1., a.2. a.3.)



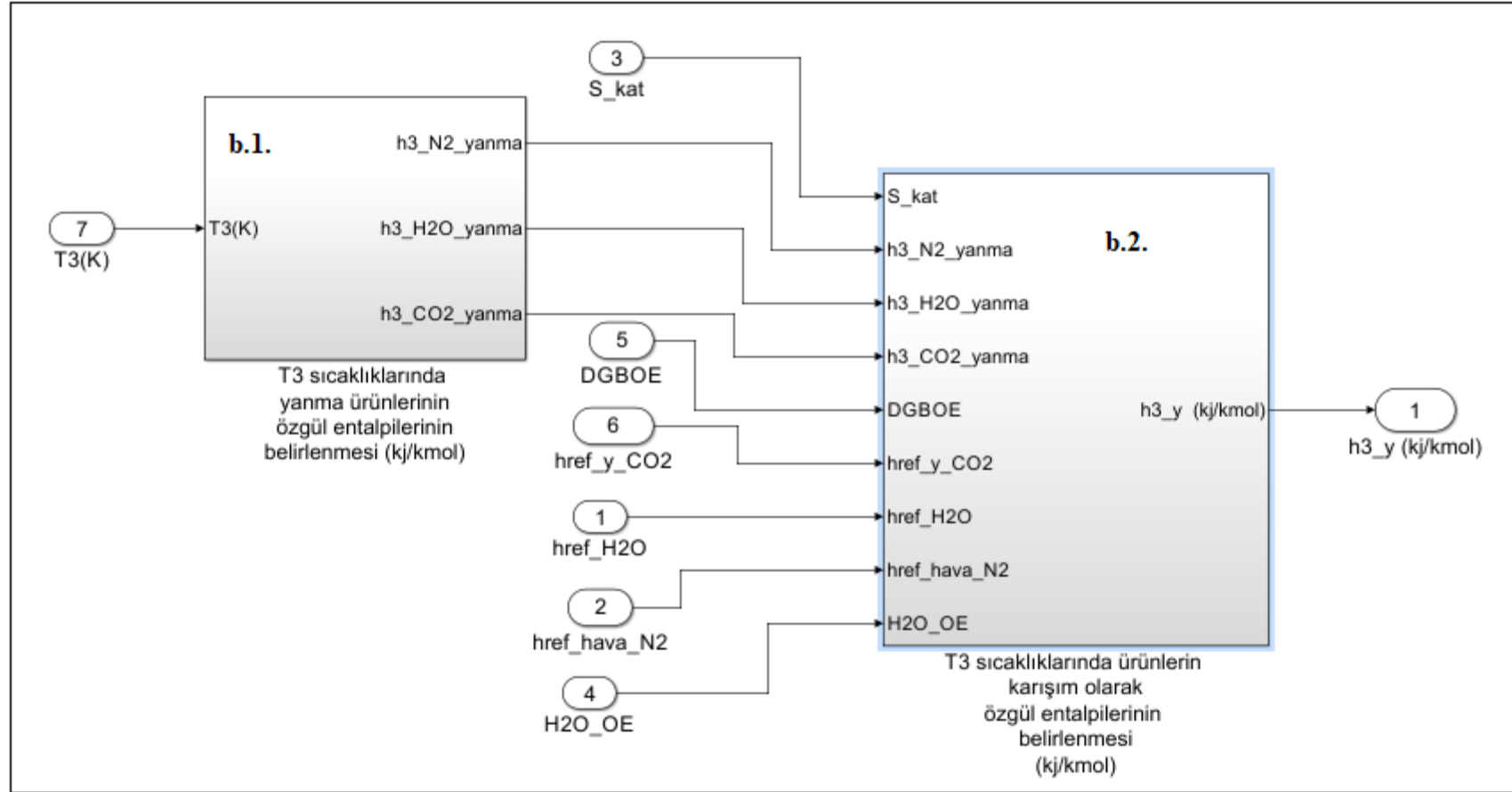
EK 17 : Yanma odası a.1. altblok modeli



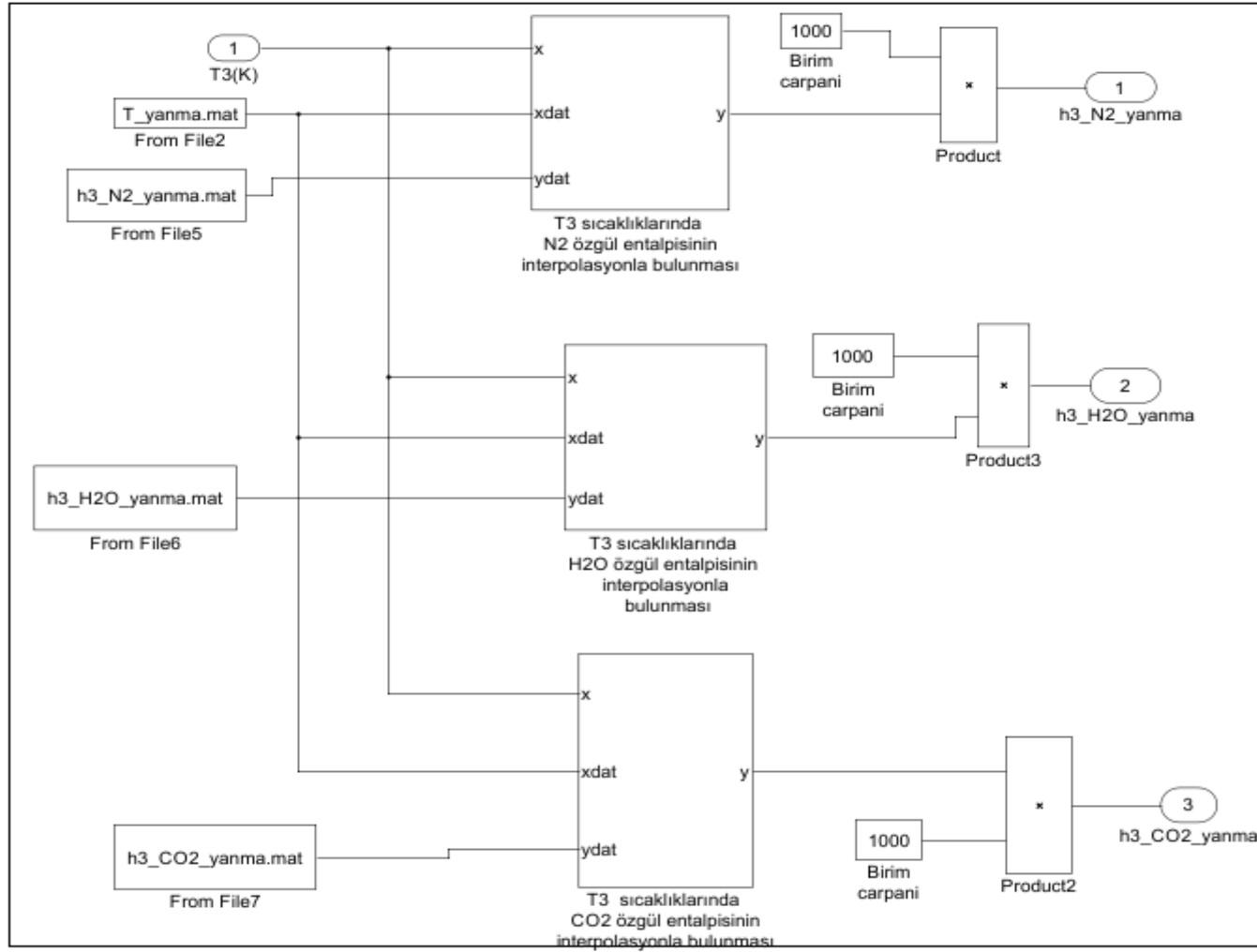
EK 18 : Yanma odası a.2. altblok modeli



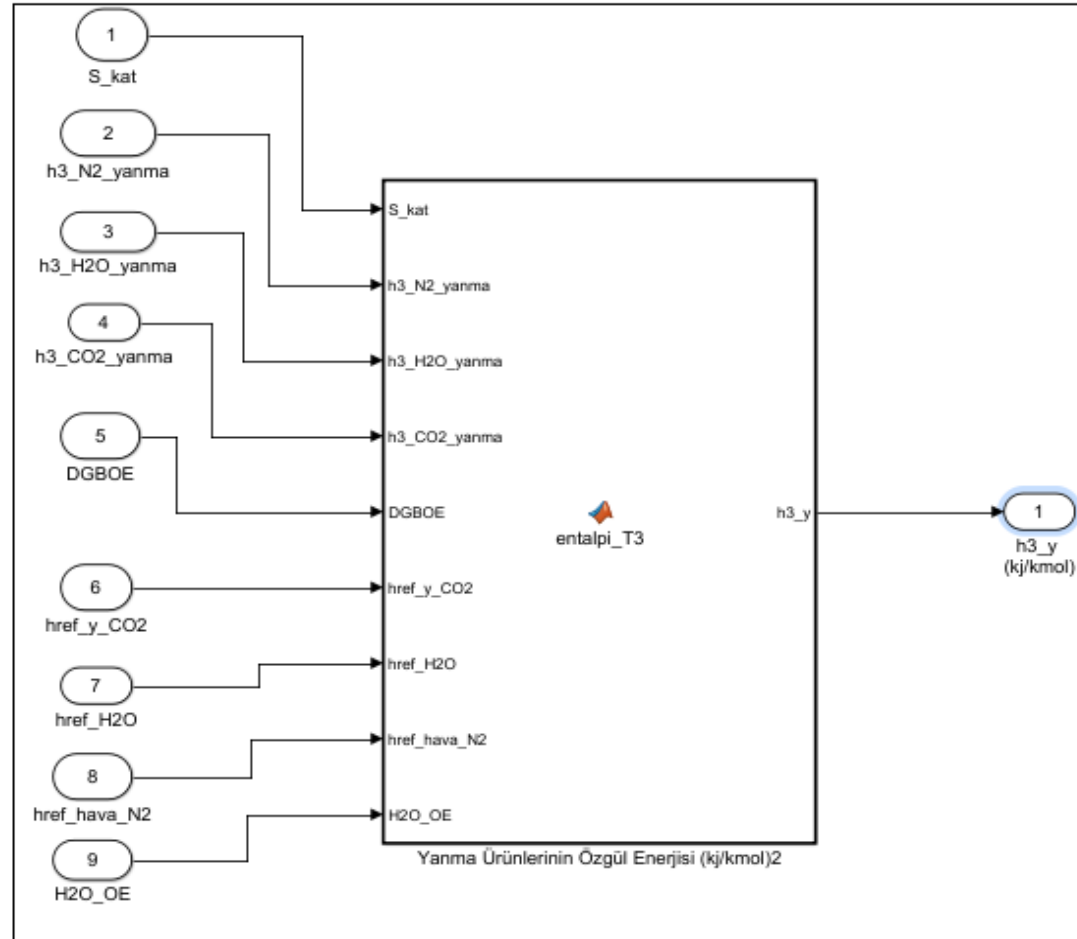
EK 19 : Yanma odası a.3. altblok modeli



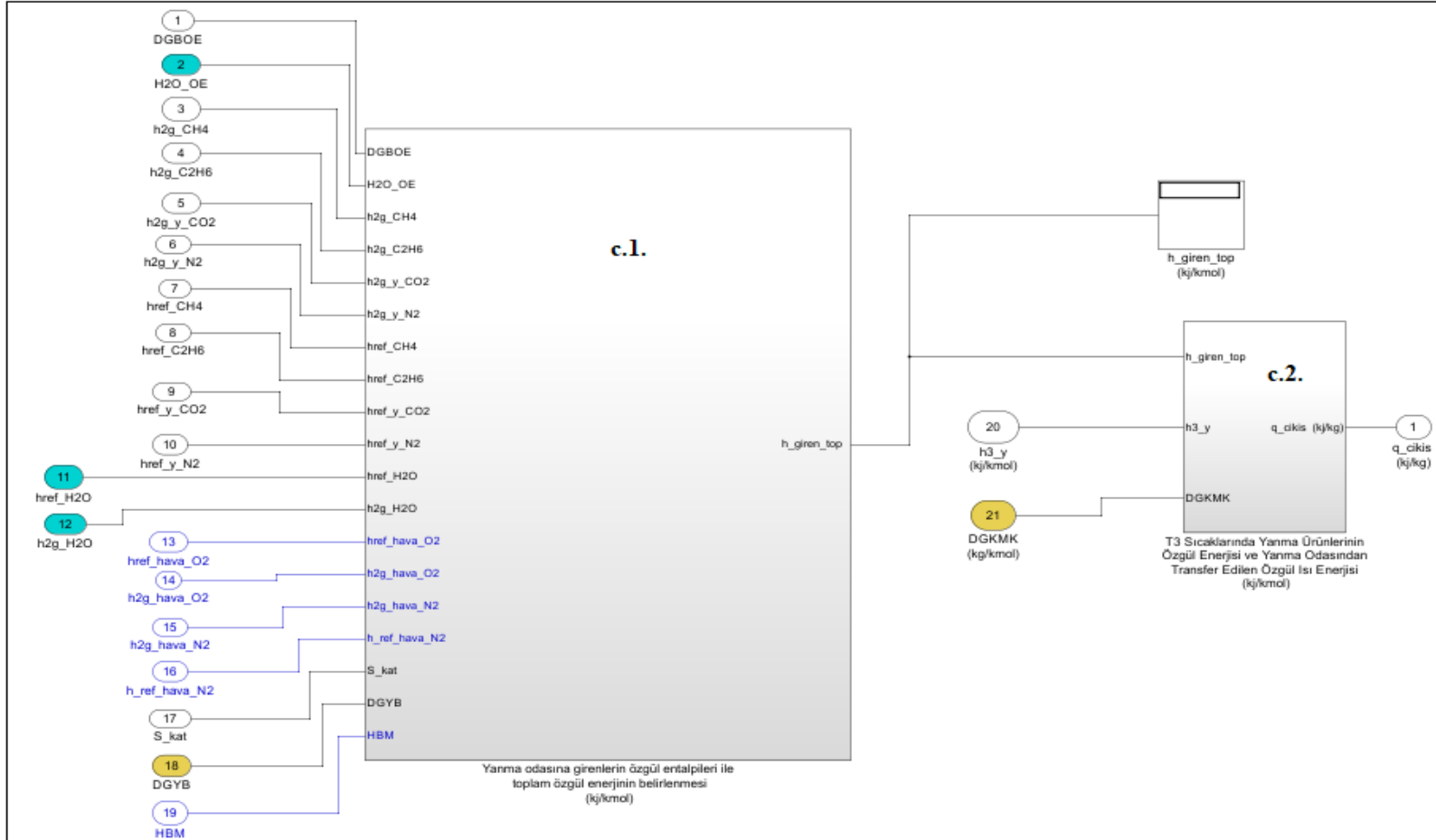
EK 20 : Yanma odası b. altblok modeli iki altbloktan oluşur. (b.1., b.2)



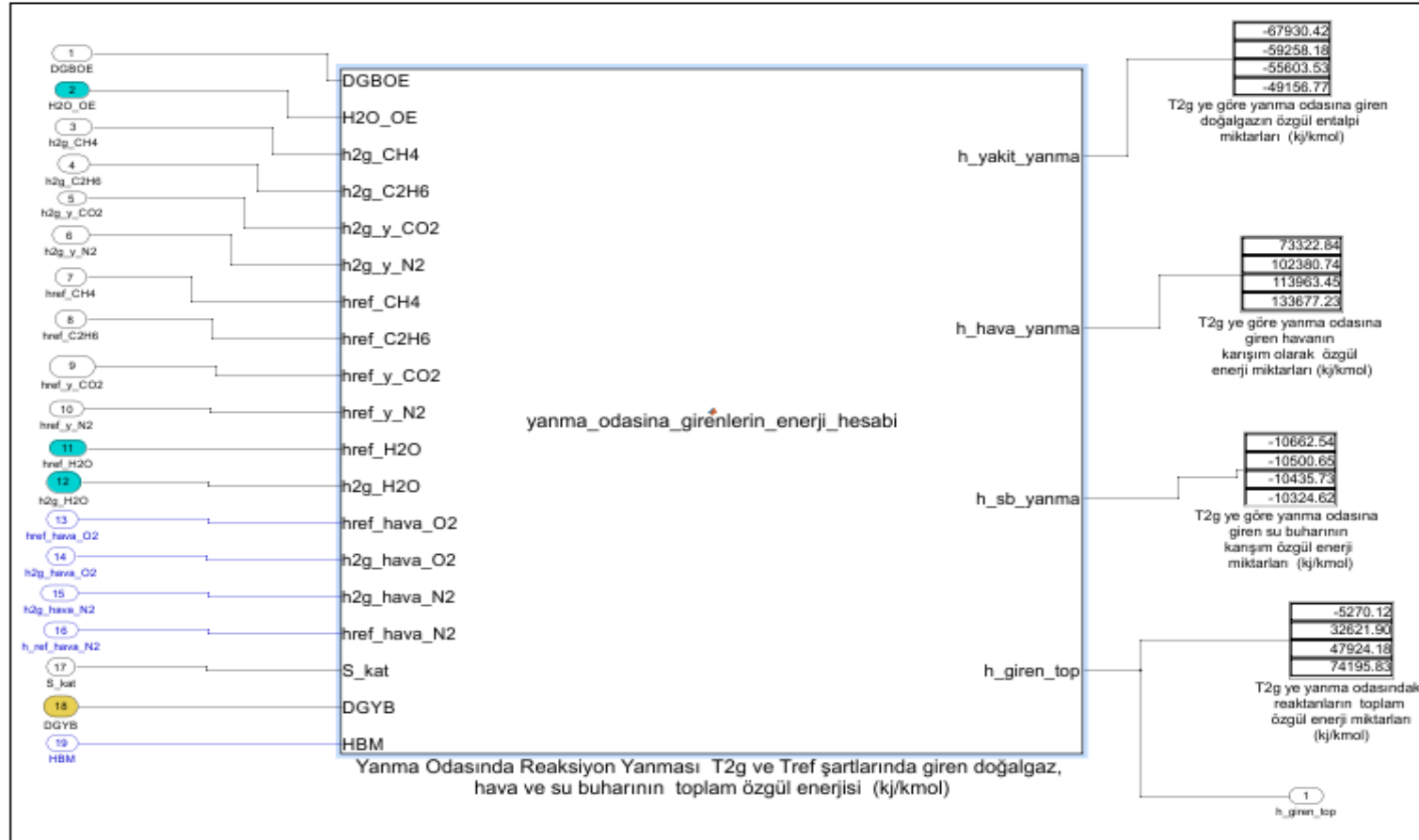
EK 21 : Yanma odası b.1. altblok modeli



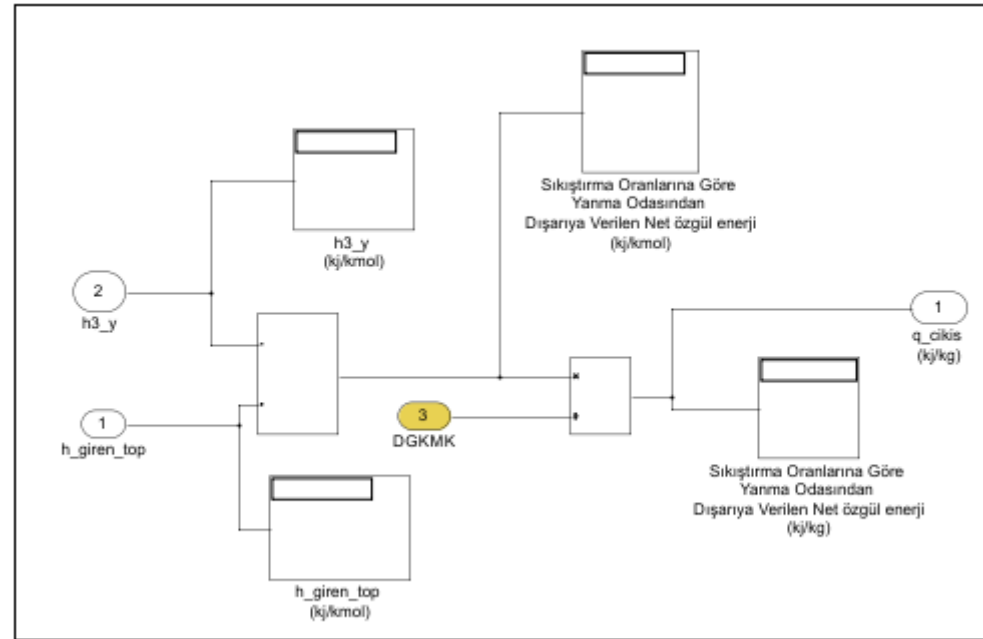
EK 22 : Yanma odası b.2. altblok modeli



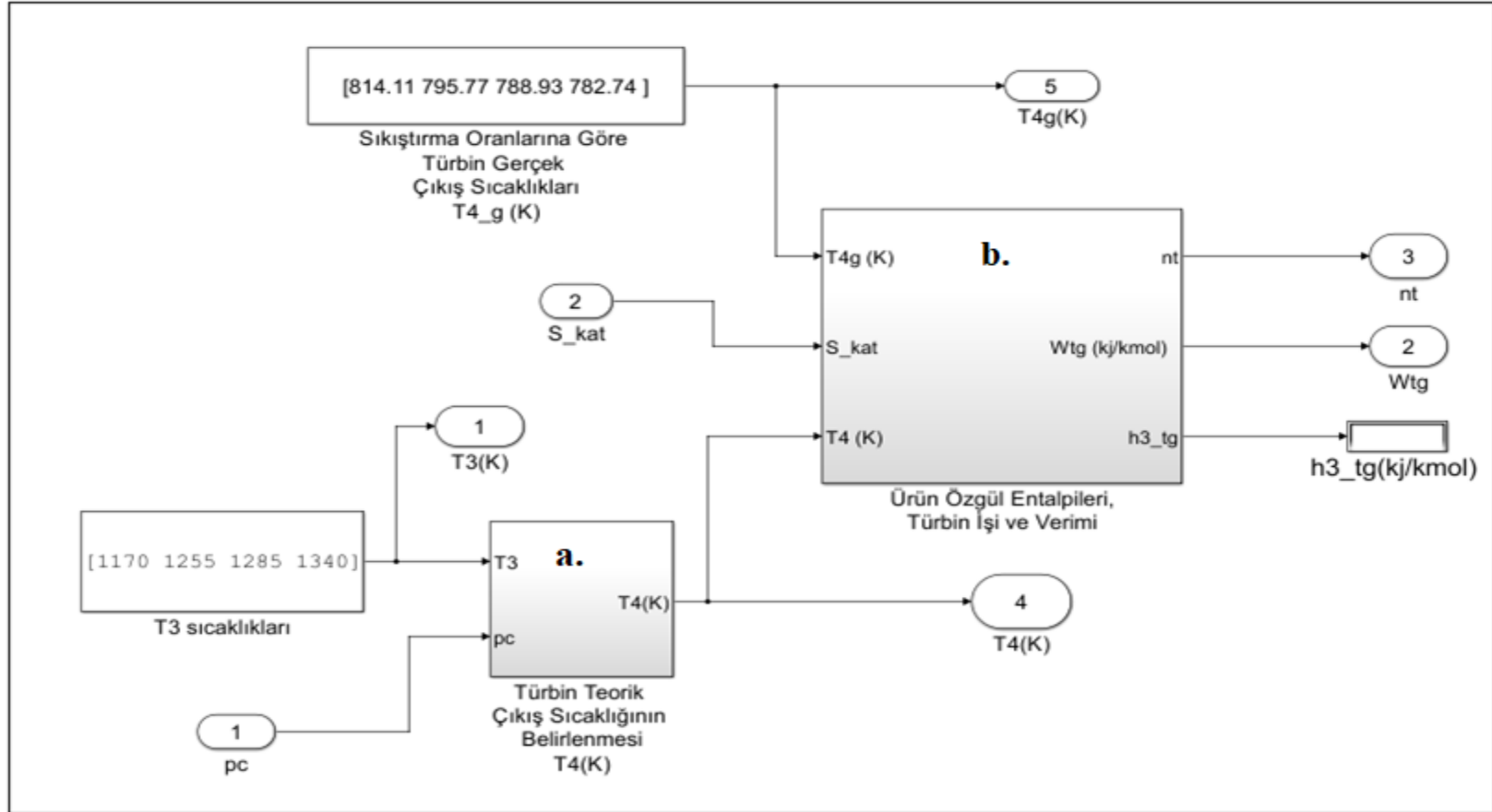
EK 23 : Yanma odası c. altblok modeli iki altbloktan oluşur. (c.1. , c.2.)



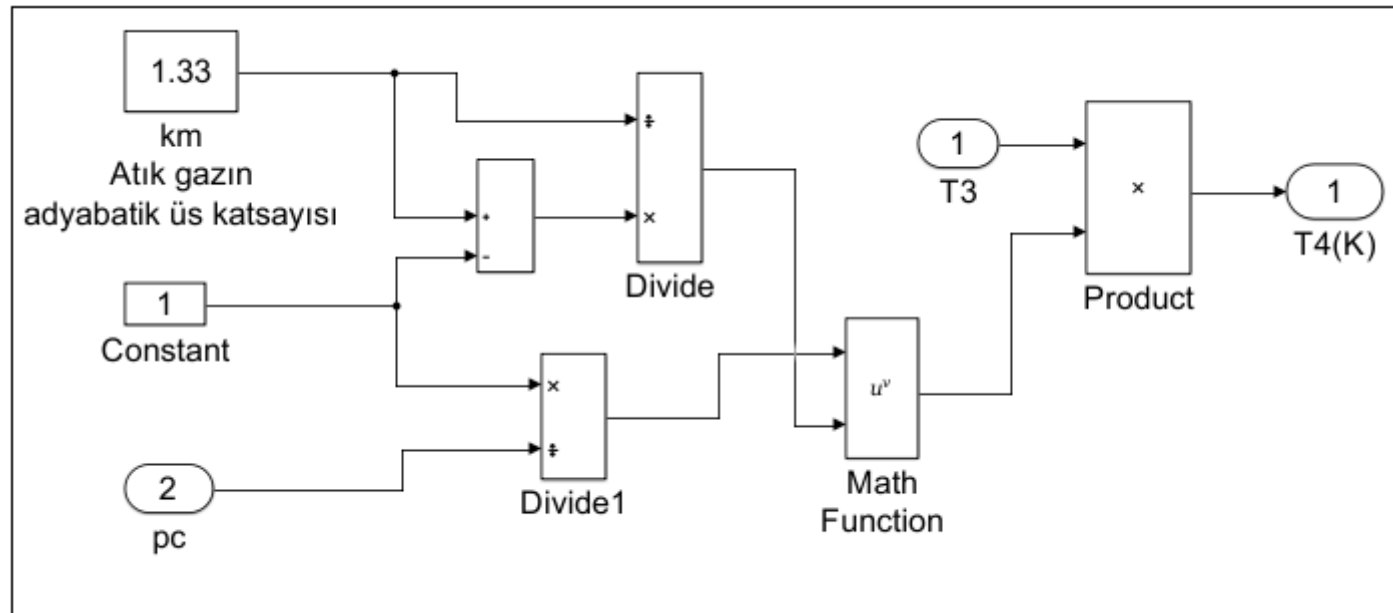
EK 24 : Yanma odası c.1. altblok modeli



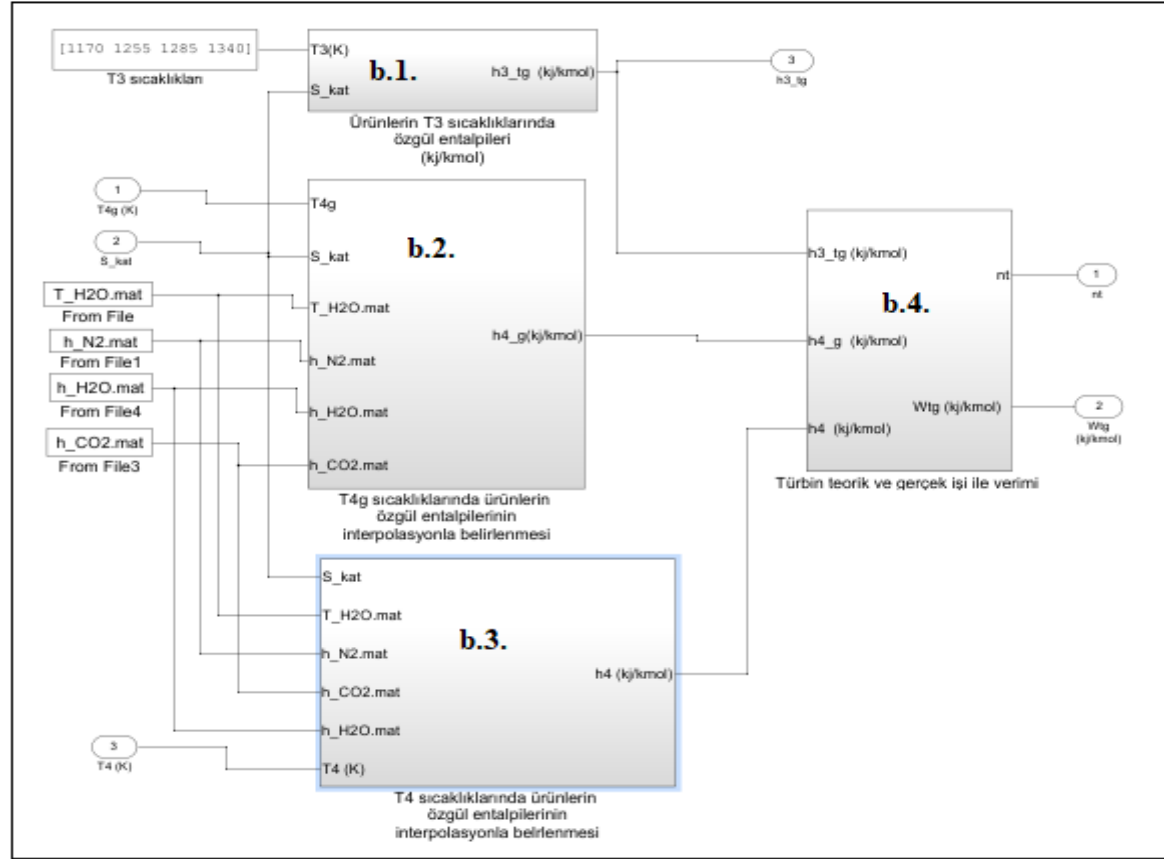
EK 25 : Yanma odası c.2. altblok modeli



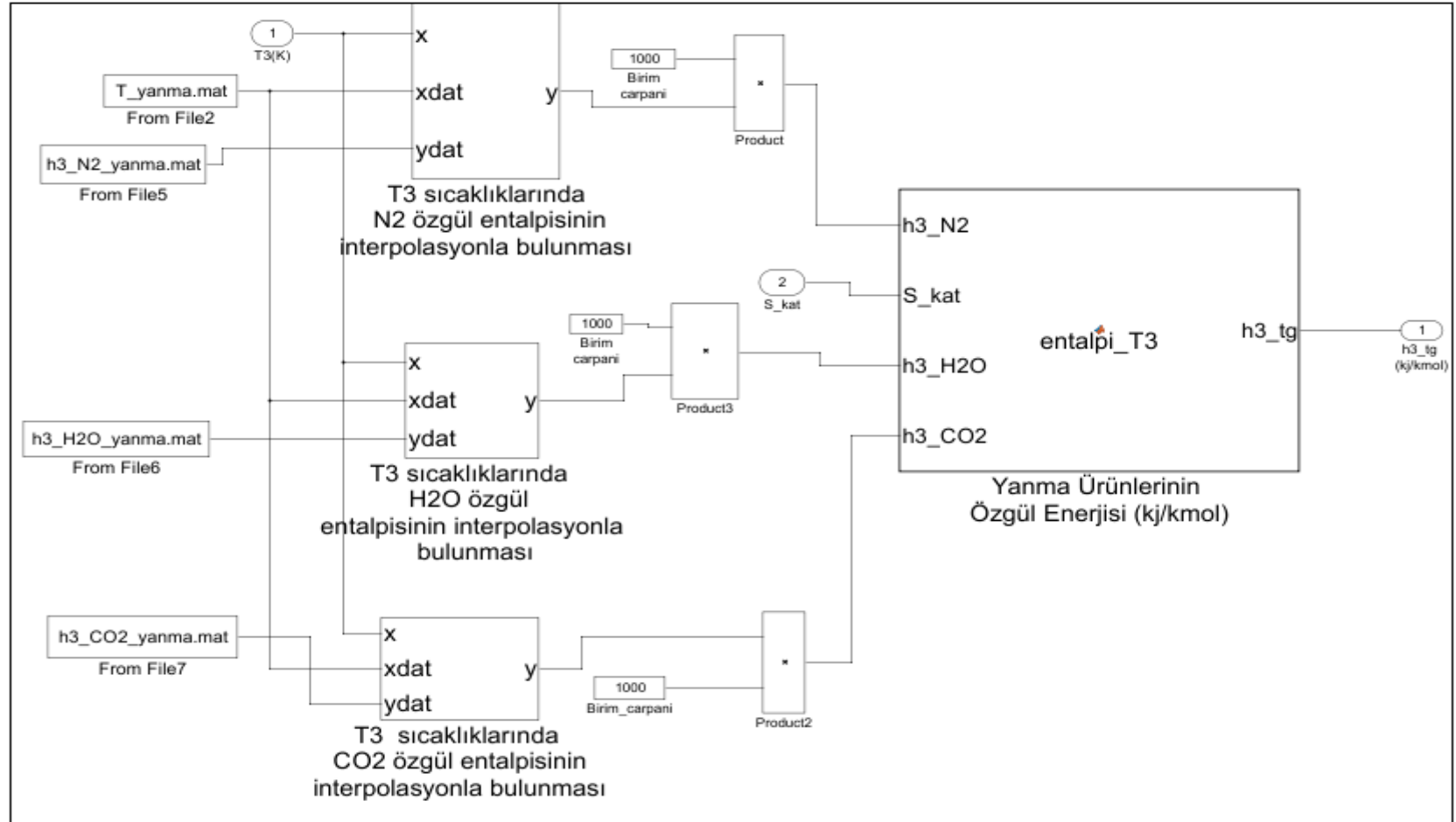
EK 26 : Gaz türbin blok modeli a. ve b.olarak belirtilen iki altbloktan oluşur.



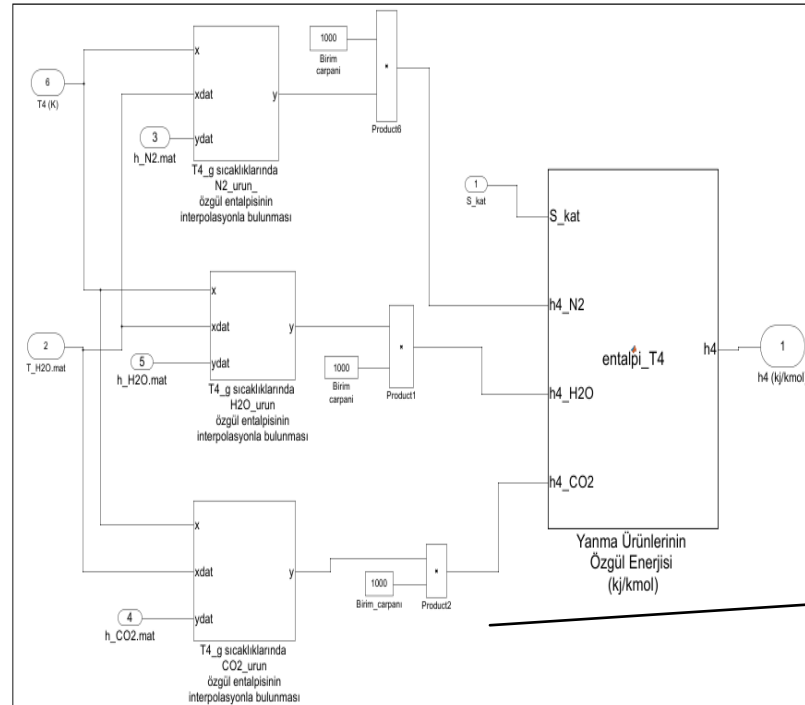
EK 27 : Gaz türbin a. altblok modeli



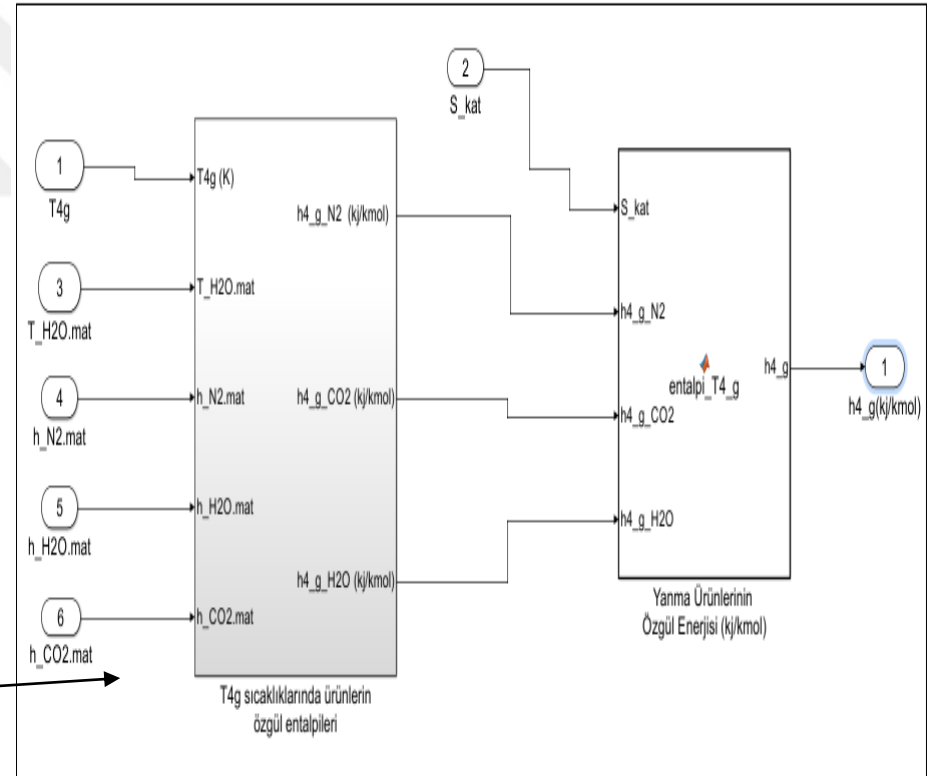
EK 28 : Gaz türbin b. altbloğu kendi içerisinde dört adet altbloktan oluşur. (b.1., b.2., b.3., b.4.)



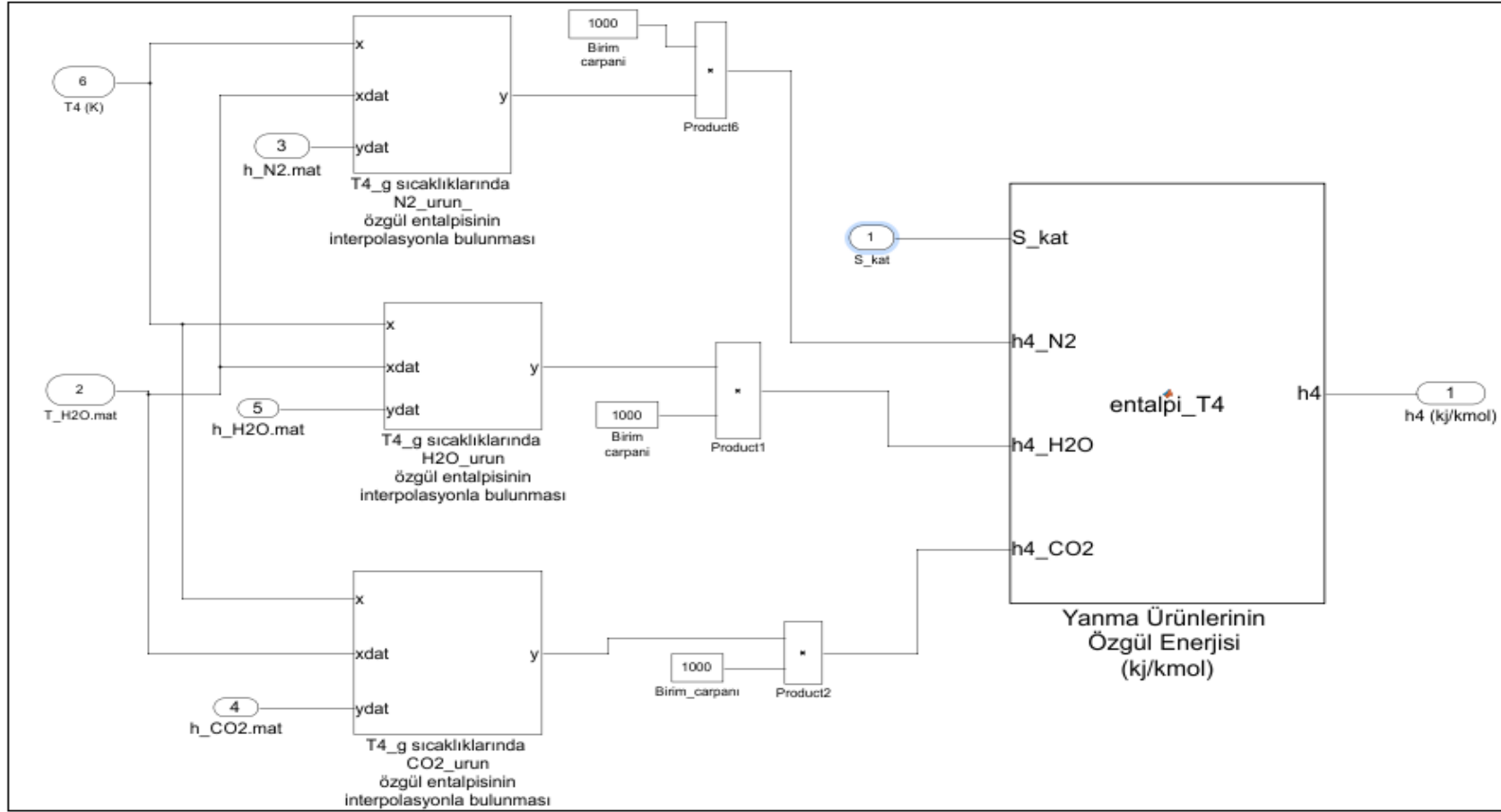
EK 29 : Gaz türbin b.1. altblok modeli



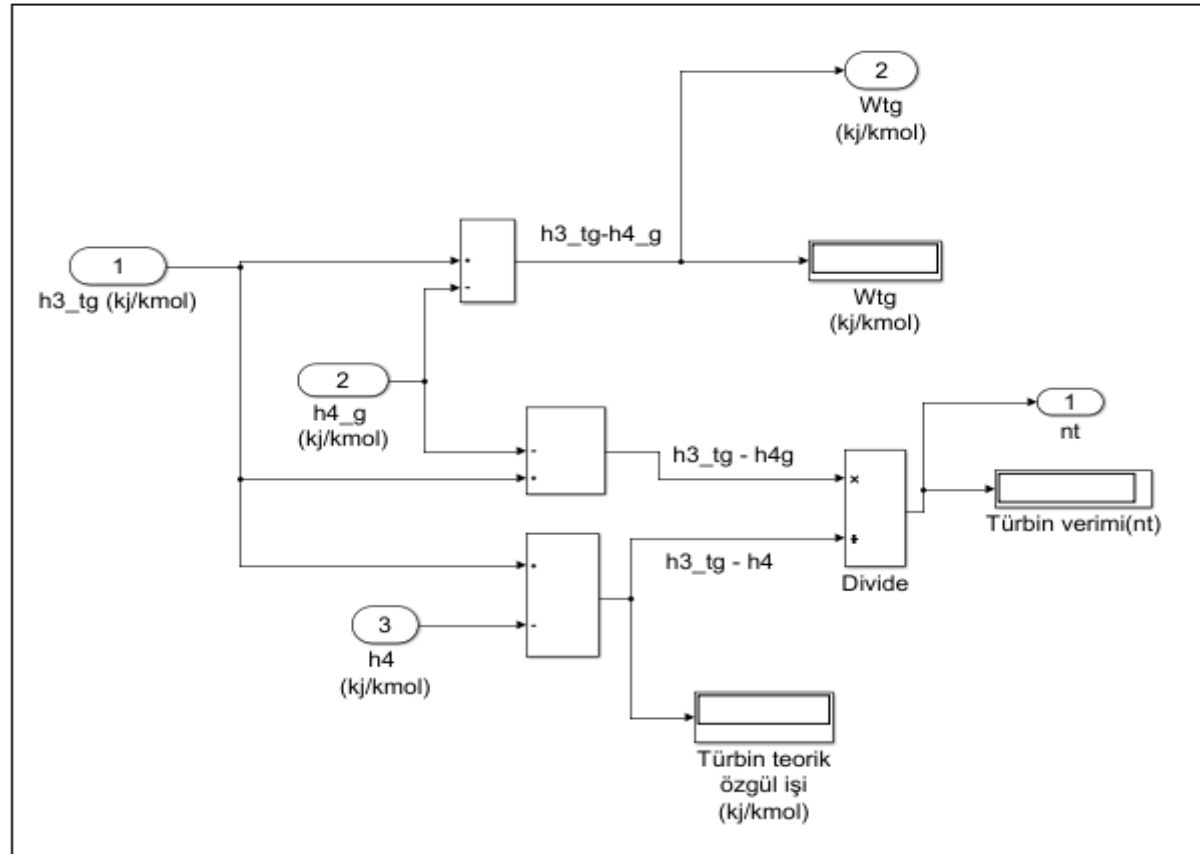
EK 30.a) : Gaz türbin b.2. altblok modeli



EK 30.b) : Gaz türbin b.2. altblok modeli



EK 31 : Gaz türbin b.3. altblok modeli



EK 32 : Gaz türbin b.4. altblok modeli