

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KATI OKSİT YAKIT HÜCRELİ ENERJİ ÜRETİM
SİSTEMLERİNİN ALTERNATİF KRİTERLERE GÖRE
PERFORMANS ANALİZİ**

Makine Yük. Lisans Ali Volkan AKKAYA

**FBE Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Enerji Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi	: 14 Haziran 2007
Tez Danışmanı	: Prof. Dr. Bahri ŞAHİN (YTÜ)
Jüri Üyeleri	: Prof. Dr. Olcay KINCAY (YTÜ)
	: Prof. Dr. Ahmet Korhan BİNARK (MÜ)
	: Prof. Dr. Recep ÖZTÜRK (YTÜ)
	: Prof. Dr. Ahmet BAYÜLKEN (İTÜ)

İSTANBUL, 2007

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ÖNSÖZ	xvi
ÖZET	xvii
ABSTRACT	xviii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Önemi	1
1.2 Tezin Kapsamı	3
1.3 Tezin Hedefi	3
1.4 Tezin Amaçları	4
1.5 Tezin Yöntemi	4
1.6 Tezin Literatüre Katkısı	6
2. TEK BİR TÜPSEL KATI OKSİT YAKIT HÜCRESİNİN PERFORMANS ANALİZİ	7
2.1 Önceki Çalışmalar	7
2.2 Tüpsel KOYH'nin Özellikleri	11
2.3 KOYH'nin Elektrokimyasal Modeli	13
2.3.1 Nernst potansiyeli	14
2.3.2 Ohmik polarizasyon	15
2.3.3 Aktivasyon polarizasyonu	15
2.3.4 Konsantrasyon polarizasyonu	16
2.3.5 Kütle dengesi	18
2.3.6 Hücrenin elektriksel gücü, ısı ve verimi	18
2.4 Modelin Doğrulanması	19
2.5 Performans Analiz Sonuçları	22
3. TÜPSEL KOYH MODÜLÜNÜN PERFORMANS ANALİZİ	30
3.1 Önceki Çalışmalar	30
3.2 Tüpsel KOYH Modülü	32
3.3 Tüpsel KOYH Modülünün Modeli	34
3.3.1 Mikser	34
3.3.2 Öncü reformer	37
3.3.3 Tüpsel KOYH	40
3.3.4 Katalitik yakıcı	45

3.3.5	Isı değiştiricisi.....	47
3.4	KOYH Modülü için Performans Kriterleri.....	49
3.5	Simülasyon ve Modelin Doğrulanması	50
3.6	Performans Analiz Sonuçları	52
3.6.1	İşletme basıncının etkisi	52
3.6.2	Hücre işletme sıcaklığının etkisi.....	55
3.6.3	Akım yoğunluğunun etkisi	58
3.6.4	Yakıt kullanım faktörünün etkisi.....	61
3.6.5	Buhar-karbon oranının etkisi	64
3.6.6	Hava giriş sıcaklığının etkisi	67
3.6.7	Yakıt giriş sıcaklığının etkisi.....	70
4.	KOYH SİSTEMİNİN PERFORMANS ANALİZİ	73
4.1	Önceki Çalışmalar	73
4.2	KOYH Sistem Modeli	75
4.2.1	Rekuperatörler	76
4.2.1.1	Rekuperatör 1	76
4.2.1.2	Rekuperatör 2	78
4.2.2	Kompresörler	80
4.2.2.1	Hava kompresörü.....	80
4.2.2.2	Yakıt kompresörü	82
4.3	KOYH Sisteminin Performans Kriterleri	83
4.4	KOYH Sisteminin Simülasyonu.....	84
4.5	Performans Analiz Sonuçları.....	86
4.5.1	Kompresör basınç oranının etkisi	87
4.5.2	Hücre işletme sıcaklığının etkisi.....	90
4.5.3	Akım yoğunluğunun etkisi	93
4.5.4	Yakıt kullanım faktörünün etkisi.....	97
4.5.5	Rekuperatör etkinlik katsayısının etkisi.....	100
4.5.6	Kompresör izentropik veriminin etkisi.....	104
5.	KOYH KOJENERASYON SİSTEMİNİN PERFORMANS ANALİZİ.....	107
5.1	Önceki çalışmalar	107
5.2	KOYH Kojenerasyon Sisteminin Modeli.....	108
5.2.1	Atık ısı kazanı	110
5.2.2	Pompa	112
5.3	KOYH Kojenerasyon Sisteminin Performans Kriterleri	113
5.4	KOYH Kojenerasyon Sisteminin Simülasyonu	114
5.5	Performans Analiz Sonuçları.....	115
5.5.1	Kompresör basınç oranının etkisi	115
5.5.2	Hücre işletme sıcaklığının etkisi.....	118
5.5.3	Akım yoğunluğunun etkisi	121
5.5.4	Yakıt kullanım faktörünün etkisi.....	123
5.5.5	Rekuperatör etkinlik katsayısının etkisi.....	126
5.5.6	Kompresör izentropik veriminin etkisi.....	129
5.5.7	Minimum sıcaklık farkının etkisi	131
6.	KOYH -GT HİBRİT SİSTEMİN PERFORMANS ANALİZİ	133
6.1	Önceki Çalışmalar	133
6.2	KOYH-GT Hibrit Sistem Modeli	136

6.2.1	Gaz Türbini	137
6.3	Hibrit Sistem için Performans Kriterleri	139
6.4	Simülasyon ve Modelin Doğrulanması	140
6.5	Performans Analiz Sonuçları	142
6.5.1	Kompresör basınç oranının etkisi	142
6.5.2	Hücre işletme sıcaklığının etkisi	145
6.5.3	Yakıt kullanım faktörünün etkisi	148
6.5.4	Akım yoğunluğunun etkisi	152
6.5.5	Rekuperatör etkinlik katsayısının etkisi	155
6.5.6	Gaz türbini izentropik veriminin etkisi	158
7.	KOYH-GT KOJENERASYON SİSTEMİNİN PERFORMANS ANALİZİ	161
7.1	KOYH-GT Kojenerasyon Sistemin Modeli	161
7.2	KOYH-GT Kojenerasyon Sistemi için Performans Kriterleri	162
7.3	Sistem Simülasyonu	163
7.4	Performans Analiz Sonuçları	164
7.4.1	Kompresör basınç oranının etkisi	164
7.4.2	Hücre işletme sıcaklığının etkisi	167
7.4.3	Yakıt kullanım faktörünün etkisi	169
7.4.4	Akım yoğunluğunun etkisi	172
7.4.5	Rekuperatör etkinlik katsayısının etkisi	174
7.4.6	Gaz türbini izentropik veriminin etkisi	177
7.4.7	Minimum sıcaklık farkının etkisi	180
8.	GENEL SONUÇ	182
	KAYNAKLAR	185
	ÖZGEÇMİŞ	195

SİMGE LİSTESİ

A	Alan
D_{eff}	Efektif gaz difüzyon faktörü
DT_p	Minimum sıcaklık farkı
E	Aktivasyon enerjisi
$\dot{E}$	Birim zamandaki ekserji değeri
F	Faraday sabiti
G	Gibbs enerjisi
$\bar{h}$	Molar entalpi
i	Akım
j	Akım yoğunluğu
j_o	Değişken akım yoğunluğu
j_L	Limit akım yoğunluğu
K	Kimyasal reaksiyonlardaki denge sabiti
L	Elektrot kalınlığı
M	Moleküler ağırlık
$\dot{n}$	Molar debi
n_e	Elektron sayısı
N	Hücre sayısı
p	Kısmi basınç
P	Basınç
$\dot{Q}$	Birim zamanda transfer edilen ısı
r	Ohmik direnç
r_{por}	Ortalama gözenek yarıçapı
r_{SC}	Buhar- karbon oranı
$\bar{R}$	Evrensel gaz sabiti
$\bar{s}$	Molar entropi
T	Sıcaklık
T_d	Doyma sıcaklığı
U_a	Hava kullanım faktörü
U_f	Yakıt kullanım faktörü
V_h	Hücre voltajı
V_N	Nernst potansiyeli
V_{akt}	Aktivasyon polarizasyonu
V_{kon}	Konsantrasyon polarizasyonu
V_k	Voltaj kayıpları
V_{ohm}	Ohmik polarizasyon
x	Mol oranı
$\dot{W}$	Güç çıktısı
$\dot{x}$	Birim zamanda reaksiyona giren metanın mol sayısı
$\dot{y}$	Birim zamanda reaksiyona giren karbonmonoksitin mol sayısı
$\dot{z}$	Birim zamanda reaksiyona giren hidrojenin mol sayısı
β	Transfer katsayısı
δ	Akım akış yol mesafesi
ε	Gözeneklilik
ε_R	Rekuperatör etkinlik katsayısı
γ	Katsayı
η_I	I. kanun verimi
η_E	Ekserji verimi

ρ	Malzeme özdirenci
τ	Eğrilik-büğrülük

Alt İndisler

θ	Çevre şartları
an	Anot
ka	Katot
CH_4	Metan
CO	Karbonmonoksit
CO_2	Karbondioksit
D	Ekserji kaybı
H_2	Hidrojen
H_2O	Buhar
N_2	Nitrojen
O_2	Oksijen
ζ	Çıkan
g	Giren
i	Karışımındaki gaz bileşenlerinin türü
k	Yakıt hücresi elemanları
Top	Toplam
Q	Isı
W	Güç

Üst İndisler

f	fiziksel
k	kimyasal

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif akım
AIK	Atık ısı kazanı
DC	Doğrusal akım
EPK	Ekserjitik performans katsayısı
FK	Yakıt kompresörü
GT	Gaz türbini
HAT	Nemli hava türbini
HK	Hava kompresörü
KOYH	Katı oksit yakıt hücresi
KY	Katalitik yakıcı
LHV	Alt ısı değeri
M	Mikser
MHD	Manyetohidrokinamik
ÖR	Öncü reformer
REK	Rekuperatör

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	Tek bir tüpsel katı oksit yakıt hücresinin yapısı (Li ve Suzuki, 2004'den uyarlanmıştır).....	11
Şekil 2.2	Elektrokimyasal prosesin çalışma prensibi	12
Şekil 2.3	Hücre voltajı için model sonuçları ile deneysel verilerin karşılaştırılması	21
Şekil 2.4	Hücre gücü için model sonuçları ile deneysel verilerin karşılaştırılması.....	21
Şekil 2.5	Farklı elektrolit kalınlıklarında ohmik polarizasyonun hücre sıcaklığıyla değişimi ($j=3000 \text{ A/m}^2$)	22
Şekil 2.6	Farklı katot aktivasyon enerjisi değerlerinde aktivasyon polarizasyonun hücre sıcaklığıyla değişimi ($j=3000 \text{ A/m}^2$).....	23
Şekil 2.7	Farklı gözenek boyutlarında konsantrasyon polarizasyonun ve limit akım yoğunluğunun basınçla değişimi ($j=3000 \text{ A/m}^2$)	24
Şekil 2.8	Polarizasyonların akım yoğunluğuyla değişimi	25
Şekil 2.9	Basıncın hücre voltajı ve gücüne etkisi.....	26
Şekil 2.10	Hücre işletme sıcaklığının hücre voltajı ve gücüne etkisi.....	27
Şekil 2.11	Hücre işletme sıcaklığıyla hücre verimi ve üretilen ısınnın değişimi ($j=3000 \text{ A/m}^2$).....	27
Şekil 2.12	Hücre verimi ve ısı üretiminin işletme basınç ile değişimi	28
Şekil 3.1	Reformasyonlu tüpsel KOYH modülü	33
Şekil 3.2	Reformasyonlu tüpsel KOYH modülü	34
Şekil 3.3	Mikser komponenti	35
Şekil 3.4	Öncü-reformer komponenti	37
Şekil 3.5	Tüpsel yakıt hücre komponenti	41
Şekil 3.6	KOYH modülündeki katalitik yakıcı komponenti.....	45
Şekil 3.7	KOYH modülündeki ısı değiştiricisi.....	47
Şekil 3.8	İşletme basıncına göre KOYH modülünün ekserjitik performans katsayısı, ekserji verimi, I. kanun verimi değişimleri.....	53
Şekil 3.9	İşletme basıncına göre KOYH modülünün güç ve toplam ekserji kaybı değişimleri.....	54
Şekil 3.10	İşletme basıncına göre KOYH modül komponentlerinin ekserji kaybı değişimleri.....	54
Şekil 3.11	İşletme basıncına göre KOYH modül komponentlerin ekserji verimlerindeki değişimleri.....	55
Şekil 3.12	Hücre işletme sıcaklığına göre KOYH modülünün ekserjitik performans katsayısı, ekserji verimi, I. kanun verimi değişimleri.....	56
Şekil 3.13	Hücre işletme sıcaklığına göre KOYH modülünün güç ve toplam ekserji kaybı değişimleri.....	57
Şekil 3.14	Hücre işletme sıcaklığına göre KOYH modül komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri.....	57
Şekil 3.15	Hücre işletme sıcaklığına göre KOYH modül komponentlerinin ekserji verimlerindeki değişimleri	58
Şekil 3.16	Akım yoğunluğuna göre KOYH modülünün ekserjitik performans katsayısı, ekserji verimi, I. kanun verimi değişimleri.....	59
Şekil 3.17	Akım yoğunluğuna göre KOYH modülünün güç ve toplam ekserji kaybı değişimleri.....	60
Şekil 3.18	Akım yoğunluğuna göre KOYH modül komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri.....	60
Şekil 3.19	Akım yoğunluğuna göre KOYH modülündeki komponentlere ait ekserji verimlerinin değişimleri.....	61
Şekil 3.20	Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH modülünün ekserjitik performans katsayısı, ekserji verimi, I. kanun verimi değişimleri.....	62

Şekil 3.21 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH modülünün güç ve toplam ekserji kaybı değişimleri.....	63
Şekil 3.22 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH modül komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri.....	63
Şekil 3.23 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH modül komponentlerin ekserji verimlerindeki değişimleri.....	64
Şekil 3.24 Buhar-karbon oranına göre KOYH modülünün ekserjitik performans katsayısı, ekserji verimi ve I. Kanun verimi değişimleri	65
Şekil 3.25 Buhar-karbon oranına göre KOYH modülünün güç ve toplam ekserji kaybı değişimleri.....	65
Şekil 3.26 Buhar-karbon oranına göre KOYH modül komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri.....	66
Şekil 3.27 Buhar-karbon oranına göre KOYH modül komponentlerin ekserji verimlerindeki değişimleri.....	66
Şekil 3.28 Hava giriş sıcaklığına göre KOYH modülünün eksersi performans katsayısı, ekserji verimi, I. kanun verimi değişimleri.....	68
Şekil 3.29 Hava giriş sıcaklığına göre KOYH modülünün güç ve toplam ekserji kaybı değişimleri.....	68
Şekil 3.30 Hava giriş sıcaklığına göre KOYH modül komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri.....	69
Şekil 3.31 Hava giriş sıcaklığına göre KOYH modül komponentlerin ekserji verimlerindeki değişimleri.....	69
Şekil 3.32 Yakıt giriş sıcaklığına göre KOYH modülünün eksersi performans katsayısı, ekserji verimi, I. kanun verimi değişimleri.....	70
Şekil 3.33 Yakıt giriş sıcaklığına göre KOYH modülünün güç ve toplam ekserji kaybı değişimleri.....	71
Şekil 3.34 Yakıt giriş sıcaklığına göre KOYH modülünün güç ve toplam ekserji kaybı değişimleri.....	71
Şekil 3.35 Yakıt giriş sıcaklığına göre KOYH modül komponentlerin ekserji verimlerindeki değişimleri.....	72
Şekil 4.1 KOYH güç üretim sistemi.....	76
Şekil 4.2 Reküperatör 1	77
Şekil 4.3 Reküperatör 2	79
Şekil 4.4 (a) Hava kompresörü, (b) kompresördeki sıkıştırma prosesinin sıcaklık-entropi diyagramı	80
Şekil 4.5 (a) Yakıt kompresörü, (b) kompresördeki sıkıştırma prosesinin sıcaklık-entropi diyagramı	82
Şekil 4.6 Basınç oranına göre KOYH sisteminin ekserjitik performans katsayısı, ekserji verimi, I. Kanun verimi değişimleri.....	87
Şekil 4.7 Basınç oranına göre KOYH sisteminde net güç ve diğer komponentlerdeki güç üretiminin veya tüketiminin değişimi	88
Şekil 4.8 Basınç oranına göre KOYH sistemindeki toplam ekserji ve toplam ekserji kaybı değişimleri.....	88
Şekil 4.9 Basınç oranına göre KOYH sistem komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri.....	89
Şekil 4.10 Basınç oranına göre KOYH sistem komponentlerinin ekserji verimi değişimleri..	89
Şekil 4.11 Hücre işletme sıcaklığına göre KOYH sisteminin ekserjitik performans katsayısı, ekserji verimi ve I. kanun verimi değişimleri	91
Şekil 4.12 Hücre işletme sıcaklığına göre KOYH sisteminde net güç ve diğer komponentlerdeki güç üretim veya tüketim değişimleri	91
Şekil 4.13 Hücre işletme sıcaklığına göre KOYH sistemindeki toplam ekserji ve toplam ekserji kaybı değişimleri	92

Şekil 4.14 Hücre işletme sıcaklığına göre KOYH sistem komponentlerinin ekserji kaybı değişimleri.....	92
Şekil 4.15 Hücre işletme sıcaklığına göre KOYH sistem komponentlerinin ekserji verimi değişimleri.....	93
Şekil 4.16 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri	94
Şekil 4.17 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH sisteminde ilgili komponentlerin güç üretimi, tüketimi ve net gücün değişimleri	95
Şekil 4.18 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri	95
Şekil 4.19 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH sistem komponentlerin ekserji kaybı değişimleri.....	96
Şekil 4.20 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri	96
Şekil 4.21 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri	98
Şekil 4.22 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH sisteminde ilgili komponentlerin güç üretimi, tüketimi ve net gücün değişimleri	98
Şekil 4.23 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri.....	99
Şekil 4.24 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH sistem komponentlerin ekserji kaybı değişimleri.....	99
Şekil 4.25 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri	100
Şekil 4.26 Reküperatör etlinliğine göre KOYH sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri	101
Şekil 4.27 Reküperatör etlinliğine göre KOYH sisteminde ilgili komponentlerin güç üretimi, tüketimi ve net gücün değişimleri.....	102
Şekil 4.28 Reküperatör etlinliğine göre KOYH sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri.....	102
Şekil 4.29 Reküperatör etlinliğine göre KOYH sistem komponentlerin ekserji kaybı değişimleri.....	103
Şekil 4.30 Reküperatör etlinliğine göre KOYH sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri.....	103
Şekil 4.31 Kompresör izentropik verimlerine göre KOYH sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri	104
Şekil 4.32 Kompresör izentropik verimlerine göre KOYH sisteminde ilgili komponentlerin güç üretimi, tüketimi ve net gücün değişimleri	105
Şekil 4.33 Kompresör izentropik verimlerine göre KOYH sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri	105
Şekil 4.34 Kompresör izentropik verimlerine göre KOYH sistem komponentlerin ekserji kaybı değişimleri.....	106
Şekil 4.35 Kompresör izentropik verimlerine göre KOYH sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri	106
Şekil 5.1 KOYH kojenerasyon sisteminin şematik gösterimi	109
Şekil 5.2 Atık ısı kazanı şematik gösterimi	110
Şekil 5.3 Atık ısı kazanı sıcaklık diyagramı	110
Şekil 5.4 Pompa komponenti.....	112
Şekil 5.5 Basınç oranına göre KOYH kojenerasyon sisteminin ekserjitik performans katsayısı ve ekserji verimi değişimi	116
Şekil 5.6 Basınç oranına göre KOYH kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, toplam ekserji	

kayıbı ve ürünlerin ekserji değerlerinin değişimi	116
Şekil 5.7 Basınç oranına göre KOYH kojenerasyon sisteminine ait komponentlerdeki ekserji kaybı değişimi	117
Şekil 5.8 Basınç oranına göre KOYH kojenerasyon sisteminine ait komponentlerin ekserji verimi değişimi	117
Şekil 5.9 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH kojenerasyon sisteminin ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri	119
Şekil 5.10 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimi	119
Şekil 5.11 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji kaybı değişimleri.....	120
Şekil 5.12 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH kojenerasyon sisteminde ilgili komponentlerin ekserji verim değişimleri	120
Şekil 5.13 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH kojenerasyon sisteminin ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri.....	121
Şekil 5.14 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri.....	122
Şekil 5.15 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji kaybı değişimleri.....	122
Şekil 5.16 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri	123
Şekil 5.17 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH kojenerasyon sisteminin ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri	124
Şekil 5.18 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri.....	124
Şekil 5.19 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH kojenerasyon sistem komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri	125
Şekil 5.20 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri	125
Şekil 5.21 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH'li kojenerasyon sisteminin ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri	127
Şekil 5.22 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri	127
Şekil 5.23 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH kojenerasyon sistemin komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri.....	128
Şekil 5.24 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri	128
Şekil 5.25 Kompresör izentropik verimlerine göre KOYH kojenerasyon sisteminin ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri	129
Şekil 5.26 Kompresör izentropik verimlerine göre KOYH kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri	130
Şekil 5.27 Kompresör izentropik verimlerine göre KOYH kojenerasyon sistem komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri.....	130
Şekil 5.28 Kompresör izentropik verimlerine göre KOYH kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri	131
Şekil 5.29 AIK'ındaki minimum sıcaklık farkına göre KOYH kojenerasyon sisteminin ekserji verimi, ekserjitik performans katsayısı değişimleri	132
Şekil 5.30 AIK'ındaki minimum sıcaklık farkına göre kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri, toplam ekserji kaybı ve AIK'nın ekserji verimi değişimleri	132
Şekil 6.1 KOYH-GT hibrit sistemi.....	137
Şekil 6.2 (a)Gaz türbini komponenti, (b) performansını değerlendirmek için kullanılan	

sıcaklık-entropi diyagramı	138
Şekil 6.3 Basınç oranına göre KOYH-GT hibrit sisteminin EPK, I.Kanun verimi ve ekserji verimi değişimleri	143
Şekil 6.4 Basınç oranına göre KOYH-GT hibrit sisteminde net güç ve diğer komponentlerdeki güç üretim ve tüketim değişimleri	143
Şekil 6.5 Basınç oranına göre KOYH-GT hibrit sisteminin toplam ekserji kaybı ve ürünlerin ekserji değişimleri	144
Şekil 6.6 Basınç oranına göre KOYH-GT hibrit sistemine ait komponentlerdeki ekserji kaybı değişimleri	144
Şekil 6.7 Basınç oranına göre KOYH-GT hibrit sistemine ait komponentlerin ekserji verimi değişimleri	145
Şekil 6.8 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH-GT hibrit sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri	146
Şekil 6.9 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH-GT hibrit sisteminde ilgili komponentlerin güç üretim, tüketim ve net güç değişimleri	146
Şekil 6.10 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH-GT hibrit sisteminin ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri	147
Şekil 6.11 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH-GT hibrit sistemindeki komponentlerin ekserji kaybı değişimleri	147
Şekil 6.12 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH-GT hibrit sisteminde ilgili komponentlerin ekserji verim değişimleri	148
Şekil 6.13 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH-GT hibrit sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri	149
Şekil 6.14 Yakıt kullanım faktörüne göre HOYH-GT hibrit sisteminde ilgili komponentlerin güç üretimi, tüketimi ve net gücün değişimleri	150
Şekil 6.15 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH-GT hibrit sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri	150
Şekil 6.16 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH-GT hibrit sistem komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri	151
Şekil 6.17 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH-GT hibrit sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri	151
Şekil 6.18 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH-GT sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri	152
Şekil 6.19 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH-GT sisteminde ilgili komponentlerin güç üretimi, tüketimi ve net gücün değişimleri	153
Şekil 6.20 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH-GT sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri	153
Şekil 6.21 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH-GT sistemindeki komponentlerin ekserji kaybı değişimleri	154
Şekil 6.22 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH-GT sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri	154
Şekil 6.23 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH-GT sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri	155
Şekil 6.24 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH-GT sisteminde ilgili komponentlerin güç üretimi, tüketimi ve net gücün değişimleri	156
Şekil 6.25 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH-GT sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri	156
Şekil 6.26 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH-GT sistemin komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri	157
Şekil 6.27 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH-GT sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri	157

Şekil 6.28 Gaz türbini izentropik verimine göre KOYH-GT sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri.....	158
Şekil 6.29 Gaz türbini izentropik verimine göre KOYH-GT sisteminde ilgili komponentlerin güç üretimi, tüketimi ve net gücün değişimleri	159
Şekil 6.30 Gaz türbini izentropik verimine göre KOYH-GT sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri	159
Şekil 6.31 Gaz türbini izentropik verimine göre KOYH-GT sistemin komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri	160
Şekil 6.32 Gaz türbini izentropik verimine göre KOYH-GT sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri	160
Şekil 7.1 KOYH-GT kojenerasyon sistemi	162
Şekil 7.2 Basınç oranına göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin EPK ve ekserji verimi değişimi.....	165
Şekil 7.3 Basınç oranına göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin toplam ekserji kaybı, toplam ekserji ve ürünlerin ekserji değişimleri.....	165
Şekil 7.4 Basınç oranına göre KOYH-GT kojenerasyon sistemine ait komponentlerdeki ekserji kaybı değişimleri	166
Şekil 7.5 Basınç oranına göre KOYH-GT'li kojenerasyon sistemine ait komponentlerin ekserji verimi değişimleri	166
Şekil 7.6 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri.....	167
Şekil 7.7 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri	168
Şekil 7.8 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH-GT kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji kaybı değişimleri.....	168
Şekil 7.9 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminde ilgili komponentlerin ekserji verim değişimleri	169
Şekil 7.10 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri	170
Şekil 7.11 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri.....	170
Şekil 7.12 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH-GT kojenerasyon sistem komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri.....	171
Şekil 7.13 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH-GT kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri	171
Şekil 7.14 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin ekserji verimi, ekserjitik performans katsayısı değişimleri	172
Şekil 7.15 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri	173
Şekil 7.16 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH-GT kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji kaybı değişimleri.....	173
Şekil 7.17 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH-GT kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri	174
Şekil 7.18 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri.....	175
Şekil 7.19 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri	176
Şekil 7.20 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH-GT kojenerasyon sistemin komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri.....	176
Şekil 7.21 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH-GT kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri	177

Şekil 7.22 Gaz türbini izentropik verimine göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri.....	178
Şekil 7.23 Gaz türbini izentropik verimine göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri	178
Şekil 7.24 Gaz türbini izentropik verimine göre KOYH-GT kojenerasyon sistemin komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri.....	179
Şekil 7.25 Gaz türbini izentropik verimine göre KOYH-GT kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri	179
Şekil 7.26 AIK'ındaki minimum sıcaklık farkına göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin ekserji verimi, ekserjitik performans katsayısı değişimleri	180
Şekil 7.27 AIK'ındaki minimum sıcaklık farkına göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri, toplam ekserji kaybı ve AIK'nın ekserji verimi değişimleri.....	181

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	İşletme şartları	20
Çizelge 2.2	Model için giriş verileri	20
Çizelge 3.1	Simülasyon giriş parametreleri	50
Çizelge 3.2	KOYH modülü için her noktadaki termodinamik özellikler	51
Çizelge 3.3	KOYH modülünün simülasyon sonuçları ve literatür ile karşılaştırılması	52
Çizelge 4.1	KOYH sistemi için simülasyon giriş verileri	84
Çizelge 4.2	KOYH sistemi için her noktadaki termodinamik özellikler	85
Çizelge 4.3	Simülasyon sonucunda hesaplanan performans değerleri	86
Çizelge 4.4	Komponentlere ait ekserji performans sonuçları	86
Çizelge 5.1	KOYH'li kojenerasyon sisteminin simülasyon giriş verileri	114
Çizelge 5.2	KOYH kojenerasyon sisteminin simülasyonu sonucunda elde edilen performans değerleri	114
Çizelge 5.3	KOYH kojenerasyon sistemi için her noktadaki termodinamik özellikler	115
Çizelge 6.1	KOYH-GT hibrit sistem modeli için simülasyon giriş verileri	140
Çizelge 6.2	SOFC-GT hibrit sisteminin simülasyon sonuçlarının doğrulanması	141
Çizelge 6.3	Hibrit sistemin her akış noktasındaki özellikleri ve molar oranları	141
Çizelge 6.4	Hibrit sistemindeki komponentlerin ekserji kaybı, ekserji verimi ve ekserji kaybı oranları	142
Çizelge 7.1	KOYH-GT kojenerasyon sisteminin simülasyonu sonucunda elde edilen performans değerleri	163
Çizelge 7.2	KOYH-GT kojenerasyon sistemi için her noktadaki termodinamik özellikler	164

ÖNSÖZ

Tez konusunun belirlenmesinden tamamlanma aşamasına kadar geçen uzun çalışma sürecinde her türlü destek ve ilgisini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Bahri ŞAHİN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Görüşlerinden istifade ettiğim değerli hocalarım Prof. Dr. İsmail TEKE, Prof. Dr. A. Korhan BİNARK ve Prof.Dr. Olcay KINCAY'a teşekkür ederim.

Karşılaştığım problemlerin aşılmasında fikirleriyle her zaman yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Hasan Hüseyin ERDEM'e vermiş olduğu destekten dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde sağladıkları maddi manevi destek ile her zaman yanımda hissettiğim aileme en içten şükranlarımı sunarım. Son olarak, kendisi de bir doktora öğrencisi olan sevgili eşim Ebru AKKAYA'ya bu uzun çalışma döneminde verdiği destek, gösterdiği sabır ve anlayıştan dolayı sonsuz teşekkürlerimi buradan iletmek isterim.

ÖZET

Katı oksit yakıt hücreli enerji üretim sistemleri, konvansiyonel sistemlere göre daha verimli ve çevresel açıdan daha duyarlı olmaları nedeni ile 21. yy'ın enerji üretim sistemleri olarak öngörülmektedir. Bu yeni teknolojiye dayanan enerji üretim sistemlerinin performans karakteristiklerini araştırmanın ve geliştirmenin en kolay, ucuz ve etkin yolu modelleme ve simülasyon çalışması yapmaktır.

Bu çalışma, katı oksit yakıt hücreli enerji üretim sistemlerinin performanslarını ve bu performanslar üzerinde çeşitli işletme ve dizayn parametrelerinin etkisini analiz etmeye imkan tanıyan termodinamik modeller oluşturmayı amaçlamaktadır. Katı oksit yakıt hücreli enerji üretim sistemlerini oluşturan komponentler ayrı ayrı ele alınmış ve elektrokimyasal, kimyasal ve termodinamik prosesler göz önünde bulundurularak matematiksel modelleri oluşturulmuştur. Öncelikle çalışmanın temelini oluşturan tüpsel bir katı oksit yakıt hücresinin ohmik, aktivasyon ve konsantrasyon polarizasyonlarını içeren elektrokimyasal model sunulmuştur. Daha sonra metanı hidrojene dönüştürebilen katı oksit yakıt hücre modülü geliştirilmiştir. Çeşitli komponentlerin (reküperatör, kompresör, gaz türbini, atık ısı kazanı) katı oksit yakıt hücre modülüne entegrasi ile ısı ve elektrik üretimi yapabilen farklı sistemler tasarlanmış ve matematiksel olarak modellenmiştir.

Sistem konfüğürasyonları bir bilgisayar yazılım programında kodlanarak bilgisayar modelleri oluşturulmuş ve verilen belirli şartlarda simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları literatürdeki deneysel veriler ile karşılaştırılarak geliştirilen modellerin güvenilirlikleri gösterilmiştir. Net güç çıktısı, I. kanun verimi, ekserji çıktısı, ekserji kaybı, ekserji verimi gibi kriterler sistemlerin performanslarını değerlendirmek için kullanılmıştır. Ayrıca, ekserjitik performans katsayısı (EPK) olarak adlandırılan ve birim ekserji kaybı başına elde edilen toplam ekserji değerini ifade eden yeni bir kriter, oluşturulan yakıt hücreli sistemlerinin performanslarını değerlendirmek için uygulanmıştır.

Sonuç olarak, tasarlanan modeller sayesinde katı oksit yakıt hücreli enerji üretim sistemleri alternatif performans kriterlerine dayalı olarak değerlendirilebilmekte, enerjistik ve ekserjistik açıdan en uygun işletme ve dizayn parametrelerinin belirlenmesinde bir açılım sağlanabilmektedir.

Anahtar kelimeler: Tüpsel katı oksit yakıt hücresi, elektrokimyasal model, polarizasyonlar, performans analizi, ekserji, ekserjitik performans katsayısı, gaz türbini, kojenerasyon, hibrit sistemler

ABSTRACT

Solid oxide fuel cells are conjectured as 21st century's energy generation systems due to high efficiency and environmental friendliness compared to conventional energy generation systems. Modeling and simulation studies of this new technology based energy generation systems are the easiest, cheapest and the most effective way to research and develop their performance characteristics.

This study aims to develop the thermodynamic models providing the performance analysis, and giving the effects of design and operation parameters on the performance of solid oxide fuel cell based energy generation systems. The mathematical models of solid oxide fuel cell based energy generation systems are developed with combining each component models taking into account the electrochemical, chemical and thermodynamic processes. Initially, an electrochemical model of single tubular solid oxide fuel cell is presented which is consisted of ohmic, activation and concentration polarizations. Afterwards, solid oxide fuel cell module model that is able to convert methane fuel to hydrogen is developed. Different systems producing heat and electricity are designed with integration various components (recuperator, compressor, gas turbine, heat recovery steam generation) to the solid oxide fuel cell module, and these systems are modeled mathematically.

Computer models of these system configurations are written in a computer software program, and simulations are carried out at the given certain conditions. Simulation results are compared to the experimental data in the literature, with this way; the developed models are validated. Net power output, first law efficiency, exergy output, exergy efficiency, exergy loss are used to evaluate performance of the systems. In addition, a new criterion, which is called the exergetic performance coefficient (EPC) and defined as the ratio of total exergy output to the total exergy loss, is applied to assess the performance of the systems.

As a conclusion, solid oxide fuel cell based energy generation systems can be evaluated on basis of alternative performance criteria, and also an informative expansion can be provided in the determination of the most convenient design and operation parameters based on energetic and exergetic approaches by means of this study.

Keywords: Tubular solid oxide fuel cell, electrochemical model, polarizations, performance analysis, exergy, exergetic performance coefficient, gas turbine, cogeneration, hybrid systems

1. GİRİŞ

1.1 Tezin Önemi

Enerji bütün medeniyetlerin dayandığı ve onunla yükseldiği temel güçlerden biridir. Modern yaşamın gelişmesi ve ilerlemesi, enerji tüketimindeki artış ile paralellik göstermektedir. Ülkelerin gelişmişlik ölçütlerinden biri de kişi başına düşen enerji tüketimidir. Teknoloji gelişimi, ekonomik büyüme, nüfus artışı ve yüksek sosyal yaşam kalitesi gibi gereksinimleri karşılamak için her yıl bir önceki yıldan daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Çok farklı formları arasında ısı ve elektrik enerjisi günlük yaşamda karşılaştığımız en önemli enerji türlerindendir. Günümüzde, dünyada üretilen elektrik enerjisinin önemli bir bölümü fosil yakıtlara dayalı gaz ve buhar türbinli sistemlerle elde edilmektedir. Fakat son on yılda elektrik üretim sistemlerini etkileyen yeni faktörler ortaya çıkmıştır. Özellikle yakın gelecekte bu faktörlerin etkisi daha çok hissedilecektir. Bu faktörler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Geçen yüzyılda enerji talebi, büyük merkezi güç üretim tesisleri inşa edilerek karşılanıyordu. Bunun nedeni termik çevrimler veya ısı makinalarının büyük tesislerde daha verimli olmalarıydı. Fakat günümüzde değişen ekonomik şartlar ve enerji politikaları enerji üretim sistemlerinin giderek merkezi büyük ölçekli sistemlerden bölgelere dağıtılmış daha küçük ölçekli sistemlere geçişi öngörmektedir. Küçük ölçekli ve bölge içinde dağıtılmış bu sistemler enerji iletim, dağıtım, arz güvenliği ve kullanım esnekliği yönünden önemli teknik ve ekonomik avantajlara sahiptir. Güç üretimi ve kullanımındaki bu yeni yaklaşım, enerji üretim endüstrisi için ilgi odağı olmaktadır. Bu ilgi, amaca uygun küçük ölçekli (5-5000 kW) enerji üreten teknolojilerin geliştirilmesini hızlandırmaktadır. Küçük ölçekli enerji üretim sistemlerindeki teknolojik gelişmeler ile bu sistemlerin verimlerinin iyileşmesi, maliyetlerinin düşmesi ve sektördeki payını giderek artması beklenmektedir. Fosil yakıt kaynaklarının sınırlı olması fosil yakıtlara dayanan enerji üretim sistemini etkileyen diğer önemli bir faktördür. Bugün, dünya enerjisinin % 85'inden fazlası fosil yakıtlardan temin edilmektedir (EIA, 2001). Enerji talebi sadece fosil yakıtlarla karşılanmaya devam ettikçe bu sınırlı miktardaki kaynak giderek azalacak ve fiyatlar sürekli artacaktır. Ayrıca, fosil yakıt kaynaklı konvansiyonel sistemlerle enerji üretimi, küresel çevre kirliliğinin en önemli sebeplerinden birisidir (Tanaka vd., 2000). Dünya genelinde fosil yakıt kullanımı nedeni ile atmosfere atılan CO₂ emisyonlarında 1990-2015 yılları arasında % 60 civarında bir artış beklenmektedir (Rao ve Samuelsen, 2003). CO₂'e ilave olarak, yanma reaksiyonuna dayalı fosil yakıtlı konvansiyonel güç üretim teknolojileri kullanıldığı zaman sülfüroksit, azotoksit, karbonmonoksit ve

yanmamış hidrokarbonlar da atmosfere atılmaktadır (Hart ve Hormandinger, 1998; Dincer, 2002). Bu durum yeni alternatif yakıt arayışı ile birlikte fosil yakıtların yüksek verimle enerjiye dönüşümünü sağlayacak yeni teknolojilerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Yukarıda belirtilen faktörler güç üretimine yeni bir yaklaşım için elverişli bir ortam hazırlamaktadır. Fosil yakıtların kullanım şeklini değiştirecek bu yaklaşım, çevresel etkiyi minimize ederken elektriği daha verimli üretecek ileri teknolojilerin geliştirilmesini sağlayacaktır. Direkt enerji üretim sistemleri içinde gelişme potansiyeli en yüksek olan yakıt hücreleri bu gereksinimleri karşılayacak ümit verici bir teknoloji olarak ortaya çıkmaktadır (Bedringas vd., 1997; Matelli ve Bazzo, 2005; Chan ve Ding, 2005).

Yakıt hücre sistemleri yakıtın kimyasal enerjisini elektrokimyasal olarak elektrik enerjisine direkt çeviren sistemlerdir (Hoogers, 2002; Larminie ve Dicks, 2004). Yakıt hücrelerinin birçok çeşidi vardır ve kullanılan elektrolit malzemesine göre isimlendirilmişlerdir. Fosforik asitli yakıt hücresi, proton değişim membranlı yakıt hücresi, ergiyik karbonatlı yakıt hücresi ve katı oksit yakıt hücresi (KOYH) en yaygın yakıt hücre tipleri arasında sayılabilir (Burt vd., 2004). Yakıt hücreleri otomobillerde, hava ve deniz araçlarında, stasyonær güç üretim sistemlerinde geniş bir uygulama potansiyeline sahiptir (Freeh vd., 2004). Bir yakıt hücresinin performans karakteristikleri onun işletme sıcaklığı ile oldukça ilgilidir. Proton değişim membranlı yakıt hücreleri gibi düşük sıcaklıklı yakıt hücre tipleri otomobil uygulamaları için uygundur, çünkü değişken yük talebine hızlı cevap verebilme özelliğine sahiptir. Diğer taraftan, ergimiş karbonatlı yakıt hücresi ve katı oksit yakıt hücreleri gibi yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt hücreleri yüksek verimlerinden dolayı stasyonær güç üretimi için daha elverişlidirler. Kullanılan yakıtla göre yüksek sıcaklıklı yakıt hücrelerinin termik verim değerleri % 40-55 aralığındadır (Pangalis vd., 2002). Bu verim günümüz konvansiyonel güç üretim sistemlerinin tek başlarına ulaşamadıkları bir değerdir (Lee ve Lark, 1998).

Yüksek sıcaklı yakıt hücreleri arasında KOYH teknolojik gelişimini daha hızlı sürdüren seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, KOYH'lerin 800-1000 °C arasındaki yüksek işletme sıcaklığına sahip olması gaz türbinleri (GT) ile kombinasyonunu mümkün kılmaktadır (Ghosh ve De 2003, 2006). KOYH-GT sistemlerinde, toplam elektrik üretiminin büyük bir çoğunluğu elektrokimyasal dönüşüm ile KOYH tarafından, geriye kalan kısmı ise KOYH'nin egzoz gazlarının gaz türbini tarafından kullanılması ile üretilmektedir. Böylece oluşan sinerji sayesinde yüksek verimlere ulaşılabilir (Harvey ve Richter, 1994; Song vd., 2005). İlk yapılan termodinamik modeller göstermiştir ki bu şekildeki bir hibrit sistemlerin yakıtın elektriğe dönüşüm verimi % 70'lere ulaşmaktadır (Benjamin vd., 1995; Lee ve Sudhoff,

1996; EG&G Services, 2004). Küçük ölçekli hibrit uygulamalar için bile % 58’lik elektrik dönüşüm verimi elde edilmektedir (Veyo vd., 2002). Ayrıca, bu sistemlerin atık ısı ısıtmada, soğutmada, endüstriyel proses işlemlerinde ve hidrojen üretiminde kullanılabilir.

1.2 Tezin Kapsamı

Yeni bir teknoloji olması nedeniyle, bu sistemlerin davranışları hakkında deneysel ve teorik çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Deneysel araştırmaların oldukça pahalı olması nedeni ile matematiksel modelleme çalışmaları, sistem davranışlarını analiz etmede kullanılabilecek ucuz ve etkili bir araçtır. Ayrıca sistem modelleme çalışmaları, mühendislik karar mekanizması için bir temel oluşturması nedeni ile yakıt hücreli sistem geliştirmede yol gösterici bir kılavuz özelliği taşımaktadır.

Bu çalışmada tüpsel KOYH teknolojisine dayanan enerji üretim sistemleri, sistematik olarak kademe kademe modellenerek elektrokimyasal, enerjistik ve ekserjistik performans yönlerinden incelenmiştir. Bunun için öncelikle bir tüpsel KOYH’ndeki elektrokimyasal prosesler modellenerek daha kompleks olan sistem analizleri için bir temel oluşturulmuştur. Oluşturulan bu elektrokimyasal model, reformasyon ve yanma gibi kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği komponentlerin de eklenmesiyle çok sayıda hücreden oluşan belirli bir tüpsel KOYH modülü esas alınarak geliştirilmiştir. Bu KOYH modülüne diğer yardımcı komponentlerin (ısı değiştiricileri, kompresörler gibi) ilavesiyle KOYH sistemi elde edilmiştir. Daha sonra elektriğin yanında bu sistemin atık ısısından ikinci ürün elde etmek amacıyla atık ısı kazanı (AIK) eklenerek KOYH kojenerasyon sistemi oluşturulmuştur. KOYH modülünün atık ısısından ilave bir elektrik daha elde etmek için bir ısı makinası olan gaz türbini eklenerek KOYH-GT hibrit sistemi elde edilmiştir. Bu oluşturulan hibrit sisteme yine AIK eklenerek KOYH-GT kojenerasyon sistemi tasarlanmıştır. Bütün bu sistemler bilgisayar ortamında simüle edilerek farklı işletme ve dizayn şartları altında alternatif kriterler için performans değişimleri detaylı olarak analiz edilmiştir.

1.3 Tezin Hedefi

Tezin hedefi, katı oksit yakıt hücresi içeren ısıtma ve elektrik üretimi yapabilen enerji üretim sistemlerinin matematik modellerini oluşturmak ve alternatif kriterler için performans analizleri yaparak optimal çalışma şartlarını belirlemektir.

1.4 Tezin Amaçları

Tezin hedefine ulaşmak için aşağıdaki amaçlar belirlenmiştir:

1. Yakıt hücreli sistem konfigürasyonlarının belirlenmesi
2. Teorik ve bilimsel temelin ortaya konması
3. Sistemlerin matematik modellerinin oluşturulması
4. Alternatif performans kriterlerinin belirlenmesi
5. Sistem modellerinin bilgisayar ortamında kodlanması
6. Sistem modellerinin simülasyonu ve doğrulanması
7. Performans analizlerinin gerçekleştirilmesi

1.5 Tezin Yöntemi

Bu tez çalışması için kullanılan yöntem yukarıdaki her bir amacı sistematik olarak vurgulayan görevler olarak aşağıda açıklanmıştır.

Görev 1: Yakıt hücreli sistem konfigürasyonlarının belirlenmesi

Tek bir yakıt hücresinden başlayarak çok daha kompleks olan KOYH-GT kojenerasyon sistemine kadar farklı sistemler, reformasyon, katalitik yakıcı, kompresörler, türbin, reküperatörler ve atık ısı kazanı gibi gibi komponentlerin ilavesiyle oluşturulmuş ve adım adım tezin ayrı bölümlerinde incelenmek üzere ele alınmıştır. Bu tez kapsamında incelenen sistem konfigürasyonları aşağıda sıralanmıştır:

- Tüpsel KOYH.(Bölüm 2)
- KOYH modülü(Bölüm 3)
- KOYH sistemi(Bölüm 4)
- KOYH kojenerasyon sistemi(Bölüm 5)
- KOYH-GT hibrit sistemi(Bölüm 6)
- KOYH-GT kojenerasyon sistemi(Bölüm 7)

Görev 2: Teorik ve bilimsel temelin ortaya konması

Yakıt hücreli sistemlerin performansını değerlendirmek için sistemleri oluşturan komponentlerdeki önemli prosesleri iyi anlamak ve kavramak gerekir. Bu nedenle, sistem komponentlerindeki fiziksel, kimyasal ve elektrokimyasal prosesler detaylı olarak incelenerek, sistemlerin performanslarını etkileyen önemli işletme ve dizayn parametreleri değerlendirilmiştir.

Görev 3: Sistemlerin matematik modellerinin oluşturulması

Yakıt hücreli sistem modellerini etkin bir şekilde oluşturmak için modüler dizayn kullanılmıştır. Bu modüller bir yakıt hücresi veya yakıt hücreli hibrit sisteminde bulunan gerçek komponentleri temsil etmektedir. Herbir modül için fiziksel, kimyasal ve elektrokimyasal prensiplere dayalı olarak matematik modeller oluşturulmuştur. Modüllere örnek olarak KOYH, ısı değiştiricisi, katalitik yakıcı, gaz türbini ve atık ısı kazanı sayılabilir. Bu modüller diğer modüllerin herhangi bir kombinasyonuna kolaylıkla eklenebilmekte veya gerektiğinde tek başlarına kullanılabilir. Bu yaklaşımın benimsinmesi modüllerin başarılı bir şekilde entegrasyonu ve böylece sistem modellerinin daha kolay oluşturulmasını sağlamıştır.

Görev 4: Alternatif performans kriterlerinin belirlenmesi

Enerji üretim sistemlerini değerlendirme yaygın olarak kullanılan ölçütler güç, kullanılan yakıt miktarı ve o yakıtın alt ısı değeri gibi parametrelerin bir fonksiyonu olan termik verimdir (bu çalışmada I. Kanun verimi olarak adlandırılmıştır). Isı ve elektrik gibi farklı türde enerji üreten sistemlerin karşılaştırılmasında ekserjitik performansın göz önüne alınması daha anlamlı sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada sistemlerin enerji analizleri ile birlikte ekserji analizleri de gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu çalışmada, ekserjitik performans katsayısı olarak adlandırılan yeni bir performans kriteri, oluşturulan yakıt hücreli sistem modellerine uygulanmıştır. Bu kriter hem I. Kanun hem de II. Kanun içinde barındıran bir özelliğe sahip olması nedeniyle, sistemlerin değerlendirmesinde daha etkin bir analiz yapma imkanı sağlamaktadır.

Görev 5: Sistem modellerinin bilgisayar ortamında kodlanması

EES (Engineering Equation Solver) programlama yazılımı, sistem modellerinin simülasyonu ve performans analizleri için kullanılmıştır. EES kimyasal prosesler içeren termodinamik sistemlerin kodlanmasında etkin bir yazılımdır. Grafik işleme yeteneğiyle verileri işleme ve değerlendirmede kolaylık sağlamaktadır. Herbir modüler komponent EES programında sistem simülasyon programının altmodelleri olarak kodlanmıştır. EES, SUBPROGRAM her bir komponent modülünün bağımsız şekilde oluşturulmasına izin vermektedir. Böylelikle, her bir modüler komponentin özelliklerini kullanıcıya doğrudan değiştirme fırsatı sağlanmıştır. “SUBPROGRAM” daki bu özellikler bağımsız değişkenlerdir. Bu değişkenlere örnek olarak uzunluk, genişlik, kalınlık, basınç oranı, akım yoğunluğu, izentropik verimler, reküperatör etkinlik katsayısı vb. sayılabilir. Bağımlı değişkenler ise bağımsız değişkenler yardımıyla

hesaplanır.

Görev 6: Sistem modellerinin simülasyonu ve doğrulanması

Verilen bağımsız değişkenlere göre her komponentin çıkış bilgileri iterasyonla hesaplanmaktadır. Bu hesaplanan değerler bir sonraki modülün giriş değerleri olmaktadır. Her bir modüler komponentin giriş ve çıkış bilgileri kaydedilerek, her akış noktasının termodinamik özellikleri elde edilmiştir. Yapılan simülasyon sonuçları Siemens Westinghouse şirketi tarafından geliştirilen tüpsel KOYH sistemlerinin deney sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Görev 7: Performans analizlerinin gerçekleştirilmesi

KOYH teknolojiye dayalı oluşturulan sistem veya hibrit sistemlerin performansları çeşitli dizayn ve işletme şartlarına bağlı olarak incelenmiştir. İşletme ve dizayn parametreleri olarak hücre işletme sıcaklığı, akım yoğunluğu, hava ve yakıt kullanım faktörleri, basınç oranı, reküperatör etkinlik katsayısı, atık ısı kazanındaki minimum sıcaklık farkı gibi parametreler seçilmiştir. Bu şekilde sistemlerin geniş bir işletme aralığında performansını maksimize eden optimal çalışma şartları belirlenmiştir.

1.6 Tezin Literatüre Katkısı

Tezin literatüre katkısı aşağıda sıralanmıştır:

- Tüpsel KOYH içeren sistem veya hibrit sistemlerin termodinamik analizleri için işletme şartlarının ve malzeme özelliklerinin bir fonksiyonu olarak ohmik, aktivasyon ve konsantrasyon polarizasyonlarını kapsayan detaylı, hızlı ve güvenilir sonuçlar veren bir elektrokimyasal model sunulması.
- Geliştirilen elektrokimyasal modelin reformasyonlu tüpsel bir KOYH modülünde kullanılarak, işletme şartlarının en geniş aralığında performans değerlendirmesi yapabilecek bir model ortaya konması.
- KOYH ve KOYH-GT hibrit sistemlerine dayalı elektrik ve ısı üretim amaçlı tesislerin sistem ve komponent bazında ekserjitik performansının işletme ve dizayn şartları ile değişiminin incelenmesi.
- KOYH sistemlerinin performanslarını değerlendirmede, ekserjitik performans katsayısı olarak adlandırılan alternatif bir performans kriterinin kullanılması.

2. TEK BİR TÜPSEL KATI OKSİT YAKIT HÜCRESİNİN PERFORMANS ANALİZİ

Bu bölümde tek bir tüpsel KOYH performansını simüle edecek bir model geliştirilmiştir. Bu geliştirilen model tüpsel hücreyi sürekli akışlı bir kontrol hacmi gibi davrandığını kabul etmektedir. İlave olarak, bu model hücre performansını etkileyen elektrokimyasal, ısı üretimi ve molar debi mekanizmalarını içermektedir. Geliştirilen model bu mekanizmaları içeren bir bilgisayar programında yazılarak simüle edilmiştir. Sonuç olarak, bu bölümün amaçlarını şu şekilde sıralamak mümkündür:

- Kompleks bir sistem analizinin temelini oluşturmak için tek bir tüpsel hücre davranışını temsil edecek doğrulanmış bir elektrokimyasal model geliştirmek,
- Çeşitli işletme şartları ve farklı hücre elemanlarının karakteristikleri için polarizasyon terimlerinin her birinin hücre voltajına etkilerini incelemek,
- Geniş bir işletme aralığında tüpsel KOYH performansının parametrik bir analizini gerçekleştirmek.

2.1 Önceki Çalışmalar

Bugüne kadar daha çok yakıt hücrelerinin en temel elemanı olan elektrolitler üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Örnek olarak, kayıpları minimize etmek için iyonik iletimin artmasına yönelik işletme sıcaklığını farklı elektrolitler geliştirilerek optimize ve test eden (Kim vd. 1999; Weber vd., 2003; Ji vd. 2005; Zhu vd. 2005), üretim maliyetlerini aşağıya çekmek için karmaşık üretim proseslerini minimize etmeyi amaçlayan (Basu vd., 2005) çalışmalar yapılmıştır. Malzeme üzerine yapılan çalışmalar hakkında daha fazla bilgi Singhal ve Kendal (2004) ve Steele (2001)'de bulunabilir. Aşağıda katı oksit yakıt hücreleri için yapılan modelleme ve performans değerlendirme çalışmalarının özetleri verilmiştir.

Achenbach (1994), düzlemsel KOYH'nin performans simülasyonu üzerinde detaylı bir çalışma yapan ilk araştırmacılardandır. Achenbach, düzlemsel bir KOYH'ni üç boyutlu ve zamana bağlı olarak modellemiştir. Bu çalışma dahili metan-buhar reformasyonunu ve anot çıkışındaki gaz karışımının geri beslemesini ve farklı akış şekillerinin etkisini içermektedir. Geliştirilen model gaz konsantrasyonlarını, akım yoğunluğunu, sıcaklık değişimini hesaplayabilen diferansiyel ve sonlu denklemleri kullanmaktadır. Ayrıca model değişen yükün hücre voltajına etkisini de hesaplamaktadır. Bu model ohmik kayıpları, anot ve katottaki aktivasyon polarizasyon kayıplarının etkisini dikkate almaktadır. Bu model yakıt hücresi araştırmaları için uygulanabilir faydalı sonuçlar sunmaktadır.

Bessette vd. (1995), bir KOYH için elektrokimyasal ve termal bir model geliştirmişlerdir. Bu model farklı şartlar altında güç-voltaj değişimini, tersinmezlikleri, sıcaklık değişimini ve akım dağılımını tahmin edebilmektedir. En önemli tersinmezlikler olarak konsantrasyon polarizasyonu, aktivasyon polarizasyonu ve ohmik kayıpları dikkate almışlardır. Bu modelin sonuçları tek bir hücrenin deneysel verileri ile karşılaştırılarak en büyük hatanın % 5 olduğu belirtilmiştir.

Ferguson vd. (1996), hidrojen yakıtlı ve farklı KOYH hücre geometrilerinin sistem performansına etkilerini incelemek için üç boyutlu model geliştirerek simülasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Model sıcaklık ve kimyasal gazların konsantrasyonlarının yanında elektrik potansiyelini de hesaplayabilmektedir. Çalışma hücre geometrilerinin, elektrolit malzemelerinin ve kanallardaki sıcaklığın hücre potansiyeline, sıcaklığına ve akım dağılımına etkisini inceleyen parametrik bir analiz sunmaktadır.

Hall vd. (1999), tüpsel bir KOYH'nin geçici rejimdeki çalışmasını modellemiş ve simüle etmişlerdir. Kullandıkları model bir boyutlu ve geometrisi basit olmasına karşın elektrokimyasal prosesler, ısı ve kütle akış transferleri modele dahil edilmiştir. Model sonuçları test verileri ile karşılaştırılmıştır.

Iwata vd. (2000), bilgisayar hesaplama kapasitelerinin artması ile daha kompleks iki ve üç boyutlu düzlemsel KOYH'ni modellemişlerdir. Simülasyon, hücre davranışını temsil edecek oldukça güvenilir sonuçlar vermiştir. Çalışmada ayrıca hücre boyunca akım ve sıcaklık dağılımları, farklı geri besleme oranları ve işletme basınç şartları incelenmiş ve polarizasyonların etkileri değerlendirilmiştir.

Yakabe vd. (2000), sonlu hacimler metodunu kullanarak anot destekli düzlemsel KOYH'ndeki ısı ve kütle transferlerini modellemişlerdir. Modelde gözenekli anot elektrodundaki gaz akışı için Darcy Kanunun kullanılması konsantrasyon polarizasyonunun tam olarak karakterize edilmesini sağlamıştır. Model sonuçlarının deneysel sonuçlar ile uyum içinde olduğu gösterilmiş ve yüksek yakıt kullanım faktörlerinde konsantrasyon polarizasyonun voltaj kaybında etkili olduğu belirtilmiştir.

Nagata vd. (2001), bir boyutlu model oluşturarak tüpsel bir KOYH'nin karakteristiklerini simüle etmişlerdir. Model katalist yoğunluğu ayarlanabilen tüpsel dahili reformasyon prosesini de kapsamaktadır. KOYH modülündeki termal gerilimleri düşürmek için optimum katalist yoğunluğu belirlenmiştir. Ayrıca, bazı işletme şartlarının performansa etkileri incelenerek sıcaklık ve gaz türlerinin dağılımı gösterilmiştir.

Yakabe vd. (2001), düzlemsel bir KOYH için sonlu hacimler yöntemini kullanarak üç boyutlu matematiksel model oluşturmuşlardır. Dahili veya harici buhar reformasyonu ve gözeneklerdeki gazların difüzyonu modele dahil edilmiştir. Modelde, gaz konsantrasyonlarının, sıcaklık dağılımının, hücre potansiyelinin ve akım yoğunluğunun hücre boyunca değişimi paralel ve karşı akışlı durumlar için hesaplanmıştır. Sonuç olarak buhar reformasyonun elektrolit üzerinde önemli bir termal gerilim oluşturduğu belirtilmiştir.

Aguiar vd. (2002), bir buhar-metan reformasyonlu KOYH'nin basınç ve işletme sıcaklığının performansa etkisini analiz etmek için 2 boyutlu model geliştirmişlerdir. Modelde sadece dolaylı reformasyon işleminin olduğu kabul edilerek farklı akış şekillerinin performansa etkileri analiz edilmiştir.

Petruzzi vd. (2003), düzlemsel bir KOYH'nin ilk çalıştırma, ısıtma, soğutma durumunda geçici ve sürekli rejim işletme şartlarındaki elektrokimyasal prosesleri incelemek üzere dinamik bir model geliştirmişlerdir. MATLAB yazılımında geliştirilen model, üç boyutlu geometrik kodlara dayanmakta ve malzeme özellikleri ile değişen işletme şartlarını dikkate almaktadır.

Recknagle vd. (2003), hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımına elektrokimyasal proseslerin ilavesi ile düzlemsel bir KOYH için simülasyon kodu geliştirmişlerdir. Düzlemsel yapının çeşitli parçaları için adyabatik sınır şartları oluşturularak sıcaklığın, akımın, yakıt kullanımının ve gaz konsantrasyonlarının hücre boyunca değişimleri incelenmiştir. Model üç farklı akış şekli için çalıştırıldığında, sıcaklık dağılımlarının homojen ve bu nedenle hücre malzemelerindeki termal gerilimlerinin en düşük olduğu durumun paralel akışlı seçenekte gerçekleştiği vurgulanmıştır.

Ota vd. (2003), tüpsel bir KOYH için iki boyutlu bir model geliştirmişlerdir. Model akım, sıcaklık ve gaz konsantrasyon dağılımını hem sürekli hem de geçici rejim şartlarında hesaplayabilmektedir. Simülasyonlar 22 mm çapındaki standart tüpsel bir hücre ve 2.4 mm çapındaki özel bir mikro-tüp hücre tipi için gerçekleştirilmiştir. Mikro-tüp hücre tipinin, işletme voltajı değiştiği zaman geçici rejim dalgalanmalarını azalttığı belirtilmiştir.

Li ve Chyu (2003), sürekli rejim şartlarında kontrol hacmi metodunu kullanarak tüpsel bir KOYH'ndeki ısı ve kütle transferleri ile kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonları iki boyutlu model ile incelemiştir. Model, KOYH'nin genel performansını değerlendirmek, detaylı bir sıcaklık ve gaz konsantrasyon dağılımlarını tanımlamak için kullanılmıştır. Model sonuçları diğer araştırmacıların sonuçları ve deneysel veriler ile oldukça uyum içinde olduğunu

gösterilmiştir.

Roos vd. (2003), disk yapılı bir düzlemsel KOYH için nümerik bir çalışma yapmışlardır. Model sonuçları işletme karakteristiklerinin yanında akım yoğunluğu, sıcaklık ve gaz türlerinin dağılımını vermektedir. Buna ilave olarak elektrot gözeneklerinin sistem davranışlarına etkisini belirlemişlerdir.

Campanari vd. (2004), sonlu hacimler metodunu kullanarak basınçlandırılmış bir tüpsel KOYH'nin elektrokimyasal ve ısı analizini gerçekleştirecek bir model geliştirmişlerdir. Model hücre davranışlarını ve genel modül performansını hesaplayabilmektedir. Bu kapsamda aktivasyon, konsantrasyon ve ohmik polarizasyonları ve dahili reformasyonun etkileri incelenmiştir. Çalışma aktivasyon polarizasyonunun etkisinin doğru değerlendirilmesinin hücre davranışı ve performans açısından oldukça önemli olduğunu vurgulamaktadır.

Gopalan ve DiGiuseppe (2004), tüpsel KOYH'lerinin yakıt kullanmadaki hassasiyetlerini modellemek için analitik ve nümerik hesaplamalar sunmuşlardır. Analitik model yakıt kullanım duyarlılık eğrilerinin şeklini açıklamak, nümerik modeli ise tüpsel KOYH'ndeki yakıt kaçaklarını belirlemek için kullanılmıştır. Sunulan çalışma kaçakların tüpsel KOYH'lerinin performansı üzerindeki etkisini göstermektedir.

Jia ve Shen (2005) ise çalışmalarında tüpsel bir KOYH'nin geçici ve sürekli rejimdeki özelliklerini simüle etmek için bir model geliştirmişlerdir. Elektrokimyasal model ohmik, aktivasyon ve konsantrasyon polarizasyonlarını içermektedir. Model akımı, gaz konsantrasyonlarını ve sıcaklık dağılımını hesaplayabilmektedir. Simülasyon sonuçları ohmik polarizasyonun katot destekli KOYH'nde en büyük voltaj kaybına neden olduğunu ve hücrenin orta kısmının diğer iki ucuna göre daha yüksek sıcaklığa ulaştığını göstermiştir.

Noren ve Hoffman (2005) geliştirdikleri bir model ile bir KOYH'nde voltaj-akım ilişkisini ve aktivasyon kaybının etkisini incelemişlerdir. Aktivasyon kayıpları nedeniyle voltaj kaybını açıklayan Butler-Volmer denklemini tartışmışlar ve çeşitli yaklaşımların uygulanabilirliğini incelemişlerdir.

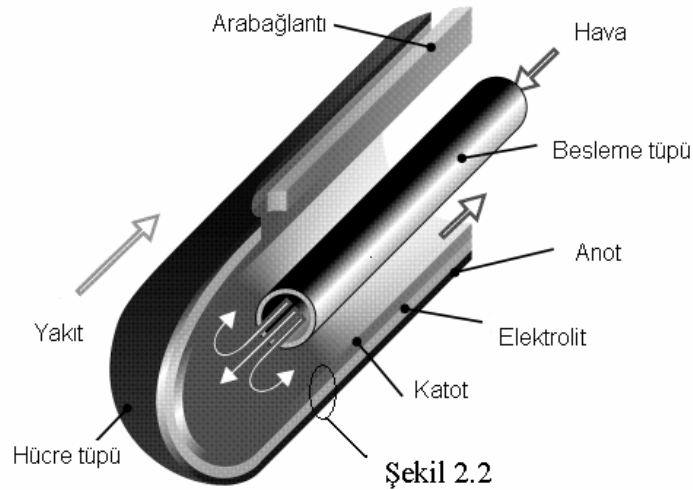
Laurencin vd. (2006), KOYH'nde dahili reformasyonun neden olduğu homejen olmayan sıcaklık dağılımını inlemişlerdir. Bunun için metan ile beslenen anot destekli hücre yapısı içinde hem sıcaklık değişim hızını hem de bölgesel gerilim dağılımını belirleyen bir termomekanik model geliştirmişlerdir. Bu çalışma, endotermik buhar reformasyon reaksiyonundan

dolayı hücre girişinde soğuma olduğunu göstermiştir.

Zhu ve Kee (2006) katı oksit yakıt hücresi için termodinamik bir model geliştirerek, maksimum verimin yakıt hücresinin yapısal özelliklerinden ve dahili polarizasyon kayıplarından bağımsız olduğu güç yoğunluğunun ise dahili polarizasyon kayıplarına ve hücre yapısına bağlı olduğunu göstermişlerdir.

2.2 Tüpsel KOYH'nin Özellikleri

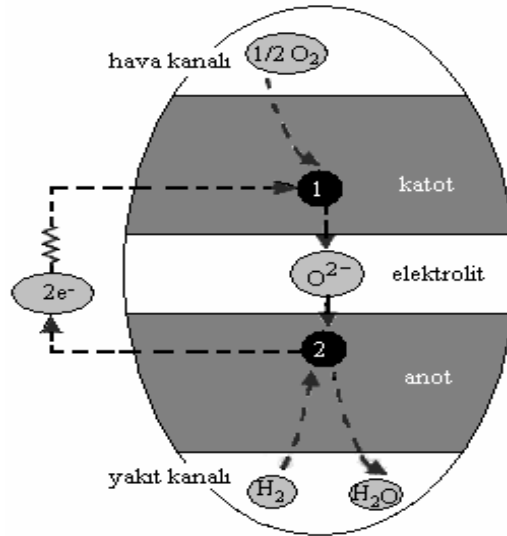
Siemens Westinghouse şirketinin öncülüğünü yaptığı en gelişmiş tüpsel KOYH dizaynı, seramik malzemelerden oluşan katı fazdaki hücre elemanlarının silindirik bir tüpün üzerine ince katmanlar formunda üst üste giydirilmesinden oluşmaktadır (Singhal, 2000). Hava elektrot destekli hücrenin son ticari prototipinde, hücrenin aktif uzunluğu ve çapı sırasıyla 150 cm ve 2.2 cm'dir (Bevc, 1997; George ve Bessette, 1998; Williams vd., 2004, 2005).



Şekil 2.1 Tek bir tüpsel katı oksit yakıt hücresinin yapısı (Li ve Suzuki, 2004'den uyarlanmıştır)

Şekil 2.1 şematik olarak tüpsel hücrenin elemanlarını göstermektedir. Lanthanum manganite malzemeye dayalı katot elektrodu 2.2 mm duvar kalınlığı ve % 30-35 gözeneklilik özelliklerine sahiptir. Yittria-stabilized zirconia'dan yapılmış elektrolit 40 mikron kalınlığındadır. Ni/YSZ anot ise 100-150 mikron kalınlığındadır. Doped lanthanum chromite'ten yapılmış ara bağlantı elemanı katot elektrodu boyunda ve 85 mikron kalınlığa sahiptir (EG&G Services, 2004).

Şekil 2.2 tüpsel bir KOYH’nde gerçekleşen elektrokimyasal prosesi şematik olarak göstermektedir. Hem hidrojen hem de karbon monoksit bu tip yakıt hücresinde elektrokimyasal olarak oksitlenebilir. Fakat hidrojenin oksitlenme reaksiyonunun karbon monoksitin oksitlenmesinden daha hızlı olduğu daha önceki çalışmalarda belirtilmiştir (Hernandez-Pacheco vd., 2005). Bu nedenle genellikle elektrokimyasal reaksiyona sadece hidrojenin katıldığı kabul edilmektedir.



Şekil 2.2 Elektrokimyasal prosesin çalışma prensibi

Yakıt hücresinin çalışması esnasında, hava kanalındaki oksijen yükü bağlantılı katotta emilir. Katot elektrodunda meydana gelen reaksiyon, emilen oksijen gazlarının dış yükten gelen elektronlar tarafından iyonize edilmesidir ve aşağıdaki gibi ifade edilir:



Yakıt kanalındaki hidrojen anot elektrodunda absorbe edilir. Sonra elektrolitin içinden geçen oksijen iyonları anot-elektrolit ara yüzünde hidrojenle reaksiyona girer. Bu reaksiyon sonucunda H₂O ve iki elektron açığa çıkar. Bu reaksiyon aşağıdaki gibidir:



Toplam elektrokimyasal reaksiyon aşağıdaki reaksiyon ile gösterilir:



Elektrokimyasal reaksiyon ekzotermik bir reaksiyondur. Elde edilen ısı enerjisi, yakıt hücresi çıkışındaki gaz karışımının sıcaklığını artırmak için kullanılır.

$$\Delta H_{H_2O} = \Delta G + T\Delta S = W + Q \quad (2.4)$$

burada, ΔH_{H_2O} elektrokimyasal reaksiyondaki entalpi değişimini, ΔG maksimum elektrik işini temsil eden Gibbs bağımsız enerji değişimini ve ΔS ısıya dönüştürülen reaksiyon entropi değişimini göstermektedir.

2.3 KOYH'nin Elektrokimyasal Modeli

Çalışmanın amaçları doğrultusunda, geliştirilecek model aşağıdaki özellikleri içermelidir:

- Hesaplamayı hızlı ve doğru bir şekilde yapmalıdır,
- Hücre performansını doğrudan matematiksel bir yaklaşımla hesaplamalıdır,
- Geniş bir işletme aralığında faydalı olmalıdır,
- Daha kompleks güç üretim çevrimlerine kolayca entegre edilebilmelidir.

Modelde göz önüne alınan yakıt hücresi bir önceki alt başlıkta özellikleri verilen katot elektrot destekli tüpsel KOYH'dir. Tüpsel KOYH tek bir kontrol hacmi olarak dikkate alınmıştır. Ayrıca, bu model Nernst potansiyelini ve ohmik, aktivasyon ve konsantrasyon olarak adlandırılan üç polarizasyon terimini de içermektedir. Anot giriş kompozisyonu hesaplamalarda kolaylık sağlaması için hidrojen ve buhar karışımı şeklinde alınmıştır. Katot girişinde havanın kompozisyonu % 79 N₂ ve % 21 O₂'den oluştuğu kabulü yapılmıştır. İşletme şartları hücre sıcaklığı, basıncı, yakıt ve hava kullanım faktörleri, giriş molar oranları ve akım yoğunluğudur. Akım yoğunluğu bağımsız değişken olarak seçildiğinde, diğer işletme şartları sabit parametreler olarak alınmıştır. Hücre geometrisi ve malzeme özellikleri ile ilgili giriş verileri girildikten sonra oluşturulan model, bağımlı değişken olarak hücre voltajı, polarizasyonları, verimi, ısı üretimini ve elektriksel gücü model çıktısı olarak belirler.

Hesaplama prosedürü şu şekilde açıklanabilir: hücre akımı verilen akım yoğunluğu değeri için belirlenir. Elektrokimyasal reaksiyon için gerekli olan hidrojen ve oksijen miktarı belirlenen akım miktarı için hesaplanır. Verilen bir hava ve yakıt kullanım faktörü değerleri için anot ve katot girişindeki molar debiler belirlenir. Kütle dengesi kullanılarak anot ve katottaki çıkış debileri hesaplanır. Bu işlemten sonra, hücre voltajı verilen hücre işletme sıcaklığı ve basıncı için Nernst ve polarizasyon denklemleri sayesinde bulunur. Son olarak, elektrokimyasal reaksiyonun ürünleri olan ısı ve elektriksel güç hesaplanır.

2.3.1 Nernst potansiyeli

Yakıt hücresi dış yük ile bağlantılı olmadığı durumda hücreden akım geçişi olmaz ve hücre voltajı açık çevrim voltajına eşit olur. Bir hücre için açık çevrim voltajı, elektrokimyasal reaksiyon için Nernst potansiyeline eşit olduğu kabul edilir (Noren ve Hoffman, 2005).

Massardo ve Lubelli (2000) ve Costamagna vd. (2001) gibi literatürdeki bazı modeller Nernst potansiyelini hücre çıkışındaki her bir gaz türünün kısmi basınçlarını kullanarak hesaplamışlardır. Fakat hücre voltajı hücrenin girişinden çıkışına doğru bir azalma gösterdiği için hücrenin giriş ve çıkıştaki gazların kısmi basınçlarının kullanılmasıyla ortalama bir Nernst potansiyeli hesaplamak daha uygun olacaktır. Bu nedenle, Nernst potansiyeli aşağıda belirtilen denklemler ile yazılabilir:

$$V_N = \frac{V_{N,g} + V_{N,\zeta}}{2} \quad (2.5)$$

$$V_{N,g} = -\frac{\Delta G^o}{n_e F} - \frac{\bar{R}T}{n_e F} \ln \left(\frac{p_{g,H_2O}}{p_{g,H_2} \sqrt{p_{g,O_2}}} \right) \quad (2.6)$$

$$V_{N,\zeta} = -\frac{\Delta G^o}{n_e F} - \frac{\bar{R}T}{n_e F} \ln \left(\frac{p_{\zeta,H_2O}}{p_{\zeta,H_2} \sqrt{p_{\zeta,O_2}}} \right) \quad (2.7)$$

burada ΔG^o Gibbs enerjisindeki değişim, n_e elektrokimyasal reaksiyona giren elektron sayısı, $\bar{R}$ evrensel gaz sabiti, F Faraday sabiti, T hücre sıcaklığı ve p gaz karışımındaki ilgili gazın kısmi basıncıdır. g ve ζ sırasıyla hücre giriş ve çıkışını temsil eden alt indislerdir.

Hücre dış yüke doğru akım üretmeye başladığında, hücre denge durumundan uzaklaşır ve hücre voltajı tersinmezliklerden dolayı düşer. Bu tersinmezliklerin başlıca nedenleri ohmik, aktivasyon ve konsantrasyon polarizasyonlarıdır. Bu polarizasyonlar voltaj kayıpları olarak düşünülebilir ve aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$V_k = V_{ohm} + V_{akt} + V_{kon} \quad (2.8)$$

Buna göre, hücre voltajı şu şekilde ifade edilebilir:

$$V_h = V_N - V_k \quad (2.9)$$

2.3.2 Ohmik polarizasyon

Ohmik polarizasyonu elektrotlar, elektrolit ve arabağlantı komponentlerindeki malzeme ara yüzleri boyunca meydana gelen elektron ve iyon taşıma proseslerinde her bir komponentin gösterdiği direnç ile ilgilidir ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$V_{ohm} = i \sum_k r_k \quad (2.10)$$

$$r_k = \sum_k \frac{\rho_k \delta_k}{A} \quad (2.11)$$

$$\rho_k = \sum_k a_k \exp(b_k / T) \quad (2.12)$$

burada, i akım, r_k ilgili komponentin ohmik direnci, δ_k ilgili komponentteki akımın akış yol uzunluğu, ρ_k ilgili komponentin malzeme özdirencidir. a ve b komponent malzemeleriyle ilgili katsayılarıdır.

2.3.3 Aktivasyon polarizasyonu

Elektrokimyasal reaksiyonlar içeren kimyasal reaksiyonlar, reaksiyona giren gaz bileşenleri tarafından aşılması gereken enerji bariyerleri içerirler (Chan vd., 2001). Aktivasyon polarizasyonu bu enerji bariyerini aşmak için harcanması gerekli ilave potansiyel olarak düşünülebilir. Aktivasyon polarizasyonu yaygın olarak doğrusal akım potansiyeli veya Tafel denklemleri ile tanımlanmaktadır. Polarizasyon modelleriyle ilgili çalışmalarda, aktivasyon polarizasyonu için Tafel ve doğrusal akım potansiyel denklemlerinin uygunluk ve uygulanabilirlik aralıkları tartışılmıştır (Chan vd., 2001; Zhu ve Kee, 2003). Ayrıca, bu polarizasyonu hesaplamak için basitliklerinden dolayı genellikle yarı ampirik korelasyonlar kullanılmıştır. Fakat işletme şartlarının geniş bir aralığında doğrulukları tartışmalıdır. Bu basitleştirilmiş modeller yerine, Hernandez-Pacheco vd., (2004) Butler-Volmer denklemi daha doğru bir sonuç vermektedir ve şu şekilde ifade edilmektedir (Costamagna vd., 2004):

$$j = j_o \left[\exp\left(\frac{\beta n_e F V_{akt}}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\beta) n_e F V_{akt}}{RT}\right) \right] \quad (2.13)$$

burada, j akım yoğunluğu, j_o değişken akım yoğunluğu, β transfer katsayısıdır. Transfer katsayısı aktivasyon enerji bariyerini etkiler ve polarizasyondaki değişim oranı olarak tanımlanır. Bu değer yakıt hücresi uygulamaları için genellikle 0.5 olarak alınır (Ni vd.,

2006). Değişken akım yoğunluğu, denge potansiyelindeki ileri ve geri yöndeki elektrot reaksiyon oranıdır. Değişken akım yoğunluğunun yüksek değerlere sahip olması iyi bir yakıt hücre performansı demektir. Değişken akım yoğunluğu hücre malzemelerine, yapısına ve işletme şartlarına göre değişmesine rağmen, bazı çalışmalarda (Li ve Suziki 2004; Chan vd., 2001; Chan ve Xia, 2002) sabit bir değer olarak alınmıştır. Fakat değişken akım yoğunluğunun değeri, aktivasyon polarizasyonun değişen işletme şartları altında hücre potansiyeli üzerindeki etkisini belirtmek açısından önemlidir. Ancak bunun formülize edilmesi oldukça karmaşıktır. Bazı yazarlar değişken akım yoğunluğunu yarı-ampirik formüller kullanarak aşağıdaki gibi ifade etmişlerdir (Nagata vd., 2001; Campanari ve Iora, 2004).

$$j_{o,an} = \gamma_{an} \left(\frac{p_{H_2}}{P_o} \right) \left(\frac{p_{H_2O}}{P_o} \right) \exp \left(- \frac{E_{an}}{RT} \right) \quad (2.14)$$

$$j_{o,ka} = \gamma_{ka} \left(\frac{p_{O_2}}{P_o} \right)^m \exp \left(- \frac{E_{ka}}{RT} \right) \quad (2.15)$$

burada γ eksponansiyel bir katsayıdır, P_o çevre basıncıdır, E aktivasyon enerjisidir, an ve ka sırasıyla anot ve katot temsil eden üst indislerdir.

2.3.4 Konsantrasyon polarizasyonu

Konsantrasyon polarizasyonu, yakıt ve hava kanallarındaki gaz konsantrasyonları ile reaksiyonun gerçekleştiği yer arasındaki reaktant ve ürünlerin difüzyonları ile ilgilidir. Anot bölümündeki reaksiyon elektrot-elektrolit arayüzeyinde hidrojenin tüketilmesine neden olur. Yeni gelen yakıt, bu arayüzeye yeterince hızlı taşınmazsa hidrojenin kısmi basıncı bu arayüzeyde düşer. Bu olay katot tarafından gelen oksijen içinde geçerlidir. Bu polarizasyon binary ve Knudsen difüzyon modellerini de içeren Fick Kanunu'nu dikkate alarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Chan vd., 2003).

$$V_{kon} = V_{kon,an} + V_{kon,ka} \quad (2.16)$$

$$V_{kon,an} = \frac{\bar{R}T}{n_e F} \ln \left(\frac{1 - j / j_{L,H_2}}{1 + j / j_{L,H_2O}} \right) \quad (2.17)$$

$$V_{kon,ka} = \frac{\bar{R}T}{n_e F} \ln \left(\frac{1}{1 - j / j_{L,O_2}} \right) \quad (2.18)$$

burada, $j_{L,i}$ ilgili elektrotun i gazının difüzyonu için limit akım yoğunluğudur. Limit akım yoğunluğu söz konusu şartlardaki maksimum akım yoğunluğu olarak düşünülebilir. Limit akım yoğunluğunun değeri farklı işletme şartları ile değişir. Fakat Chan vd. (2002) limit akım yoğunluğunu sabit parametre olarak kullanmıştır. Bu durum geniş bir işletme aralığında hücre performansını doğru analiz etmeyi zorlaştırır. Bu tezde limit akım yoğunluğu, işletme şartlarına bağlı bir değişken olarak modele dahil edilmiştir. H_2 için limit akım yoğunluğu aşağıdaki denklemde olduğu gibi yazılabilir (Singhal ve Kendal, 2004):

$$j_{L,H_2} = \frac{n_e F D_{eff,H_2}}{R T L_{an}} P_{H_2} \quad (2.19)$$

burada, L ilgili elektrotun kalınlığı, D_{eff,H_2} gözenekli elektrotta moleküllerin hareket yolunu açıklamak için kullanılan efektif gaz difüzyon faktörüdür. Paralel gözenek modelini kullanarak, efektif difüzyon faktörü Knudsen difüzyonu ve binary difüzyon katsayısı ile hesaplanabilir (Chan vd., 2001):

$$\frac{1}{D_{eff,H_2}} = \frac{\varepsilon}{\tau} \left(\frac{1}{D_{H_2,k}} + \frac{1}{D_{H_2,H_2O}} \right) \quad (2.20)$$

burada, ε ve τ sırasıyla ilgili elektrotun gözeneklilik ve eğribüğürlük ifadeleridir. $D_{H_2-H_2O}$ H_2 'nin H_2 - H_2O karışımı içindeki binary difüzyon katsayısını ifade eder ve Fuller korelasyonu ile aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Todd ve Young, 2002):

$$D_{H_2-H_2O} = \frac{0.00143 T^{1.75}}{M_{H_2-H_2O}^{1/2} (v_{H_2}^{1/3} + v_{H_2O}^{1/3})^2 P} \quad (2.21)$$

burada, v ilgili gaz türünün spesifik Fuller difüzyon hacimlerini ve P işletme basıncı göstermektedir. $M_{H_2-H_2O}$ aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$M_{H_2-H_2O} = 2 \left(\frac{1}{M_{H_2}} + \frac{1}{M_{H_2O}} \right)^{-1} \quad (2.22)$$

burada, M ilgili gaz türünün moleküler ağırlığını temsil etmektedir.

Knudsen difüzyon katsayısı ortalama gözenek yarıçapı (gözeneklerin silindirik şeklinde olduğu kabul edilerek) ve ortalama gaz hareket yolu ile açıklanabilir. Gaz karışımındaki H_2 için Knudsen katsayısı aşağıda olduğu gibi yazılabilir:

$$D_{H_2,k} = 97.0 r_{por} \sqrt{\frac{T}{M_{H_2}}} \quad (2.23)$$

burada, r_{por} ortalama gözenek yarıçapıdır.

Hidrojen dışındaki gazların limit akım yoğunluğu da benzer şekilde hesaplanabilir.

2.3.5 Kütle dengesi

KOYH'nin giriş ve çıkışındaki kütle dengesi:

$$\dot{n}_{\zeta,H_2} = \dot{n}_{g,H_2} - \dot{z} \quad (2.24)$$

$$\dot{n}_{\zeta,H_2O} = \dot{n}_{g,H_2O} + \dot{z} \quad (2.25)$$

$$\dot{n}_{\zeta,O_2} = \dot{n}_{g,O_2} - \frac{\dot{z}}{2} \quad (2.26)$$

$$\dot{n}_{\zeta,N_2} = \dot{n}_{g,N_2} \quad (2.27)$$

burada $\dot{n}$ gaz bileşenlerinin molar debisini, $\dot{z}$ her saniye için elektrokimyasal reaksiyona giren hidrojenin mol sayısını göstermektedir. $\dot{z}$ verilen yakıt kullanım faktörüne (U_f) bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{z} = U_f \dot{n}_{g,H_2} \quad (2.28)$$

Yakıt hücresine giren oksijen miktarı hava kullanım katsayısına bağlı olarak;

$$\dot{n}_{g,O_2} = \frac{\dot{z}}{2U_a} \quad (2.29)$$

şeklinde ifade edilir.

2.3.6 Hücresinin elektriksel gücü, ısı ve verimi

Yakıt hücresinden elde edilen elektriksel güç hücre voltajının akım ile çarpılmasıyla aşağıdaki gibi belirlenir:

$$\dot{W}_h = V_h \cdot i \quad (2.31)$$

Denklemdaki akım miktarı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$i = 2 \cdot F \cdot \dot{z} \quad (2.30)$$

Yakıt hücresinin elektrokimyasal reaksiyonu sonucunda oluşan ısı üretimi aşağıdaki denklem ile ifade edilir (Chan vd., 2003b):

$$\dot{Q}_h = V_k \cdot i + T \Delta \bar{s}_{H_2O} \cdot \dot{z} \quad (2.32)$$

Yakıt hücre verimi elde edilen elektriksel gücün H_2O 'nun oluşum entalpisine oranı olarak ifade edilmiştir (Rao vd., 2004):

$$\eta = \frac{\dot{W}_h}{\dot{z} \cdot \Delta \bar{h}_{H_2O}} \quad (2.33)$$

2.4 Modelin Doğrulanması

Modelin doğruluğunu incelemek için, hesaplanan hücre voltajı-akım yoğunluğu ve güç-akım yoğunluğu eğrileri Siemens Westinghouse tarafından geliştirilen tüpsel KOYH'nin deneysel verileri (EG&G Services, 2002; Williams vd., 2004) ile karşılaştırılmıştır.

Deneysel testin işletme şartları Çizelge 2.1'de verilmiştir. Aynı işletme şartları modelin simülasyonunda da kullanılmıştır. Çizelge 2.2'de verilen diğer model giriş verileri Bessette vd. (1995a), Singhal (1997;2000), EG&G Services (2002), Weber ve Tiffée (2004), Campanari ve Iora (2004) ve Suwanwarangkul vd. (2003, 2006)'den alınmıştır.

Verilen verilere göre geliştirilen modelin simülasyon sonuçları hücre voltajı için Şekil 2.3'de, hücre güç çıktısı için Şekil 2.4'de verilmiş ve deneysel veriler ile karşılaştırılması sunulmuştur.

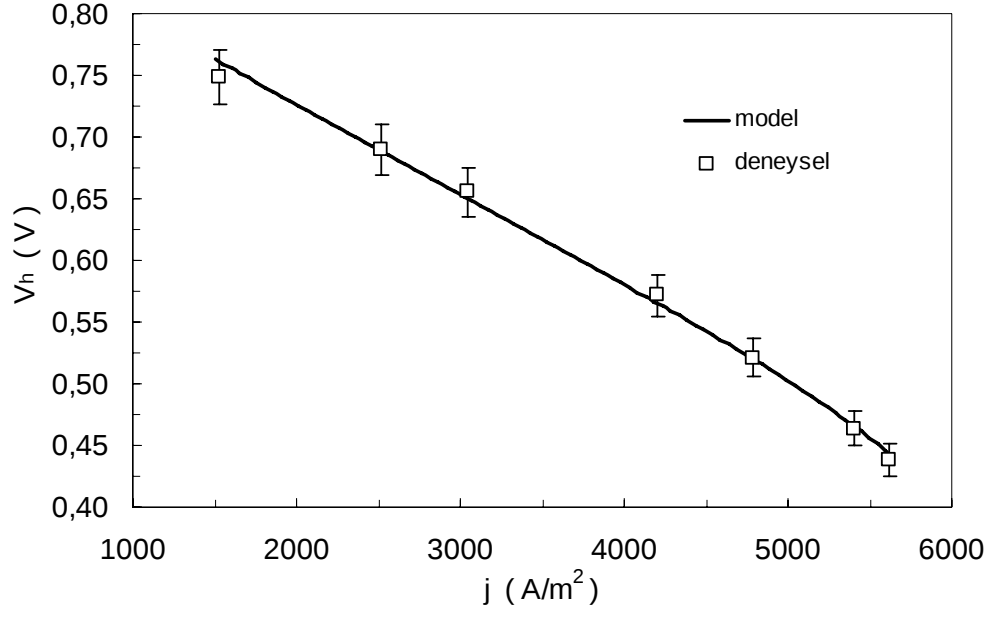
Model sonuçları ile deneysel verilerin uyum içinde olduğu görülmektedir. Hücre voltajı ve güç çıktısı için akım yoğunluğunun $1500-6500 \text{ A/m}^2$ aralığında gerçekleşen maksimum hata değeri % 3'ü geçmemektedir. Elde edilen bu sonuç geliştirilen modelin KOYH performansını değerlendirmede güvenilir olduğunu göstermektedir.

Çizelge 2.1 İşletme şartları

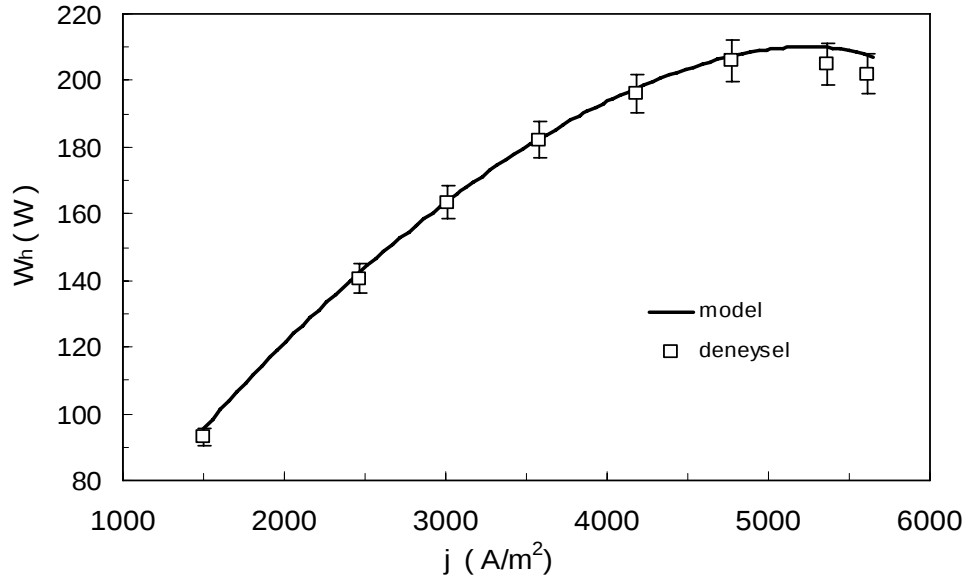
İşletme şartları	Değerler
Basınç, P (bar)	1
Hücre sıcaklığı, T (K)	1273
Yakıt kullanım faktörü, U_f (%)	85
Hava kullanım faktörü, U_a (%)	16.7
Yakıt molar oranı, $X_{H_2} - X_{H_2O}$ (%)	89-11

Çizelge 2.2 Model için giriş verileri

Ohmik polarizasyon			
Komponent	a (Ωm)	b (K)	δ (m)
Katot	0.0000811	600	0.0022
Anot	0.0000298	-1392	0.0001
Elektrolit	0.0000294	10350	0.00004
Arabağlantı	0.0012	4690	0.000085
Aktivasyon polarizasyonu			
$E_{act,an}$ (kJ/kmol)	110000		
$E_{act,ka}$ (kJ/kmol)	155000		
γ_{an} (A/m ²)	7×10^9		
γ_{ka} (A/m ²)	7×10^9		
Konsantrasyon polarizasyonu			
$r_{por,an}$ (m)	1×10^{-6}		
$r_{por,ka}$ (m)	1×10^{-6}		
ϵ_{an} (%)	30		
ϵ_{ka} (%)	30		
τ_{an}	3		
τ_{ka}	3		



Şekil 2.3 Hücre voltajı için model sonuçları ile deneysel verilerin karşılaştırılması

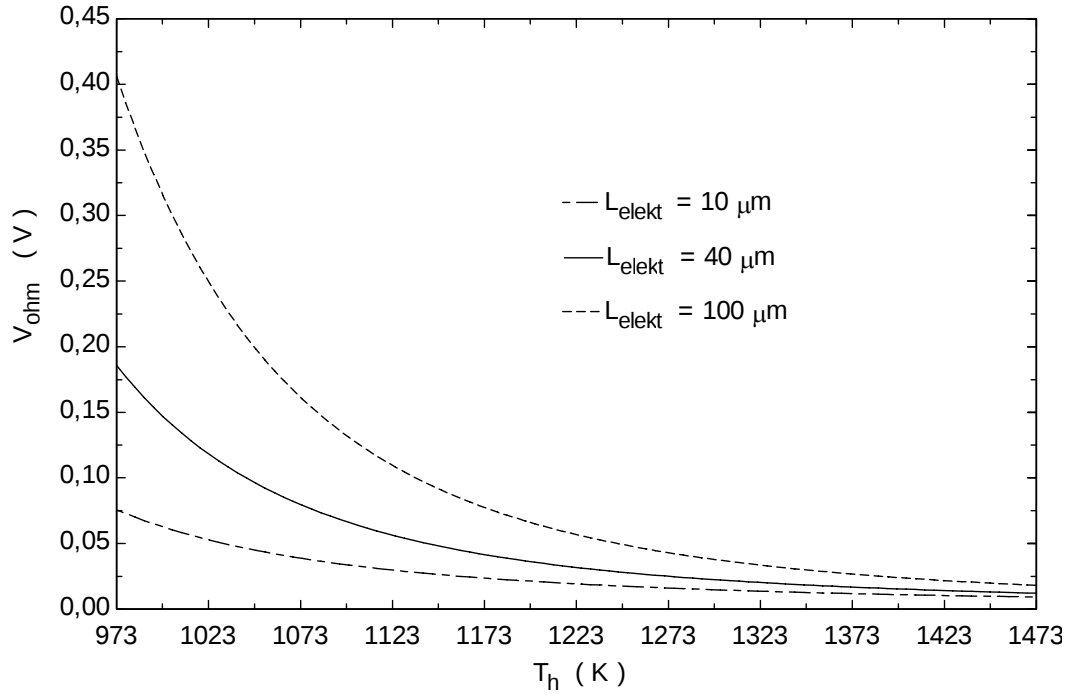


Şekil 2.4 Hücre gücü için model sonuçları ile deneysel verilerin karşılaştırılması

2.5 Performans Analiz Sonuçları

Bölüm 2.3’de tanıtılan modele dayalı olarak, Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2’deki gibi belirlenen veriler kullanılarak yakıt hücre performansının işletme ve dizayn parametreleri ile ilişkisi incelenmiş ve aşağıda sunulmuştur.

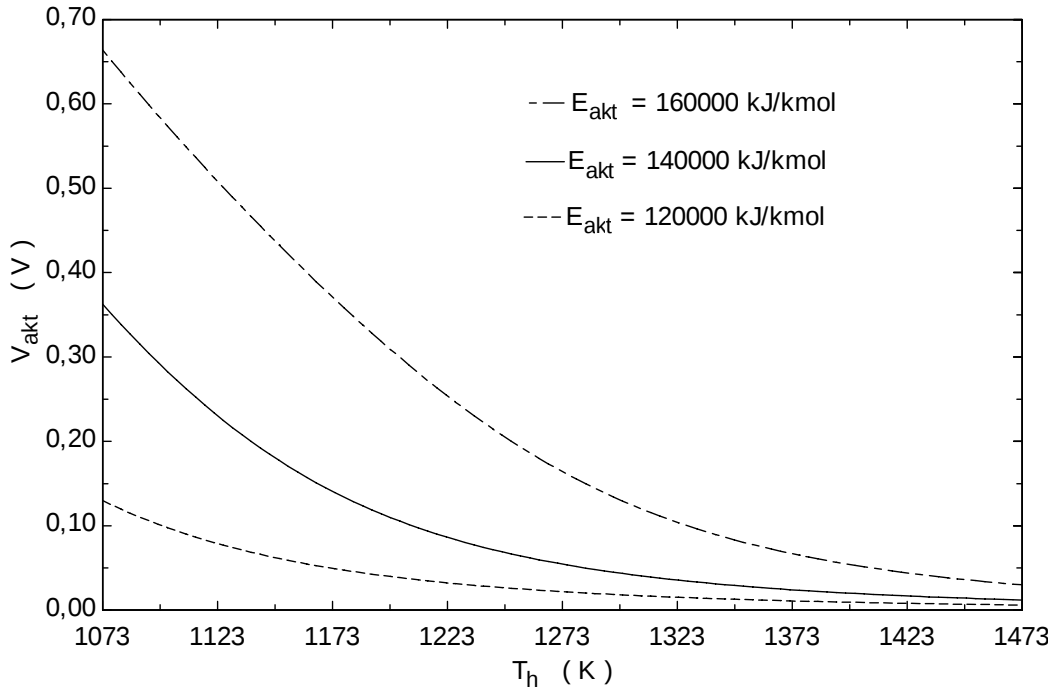
Hücre sıcaklığının ohmik polarizasyona etkisi farklı elektrolit kalınlıkları için Şekil 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.5 Farklı elektrolit kalınlıklarında ohmik polarizasyonun hücre sıcaklığıyla değişimi ($j=3000 \text{ A/m}^2$)

Şekilden görüldüğü üzere, ohmik polarizasyon değeri hücre sıcaklığının artması ile azalmaktadır. Bunun nedeni, hücre sıcaklığının artmasıyla malzeme öz direncinin ve buna bağlı olarak ohmik direncin azalmasıdır. Ayrıca, sıcaklık artışının ohmik polarizasyon değerini düşürme etkisi düşük sıcaklıklarda daha fazla olmaktadır. Buna ilave olarak, elektrolit kalınlığının artması ile ohmik polarizasyon değeri artmaktadır. Örneğin, 1073 K hücre sıcaklığında ve elektrolit kalınlıklarının 10, 40 ve 100 mikron (μm) olması durumunda ohmik polarizasyon sırasıyla 0,04, 0,08 ve 0,17 V olmaktadır. Ohmik polarizasyondaki bu artışın nedeni, elektrolit kalınlığının artması ile akım akış yolu artarak daha yüksek ohmik direnç oluşmasıdır. Elektrolit kalınlığının ohmik polarizasyonu üzerindeki etkisi düşük sıcaklıklarda daha fazladır. Sonuç olarak sıcaklığın artması ve elektrolit kalınlığının düşmesi ohmik polarizasyonu azaltacağından, hücre performansını artıracığı söylenebilir.

Aktivasyon polarizasyonunun hücre işletme sıcaklığı ile değişimi farklı aktivasyon enerjileri için Şekil 2.6'daki gibi elde edilmiştir.

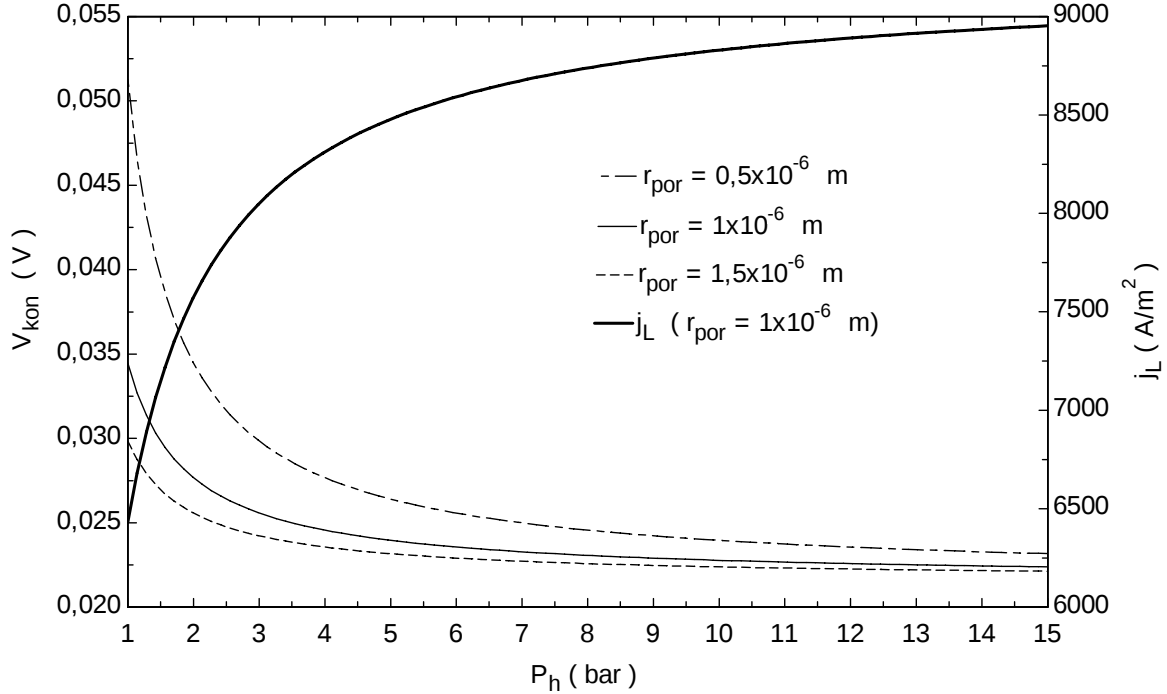


Şekil 2.6 Farklı katot aktivasyon enerjisi değerlerinde aktivasyon polarizasyonunun hücre sıcaklığıyla değişimi ($j=3000 \text{ A/m}^2$)

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi, aktivasyon polarizasyonu düşük sıcaklıklarda hızlı ve yüksek sıcaklıklarda yavaş bir şekilde azalmaktadır. Bu azalmanın en önemli nedeni, sıcaklığın artmasıyla değişken akım yoğunluğunun (j_o) artmasıdır. Yüksek j_o değeriyle daha yüksek bir elektrokimyasal reaksiyon oranı sağlanır ve bu durum aktivasyon polarizasyonunun azalmasına neden olur. Belirli bir hücre sıcaklığında aktivasyon enerjisinin artması ile polarizasyon artmaktadır. Örnek olarak, 1073 K hücre sıcaklığında, 120000, 140000 ve 160000 kJ/kmol aktivasyon enerji değerleri için aktivasyon polarizasyonu sırasıyla 0,05, 0,14 ve 0,37 V olmaktadır. Ayrıca, sıcaklığın artmasıyla, aktivasyon enerji değerinin aktivasyon polarizasyonu üzerindeki etkisinin azaldığı Şekil 2.6'da açık olarak görülmektedir. Bu çerçevede, termal dayanım limitini aşmayacak yüksek hücre sıcaklığındaki bir işletme ve düşük aktivasyon enerjisine sahip bir malzeme kullanımıyla yakıt hücresinin performansının artırılabilirliği söylenebilir.

Konsantrasyon polarizasyonunda gözenek yarıçapı, difüzyonu etkileyen önemli bir parametredir. Bunun yanında, işletme basıncı da difüzyona etki eden önemli işletme

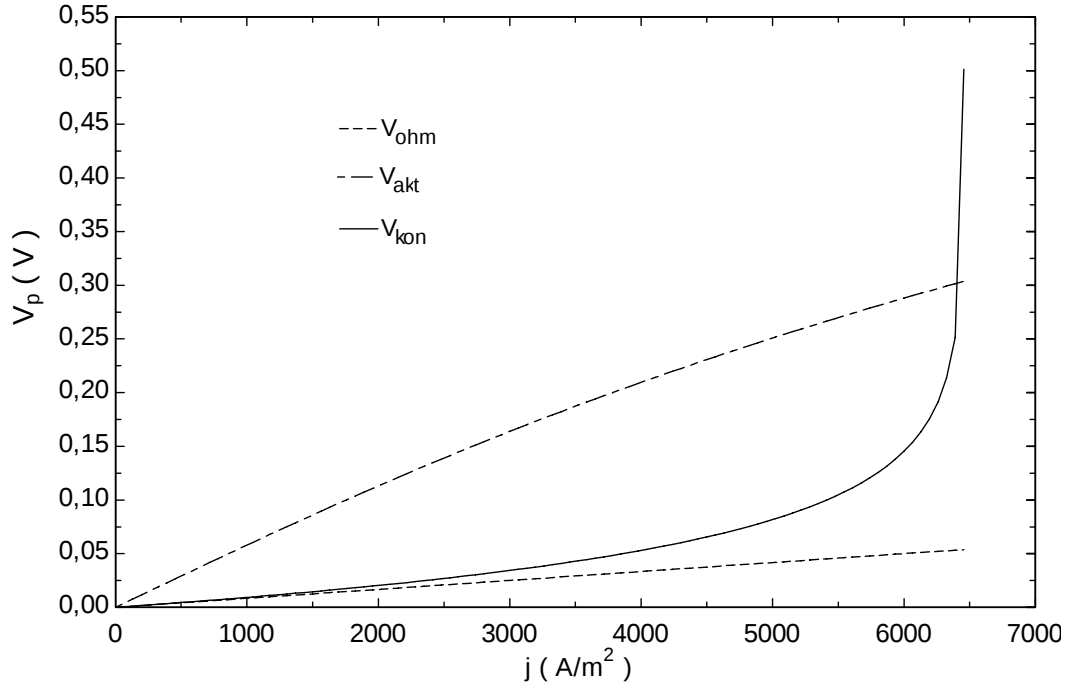
şartlarından biridir. Bu nedenle, basıncın değişimiyle farklı gözenek yarıçapı değerlerinde konsantrasyon polarizasyonunu incelenmiş ve sonuçlar Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7 Farklı gözenek boyutlarında konsantrasyon polarizasyonunun ve limit akım yoğunluğunun basınçla değişimi ($j=3000 A/m^2$)

Hücre basıncının artmasıyla konsantrasyon polarizasyonu azalmaktadır. Azalma hızı düşük basınç değerlerinde daha yüksektir. Konsantrasyon polarizasyonundaki bu azalmanın nedeni Şekil 2.7’de görüldüğü gibi limit akım yoğunluğunun hücre basıncıyla artmasıdır. Örneğin, basınç değeri 1 bardan 15 bara kadar artması durumunda limit akım yoğunluğundaki artış % 44 olmaktadır. Ayrıca konsantrasyon polarizasyonu, gözenek yarıçapı arttıkça azalmaktadır. Gözenek yarıçaplarının konsantrasyon polarizasyon üzerindeki etkisi yüksek basınçlarda daha azdır. Bu nedenle, hücre işletme basıncının yüksek ve gözenek yarıçapının büyük olması konsantrasyon polarizasyonu açısından daha iyi bir performans elde edilmesini sağlayabilecektir.

Şekil 2.8’de ohmik, aktivasyon ve konsantrasyon polarizasyonlarının akım yoğunluğu ile değişimleri verilmiştir.

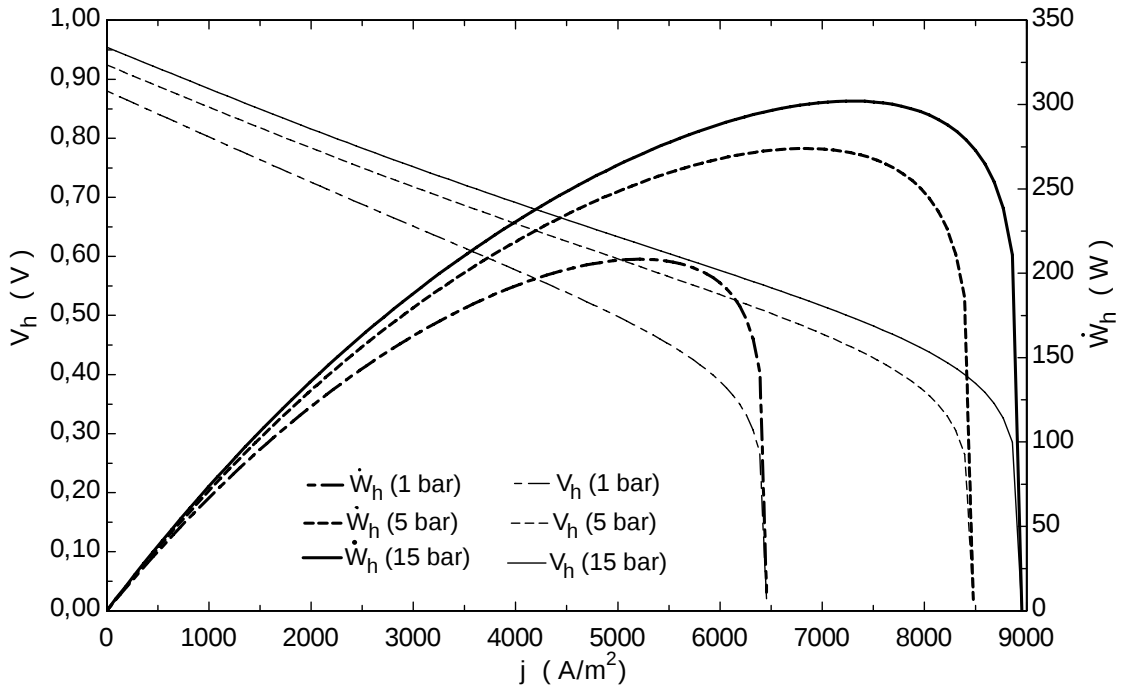


Şekil 2.8 Polarizasyonların akım yoğunluğuyla değişimi

Şekilden görüldüğü üzere tüm polarizasyon değerleri, akım yoğunluğunun artmasıyla artmaktadır. Limit akım yoğunluğuna kadar aktivasyon polarizasyonu diğer polarizasyonlara göre daha yüksektir. Akım yoğunluğunun 3000 A/m^2 olduğu noktadaki aktivasyon polarizasyonunun değeri 0.17 V 'dur. Diğer taraftan, akım yoğunluğu limit akım yoğunluğu değerine yaklaştığı zaman konsantrasyon polarizasyonunun değeri aniden hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu noktada, konsantrasyon polarizasyonunun değeri aktivasyon polarizasyonunun değerinden daha büyük olmaktadır. Ohmik polarizasyonu akım yoğunluğuyla doğrusal bir şekilde artış göstermesine rağmen, değeri limit akım yoğunluğunda bile 0.05 V değerini geçmemektedir. Bu çerçevede hücre voltajını artırmak için, düşük akım yoğunlukları seçilmesi gerektiği söylenebilir. Fakat diğer yandan, düşük akım yoğunluklarında KOYH'den aynı gücü elde etmek için hücre alanı artacağından KOYH maliyeti artacaktır.

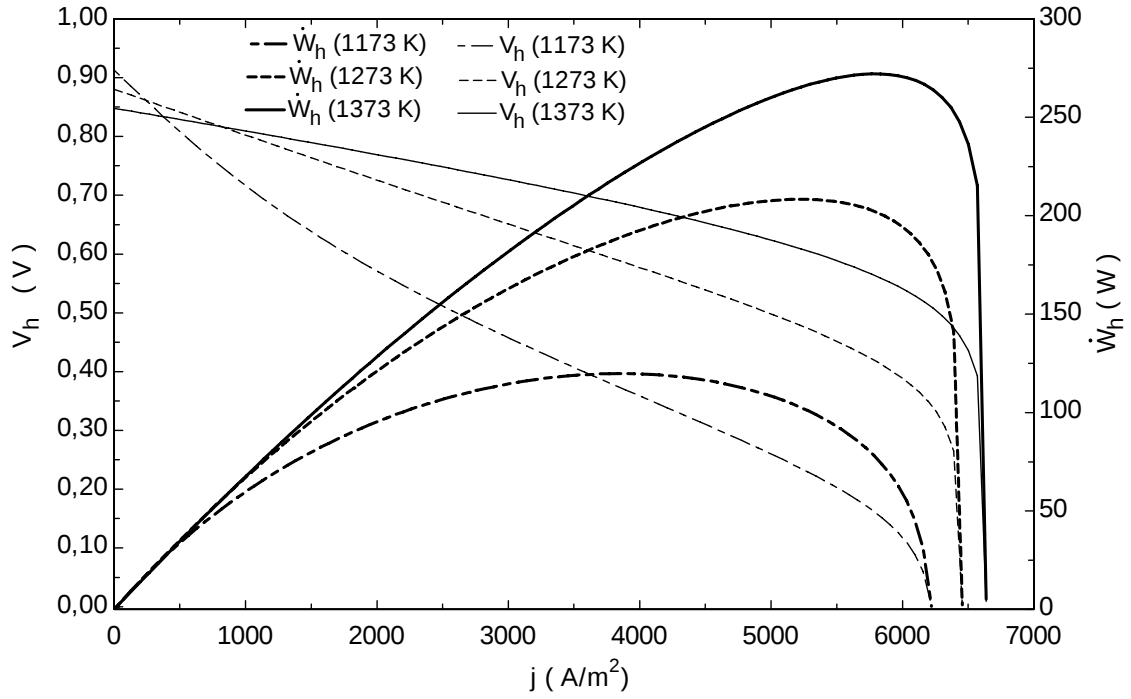
Geliştirilen model limit akım yoğunluğu değerini belirleyebildiği için hücre voltajı ve gücü geniş bir aralıkta hesaplanabilmektedir. Şekil 2.9'da hücre voltajı ve gücün akım yoğunluğu ile değişimi ve basıncın etkisi görülmektedir. Hücre voltajı akım yoğunluğunun artmasıyla sürekli azalma gösterirken hücre gücü akım yoğunluğunun belirli bir değerinde maksimum olmaktadır. Hücre basıncının 1 bar olması durumunda maksimum güç ile bu şartlardaki akım yoğunluğu ve hücre voltajı yaklaşık olarak sırasıyla 210 W , 5200 A/m^2 ve 0.47 V 'dir. Maksimum güç şartlarından sonra akım yoğunluğu limit akım yoğunluğu değerine yaklaştıkça

hücre voltajı ve gücü aniden azalarak sıfır değerini almaktadır. Basıncın artmasıyla hücre voltajı ve gücü, Nernst potansiyelinin artması ve polarizasyonların azalması nedenlerinden dolayı artmaktadır. Basıncın 5 bar olması durumunda maksimum güç 270 W olurken bu şartlardaki hücre voltajı 0.49 V ve akım yoğunluğu 6900 A/m^2 olmaktadır. Basıncın 15 bar olduğunda ise maksimum güç 300 W olurken bu şartlardaki hücre voltajı 0.51 V ve akım yoğunluğu 7400 A/m^2 olarak gerçekleşmektedir. Ayrıca, basıncın artmasıyla limit akım yoğunluğu değeri de artarak 1, 5 ve 15 bar için sırasıyla 6450, 8500 ve 8950 A/m^2 olmaktadır.



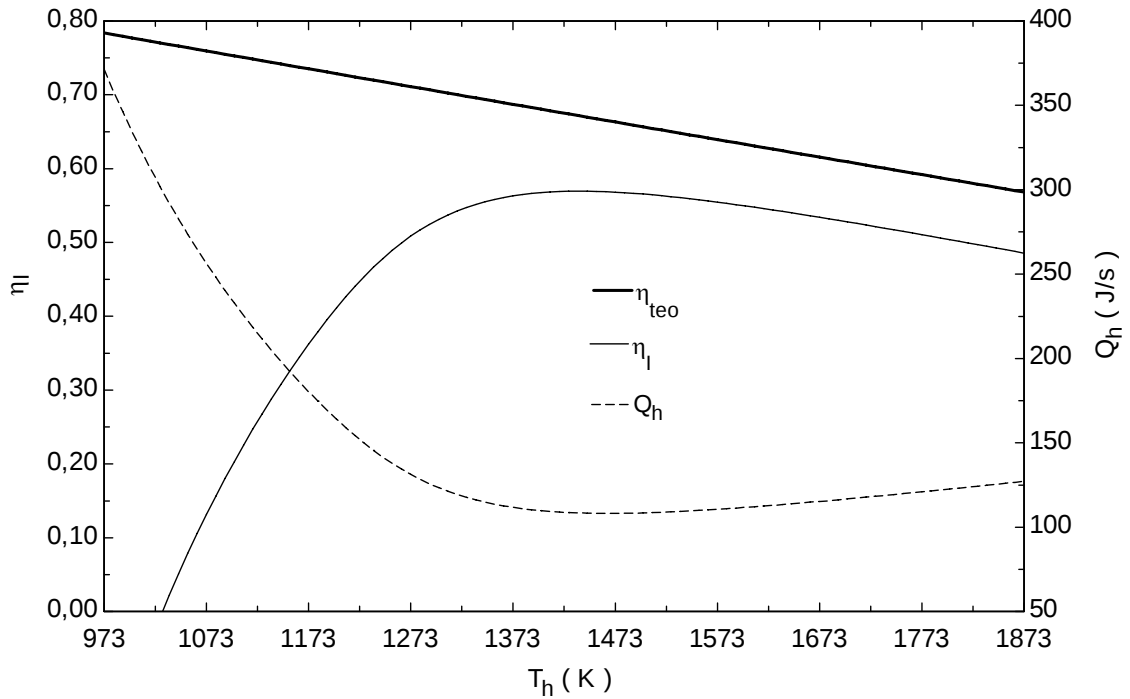
Şekil 2.9 Basıncın hücre voltajı ve gücüne etkisi

Şekil 2.10'da hücre sıcaklığının hücre voltajı ve gücüne etkisi görülmektedir. İşletme sıcaklığı arttıkça akım yoğunluğunun geniş bir aralığında hücre voltajı ve güç artmaktadır. Bunun nedeni sıcaklığın artmasıyla ohmik ve aktivasyon polarizasyonlarındaki azalmadır. Ancak akım yoğunluğunun sıfıra yakın olduğu durumlarda sıcaklığın artması hücre voltajını düşürmektedir. Ayrıca sıcaklığın artması ile limit akım yoğunluğu, maksimum güç ve maksimum güç şartlarındaki akım yoğunluğu ve hücre voltajı artmaktadır. Örneğin, hücre sıcaklığının 1173, 1273 ve 1373 K olması durumunda maksimum güç değeri sırasıyla 125, 210 ve 270 W olmaktadır ve bu şartlardaki akım yoğunluğu 4000 , 5100 ve 5700 A/m^2 olurken hücre voltajı ise 0.37, 0.49 ve 0.60 V olarak gerçekleşmektedir.



Şekil 2.10 Hücre işletme sıcaklığının hücre voltajı ve gücüne etkisi

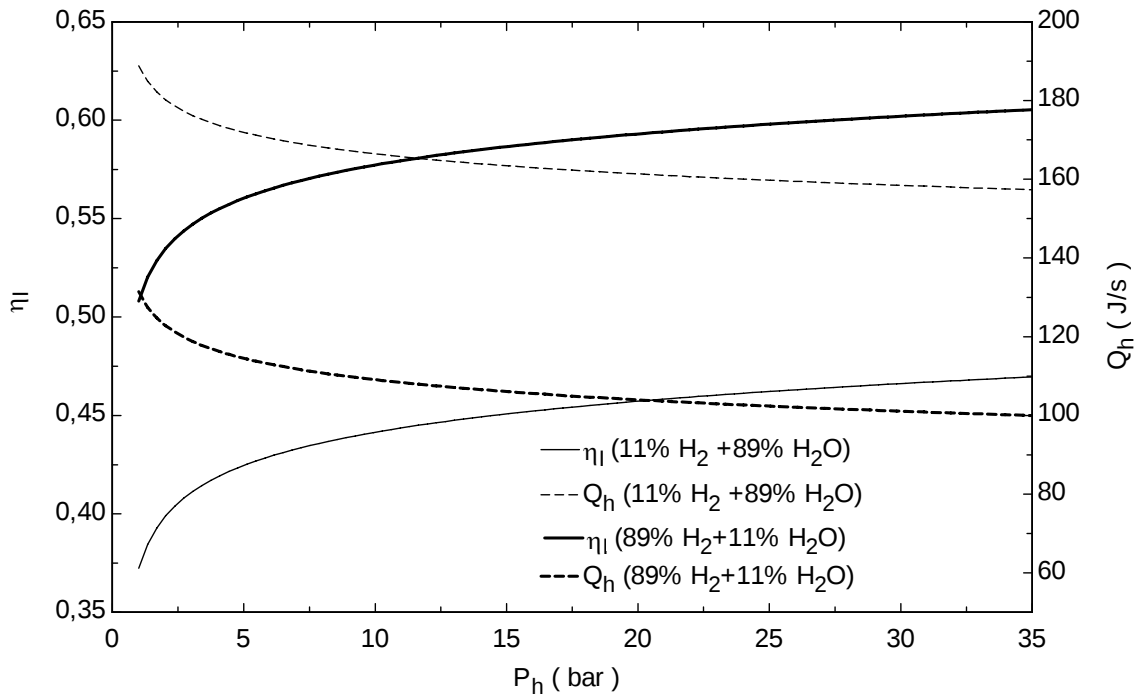
Hücre verimi ve ısı üretimi analiz edilmesi gereken önemli performans özelliklerindendir. Şekil 2.11’de hücre sıcaklığının değişmesi durumunda verim ve üretilen ısı değişimi verilmiştir.



Şekil 2.11 Hücre işletme sıcaklığıyla hücre verimi ve üretilen ısınnın değişimi ($j=3000 \text{ A/m}^2$)

Teorik verim Gibbs enerjisinin, elektrokimyasal reaksiyon entalpisine oranı olarak tanımlandı ve şekilden görüldü gibi değeri sıcaklığın artmasıyla lineer olarak azalmaktadır. Ancak I. Kanun verimi 1400 K'e kadar hızlı bir şekilde artarak bir maksimumdan geçmekte ve bu noktadan sonra sıcaklığın artmasıyla yavaş bir şekilde azalma göstermektedir. Maksimum I. Kanun verimi % 57 olmaktadır. Polarizasyonlar ve elektrokimyasal reaksiyondaki entropi üretiminden kaynaklanan tersinmezliklerden dolayı I. Kanun verimini teorik verimden daima düşüktür. Düşük hücre sıcaklıklarında polarizasyon değerleri yüksek olması nedeniyle daha yüksek ısı üretimi söz konusudur. KOYH'nin elektrokimyasal reaksiyonundan elde edilen ısı 1400 K'e kadar sıcaklığın artmasıyla azalmakta ve bu değerden sonra artmaktadır. Bunun nedeni ise 1400 K'e kadar sıcaklığın artması ile polarizyon kaynaklı ısı üretiminin azalması ve 1400 K'den sonra ise entropi üretiminden kaynaklanan ısı üretiminin daha etkin olmasıdır.

Şekil 2.12'de hücre basıncının, farklı yakıt karışımlarında verime ve ısı üretimine etkisi gösterilmektedir.



Şekil 2.12 Hücre verimi ve ısı üretiminin işletme basıncı ile değişimi

Hücre basıncının ve H_2 molar oranının artmasıyla hücre veriminin arttığı ve ısı üretiminin azaldığı gözlenmektedir. Örneğin, anot giriş molar oranı % 11 H_2 ve % 89 H_2O olması durumunda, hücre basıncı 1 bardan 15 bara arttığında hücre verimindeki artış yaklaşık olarak

% 21 olmaktadır. Buna ilave olarak, 10 bar sabit basınçta, anot giriş molar oranında % 11 H_2 ve % 89 H_2O 'dan % 89 H_2 ve % 11 H_2O şeklinde bir değişiklik olduğunda hücre verimindeki artış yaklaşık olarak % 32 olmaktadır. Bu artışın nedeni, H_2 miktarının artması ile KOYH'den daha fazla elektrik elde edilmesidir. Ayrıca basıncın artması hücre voltajını, dolayısıyla güç çıkışını artırdığı için ısı üretimi azalmaktadır.

3. TÜPSEL KOYH MODÜLÜNÜN PERFORMANS ANALİZİ

Tezin bu bölümünde çok sayıda tüpsel hücrenin bir araya getirilmesi ile oluşan KOYH modülü için bir simülasyon modeli sunulmuştur. İkinci bölümde tek bir tüp için geliştirilen elektrokimyasal modele öncü-reformasyon, dahili reformasyon ve katalitik yakıcıdaki prosesler eklenerek oluşturulan yeni model ile metan kullanılması durumunda KOYH modülünün performansı değerlendirilmiştir. Oluşturulan modelinin simülasyon sonuçları Siemens-Westinghouse şirketinin geliştirdiği 100 kW'lık tüpsel KOYH sisteminin deneysel sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu model, daha sonraki bölümlerde KOYH'ini temel alan enerji üretim sistemlerinin modellerini oluşturmada kullanılacaktır.

3.1 Önceki Çalışmalar

Bessette ve Wepfer (1995), tek bir hücre için geliştirdikleri modeli bir KOYH modülünün performansını değerlendirmek üzere genişletmişlerdir. Tersinmezliklere ilave olarak modüldeki hücreler arası etkileşimleri dikkate almışlardır. KOYH'ne giren yakıt sıcaklığının ve debisinin performansa ve modül çıkış sıcaklığına etkileri üzerinde inceleme yapmışlardır. Ayrıca elektriksel güç ve termal verimleri, geniş bir voltaj aralığında incelemişlerdir. Başka bir çalışmada yazarlar bu modelin kısmi yükteki performansını araştırmışlardır (Bessette ve Wepfer, 1996).

Massardo ve Lubelli (2000), dahili reformasyonlu KOYH modülünün bir matematik modelini yakıt hücresinin sürekli rejimdeki performansını değerlendirmek için geliştirmişlerdir. Yaptıkları parametrik analizde hücre işletme basıncının, hücre sıcaklığının, yakıt, oksidant debilerinin ve kompozisyonlarının performansa etkilerini araştırmışlardır.

Padulles vd. (2000), bir KOYH modülünün dinamik modelini oluşturarak voltaj-akım ve güç-akım eğrilerinin kullanılmasının güvenli işletme alanlarını belirlemek açısından önemli olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca modülün geçici rejimdeki davranış özelliklerini simüle etmişlerdir. KOYH modülünün geçici rejimdeki davranışlarını modelleyen benzer bir çalışmada Sedghisigarchi (2004) tarafından gerçekleştirilmiştir.

Campanari (2001), yakıt olarak doğal gaz kullanan dahili reformasyonlu ve dahili hava ön-ısıtılmalı bir tüpsel KOYH modülünün termodinamik modelini geliştirmiştir. Bu model yakıt ve hava kullanım faktörlerinin bir fonksiyonu olarak anot ve katot çıkışlarındaki termodinamik özellikleri, modül verimini ve modül içindeki ısı üretimini bulabilmektedir. Oluşturulan model, hücre potansiyelini deneysel verilere dayalı ampirik formüllerle

hesaplamaktadır. Ayrıca akım yoğunluğu, yakıt kullanım faktörü, buhar-karbon oranı gibi çeşitli işletme şartlarının modül performansına etkileri incelenmiştir.

Pangalish vd. (2002) tarafından geliştirilen termodinamik model, tüpsel KOYH modülü içinde yeralan öncü reformasyon, dahili reformasyon, aktif alan, yanma bölgesi, hava önısıtma gibi tüm komponentleri içermektedir. Bu modele dayalı sonuçlar yakıt hücre modülünün 1500 A/m^2 akım yoğunluğunda % 56 verime ulaştığını buna karşın akım yoğunluğunun 6000 A/m^2 olduğunda % 38.7'ye düştüğünü göstermiştir.

Aguiar vd. (2004), paralel ve karşı akışlı çalışma durumlarını açıklayabilen bir model geliştirmişlerdir. Model direkt dahili reformasyonlu, orta sıcaklıklı düzlemsel KOYH modülünün elektrokimyasal reaksiyonlarını, kütle ve enerji denge denklemlerini içermektedir. Modül % 75 yakıt kullanım faktöründe % 10 ön-reforme edilmiş metan yakıt karışımı ile beslenmektedir. Model karşı akışlı bir düzenlemenin daha düşük sıcaklık gradyeni sağladığını ortaya koymuştur. Aguiar ve çalışma arkadaşları ayrıca katot aktivasyon polarizasyonun en büyük voltaj kaybına neden olduğunu göstermişlerdir.

Lazzaretto vd. (2004), tüpsel KOYH modülünün sıfır boyutlu modelini sunmuşlardır. Modelin geçerliliğini göstermek için elektrokimyasal performans simülasyon sonuçlarını literatürdeki deneysel sonuçlarla ve iki-üç boyutlu olarak hazırlanan model sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Böyle bir modelin hibrit sistem modelleri oluşturmak için ideal olduğunu belirtmişlerdir.

Lemanski ve Badur (2004), dahili reformasyonlu tüpsel bir KOYH'nin sıfır boyutlu modele dayalı nümerik simülasyonunu gerçekleştirerek çeşitli işletme şartlarına göre parametrik analiz yapmışlardır. Oluşturulan modelin daha kompleks sistemler için temel oluşturduğunu vurgulamışlardır.

Marsano vd. (2004), çalışmalarında KOYH modülünde ejektör teknolojiye göre anot çıkışındaki gazları geri beslemenin işletme ve dizayn şartlarındaki performans üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Bunun için sabit basınçlı karışım bölgesi ve sabit alanlı karışım bölgesi olmak üzere iki farklı ejektör geometrisini dikkate almışlardır.

Bove vd. (2005a), sistem entegrasyonu için mümkün olduğu kadar basitleştirilmiş KOYH modeli göz önüne alarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sıfır boyutlu model yaklaşımını kullanmışlar ve KOYH'nin giriş ve çıkış şartlarının ortalama değerlerinin göz önünde bulundurulması gerekliliğini vurgulamışlardır. Yazarlar daha sonraki çalışmalarında bir

boyutlu model sonuçlarının sıfır boyutlu modele göre deneysel sonuçlarla daha iyi uyum sağladığını göstermişlerdir (Bove vd. 2005b).

Zhang vd. (2005), dahili reformasyonlu tüpsel bir KOYH modelini AspenPlus bilgisayar yazılımında bulunan fonksiyonları ve birim operasyon modellerini kullanarak oluşturmuşlardır. Bu model KOYH çalışmasının termodinamik ve parametrik analizini gerçekleştirebilmektedir. Analiz sonucunda yakıt kullanım faktörünün 0.85 olduğu noktada elektrik veriminin % 52'ye ulaştığını belirtmişlerdir.

Jiang vd. (2006), tüpsel KOYH modülünün bir boyutlu dinamik modelini elektrokimyasal ve termal ilişkileri dikkate alarak modellemişler ve simülasyon sonuçlarını deneysel verilerle karşılaştırarak modelin güvenilirliğini göstermişlerdir. Ayrıca, KOYH modülünün hücre konfigürasyonları ve işletme şartları için detaylı bir parametrik analizini sunmuşlardır.

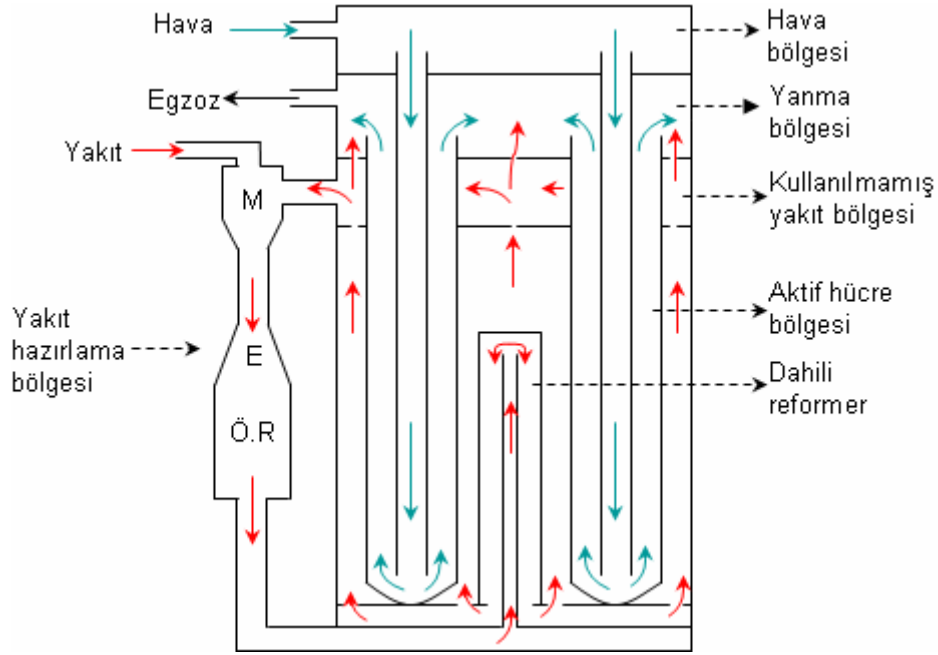
Colpan vd. (2007), kömürün gazlaştırılması ile elde edilen yakıtla çalıştırılan dahili reformasyonlu KOYH'ni termodinamik olarak modellemişlerdir. Anot çıkışındaki gaz akışının geri beslemesini modele dahil etmişlerdir. Geri besleme oranı ve yakıt kullanım oranlarının etkilerini incelemişlerdir. Termodinamik ve ekonomik olarak etkili olacak şartları belirlemişler ve irdelemişlerdir.

Lin vd. (2007), düzlemsel bir KOYH modülünde ilk çalışma, kapanma ve sürekli rejim şartlarında termal gerilim dağılımını göstermek için üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Üç boyutlu sonlu elemanlar analiz modelinin KOYH modülündeki termal gerilim analizinde ve kritik yerlerinin tespitinde gerçekçi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, model sonuçlarına göre modüldeki termal gerilim dağılımında hücreden hücreye önemli bir değişiklik olmadığını belirtmişlerdir.

3.2 Tüpsel KOYH Modülü

Yakıt hücre modülü Siemens-Westinghouse şirketinin geliştirdiği 100 kW'lık tüpsel KOYH'ni temel alarak oluşturulmuştur. Göz önünde bulundurulmuş tüpsel KOYH katot elektrot destekli hücrelerden oluşan (çapı 22 mm, aktif uzunluğu 150 cm, aktif alanı 834 cm^2) ve modül içinde reformer bulunduran ticari amaçlı ilk prototiptir. Hücre aşamasından sonra imalat işleminin bir sonraki adımı hücre grubudur. Bu hücre grubu 8 hücrenin elektriksel olarak seri, 3 hücrenin elektriksel olarak paralel bağlanmasıyla 24 hücre dizisinden oluşmaktadır. 4 hücre grubu seri olarak bağlanarak bir grup sırasını meydana getirmektedir. 12 adet grup sırası yan yana konur ve her birinin arasına modül reformeri yerleştirilir. Bu 48

hücre gurubu sırası, modül reformerleri, ejektörler ve öncü-reformerlerden oluşmaktadır (Singhal, 2000).



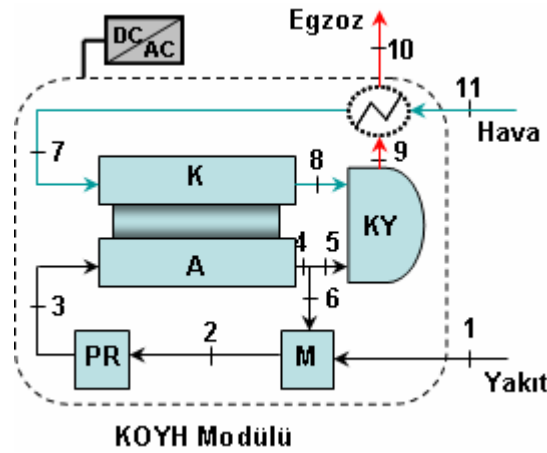
Şekil 3.1 Reformasyonlu tüpsel KOYH modülü

Şekil 3.1'deki basitleştirilmiş şema tüpsel KOYH modülün yapısını ve akış özelliklerini göstermektedir. Dikey olarak yerleştirilmiş hücre dizisi beş bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgeler şunlardır; yakıtın dağıtıldığı bölge (dahili reformer bölgesi), aktif hücre bölgesi, kullanılmamış yakıt bölgesi, yanma bölgesi ve hava bölgesi. Atmosfer basıncının biraz üzerinde sülfürden arındırılmış yakıt, taze yakıt olarak sisteme girer. Buradaki bir ejektör (E), eşzamanlı olarak kullanılmış yakıt bölgesinden reaksiyona girmemiş belli miktarda gaz karışımını çeker ve taze yakıt ile mikserde (M) karıştırır. Bu karışım yakıtın belirli bir miktarının reforme edildiği adyabatik bir öncü-reformere (ÖR) gider (Riensch vd., 2000). Buradan katalitik olarak aktif olan yakıt dağıtım bölgesine gider. Dahili modül reformerinde yakıt hücresi tarafından ısıtılarak gerekli olan reformasyon enerjisi temin edilir. Burada tamamen reforme edilen yakıt, elektrokimyasal olarak reaksiyona girip ısı ve elektriksel güç üretilen hücrelerin dış yüzeyinden geçer. Geriye kalan yakıt, kullanılmamış yakıt bölgesine geçer ve belirli bir miktarı ejektör vasıtasıyla geri beslenir, diğer bölümü yanma bölgesine gider. Hava, besleme tüpünden geçtikten sonra elektrokimyasal reaksiyonda kullanılmak üzere hücre katodu ve hava besleme tüpü arasından yukarıya doğru hareket eder. Elektrokimyasal reaksiyona girmeyen havanın belirli bir kısmı yanma bölgesine geçerek kullanılmayan yakıt ile reaksiyona girerek yanma reaksiyonu gerçekleşir. Yanma

bölgesindeki yüksek sıcaklıktaki gaz karışımı hava besleme tüplerinden geçen havanın ısıtılmasında kullanıldıktan sonra KOYH modülünü terk eder (George, 2000).

3.3 Tüpsel KOYH Modülünün Modeli

Dikkate alınan KOYH modülünün şematik görünümü Şekil 3.2’de verilmiştir. Yukarıda tanımlanan reformasyonlu tüpsel KOYH modülünün karakteristikleri, komponent bazında ele alınarak matematiksel modeli oluşturulmuştur. Bu model mikser, öncü-reformer, yakıt hücreleri (anot ve katot) ve katalitik yakıcı gibi KOYH modülünde bulunan komponentleri içermektedir.



Şekil 3.2 Reformasyonlu tüpsel KOYH modülü

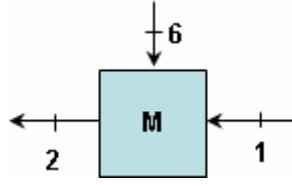
Her komponent için modelleme yaklaşımı sonraki alt başlıklarda açıklanacaktır. Modelleme esnasında yapılan kabuller aşağıda sıralanmıştır:

- Her komponent sürekli akışlı açık bir kontrol hacmi olarak ele alınmıştır.
- Katodik akış kompozisyonu O_2 ve N_2 karışımından oluşmaktadır.
- Yakıt olarak CH_4 kullanılmıştır.
- Yakıt işleme proseslerindeki reaksiyonların dengede oldukları kabul edilmiştir.
- CO 'in elektrokimyasal reaksiyona girmediği düşünülmüştür.
- Hücre işletme sıcaklığı ve reformasyon reaksiyonlarının sıcaklıkları ilgili komponentlerin çıkış sıcaklıklarına eşit kabul edilmiştir.

3.3.1 Mikser

Anottan çıkan gaz akışı, reformasyon prosesi için hem ısı hem de buhar kaynağı olması bakımından ilginç bir kaynak oluşturmaktadır. Sıcaklığının yüksek olması ($900-1000\text{ }^{\circ}C$) ve

karışımın molar bazda % 50'ye kadar su baharı içermesi reformasyon için gerekli şartları sağlamaktadır. Bu nedenle, bu gaz akışının bir kısmı bir ejektör yardımıyla geri beslenir.



Şekil 3.3 Mikser komponenti

KOYH modülüne beslenen taze yakıt (1 noktası), anot çıkışında geri beslenen gaz karışımı (6 noktası) ile mikserde karışır (Şekil 3.3). Mikserin çıkışındaki (2 noktası) gaz akışı H_2O , CO_2 , H_2 , CO ve CH_4 'dan oluşan bir gaz karışımıdır. Belirli bir buhar-karbon oranı (r_{SC}) ile anot çıkışında geribesleme yapılan gaz akışının miktarı belirlenir. Denklem 3.1 buhar-karbon oranı ifadesini göstermektedir:

$$r_{SC} = \frac{\dot{n}_{6,H_2O}}{\dot{n}_{2,CH_4} + \dot{n}_{2,CO}} \quad (3.1)$$

Literatüre göre öncü-reformer içinde karbon oluşumun gerçekleşmemesi için r_{SC} oranı 1.8'den büyük olmalıdır (Peters vd.,2000; Haynes ve Wepfer, 2000; Sancez vd., 2006). Karbon oluşumu ayrıca KOYH modülünde elektrotların gözeneklerini tıkadığı için reaksiyona giren gazların aktif tarafa geçmelerini engeller, böylece performansın kötüleşmesine hatta tamamen durmasına neden olabilir (Clarke vd., 1997; Koh vd., 2002; Weber vd., 2003).

Sisteme giren yakıt miktarı da bilindiği zaman mikserin çıkışındaki molar debiler molar kütle dengesinden ve 2 noktasının entalpi değeri enerji dengesinden hesaplanabilir:

$$\dot{n}_{2,CH_4} = \dot{n}_{1,CH_4} + \dot{n}_{6,CH_4} \quad (3.2)$$

$$\dot{n}_{2,CO} = \dot{n}_{1,CO} + \dot{n}_{6,CO} \quad (3.3)$$

$$\dot{n}_{2,H_2} = \dot{n}_{1,H_2} + \dot{n}_{6,H_2} \quad (3.4)$$

$$\dot{n}_{2,H_2O} = \dot{n}_{1,H_2O} + \dot{n}_{6,H_2O} \quad (3.5)$$

$$\dot{Q}_M - \dot{W}_M + \sum_i (\dot{n}_{1,i} \bar{h}_{1,i} + \dot{n}_{6,i} \bar{h}_{6,i})_g - \sum_i (\dot{n}_{2,i} \bar{h}_{2,i})_c = 0 \quad (3.6)$$

Denklem 3.6'da proses adyabatik ve iş üretimi veya tüketimi olmadığı için ısı ve güç terimleri

dikkate alınmamıştır. 2 noktasındaki molar debi ve molar bileşenleri bilindiği için iterasyonla T_2 sıcaklığı belirlenir.

Sonraki aşamada komponentin giriş ve çıkışındaki her noktanın fiziksel ve kimyasal ekserji değerleri hesaplanarak ilgili noktalara ait ekserji değerleri hesaplanır. Bu çalışmada dikkate alınan kimyasal gaz türlerinin standart kimyasal ekserji değerleri Kotas (1995)'den alınmıştır.

6 noktası: KOYH anodundan çıkan yüksek sıcaklıktaki gazların bir kısmının reformasyon işlemi için ayrıldığı noktadır. 6 noktasındaki gaz kompozisyonu H_2 , H_2O , CO ve CO_2 gazlarından oluşmaktadır. Geri besleme yapılan gazların ekserji değeri bu noktadaki fiziksel ve kimyasal ekserji değerlerinin toplanması ile elde edilir. Fiziksel ekserjinin hesaplanabilmesi o noktadaki entropi değerinin bilinmesine bağlıdır. 6 noktasının gaz karışımındaki bir gaz türünün entropisi o noktanın sıcaklığına, kısmi basıncına ve molar oranına bağlı olarak hesaplanmaktadır. 6 noktasının fiziksel ve kimyasal ekserjileri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{E}_6^f = \sum_i \dot{n}_{6,i} [\bar{h}_{6,i} - \bar{h}_{o6,i} - T_o (\bar{s}_{6,i} - \bar{s}_{o6,i})] \quad (3.7)$$

$$\dot{E}_6^k = \sum_i \dot{n}_{6,i} \sum_i (x_{6,i} \bar{e}_{1,i}^{kim} + \bar{R} T_o x_{6,i} \ln(x_{6,i})) \quad (3.8)$$

1 noktası: Kompresör tarafından basınçlandırılmış, reküperatör tarafından önısıtılmış metan yakıtının miksere giriş şartlarını göstermektedir. Yakıt kompozisyonu % 100 CH_4 'dür. Buna göre 1 noktasının fiziksel ve kimyasal ekserji ifadesi Denklem 3.9 ve 3.10'da verilmiştir:

$$\dot{E}_1^f = \dot{n}_{1,CH_4} [\bar{h}_{1,CH_4} - \bar{h}_{o1,CH_4} - T_o (\bar{s}_{1,CH_4} - \bar{s}_{o1,CH_4})] \quad (3.9)$$

$$\dot{E}_1^k = \dot{n}_{1,CH_4} \bar{e}_{1,CH_4}^{kim} \quad (3.10)$$

2 noktası: 1 noktasından gelen yakıt ile 6 noktasındaki gaz akışının mikserden çıktığı şartları göstermektedir. 2 noktasının gaz bileşenleri CH_4 , H_2 , H_2O , CO ve CO_2 'dir. Kütle dengesinden çıkıştaki debi ve molar oranları bilindiğinden ve enerji denkleminde de çıkış sıcaklığı hesaplandığından dolayı bu noktanın fiziksel ve kimyasal ekserji değeri Denklem 3.11 ve 3.12 ile hesaplanır:

$$\dot{E}_2^f = \sum_i \dot{n}_{2,i} [\bar{h}_{2,i} - \bar{h}_{o2,i} - T_o (\bar{s}_{2,i} - \bar{s}_{o2,i})] \quad (3.11)$$

$$\dot{E}_2^k = \sum_i \dot{n}_{2,i} \sum_i \left(x_{2,i} \bar{e}_{6,i}^{kim} + \bar{R} T_o x_{2,i} \ln(x_{2,i}) \right) \quad (3.12)$$

Her noktanın ekserji değerleri hesaplandığında mikser komponentindeki ekserji kaybı, ekserji dengesinden bulunabilir:

$$\dot{E}_{D,M} = \dot{\phi}_M \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) - \dot{W}_M + (\dot{E}_1 + \dot{E}_6)_g - (\dot{E}_2)_\zeta \quad (3.13)$$

Denklem (3.13) sadeleştirilirse mikser komponentindeki ekserji kaybı aşağıdaki gibi yazılabilir:

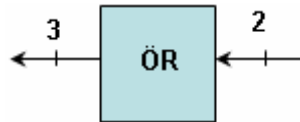
$$\dot{E}_{D,M} = \dot{E}_1 + \dot{E}_6 - \dot{E}_2 \quad (3.14)$$

Mikser komponentinin ekserji verimi de aşağıda gibi ifade edilir (Bejan vd, 1995):

$$\eta_{E,M} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1 + \dot{E}_6} \quad (3.15)$$

3.3.2 Öncü reformer

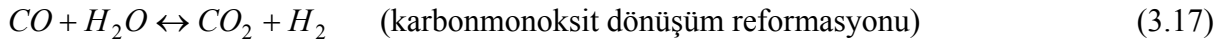
Reformasyonun sadece dahili olarak gerçekleşmesi, hem anotta karbon oluşumunu artırmasına hem de reformasyon reaksiyonun endotermik reaksiyon olması nedeniyle yüksek sıcaklık gerilimine neden olabilmektedir (Peters vd.,2000). Bunlara ilave olarak metanın tamamının dahili olarak reforme edilmesi, hücrenin girişindeki sıcaklığı aşırı düşürerek elektrokimyasal performansı negatif olarak etkilemesine ve hatta tamamen bozulmasına neden olabilir. Bunlardan sakınmak için, KOYH modülünün dizaynına bir öncü-reformer eklenmiştir (Şekil 3.4). Metanın hidrojene ve yan ürünlere dönüşümü farklı tekniklerle gerçekleştirilebilir. Buhar-reformasyonu yakıt hücreleri için en uygun olanıdır.



Şekil 3.4 Öncü-reformer komponenti

Buhar reformasyon reaksiyonları ile adyabatik öncü-reformerde metan, kimyasal reaksiyonlara girer ve dönüşüme uğrar. Reformasyonda iki reaksiyon meydana gelir; 1) metan

reformasyonu (Denklem 3.16), 2) karbonmonoksit dönüşüm reformasyonu (Denklem 3.17). Bu reaksiyonların sonucunda oluşan toplam reformasyon reaksiyonu oldukça kuvvetli endotermik reaksiyondur (Dicks, 1998; Lehnert vd., 2000). Reformasyona giren gaz karışımının giriş kompozisyonu ve sıcaklığı mikserdeki hesaplamalardan bilinmektedir. Bu reaksiyonların kimyasal dengeye ulaştıkları kabul edilmiştir.



Bu iki reaksiyonun denge sabitleri (metan reformasyon reaksiyonu için K_r , karbonmonoksit dönüşüm reaksiyonu için K_s) sıcaklığın bir fonksiyonudur ve denge durumundaki karışımın kompozisyonunu belirler (Cengel ve Boles, 2002).

$$K_r = \exp(-\Delta G_r / \bar{R}T) \quad (3.18)$$

$$K_s = \exp(-\Delta G_s / \bar{R}T) \quad (3.19)$$

Denklem 3.18 ve 3.19'da T sıcaklığı, reformasyonun gerçekleştiği sıcaklık (T_3 'e eşit olarak alınmıştır), ΔG ise dikkate alınan reaksiyon için Gibbs enerji fonksiyonundaki değişimi göstermektedir. Denge sabitleri aynı zamanda denge durumundaki gaz karışımının kısmi basınçları ile de ifade edilebilir:

$$K_r = \frac{(p_{3,H_2})^3 \cdot p_{3,CO}}{p_{3,CH_4} \cdot p_{3,H_2O}} \quad (3.20)$$

$$K_s = \frac{p_{3,H_2} \cdot p_{3,CO_2}}{p_{3,CO} \cdot p_{3,H_2O}} \quad (3.21)$$

burada, p_i reaksiyona giren gaz türlerinin kısmi basınçlarını temsil etmektedir. Metan ve karbonmonoksit reformasyon reaksiyonlarının denge sabitleri, denge karışımının kısmi basınçlarını mol oranlarıyla ifade edilerek yazılabilir:

$$p_i = x_i P = \frac{n_i}{n_{\text{top}}} P \quad (3.22)$$

$$K_r = \frac{(\dot{n}_{3,H_2} / \dot{n}_{3,\text{top}})^3 \cdot (\dot{n}_{3,CO} / \dot{n}_{3,\text{top}})}{(\dot{n}_{3,CH_4} / \dot{n}_{3,\text{top}}) \cdot (\dot{n}_{3,H_2O} / \dot{n}_{3,\text{top}})} P^2 \quad (3.23)$$

$$K_s = \frac{(\dot{n}_{3,H_2} / \dot{n}_{3,top}) \cdot (\dot{n}_{3,CO_2} / \dot{n}_{3,top})}{(\dot{n}_{3,CO} / \dot{n}_{3,top}) \cdot (\dot{n}_{3,H_2O} / \dot{n}_{3,top})} \quad (3.24)$$

burada, $\dot{n}_{3,top}$ denge durumundaki toplam molar debiyi, P ise 3 noktasının (reformasyon çıkışı) toplam basıncını göstermektedir.

x_r metan reformasyon reaksiyonunda reforme edilmiş metanın molar debisi, y_r ise karbonmonoksit dönüşüm reaksiyonunda tüketilen karbonmonoksitin molar debisi olarak düşünüldüğünde, reformasyon çıkışındaki karışım kompozisyonu molar kütle dengesinden aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$\dot{n}_{3,CH_4} = \dot{n}_{2,CH_4} - \dot{x}_r \quad (3.25)$$

$$\dot{n}_{3,CO} = \dot{n}_{2,CO} - \dot{x}_r - \dot{y}_r \quad (3.26)$$

$$\dot{n}_{3,CO_2} = \dot{n}_{2,CO} + \dot{y}_r \quad (3.27)$$

$$\dot{n}_{3,H_2} = \dot{n}_{2,H_2} + 3\dot{x}_r + \dot{y}_r \quad (3.28)$$

$$\dot{n}_{3,H_2O} = \dot{n}_{2,H_2O} - \dot{x}_r - \dot{y}_r \quad (3.29)$$

Denklem 3.23 ve 3.24’de verilen denge sabitleri Denklem 3.25-3.29’da verilen molar kütle denge eşitliklerinin sağ taraflarını kullanarak yeniden düzenlenebilir:

$$K_r = \frac{\left(\frac{\dot{n}_{2,H_2} + 3\dot{x}_r + \dot{y}_r}{\dot{n}_{2,top} + 2\dot{x}_r} \right)^3 \cdot \left(\frac{\dot{n}_{2,CO} + \dot{x}_r - \dot{y}_r}{\dot{n}_{2,top} + 2\dot{x}_r} \right)}{\left(\frac{\dot{n}_{2,CH_4} - \dot{x}_r}{\dot{n}_{2,top} + 2\dot{x}_r} \right) \cdot \left(\frac{\dot{n}_{2,H_2O} - \dot{x}_r - \dot{y}_r}{\dot{n}_{2,top} + 2\dot{x}_r} \right)} P^2 \quad (3.30)$$

$$K_s = \frac{\left(\frac{\dot{n}_{2,H_2} + 3\dot{x}_r + \dot{y}_r}{\dot{n}_{2,top} + 2\dot{x}_r} \right) \cdot \left(\frac{\dot{n}_{2,CO_2} + \dot{y}_r}{\dot{n}_{2,top} + 2\dot{x}_r} \right)}{\left(\frac{\dot{n}_{2,CO} + \dot{x}_r - \dot{y}_r}{\dot{n}_{2,top} + 2\dot{x}_r} \right) \cdot \left(\frac{\dot{n}_{2,H_2O} - \dot{x}_r - \dot{y}_r}{\dot{n}_{2,top} + 2\dot{x}_r} \right)} \quad (3.31)$$

Reformer sıcaklığı için karışım kompozisyonun çıkış ve girişteki durumuna bağlı olarak enerji dengesi yazılır:

$$\dot{Q}_{\dot{O}R} - \dot{W}_{\dot{O}R} + \sum_i (\dot{n}_{2,i} \cdot \bar{h}_{2,i})_g - \sum_i (\dot{n}_{3,i} \cdot \bar{h}_{3,i})_{\dot{c}} = 0 \quad (3.32)$$

Reformer komponent modelinde 5 adet bilinmeyen mevcuttur. Bu değişkenler denge sabitleri (K_r ve K_s), kimyasal reaksiyonlarda tüketilen metan ve karbonmonoksitin molar debileri (x_r ve y_r) ve denge karışımın sıcaklığı (T_3)'dır. Çözümleme yapabilmek için bilinmeyen sayısınınca denklem oluşturmak gerekir. Bu amaçla Denklem 3.18, 3.19, 3.30, 3.31 ve 3.32 kullanılarak iteratif bir prosüdür uygulanmıştır. Çözümleme yapıldıktan sonra Denklem 3.25-3.29'da verilen kütle korunumundan komponent çıkışındaki karışım gazlarının molar debileri bulunur.

Bu komponentin ekserji kaybı ve ekserji veriminin hesaplanabilmesi için giriş ve çıkış noktalarının ekserji değerlerinin hesaplanması gerekir. 2 noktasının ekserji değeri (mikser çıkışı) mikser komponent modelinde elde edilebildiğinden, burada sadece 3 noktasının değerlendirmesi yapılacaktır.

3 noktası: Kimyasal reaksiyonlar neticesinde hidrojen zengin gaz karışımının komponentten çıktığı noktadır. Fiziksel ve kimyasal ekserji denklemleri aşağıda verilmiştir:

$$\dot{E}_3^f = \sum_i \dot{n}_{3,i} [\bar{h}_{3,i} - \bar{h}_{o3,i} - T_o (\bar{s}_{3,i} - \bar{s}_{o3,i})] \quad (3.33)$$

$$\dot{E}_3^k = \sum_i \dot{n}_{3,i} \sum_i (x_{3,i} \bar{e}_{3,i}^{kim} + \bar{R} T_o x_{3,i} \ln(x_{3,i})) \quad (3.34)$$

Komponentin giriş ve çıkış noktalarının ekserji değerleri hesaplandığında meydana gelen ekserji kaybı, ekserji dengesinden bulunabilir:

$$\dot{E}_{D,\text{ÖR}} = \cancel{\dot{Q}_{\text{ÖR}}} \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) - \cancel{\dot{W}_{\text{ÖR}}} + (\dot{E}_2)_g - (\dot{E}_3)_\varphi \quad (3.35)$$

Komponentin adyabatik şartlarda çalıştığı ve iş üretimi olmadığı için Denklem (3.35) sadeleşerek, komponentteki ekserji kaybı Denklem 3.36'da belirtildiği gibi yazılabilir:

$$\dot{E}_{D,\text{ÖR}} = \dot{E}_2 - \dot{E}_3 \quad (3.36)$$

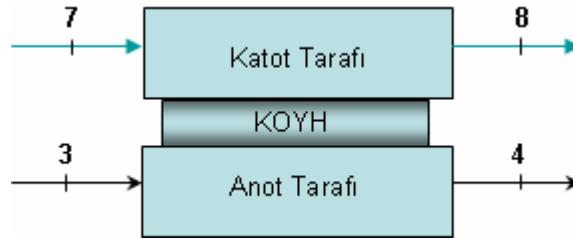
Komponentin ekserji verimi ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\eta_{E,\text{ÖR}} = \frac{\dot{E}_3}{\dot{E}_2} \quad (3.37)$$

3.3.3 Tüpsel KOYH

Ön reformasyon işleminden geçmiş yakıt karışımında bulunan CO ve CH₄'ün 1000 °C'ta katalist kullanmadan doğrudan oksidasyonu mümkündür. Ancak karbonmonoksit dönüşüm

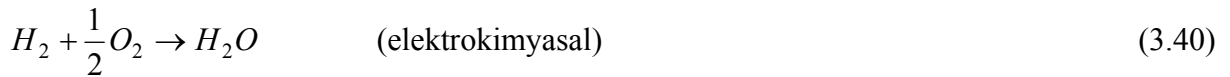
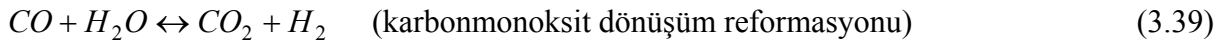
reaksiyonu ile CO'in ve metan reformasyon reaksiyonuyla da CH₄'ün H₂'e dönüştürülmesi daha tercih edilen yöntemdir (Meusinger vd., 1998).



Şekil 3.5 Tüpsel yakıt hücre komponenti

KOYH'nin anot kısmı başlıca H₂, H₂O, % 10-20 CH₄ ve CO gaz karışımını içeren ön-reformasyon çıkış gazlarıyla beslenir. Metan bulunduğu sürece metanın reformasyonu için gerekli ısı hidrojenin elektrokimyasal reaksiyonundan açığa çıkan ısıyla karşılanır. Karbon oluşumu yüksek işletme sıcaklığı ve su buharından dolayı oluşmaz (Sancez vd., 2006).

Şekil 3.5'de gösterildiği gibi KOYH'nin anot tarafına, ön reformasyondan çıkan gaz karışımı (3 noktası) ve katot tarafına da hava girer (7 noktası). Yakıt hücresinde meydana gelen reaksiyonlar şunlardır:



Yukarda belirtilen reaksiyonların verilen işletme sıcaklığında termodinamik dengeye ulaştıkları düşünülmüştür. KOYH'de işletme sıcaklığının yeterince yüksek olması nedeniyle metanın reformasyon reaksiyonunda tamamen reforme edildiği ve dönüşüm reaksiyonunun kimyasal dengede olduğu kabul edilmiştir. Reformasyon ve dönüşüm reaksiyonları neticesinde ortaya çıkan hidrojen ve önreformasyondan gelen hidrojenin belirli bir kısmı elektrokimyasal reaksiyona katılır. Katot tarafındaki O₂, anottan gelen elektronlar tarafından O⁻ iyonuna dönüştürülür ve elektrolit yardımıyla elektrokimyasal reaksiyonun gerçekleştiği yere doğru hareket eder (Bove vd., 2005a):



Yakıt hücresinde dahili olarak gerçekleşen metan reformasyon ve karbonmonoksit dönüşüm reaksiyonlarının denge sabitleri (K_{pr} ve K_{ps}), Denklem 3.18 ve 3.19’da ifade edildiği şekilde verilen işletme sıcaklığı için reaksiyon Gibbs enerji fonksiyonlarından hesaplanır.

$\dot{x}$ yakıt hücresi içinde dahili olarak reforme edilmiş metanın molar debisi (tüm metanın reforme edildiği kabul varsayılmıştır), $\dot{y}$ karbonmonoksit dönüşüm reaksiyonunda tüketilen karbonmonoksitin molar debisi ve $\dot{z}$ elektrokimyasal reaksiyonda kullanılan hidrojenin molar debisi (verilen akım yoğunluğu veya sisteme giren metanın molar debisinden hesaplanır) olarak tanımlanırsa, yakıt hücresinin kütle dengesi denkleminde anot ve katot çıkış noktalarının molar debileri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{n}_{4,CH_4} = \dot{n}_{3,CH_4} - \dot{x} = 0 \quad (3.42)$$

$$\dot{n}_{4,CO} = \dot{n}_{3,CO} + \dot{x} - \dot{y} \quad (3.43)$$

$$\dot{n}_{4,CO_2} = \dot{n}_{3,CO} + \dot{y} \quad (3.44)$$

$$\dot{n}_{4,H_2} = \dot{n}_{3,H_2} + 3\dot{x} + \dot{y} - \dot{z} \quad (3.45)$$

$$\dot{n}_{4,H_2O} = \dot{n}_{3,H_2O} - \dot{x} - \dot{y} + \dot{z} \quad (3.46)$$

$$\dot{n}_{8,O_2} = \dot{n}_{7,O_2} - \frac{\dot{z}}{2} \quad (3.47)$$

$$\dot{n}_{8,N_2} = \dot{n}_{7,N_2} \quad (3.48)$$

Reaksiyonların denge sabitleri, öncü reformer komponent modeline benzer şekilde aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$K_{pr} = \frac{\left(\frac{\dot{n}_{3,H_2} + 3\dot{x} + \dot{y} - \dot{z}}{\dot{n}_{2,top} + 2\dot{x}} \right)^3 \cdot \left(\frac{\dot{n}_{3,CO} + \dot{x} - \dot{y}}{\dot{n}_{2,top} + 2\dot{x}} \right)}{\left(\frac{\dot{n}_{3,CH_4} - \dot{x}}{\dot{n}_{2,top} + 2\dot{x}} \right) \cdot \left(\frac{\dot{n}_{2,H_2O} - \dot{x} - \dot{y} + \dot{z}}{\dot{n}_{2,top} + 2\dot{x}} \right)} P^2 \quad (3.49)$$

$$K_{ps} = \frac{\left(\frac{\dot{n}_{3,H_2} + 3\dot{x} + \dot{y} - \dot{z}}{\dot{n}_{2,top} + 2\dot{x}} \right) \cdot \left(\frac{\dot{n}_{3,CO_2} + \dot{y}}{\dot{n}_{2,top} + 2\dot{x}} \right)}{\left(\frac{\dot{n}_{3,CO} + \dot{x} - \dot{y}}{\dot{n}_{2,top} + 2\dot{x}} \right) \cdot \left(\frac{\dot{n}_{3,H_2O} - \dot{x} - \dot{y} + \dot{z}}{\dot{n}_{2,top} + 2\dot{x}} \right)} \quad (3.50)$$

Yakıt hücresinde elektrokimyasal reaksiyona girecek hidrojenin miktarı, yakıt hücresinin anoduna giren metan, hidrojen ve karbonmonoksit karışanlarının hidrojen eşdeğerlerinin toplamı ve yakıt kullanım faktörüne bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{z} = U_f \cdot (4 \cdot \dot{n}_{3,CH_4} + \dot{n}_{3,H_2} + \dot{n}_{3,CO}) \quad (3.51)$$

$\dot{x}$, $\dot{y}$ ve $\dot{z}$ 'in hesaplanmasından sonra yakıt hücre çıkış noktalarının (4 ve 8 noktaları) karışım kompozisyonu, molar kütle denge denklemlerinden (Denklem 3.42-3.48) bulunabilir.

Hücre voltajının hesaplanması yakıt hücre komponent modelinin en önemli kısımlarından biridir. Hücre voltajı, temel olarak Nernst potansiyeli ve başlıca üç önemli polarizasyon kayıplarının matematiksel olarak hesaplanmasına dayanmaktadır. Bu hesaplar Bölüm 2'de ayrıntılı olarak verildiği için bu bölümde bahsedilmemiştir. Hücre voltajı, Nernst potansiyelinden polarizasyonların oluşturduğu kayıp voltajların çıkartılmasıyla bulunmaktadır:

$$V_h = V_N - V_{ohm} - V_{akt} - V_{kon} \quad (3.52)$$

Tek bir hücrenin sahip olduğu voltaj değeri hesaplandığında, yakıt hücresinden elde edilen güç çıktısı Denklem 3.53'de verilmiştir:

$$\dot{W}_{YH} = N \cdot V_h \cdot i \quad (3.53)$$

burada N , yakıt hücre modülünde kullanılan tüp sayısını temsil etmektedir. Enerji denge denkleminde katot çıkış entalpi ve sıcaklık değeri hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_{YH} - \dot{W}_{YH} + \sum_i (\dot{n}_{3,i} \bar{h}_{3,i} + \dot{n}_{7,i} \bar{h}_{7,i})_g - \sum_i (\dot{n}_{4,i} \bar{h}_{4,i} + \dot{n}_{8,i} \bar{h}_{8,i})_c = 0 \quad (3.54)$$

Tüpsel yakıt hücresinin giriş ve çıkış noktalarının termodinamik özellikleri hesaplandığında ekserji değerleri de hesaplanabilir. 3 noktasının ekserji hesabı ön reformer komponentinde anlatıldığı için 4, 7 ve 8 noktalarının ekserji değerlerinin nasıl belirleneceği aşağıda açıklanmıştır:

4 noktası: Tüpsel yakıt hücresinin anot çıkışıdır. Bu noktanın gaz kompozisyonu içinde CO, CO₂, H₂ ve H₂O bulunmaktadır. Bu kompozisyonun fiziksel ve kimyasal ekserji ifadesi Denklem 3.55 ve 3.56'da verilmiştir:

$$\dot{E}_4^f = \sum_i \dot{n}_{4,i} [\bar{h}_{4,i} - \bar{h}_{o4,i} - T_o (\bar{s}_{4,i} - \bar{s}_{o4,i})] \quad (3.55)$$

$$\dot{E}_4^k = \sum_i \dot{n}_{4,i} \sum_i \left(x_{4,i} \bar{e}_{3,i}^{kim} + \bar{R} T_o x_{4,i} \ln(x_{4,i}) \right) \quad (3.56)$$

7 noktası: Yakıt hücre modülüne giren havanın katalitik yakıcının içinden geçen hava besleme kanalında sıcaklığı arttıktan sonra tüpsel yakıt hücresinin katot tarafına girdiği noktadır. Bu noktada havayı oluşturan karışanların molar oranlarında bir değişme söz konusu olmadığı için kimyasal ekserjisi sıfırdır. Fiziksel ekserji değeri ise aşağıdaki denklemde belirtildiği gibi yazılabilir:

$$\dot{E}_7^f = \sum_i \dot{n}_{7,i} \left[\bar{h}_{7,i} - \bar{h}_{o7,i} - T_o (\bar{s}_{7,i} - \bar{s}_{o7,i}) \right] \quad (3.57)$$

8 noktası: Tüpsel yakıt hücresinin katot tarafına giren havanın kimyasal reaksiyona girmeyen kısmının katot kanalından çıktığı noktadır. Bu noktadaki havayı oluşturan O₂ ve N₂ gazlarının molar oranları değiştiği için kimyasal ekserjisinde değişme olmaktadır. Denklem 3.58 ve 3.59 sırasıyla bu noktanın fiziksel ve kimyasal ekserjilerini göstermektedir:

$$\dot{E}_8^f = \sum_i \dot{n}_{8,i} \left[\bar{h}_{8,i} - \bar{h}_{o8,i} - T_o (\bar{s}_{8,i} - \bar{s}_{o8,i}) \right] \quad (3.58)$$

$$\dot{E}_8^k = \sum_i \dot{n}_{8,i} \sum_i \left(x_{8,i} \bar{e}_{8,i}^{kim} + \bar{R} T_o x_{8,i} \ln(x_{8,i}) \right) \quad (3.59)$$

Her noktaya ait ekserji değerleri bilindiğinde ekserji kaybı ifadesi Denklem 3.60'da olduğu gibi ekserji dengesinden hesaplanabilir:

$$\dot{E}_{D,YH} = \cancel{\dot{Q}_{YH}} \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) - \dot{W}_{YH} + (\dot{E}_3 + \dot{E}_7)_g - (\dot{E}_4 + \dot{E}_8)_c \quad (3.60)$$

Çevre ile ısı transferi olmadığı düşünüldüğü için Denklem (3.60) sadeleştirilerek Denklem 3.61'deki gibi yazılabilir:

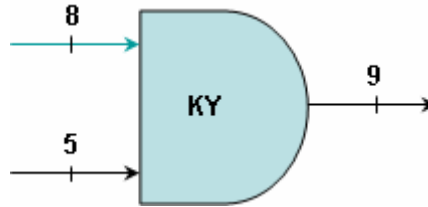
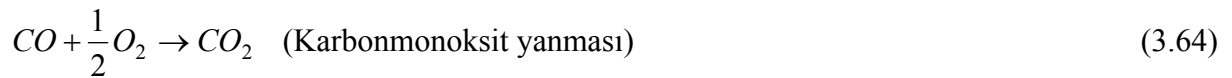
$$\dot{E}_{D,YH} = \dot{E}_3 + \dot{E}_7 - \dot{E}_4 - \dot{E}_8 - \dot{W}_{YH} \quad (3.61)$$

Ekserji verim ifadesi de Denklem 3.62'de gösterildiği gibi ifade edilebilir:

$$\eta_{E,YH} = \frac{\dot{W}_{YH}}{(\dot{E}_3 + \dot{E}_7) - (\dot{E}_4 + \dot{E}_8)} \quad (3.62)$$

3.3.4 Katalitik yakıcı

Elektrokimyasal ve kimyasal reaksiyonlardan sonra anot çıkışındaki gazların bir kısmı geri beslenerek taze yakıtla mikserde birleşir ve ön reformasyon için buhar temini sağlanır. Geriye kalan gaz kompozisyonu (5 noktası) içindeki H_2 ve CO , kullanılmayan havayla (8 noktası) katalitik yakıcıda karşıır ve oksijenle yanma reaksiyonlarına girerler (Şekil 3.6). Bu reaksiyonlar ısı açığa çıkarırlar. Bu ısı, yanma ürünlerinin sıcaklığını yükseltir. Katalitik yakıcıda meydana gelen reaksiyonlar aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.6 KOYH modülündeki katalatik yakıcı komponenti

Hidrojen yanma reaksiyonunda tüketilen hidrojenin molar debisinin $\dot{z}_{ky}$, karbonmonoksit yanma reaksiyonunda tüketilen karbonmonoksitin molar debisinin $\dot{y}_{ky}$ olması durumunda molar kütle dengesinden katalitik yakıcının çıkış noktasındaki (9 noktası) karışımın kompozisyonu ve molar debisi belirlenebilir. $\dot{y}_{ky}$ ve $\dot{z}_{ky}$ değerleri yakıcının yanma verimi ile hesap edilir:

$$\dot{y}_{ky} = \dot{n}_{5,CO} \cdot \eta_{KY} \quad (3.65)$$

$$\dot{z}_{ky} = \dot{n}_{5,H_2} \cdot \eta_{KY} \quad (3.66)$$

Buna göre molar kütle dengesi aşağıda verilen denklemlerle ifade edilebilir:

$$\dot{n}_{9,CO} = \dot{n}_{5,CO} - \dot{y}_{ky} \quad (3.67)$$

$$\dot{n}_{9,CO_2} = \dot{n}_{5,CO_2} + \dot{y}_{ky} \quad (3.68)$$

$$\dot{n}_{9,H_2} = \dot{n}_{5,H_2} - \dot{z}_{ky} \quad (3.69)$$

$$\dot{n}_{9,H_2O} = \dot{n}_{5,H_2O} + \dot{z}_{ky} \quad (3.70)$$

$$\dot{n}_{9,O_2} = \dot{n}_{8,O_2} - \frac{\dot{z}_{ky}}{2} - \frac{\dot{y}_{ky}}{2} \quad (3.71)$$

$$\dot{n}_{9,N_2} = \dot{n}_{8,N_2} \quad (3.72)$$

Katalitik yakıcı komponentin giriş ve çıkış molar debileri ve kompozisyonu hesaplandıktan sonra enerji dengesinden çıkış noktasının entalpi ve sıcaklık değeri hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_{KY} - \dot{W}_{KY} + \sum_i (\dot{n}_{5,i} \cdot \bar{h}_{5,i} + \dot{n}_{8,i} \cdot \bar{h}_{8,i})_g - \sum_i (\dot{n}_{9,i} \cdot \bar{h}_{9,i})_\zeta = 0 \quad (3.73)$$

Katalitik yakıcı komponentinde meydana gelen ekserji kaybını belirlemek için giriş ve çıkış noktalarındaki ekserji değerlerinin belirlenmesi gerekir. 8 noktasının ekserji değeri bir önceki komponent modelinde verilmişti. Aşağıda 5 ve 9 noktalarına ait ekserji ifadeleri verilmiştir.

5 noktası: Yakıt hücresinin anodundan çıkan gaz karışımının bir kısmı 6 noktasına geri beslenmişti. 5 noktası ise geriye kalan gaz karışımının katalitik yakıcıya girdiği noktadır. Denklem 3.74 ve 3.75, 5 noktasının fiziksel ve kimyasal ekserjilerini vermektedir:

$$\dot{E}_5^f = \sum_i \dot{n}_{5,i} [\bar{h}_{5,i} - \bar{h}_{05,i} - T_o (\bar{s}_{5,i} - \bar{s}_{05,i})] \quad (3.74)$$

$$\dot{E}_5^k = \sum_i \dot{n}_{5,i} \sum_i (x_{5,i} \bar{e}_{5,i}^{kim} + \bar{R} T_o x_{5,i} \ln(x_{5,i})) \quad (3.75)$$

9 noktası: Katalitik yakıcıda gerçekleşen yanma reaksiyon ürünlerinin komponentten çıktığı noktadır. Bu noktanın fiziksel ve kimyasal ekserjileri aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\dot{E}_9^f = \sum_i \dot{n}_{9,i} [\bar{h}_{9,i} - \bar{h}_{09,i} - T_o (\bar{s}_{9,i} - \bar{s}_{09,i})] \quad (3.76)$$

$$\dot{E}_9^k = \sum_i \dot{n}_{9,i} \sum_i (x_{9,i} \bar{e}_{9,i}^{kim} + \bar{R} T_o x_{9,i} \ln(x_{9,i})) \quad (3.77)$$

Katalitik yakıcının her noktasındaki ekserji değerlerinin hesaplanması durumunda, ekserji kaybı ekserji dengesinden hesaplanabilir:

$$\dot{E}_{D,KY} = \dot{Q}_{KY} \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) - \dot{W}_{KY} + (\dot{E}_5 + \dot{E}_8)_g - (\dot{E}_9)_\zeta \quad (3.78)$$

Çevre ile ısı ve iş transferi olmadığı için yukarıdaki ekserji kaybı ifadesi Denklem 3.79'daki gibi yazılabilir:

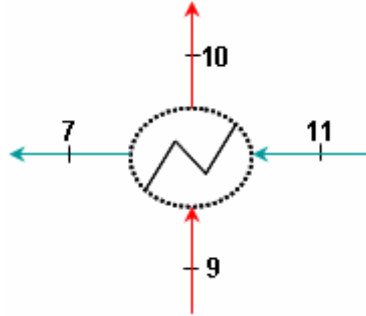
$$\dot{E}_{D,KY} = \dot{E}_5 + \dot{E}_8 - \dot{E}_9 \quad (3.79)$$

Katalitik yakıcının ekserji verimi, çıkış ekserjisinin girişteki ekserji toplamına oranı ile hesaplanabilir (Bejan vd, 1995):

$$\eta_{E,KY} = \frac{\dot{E}_9}{\dot{E}_5 + \dot{E}_8} \quad (3.80)$$

3.3.5 Isı değıştiricisi

KOYH modülüne giren hava (11 noktası) besleme kanalları ile tüpsel yakıt hücresine giderken katalitik yakıcının içinden geçer. Böylece katalitik yakıcıda açığa çıkan ısı (9 noktası) bir kısmı besleme kanalları vasıtası ile yakıt hücre tüplerine giden havayı (7 noktası) ısıtarak sıcaklığını artırır. Modülde gerçekleşen bu proses, bir ısı değıştiricideki prosese benzediğı için ısı değıştirci alt başlığında incelenmiştir.



Şekil 3.7 KOYH modülündeki ısı değıştiricisi

Ele alınan ısı değıştiricisinin modellenmesinde soğuk akışkan yakıt hücre modülüne giren hava, sıcak akışkan ise katalitik yakıcıdan çıkan yüksek sıcaklıktaki gaz karışımıdır. 7 noktasının sıcaklık değeri kabul edilen bir etkinlik katsayısı ile belirlenmiştir (Bejan vd., 1995). Denklem 3.81 ısı değıştiricisinin etkinlik katsayısı ve Denklem 3.82 ise 7 noktasının sıcaklık değerin etkinli k katsayısı ile ilişkisini göstermektedir:

$$\varepsilon_{ID} = \frac{T_7 - T_{11}}{T_9 - T_{11}} \quad (3.81)$$

$$T_7 = T_{11} + \varepsilon_{ID}(T_9 - T_{11}) \quad (3.82)$$

Soğuk ve sıcak akışkanların giriş ve çıkış noktalarındaki kompozisyonlarında ve debilerinde bir değişme söz konusu değildir. 7 noktasının sıcaklığı hesaplandıktan sonra enerji dengesinden 10 noktasının entalpisi hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_{ID} - \dot{W}_{ID} + \sum_i (\dot{n}_{9,i} \cdot \bar{h}_{9,i} + \dot{n}_{7,i} \cdot \bar{h}_{7,i})_g - \sum_i (\dot{n}_{10,i} \cdot \bar{h}_{10,i} + \dot{n}_{11,i} \cdot \bar{h}_{11,i})_c = 0 \quad (3.83)$$

Isı değiştiricisinde çevre ile ısı transferi olmadığı kabulü yapıldığı ve iş üretimi veya tüketimi de olmadığı için Denklem 3.83'deki ilgili terimler dikkate alınmamıştır. 10 noktasının entalpisi hesaplandıktan sonra bu noktanın sıcaklığı kolayca bulunur.

Ekserji kaybını ve ekserji verimini bulmak için giriş ve çıkış noktalarının ekserjilerini hesaplamak gerekir. Her noktanın ekserjisi o noktanın fiziksel ve kimyasal ekserjilerinin toplamı alınarak hesaplanmıştır. 7 ve 9 noktalarının ekserji değerleri önceki kısımlarda verildiği için burada 10 ve 11 noktalarının ekserji ifadeleri verilmiştir.

10 noktası: Yüksek sıcaklığa sahip katalitik yakıcı çıkışındaki gazların, ısılarının bir kısmını yakıt hücresine giren havaya aktardıktan sonra KOYH modülünü terk ettiği noktadır. Bu noktanın kimyasal ekserjisi gaz karışımının molar oranlarında bir değişme olmadığı için 9 noktasının kimyasal ekserjine eşittir. Fiziksel ekserji hesabı Denklem 3.84'de verilmiştir:

$$\dot{E}_{10}^f = \sum_i \dot{n}_{10,i} [\bar{h}_{10,i} - \bar{h}_{o10,i} - T_o (\bar{s}_{10,i} - \bar{s}_{o10,i})] \quad (3.84)$$

11 noktası: Havanın yakıt hücre modülüne girdiği noktadır. Bu noktanın gaz bileşiminin molar oranı çevre şartlarıyla aynı olduğu için kimyasal ekserjisi sıfırdır. Fiziksel ekserjisi Denklem 3.85'deki gibidir:

$$\dot{E}_{11}^f = \sum_i \dot{n}_{11,i} [\bar{h}_{11,i} - \bar{h}_{o11,i} - T_o (\bar{s}_{11,i} - \bar{s}_{o11,i})] \quad (3.85)$$

Her noktanın ekserjileri hesaplandığında ekserji dengesinden ekserji kaybı bulunabilir:

$$\dot{E}_{D,ID} = \dot{Q}_{ID} \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) - \dot{W}_{ID} + (\dot{E}_9 + \dot{E}_{11})_g - (\dot{E}_7 + \dot{E}_{10})_c \quad (3.86)$$

Denklem 3.86 sadeleştirilerek yeniden yazılırsa aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{E}_{D,ID} = \dot{E}_9 + \dot{E}_{11} - \dot{E}_7 - \dot{E}_{10} \quad (3.87)$$

Isı değiştiricisinin ekserji verimini Denklem 3.88'de olduğu gibi soğuk ve sıcak akışkanların

çıkış noktalarındaki ekserji değerlerini giriş noktalarındaki ekserji değerlerine oranlayarak bulunabilir (Bejan vd, 1995):

$$\eta_{E,ID} = \frac{\dot{E}_7 - \dot{E}_{11}}{\dot{E}_9 - \dot{E}_{10}} \quad (3.88)$$

3.4 KOYH Modülü için Performans Kriterleri

Her komponentin yukarıdaki gibi modelleri oluşturulduktan sonra birbirleriyle entegre edilerek KOYH modeli tamamlanır. Bu modele ve göz önüne alınan alternatif kriterlere göre performans hesaplanabilir. KOYH modülünden elde edilen güç çıktısı brüt güç değeridir ve Denklem 3.53’de verilmişti. I. Kanun verimi modülden elde edilen güç çıktısı, sisteme giren yakıt miktarı ve yakıtın alt ısı değerine bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{KOYH}}{\dot{n}_{11} \cdot LHV_f} \quad (3.89)$$

Modülden elde edilen güç, KOYH modülünün toplam ekserjisine eşittir:

$$\dot{E}_{Top} = \dot{W}_{KOYH} \quad (3.90)$$

KOYH modülün ekserji verimi ise sistemden elde edilen toplam ekserjinin yakıtın ekserjine bölünmesiyle hesaplanır:

$$\eta_E = \frac{\dot{E}_{Top}}{\dot{E}_1} \quad (3.91)$$

Modülün ekserji kaybı her komponentte meydana gelen ekserji kayıplarının ve modülden çıkan gazların ekserji değerinin toplanmasıyla bulunur:

$$\dot{E}_{D,Top} = \dot{E}_{D,M} + \dot{E}_{D,ÖR} + \dot{E}_{D,YH} + \dot{E}_{D,KY} + \dot{E}_{D,ID} + \dot{E}_{10} \quad (3.92)$$

Bu çalışmada, Üst (2005) tarafından tanımlanan ve çeşitli enerji üretim sistemlerine uygulanan (Üst vd. 2005, 2006) yeni bir performans kriteri (ekserjitik performans katsayısı/ekolojik performans katsayısı) ilk defa yakıt hücrelerinin performansını değerlendirmede diğer klasik kriterlerle birlikte kullanılacaktır. Ekserjitik performans katsayısı (EPK), toplam ekserji çıktısının toplam ekserji kaybına oranı olarak Denklem 3.93’deki gibi tanımlanmıştır:

$$EPK = \frac{\dot{E}_{Top}}{\dot{E}_{D,Top}} \quad (3.93)$$

3.5 Simülasyon ve Modelin Doğrulanması

100 kW'lık tüpsel bir KOYH modülüne göre geliştirilen modelin simülasyonu Çizelge 3.1'de verilen simülasyon giriş parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve performans sonuçları elde edilmiştir.

Çizelge 3.1 Simülasyon giriş parametreleri

Parametre	Değer
Yakıt giriş kompozisyonu (%)	100 CH ₄
Hücre işletme sıcaklığı (°C)	1000
Hücre işletme basıncı (bar)	1.08
Ortalama akım yoğunluğu (A/m ²)	1800
Aktif hücre alanı (m ²)	0.0834
Tüpsel hücre sayısı (adet)	1152
Hava giriş sıcaklığı(°C)	630
Yakıt giriş sıcaklığı (°C)	400
Yakıcı verimi (%)	98
Hücre yakıt kullanım faktörü (%)	67.7
Toplam yakıt kullanım faktörü (%)	85
Hava kullanım faktörü (%)	18
Molar Buhar-karbon oranı (-)	2
Yakıt hücre grubundaki basınç kaybı (%)	2
Katalitik yakıcıdaki basınç kaybı (%)	3
İnverter verimi (%)	92.5

Bir komponentin çıkış değerleri sonraki komponentin giriş değerleri olacağından, tüm komponent modelleri simüle edildiğinde modülün tüm karakteristikleri belirlenmiş olur. KOYH modülünün simülasyonundaki en kritik işlem, 6 noktasındaki gaz karışımlarının molar oranları ile yakıt hücresinin anot çıkışı olan 4 noktasındaki gaz karışımının molar oranlarının aynı olmasının sağlanmasıdır. Simülasyon esnasında bu iki noktanın molar oranları karşılaştırılır. Eğer fark varsa 4 noktasının hesaplanan molar oran değerleri 6 noktası

için yeni değerleri olarak atanır ve tüm komponentlerdeki hesaplamalar yeniden yapılır. Bu iki noktanın molar oran değerleri arasındaki fark, ön görülen hata değerine düşünceye kadar iterasyon devam eder. Yakınsama gerçekleştiğinde simülasyon işlemi sonlanır ve modülün performansı ile ilgili tüm bilgiler hesaplanmış olur. Tüpsel KOYH modülünün simülasyon sonuçları Çizelge 3.2’de verilmiştir. Çizelge 3.3’de ise, simülasyondan elde edilen sonuçlar ile Siemens-Westinghouse tarafından geliştirilen Tüpsel KOYH ile ilgili literatürdeki sonuçların (Veyo ve Lundberg 1999; Campanari, 2001; Veyo vd., 2002; Veyo vd., 2003; Zhang vd., 2005; Cali vd. 2006) bir karşılaştırması sunulmuştur. Bu karşılaştıma göstermektedir ki geliştirilen model, tüpsel KOYH modülünün performansını başarılı bir şekilde simüle edebilmektedir.

Çizelge 3.2 KOYH modülü için her noktadaki termodinamik özellikler

Nok.	T (°C)	P (bar)	n (kmol/h)	Eks (kW)	Gaz kompozisyonu (%) molar						
					H ₂	CH ₄	H ₂ O	CO	CO ₂	O ₂	N ₂
1	400.0	1.080	00.95	222.2	-	100	-	-	-	-	-
2	794.5	1.080	05.81	325.9	10.36	16.34	45.42	6.37	21.51	-	-
3	550.5	1.080	06.49	324.5	29.83	09.29	30.65	6.36	23.87	-	-
4	910.0	1.058	07.71	168.0	12.38	-	54.29	7.61	25.72	-	-
5	910.0	1.058	02.85	062.1	12.38	-	54.29	7.61	25.72	-	-
6	910.0	1.080	04.86	106.0	12.38	-	54.29	7.61	25.72	-	-
7	798.0	1.080	42.66	149.7	-	-	-	-	-	21.01	78.99
8	906.7	1.058	41.04	174.0	-	-	-	-	-	17.90	82.10
9	1003	1.030	43.63	222.8	0.00	-	4.34	0.00	2.17	16.20	77.27
10	847.7	1.030	43.63	173.2	0.00	-	4.34	0.00	2.17	16.20	77.27
11	630.0	1.080	42.66	104.3	-	-	-	-	-	21.01	78.99

Çizelge 3.3 KOYH modülünün simülasyon sonuçları ve literatür ile karşılaştırılması

Parametre	Literatür	Simülasyon
Hücre voltajı (V)	0.682	0.678
Bürüt DC güç (kW)	118	117.2
Öncü-reformer çıkış sıcaklığı (°C)	550	550.5
Modül egzoz sıcaklığı (°C)	847	846.5
Bürüt DC elektrik verimi (%)	53.25	55.4
Bürüt AC elektrik verimi (%)	50	51.3
Anot çıkış kompozisyonu (%)	48 H ₂ O, 28 CO ₂ , 14 H ₂ , 5 CO, 5 N ₂	54.3 H ₂ O, 25.7 CO ₂ , 12.4 H ₂ , 7.6 CO, 0 N ₂
Modül çıkış kompozisyonu (%)	5 H ₂ O, 2 CO ₂ , 16 O ₂ , 77 N ₂	4.3 H ₂ O, 2.2 CO ₂ , 16.2 O ₂ , 77.3 N ₂

3.6 Performans Analiz Sonuçları

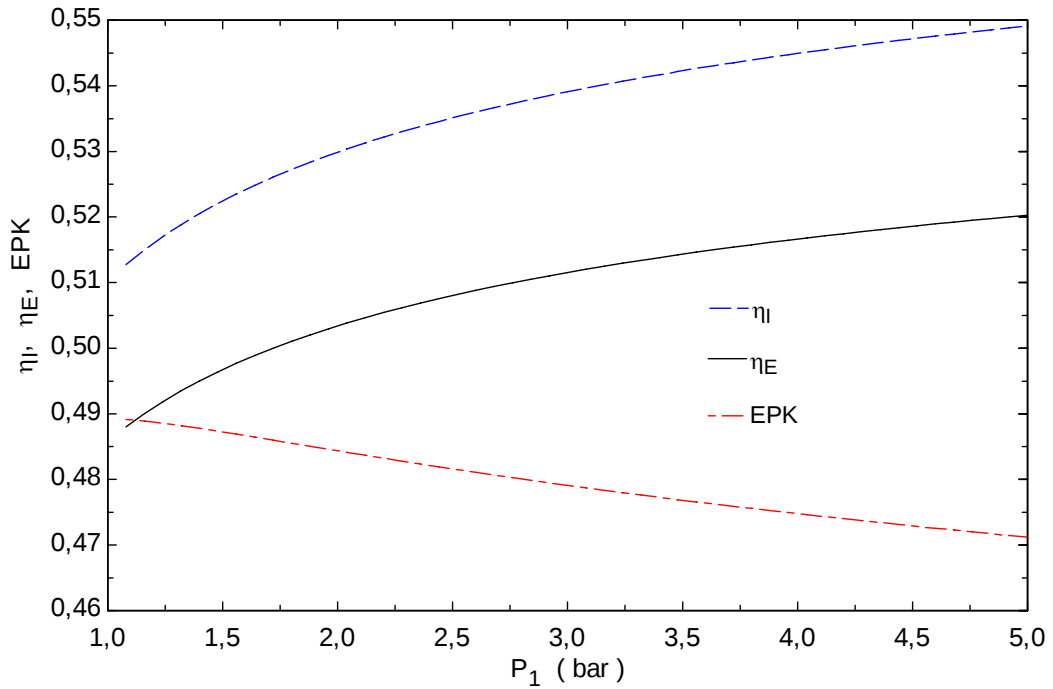
Enerji üretim sistemlerin analizinde dizayn parametrelerinin bağımsız değişkenler olarak tanımlanması önemlidir. Termodinamik sistem analizinde bağımsız değişken olarak tanımlanan bir dizayn parametresinin performansa etkisini inceleyebilmek için, söz konusu parametre belirli aralıkta değiştirilirken, diğer dizayn parametreleri sabit kalmalıdır. Bu bölümde yapılan analizde hücre işletme sıcaklığı (T_h), yakıt kullanma faktörü (U_f), akım yoğunluğu (j), buhar-karbon oranı (r_{SC}) işletme basıncı (P_1), hava giriş sıcaklığı (T_{11}) ve yakıt giriş sıcaklığı (T_{11}) bağımsız değişkenler olarak ele alınmıştır. Performans analizlerinde modül çıkış sıcaklığı 840 °C olarak sabitlenmiştir. Bu durumda hava kullanım faktörü sürekli değişerek sisteme giren hava miktarını belirlemektedir.

3.6.1 İşletme basıncının etkisi

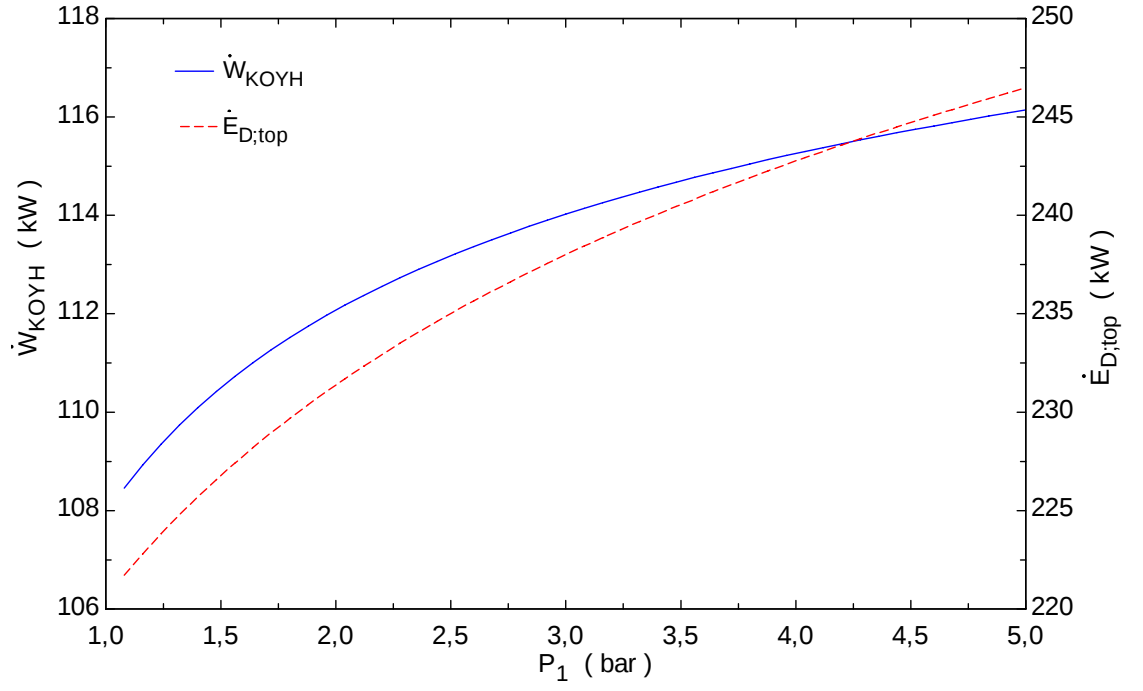
Tüpsel KOYH modülünde işletme basıncının performans üzerindeki etkisi 1.08 ile 5 bar arasında incelenerek sonuçlar Şekil 3.8’de verilmiştir. Sonuçlar, işletme basıncının artmasının I. Kanun ve ekserji verimi üzerinde olumlu etki yaptığını göstermektedir. İşletme basıncının 1.08 bardan 5 bara çıkarılması durumunda hem I. Kanun verimi hem de ekserji verimi % 7 artırarak sırasıyla % 55 ve % 52 verim değerlerine ulaşılmaktadır. Şekil 3.9 bu artışın temel sebebini açıklamaktadır. İşletme basıncının artması, hücre voltajının değerinin artmasına neden olmakta, böylece modülden elde edilen güç artmaktadır. KOYH modülünün toplam ekserji değerinin modülün güç çıktısına eşit olması, ekserji verim davranışının I. Kanun verimine benzemesinin nedenini açıklamaktadır.

Şekil 3.8’de verilen sonuçlar, ekserjitik performans katsayısının (EPK) artan basınçla azaldığını göstermektedir. Basınç artışı modülden elde edilen toplam ekserji değerini artırsa bile toplam ekserji kaybının daha fazla artması (Şekil 3.9) bu azalmanın esas nedenidir.

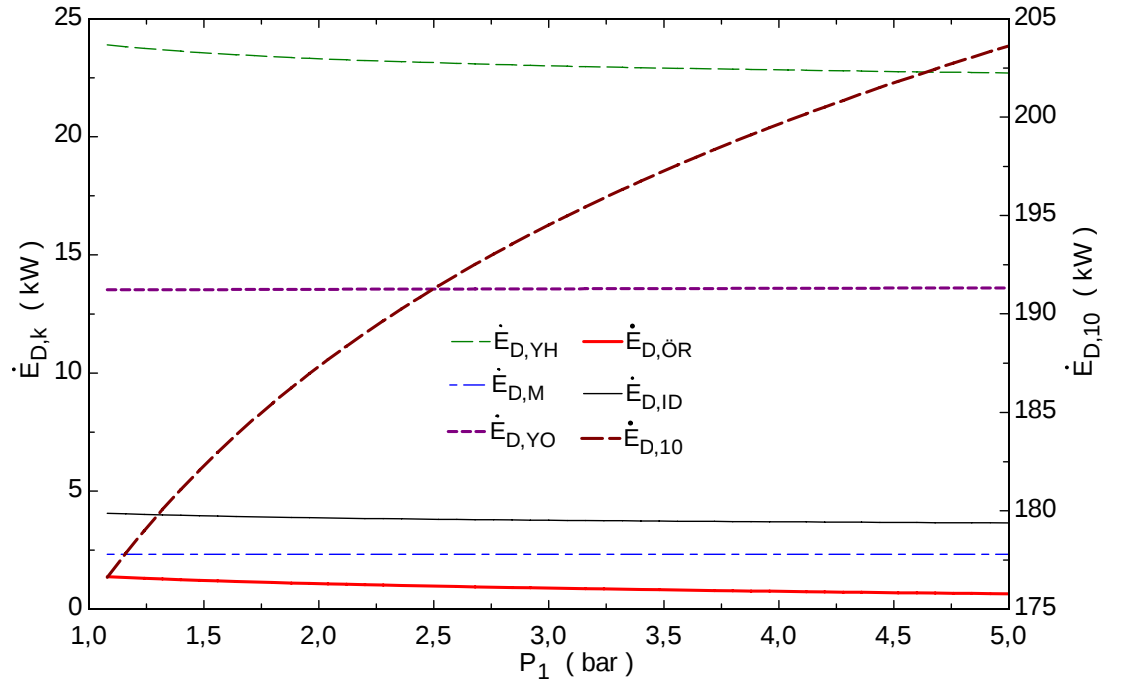
Şekil 3.10’da modül komponentlerindeki ekserji kaybının işletme basıncı ile değişimi görülmektedir. Bu şekilden, modül için en fazla ekserji kaybının 10 noktasında modülü terk eden gaz karışımından kaynaklandığı ve bu kaybın basıncın artması ile önemli ölçüde arttığı gözlenmektedir. Şekil 3.11’de gözönüne alınan basınç aralığında KOYH modülünü oluşturan komponentlerin ekserji verimlerinin işletme basıncı ile değişimleri verilmiştir. Yakıt hücre grubu dışındaki komponentlerde basıncın ekserji verimi üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır.



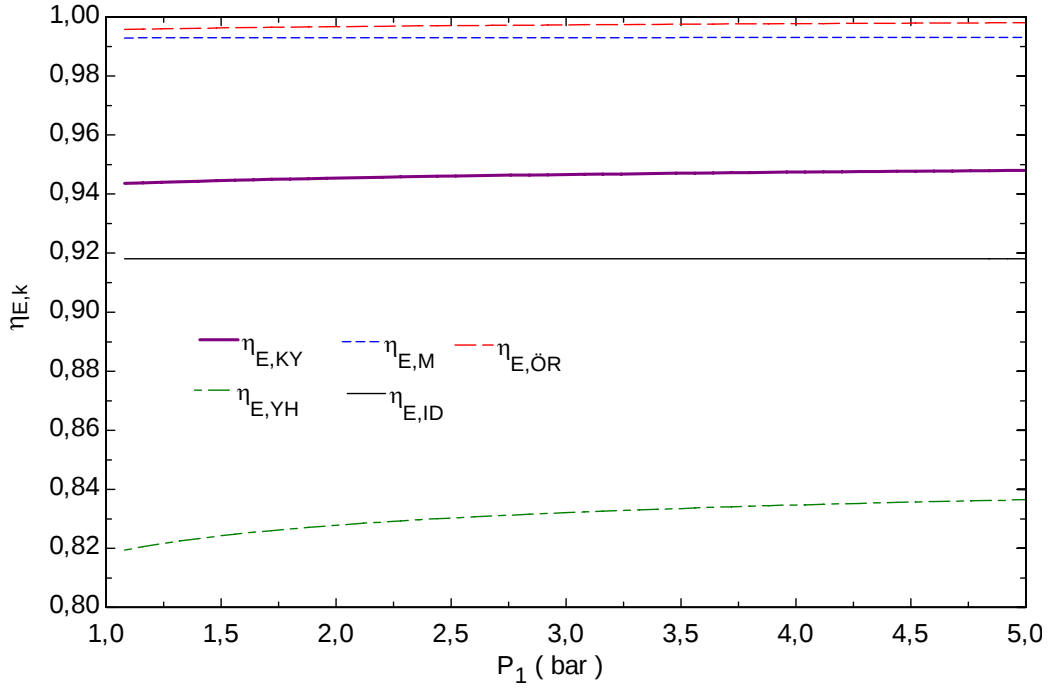
Şekil 3.8 İşletme basıncına göre KOYH modülünün ekserjistik performans katsayısı, ekserji verimi, I. kanun verimi değişimleri



Şekil 3.9 İşletme basıncına göre KOYH modülünün güç ve toplam ekserji kaybı değişimleri



Şekil 3.10 İşletme basıncına göre KOYH modül komponentlerinin ekserji kaybı değişimleri



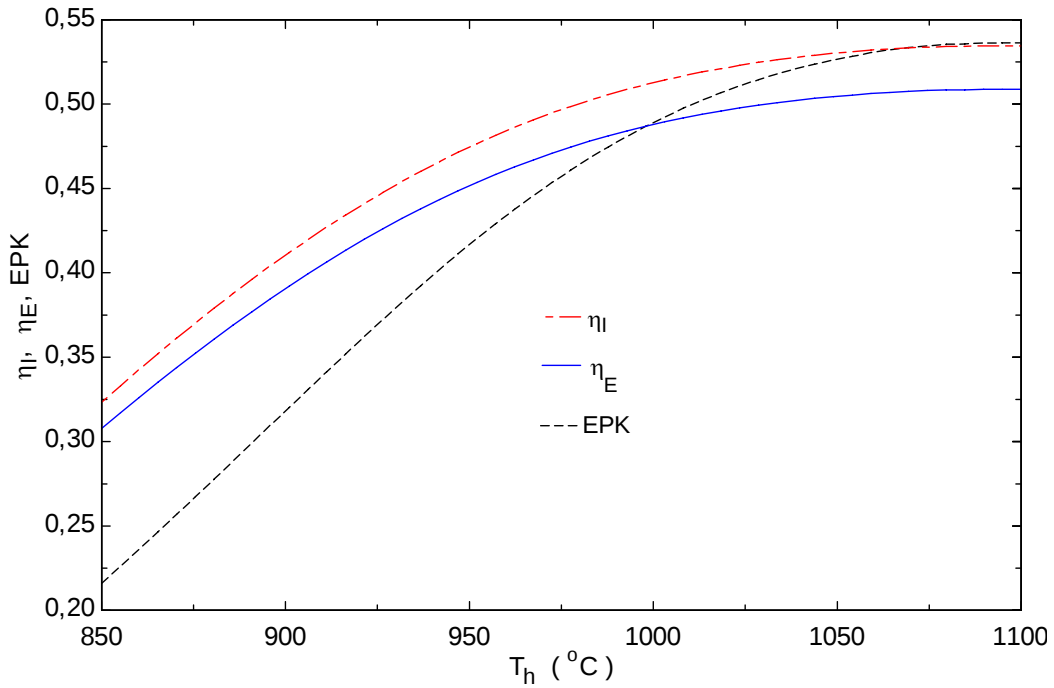
Şekil 3.11 İşletme basıncına göre KOYH modül bileşenlerinin ekserji verimindeki değişimleri

3.6.2 Hücre işletme sıcaklığının etkisi

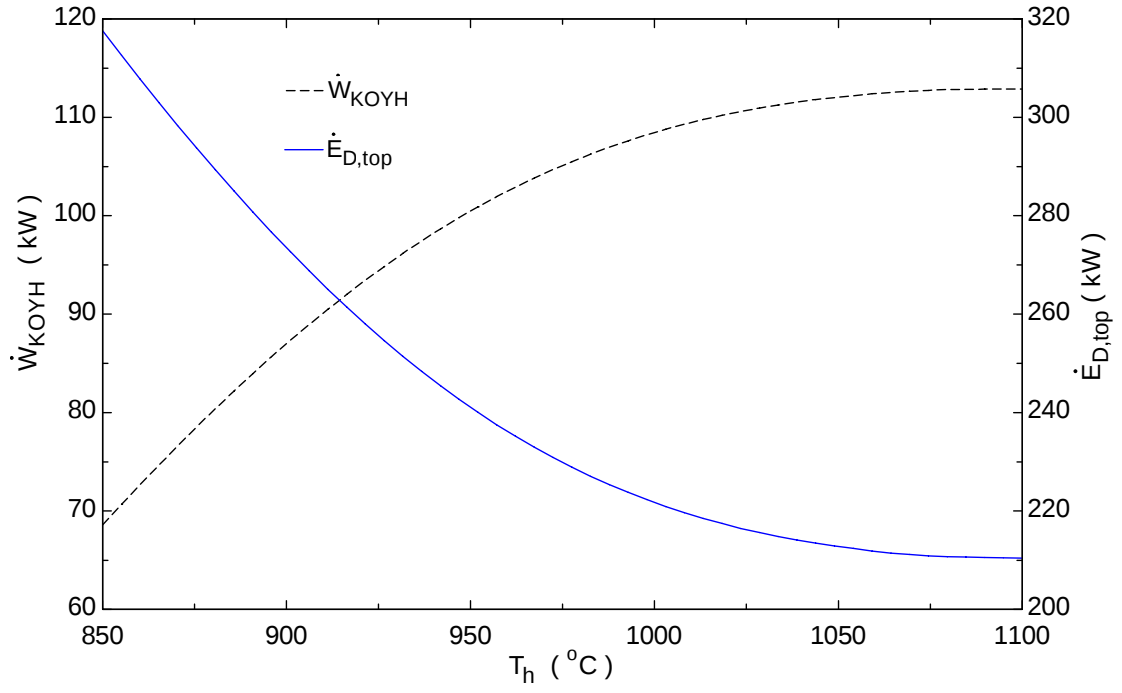
Hücre işletme sıcaklığı 850 °C ile 1100 °C arasında değiştirilerek KOYH modülünün performans değişimi araştırılmış ve sonuçlar Şekil 3.12’de verilmiştir. Gözönüne alınan hücre işletme sıcaklığı aralığında işletme sıcaklığı arttıkça I. Kanun verimi, ekserji verimi ve ekserjistik performans katsayısının azalan bir hızla arttığı gözlenmektedir. İşletme sıcaklığının 850 °C’den 1100 °C’e yükseltilmesi I. Kanun veriminde % 67, ekserji veriminde % 64 ve ekserjistik performans katsayısında ise % 150 bir artış sağlamaktadır. Özellikle düşük sıcaklık değerlerinde artış eğilimi daha hızlı gerçekleşirken, yüksek sıcaklıklarda artış eğilimin azalarak bir noktada durduğu görülmektedir. Çünkü Şekil 3.13’den sıcaklık artışının, modülün güç çıktısını benzer karakteristikte etkilediği görülmektedir, dolayısıyla güç çıktısındaki değişim performans kriterlerinin davranışını şekillendirmektedir. Hücre işletme sıcaklığının düşük olduğu yerlerde voltaj kayıpları çok yüksektir. Bunun neticesinde hücre voltajı ve dolayısıyla modülden elde edilen güç düşük değerdedir. Sıcaklığın artması voltaj kayıplarını hızla düşürmekte böylece hücre voltajı artarak modül gücünü artırmaktadır. Fakat daha yüksek sıcaklıklarda Nernst potansiyelini belirleyen Gibbs enerji fonksiyonundaki azalma miktarı voltaj kayıplarının azalmasından elde edilen artışa yaklaşarak güçteki değişimi yavaşlatarak sabitlenmesine neden olmaktadır.

Ekserjitik performans katsayısındaki daha hızlı artışın nedeni Şekil 3.13’den de görüldüğü gibi hücre işletme sıcaklığının artması ile toplam ekserji kaybının azalmasıdır. Şekil 3.14’de KOYH modülünü oluşturan komponentlerde meydana gelen ekserji kayıplarının hücre işletme sıcaklığı ile değişimi görülmektedir. Toplam ekserji kaybının büyük bir bölümü 10 noktasında modülden çıkan gazlardan kaynaklanmaktadır. Sıcaklık artışı öncü reformer ve mikser dışındaki tüm komponentlerdeki ekserji kaybında bir azalmaya neden olmaktadır. Ancak sıcaklık artışıyla yakıt hücre grubunun ve 10 noktasında modülü terk eden gaz karışımının ekserji kaybındaki azalma diğer komponentlere göre daha fazladır.

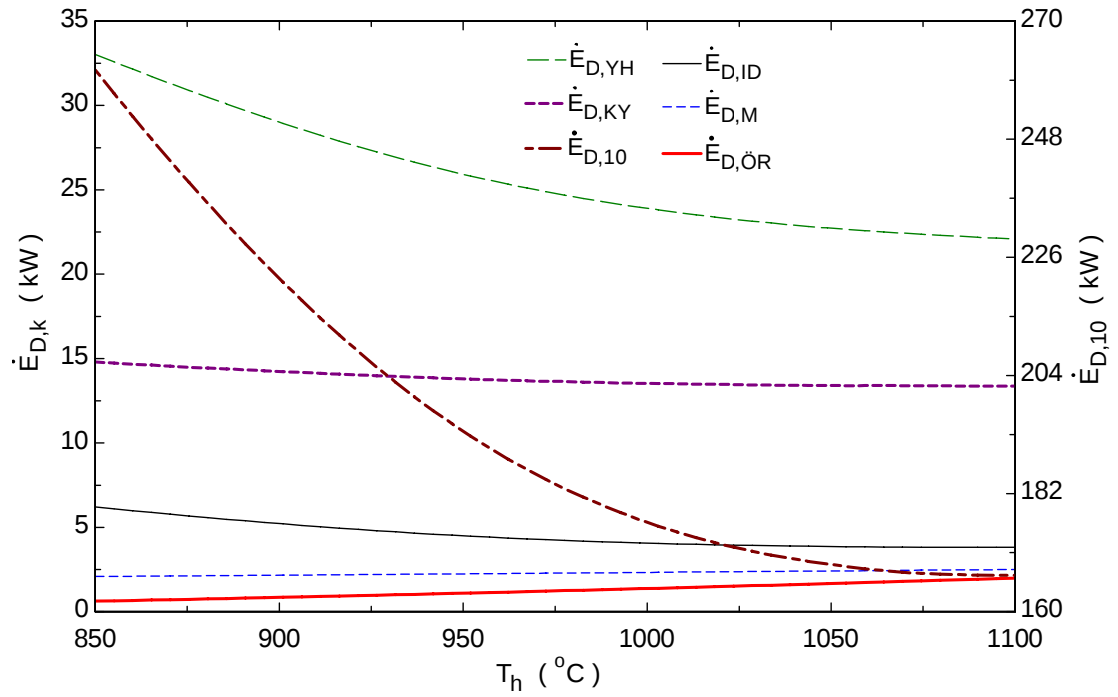
Komponentlerin ekserji verimlerinin işletme sıcaklığı ile değişimi Şekil 3.15’de görülmektedir. Hücre işletme sıcaklığının değişimi yakıt hücre grubunun dışındaki komponentlerin ekserji verimlerinde önemli bir değişikliğe neden olmamaktadır. İşletme sıcaklığının 850 °C’den 1100 °C’e yükseltilmesi yakıt hücre grubunun ekserji verimini % 24 artırmaktadır.



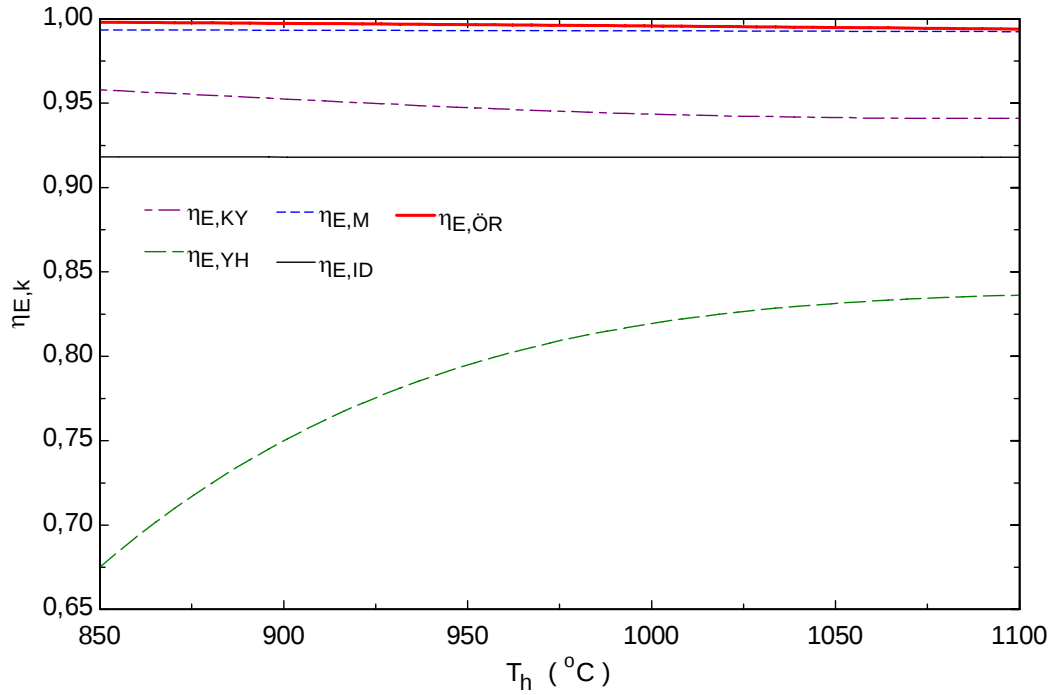
Şekil 3.12 Hücre işletme sıcaklığına göre KOYH modülünün ekserjitik performans katsayısı, ekserji verimi, I. kanun verimi değişimleri



Şekil 3.13 Hücre işletme sıcaklığına göre KOYH modülünün güç ve toplam ekserji kaybı değişimleri



Şekil 3.14 Hücre işletme sıcaklığına göre KOYH modül komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri



Şekil 3.15 Hücre işletme sıcaklığına göre KOYH modül komponentlerinin ekserji verimlerindeki değişimleri

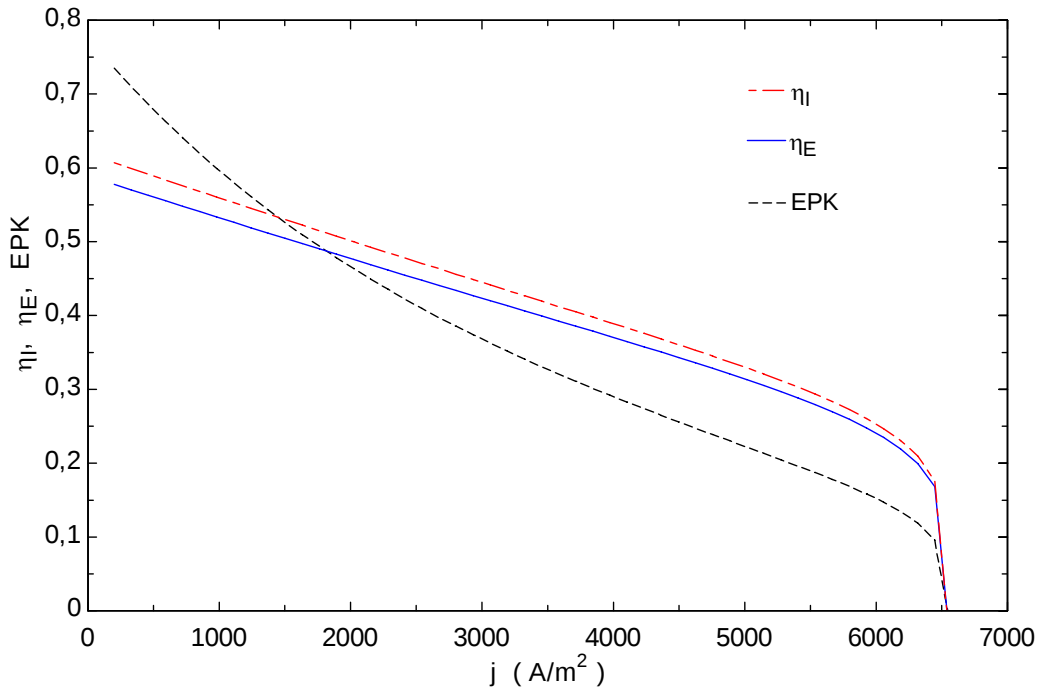
3.6.3 Akım yoğunluğunun etkisi

Akım yoğunluğu 250 A/m^2 'den ile limit akım yoğunluğu değerine (yaklaşık 6500 A/m^2) kadar değiştirilerek, bu değişimin KOYH modülünün performansına etkisi Şekil 3.16'da verilmiştir. Akım yoğunluğu arttıkça I. Kanun verimi, ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı azalmaktadır. Akım yoğunluğunun değeri limit akım yoğunluğu değerine yaklaştıkça performanslar hızla azalarak limit akım yoğunluğu değerinde beklendiği gibi sıfır olmaktadır.

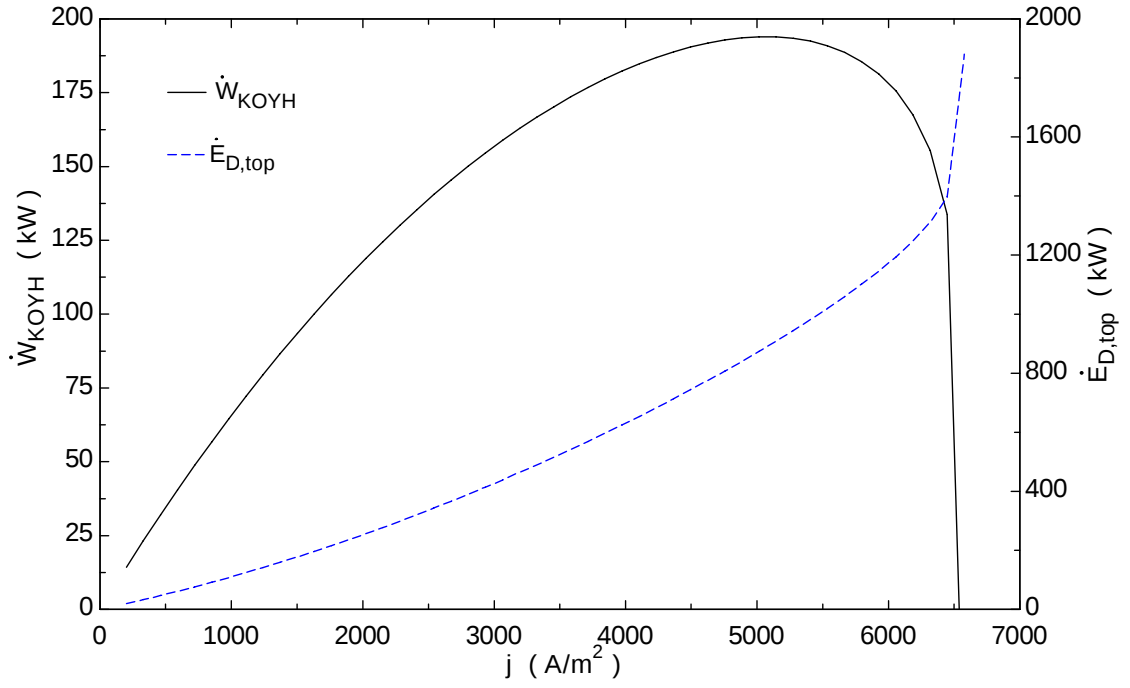
Şekil 3.17'de güç ve toplam ekserji kaybının akım yoğunlu ile değişimi görülmektedir. Akım yoğunluğu arttıkça güç artmakta ve belirli bir akım yoğunluğu değerinde (5000 A/m^2) maksimum olmaktadır. Maksimum güç şartlarından itibaren akım yoğunluğu arttıkça güç hızlı bir şekilde azalarak limit akım yoğunluğunda sıfır olmaktadır. Akım yoğunluğunun 5000 A/m^2 değerine kadar gücü artırma etkisi voltaj kayıplarının azaltma etkisinden daha fazla olduğundan güç artmaktadır. Akım yoğunluğunun 5000 A/m^2 'den sonra voltaj kayıpları daha etkin duruma geçtiğinden güç azalmaktadır.

Şekil 3.18'de modül komponentlerinde meydana gelen ekserji kayıplarının akım yoğunluğu

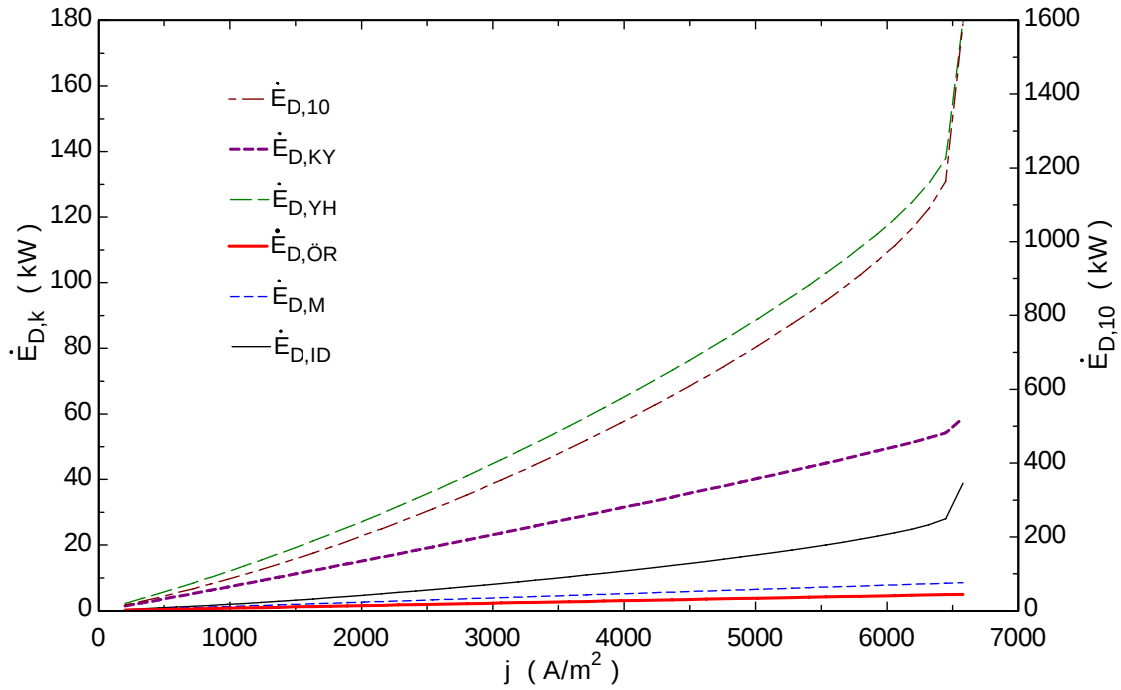
ile değişimi görülmektedir. Akım yoğunluğundaki artışla tüm komponentlerdeki ekserji kaybının arttığı görülmektedir. Ekserji kaybındaki en fazla artış yakıt hücre grubundan, katalitik yakıcıdan ve modülü terk eden gaz karışımından kaynaklanmaktadır. Komponentlerin ekserji verimleri incelendiğinde akım yoğunluğundaki artış, yakıt hücre grubunun ekserji verimini hızla düşürürken diğer komponentlerin ekserji verimini önemli ölçüde etkilememektedir (Şekil 3.19).



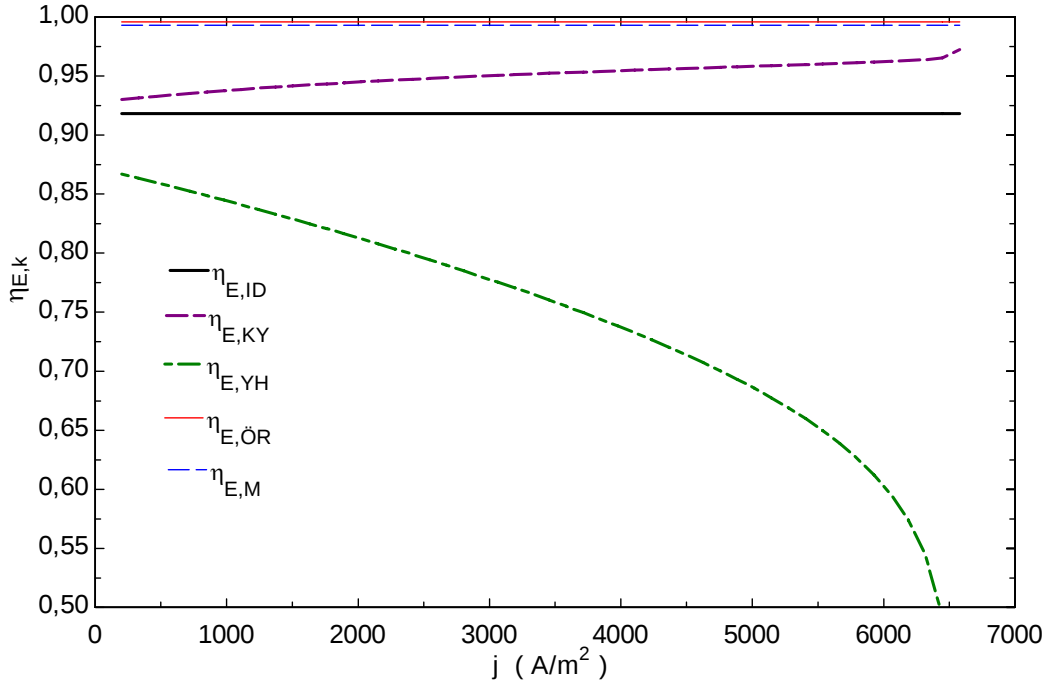
Şekil 3.16 Akım yoğunluğuna göre KOYH modülünün ekserjistik performans katsayısı, ekserji verimi, I. kanun verimi değişimleri



Şekil 3.17 Akım yoğunluğuna göre KOYH modülünün güç ve toplam ekserji kaybı değişimleri



Şekil 3.18 Akım yoğunluğuna göre KOYH modül komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri



Şekil 3.19 Akım yoğunluğuna göre KOYH modülündeki bileşenlere ait ekserji verimlerinin değişimleri

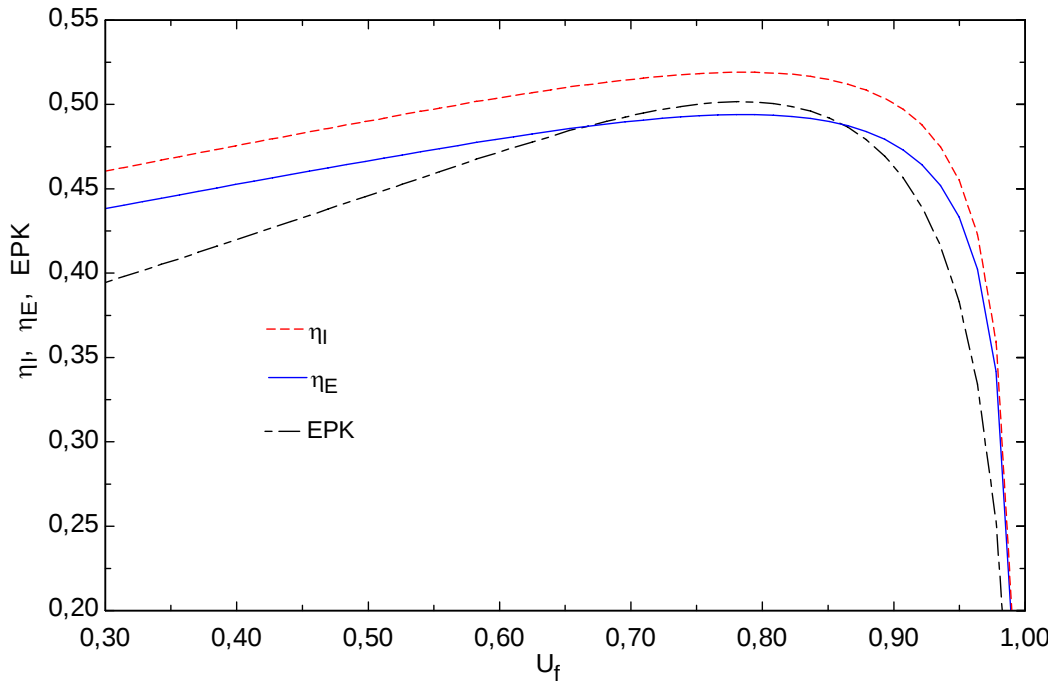
3.6.4 Yakıt kullanım faktörünün etkisi

Tüpsel KOYH modülünde hücre yakıt kullanım faktörü 0.30 ile alabileceği maksimum değeri (1 değerine çok yakın) arasındaki değişimin performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şekil 3.20’de, gözönüne alınan yakıt kullanım faktörü aralığında üç performans kriterinin (I. Kanun verimi, ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı) bir maksimum değerden geçtiği görülmektedir. Kullanım faktörü değerinin 0.79 olması durumunda her üç performans kriteri de maksimum olmaktadır.

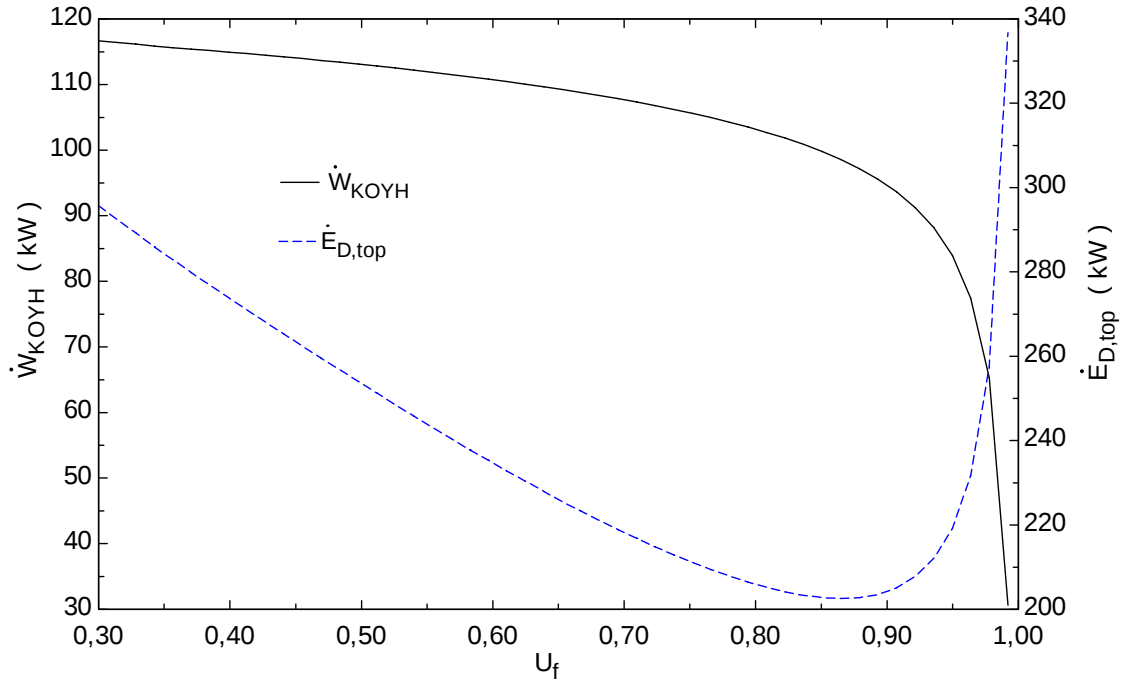
Modülden elde edilen gücün ve toplam ekserji kayıplarının yakıt kullanım faktörü ile değişimi Şekil 3.21’de görülmektedir. Şekilden görüleceği üzere güç, yakıt kullanım faktörünün artmasıyla önce yavaş ve daha sonra hızlı bir şekilde azalmaktadır. Bu azalmanın nedeni artan yakıt kullanım faktörüyle birlikte giren yakıtın azalması ve polarizasyon kayıplarının artmasıdır. Toplam ekserji kaybı ise yakıt kullanım faktörünün belirli bir değerine kadar azalmakta ve minimum bir değerden geçtikten sonra hızlı bir şekilde artmaktadır. Bunun nedeni ise minimum değere kadar yakıt miktarındaki azalmanın minimum değerden sonra ise polarizasyon kayıplarının etkin olmasıdır.

Şekil 22’de görüldüğü gibi hücre voltajındaki azalmadan dolayı yakıt hücre grubunda ekserji kaybı sürekli artmaktadır ve yüksek yakıt kullanım faktörlerinde polarizasyon kayıplarının daha hızlı artmasından dolayı ekserji kaybı da daha hızlı bir artış göstermektedir. Şekilden görüleceği üzere yakıt kullanım faktörünün ekserji kaybı üzerindeki etkisi yakıt hücre grubu, katalitik yakıcı ve 10 noktasında diğer komponentlere göre daha fazladır.

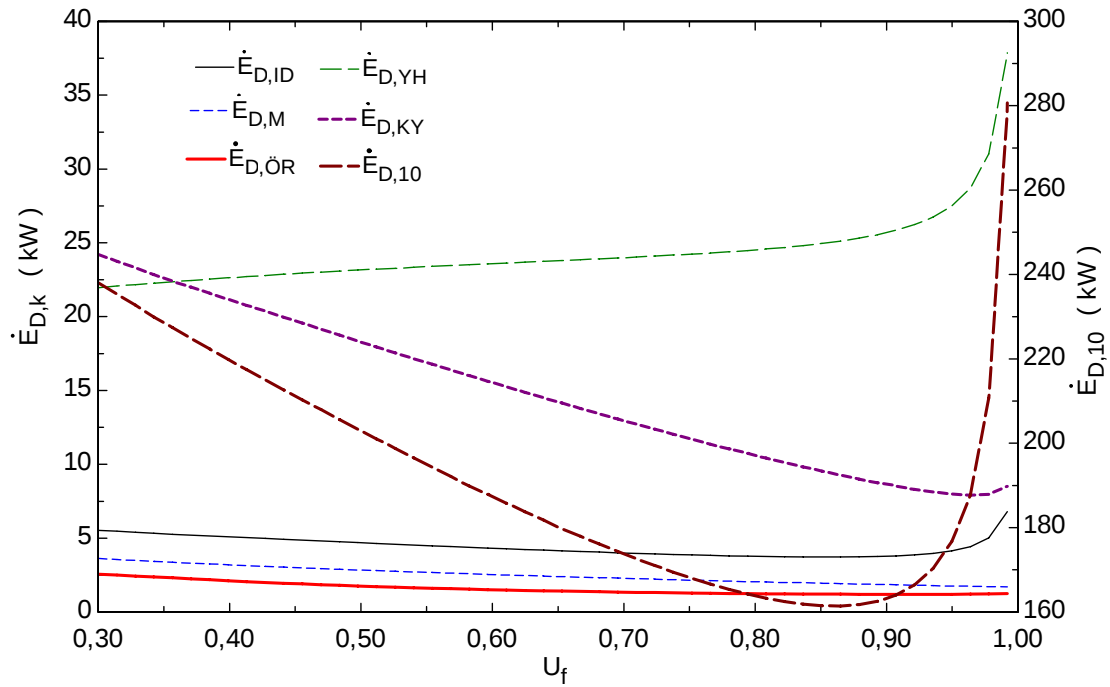
Modül komponentlerinin ekserji veriminin yakıt kullanım faktörü ile değişimi Şekil 23’deki gibi elde edilmiştir. Bu sonuçlar, artan yakıt kullanma faktörü ile katalitik yakıcının ekserji veriminin arttığı ve yakıt hücre grubunun ekserji veriminin azaldığını göstermektedir. Ayrıca, yakıt kullanma faktöründeki değişimin diğer komponentlerin ekserji verimini çok fazla etkilemediği sonuçlardan gözükmektedir.



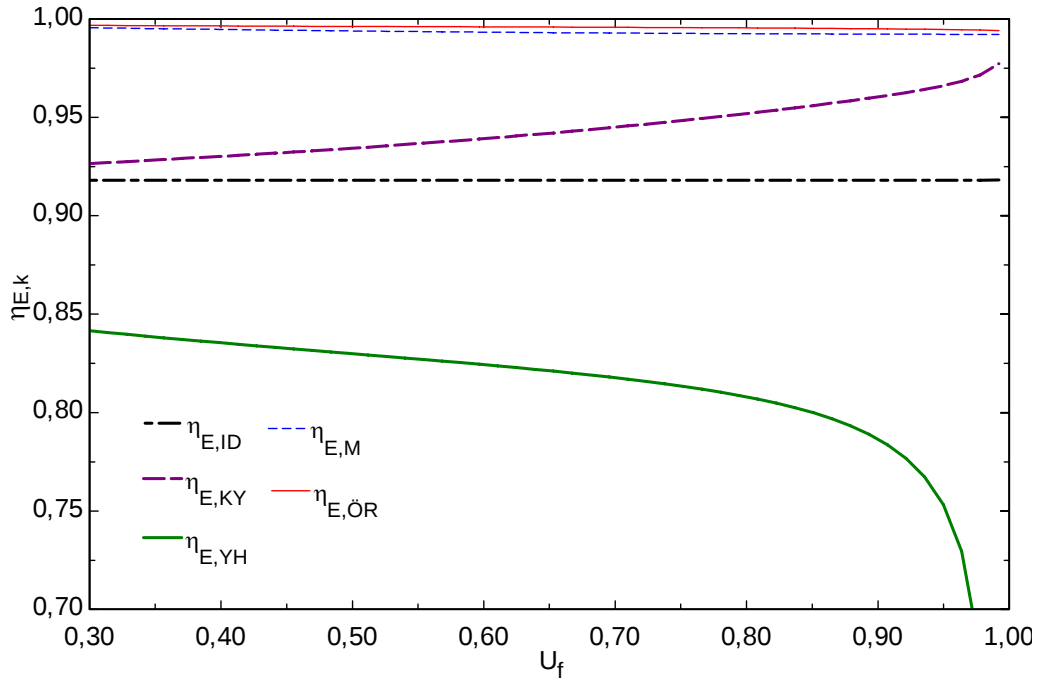
Şekil 3.20 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH modülünün ekserjitik performans katsayısı, ekserji verimi, I. kanun verimi değişimleri



Şekil 3.21 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH modülünün güç ve toplam ekserji kaybı değişimleri



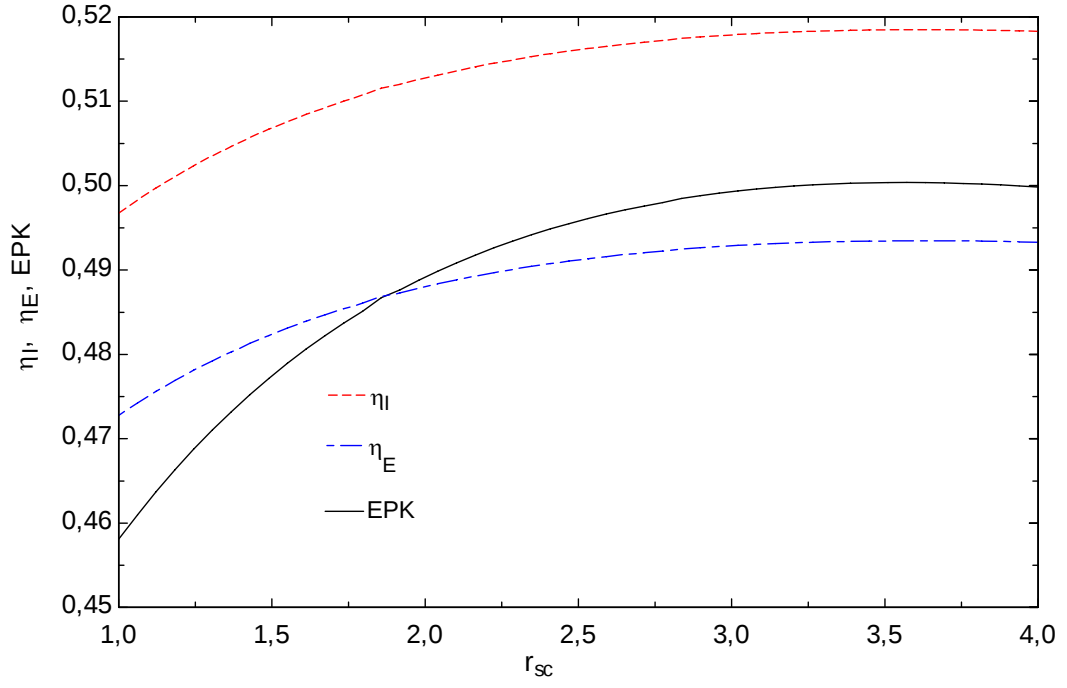
Şekil 3.22 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH modül komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri



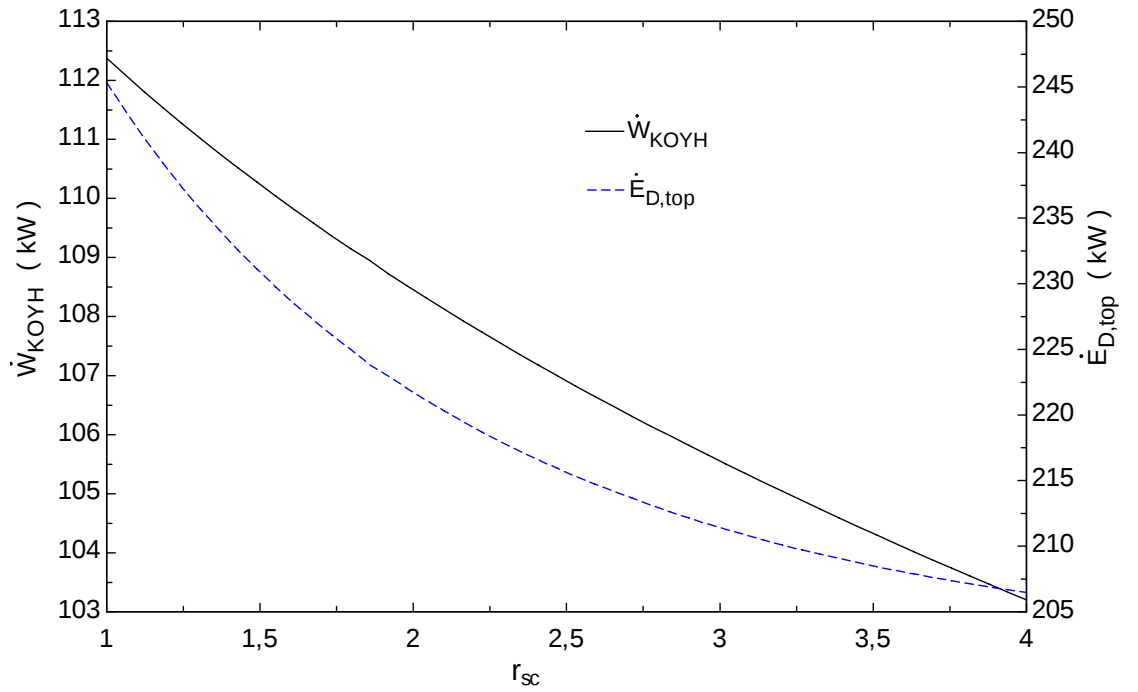
Şekil 3.23 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH modül componentlerin ekserji verimlerindeki değişimleri

3.6.5 Buhar-karbon oranının etkisi

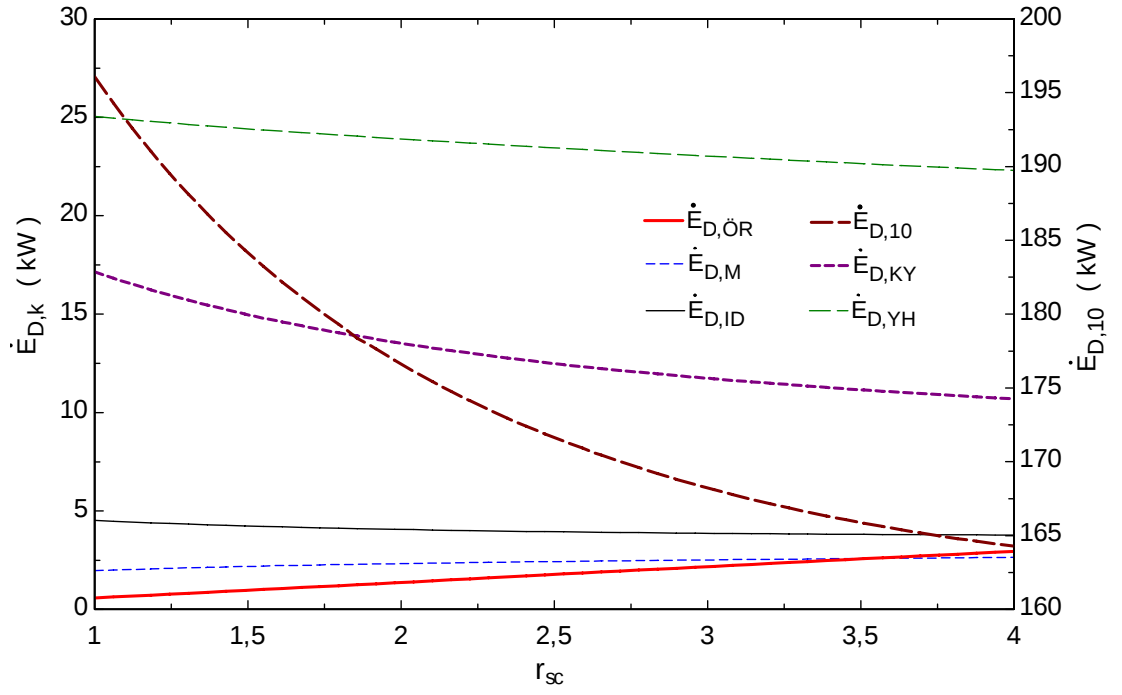
KOYH modülünün I. kanun verimi, ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısının buhar-karbon oranı ile değişimi Şekil 3.24’de görülmektedir. Buhar-karbon oranı arttıkça her üç performans da artmaktadır. Performanslardaki bu artış, buhar-karbon oranının düşük değerlerinde daha hızlı olurken yüksek değerlere gidildikçe azalmaktadır. Şekil 3.25’de güç çıktısının ve toplam ekserji kaybının buhar-karbon oranı ile değişimi görülmektedir. Buhar-karbon oranının artması güç ve toplam ekserji kaybını azaltmaktadır. Bunun nedeni anot çıkışından (Şekil 3.2’deki 4 noktası) daha fazla gaz karışımının geri beslenmesidir. Bu durum toplam yakıt kullanım faktörünün değerini artırır ve modüle giren taze yakıt miktarının azalmasına neden olacağından, hücre voltajı ve buna bağlı olarak modül güç çıktısı azalır. Buna karşın giren yakıttaki azalma güçteki azalmadan daha fazla olduğu için I. Kanun ve ekserji verimleri artış gösterir (Şekil 3.24). Buhar-karbon oranının artması Şekil 3.24’den görüleceği üzere ekserjitik performans katsayısını (güç/toplam ekserji kaybı) önemli ölçüde artırmaktadır. Bu artışın nedeni buhar-karbon oranının artması ile toplam ekserji kaybındaki azalmanın güçteki azalmadan daha fazla olmasıdır (Şekil 3.25). KOYH modülünün her bir componentindeki ekserji kaybının ve ekserji veriminin buhar-karbon oranı ile değişimi Şekil 3.26 ve Şekil 3.27’de verilmiştir. Bu sonuçlar, componentlerin ekserjitik performansının buhar-karbon oranı ile ilişkisini açık olarak göstermektedir.



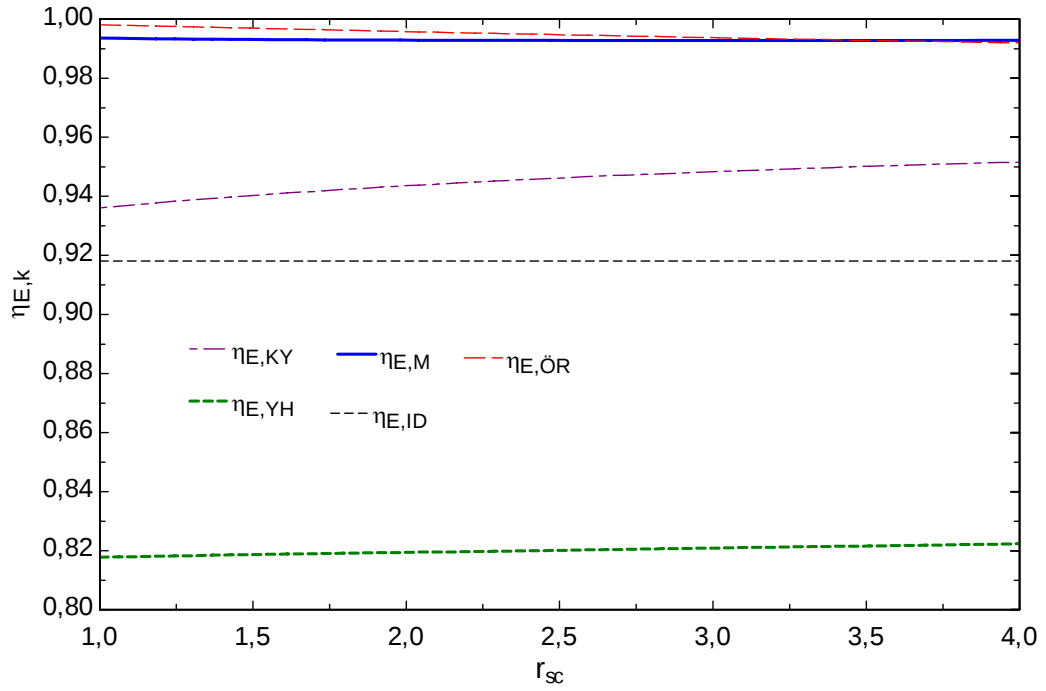
Şekil 3.24 Buhar-karbon oranına göre KOYH modülünün ekserjistik performans katsayısı, ekserji verimi ve I. Kanun verimi değişimleri



Şekil 3.25 Buhar-karbon oranına göre KOYH modülünün güç ve toplam ekserji kaybı değişimleri



Şekil 3.26 Buhar-karbon oranına göre KOYH modül komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri

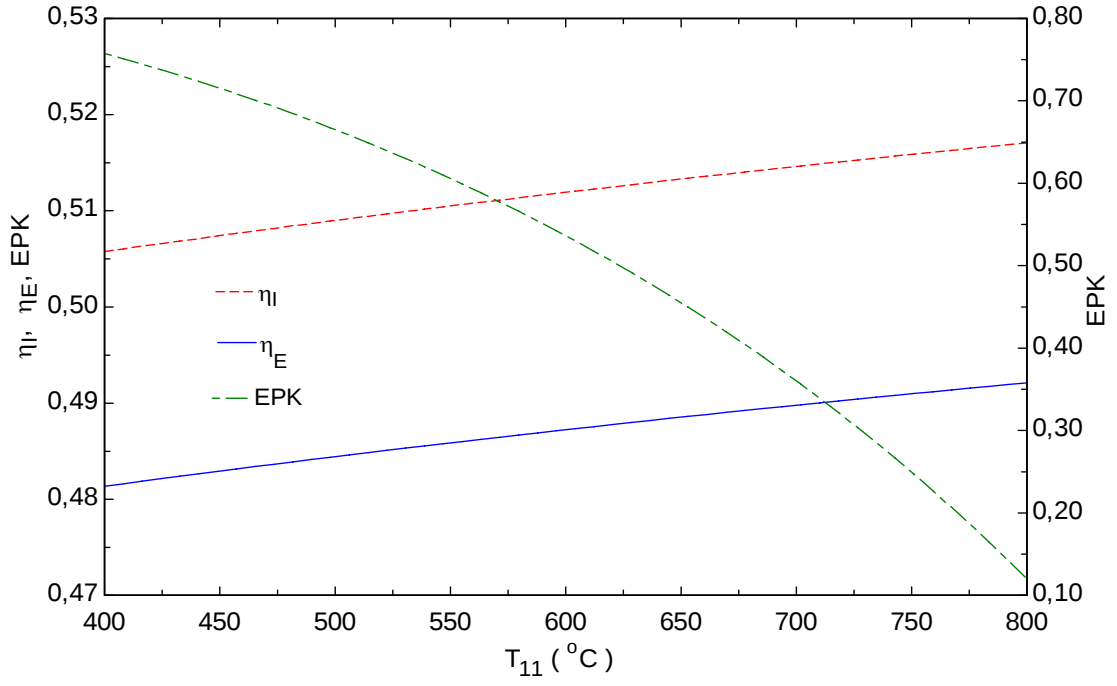


Şekil 3.27 Buhar-karbon oranına göre KOYH modül komponentlerin ekserji verimlerindeki değişimleri

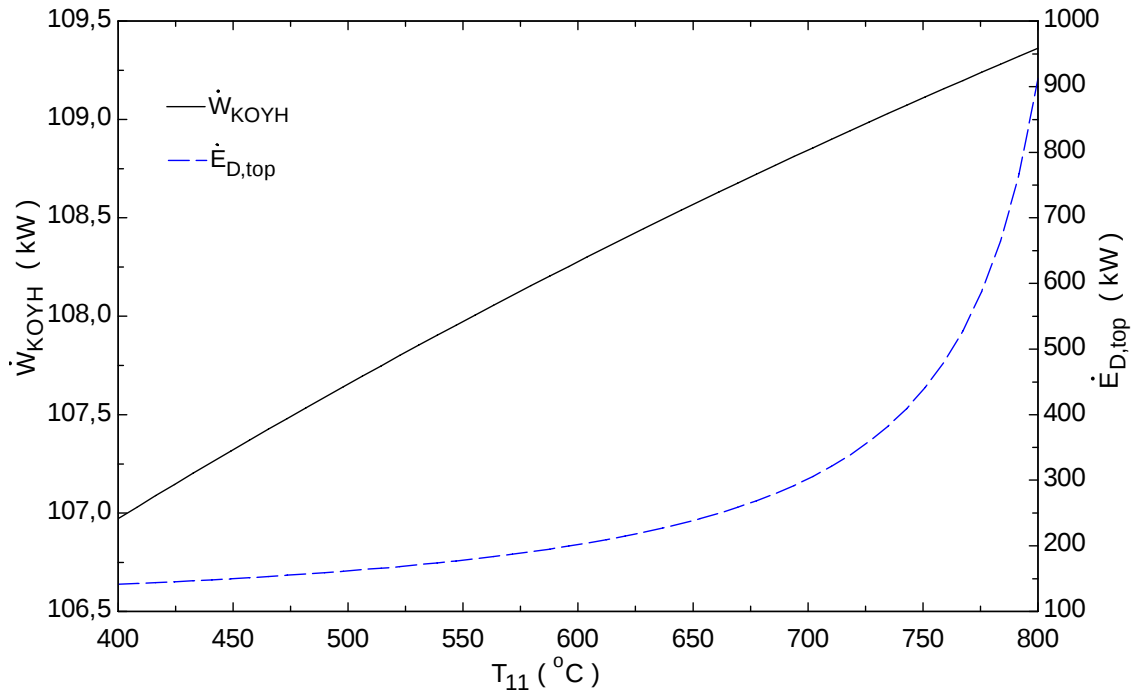
3.6.6 Hava giriş sıcaklığının etkisi

KOYH modülüne giren hava sıcaklığının (T_{11}) değişmesi durumunda modül performansının nasıl etkilendiği Şekil 3.28-3.31’de gösterilmektedir. Bu analizde modül egzoz gazı çıkış sıcaklığı sabit tutulduğu için, düşük hava giriş sıcaklıklarında hava kullanım katsayısı ($\sim 1/\text{hava fazlalık katsayısı}$) yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu ise KOYH modülüne giren hava miktarının azalması anlamına gelmektedir. Böylece katalitik yakıcının çıkış (9 noktası) sıcaklığı yükselir ve modül egzoz çıkış (10 noktası) sıcaklığının istenilen değerde olması sağlanır. Hava giriş sıcaklığın artması modüle giren hava miktarını artırıcı yönde etki yapar. Bu durum hücre voltajında çok azda olsa bir artış sağladığı için modül güç çıktısını artırmaktadır.

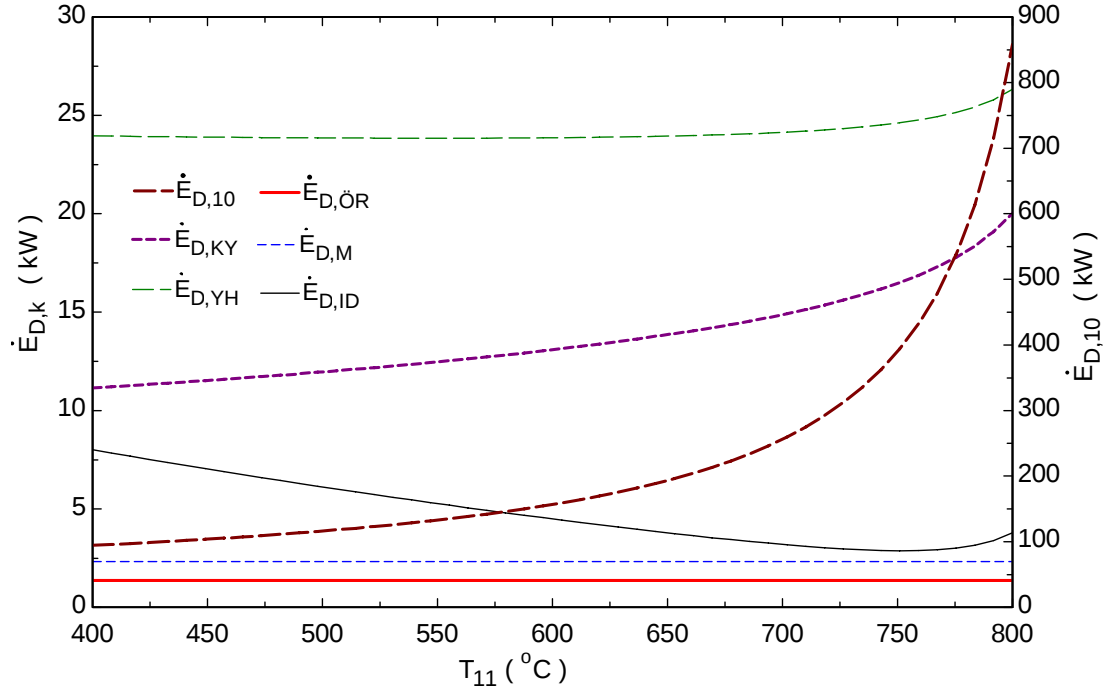
Şekil 3.29’da görüldüğü gibi hava giriş sıcaklığının 400 °C’den 800 °C’ye artırılması durumunda güçte yaklaşık % 1.8 artış gerçekleşmektedir. Yakıt girişinde bir değişiklik olmadığı için I. Kanun ve ekserji verimleri artış göstermektedir (Şekil 3.28). Aynı şekilden toplam ekserji kaybı, incelenen sıcaklık aralığında sürekli arttığı görülmektedir. Sıcaklık artışıyla modüle giren havanın artması neticesinde, toplam ekserji kaybındaki artış oranı, düşük sıcaklıklarda daha az iken yüksek sıcaklıklarda daha fazla olarak gerçekleşmektedir. Toplam ekserji kaybındaki bu değişim ekserjitik performans katsayısının davranışını biçimlendirmektedir. Hava giriş sıcaklık arttıkça ekserjitik performans katsayısı düşmektedir (Şekil 3.28). Bu düşüşün nedeni, hava giriş sıcaklık artması ile toplam ekserji kaybındaki artışın güçteki artıştan daha fazla olmasıdır (Şekil 3.29). Ayrıca, KOYH modülünün herbir komponentindeki ekserji kaybının ve ekserji veriminin hava giriş sıcaklığı ile değişimi Şekil 3.30 ve Şekil 3.31’de verilmiştir.



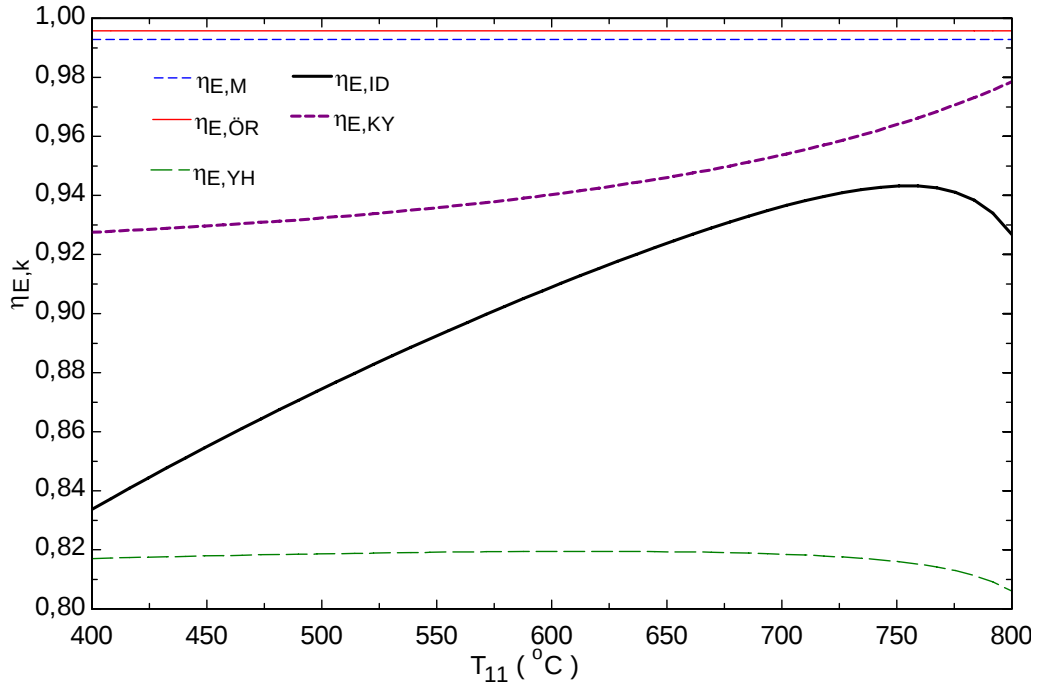
Şekil 3.28 Hava giriş sıcaklığına göre KOYH modülünün eksersi performans katsayısı, ekserji verimi, I. kanun verimi değişimleri



Şekil 3.29 Hava giriş sıcaklığına göre KOYH modülünün güç ve toplam ekserji kaybı değişimleri



Şekil 3.30 Hava giriş sıcaklığına göre KOYH modül komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri

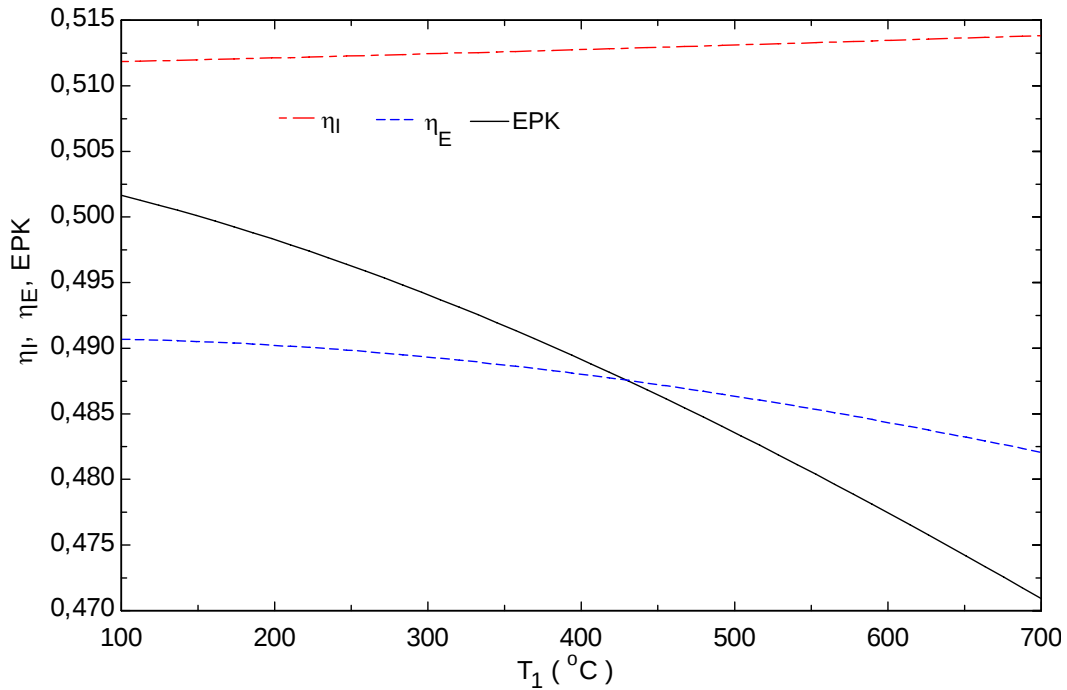


Şekil 3.31 Hava giriş sıcaklığına göre KOYH modül komponentlerin ekserji verimlerinde değişimleri

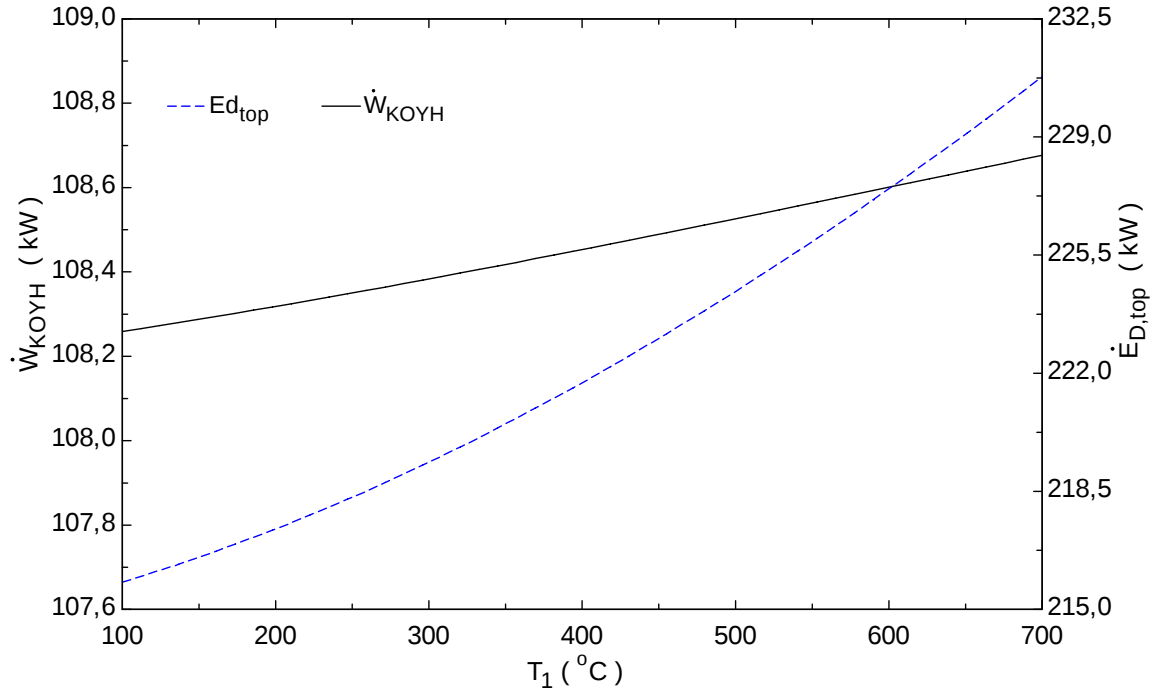
3.6.7 Yakıt giriş sıcaklığının etkisi

Modüle giren taze yakıt sıcaklık değişiminin modül performansına etkileri Şekil 3.32-3.35’de verilmiştir. KOYH modülüne giren yakıt sıcaklığının artması I. Kanun ve ekserji veriminde önemli bir değişiklik yapmazken ekserjitik performans katsayısını düşürmektedir. Bu düşüşün nedeni yakıt girişinin sıcaklığının artması KOYH modülünden elde edilen gücü çok fazla etkilemezken toplam ekserji kaybının önemli ölçüde artmasıdır (Şekil 3.33). Örneğin yakıt giriş sıcaklığının 100 °C’den 700 °C’ye çıkarılmasıyla güçteki artış % 0.4 olurken toplam ekserji kaybındaki artış % 7 olmaktadır.

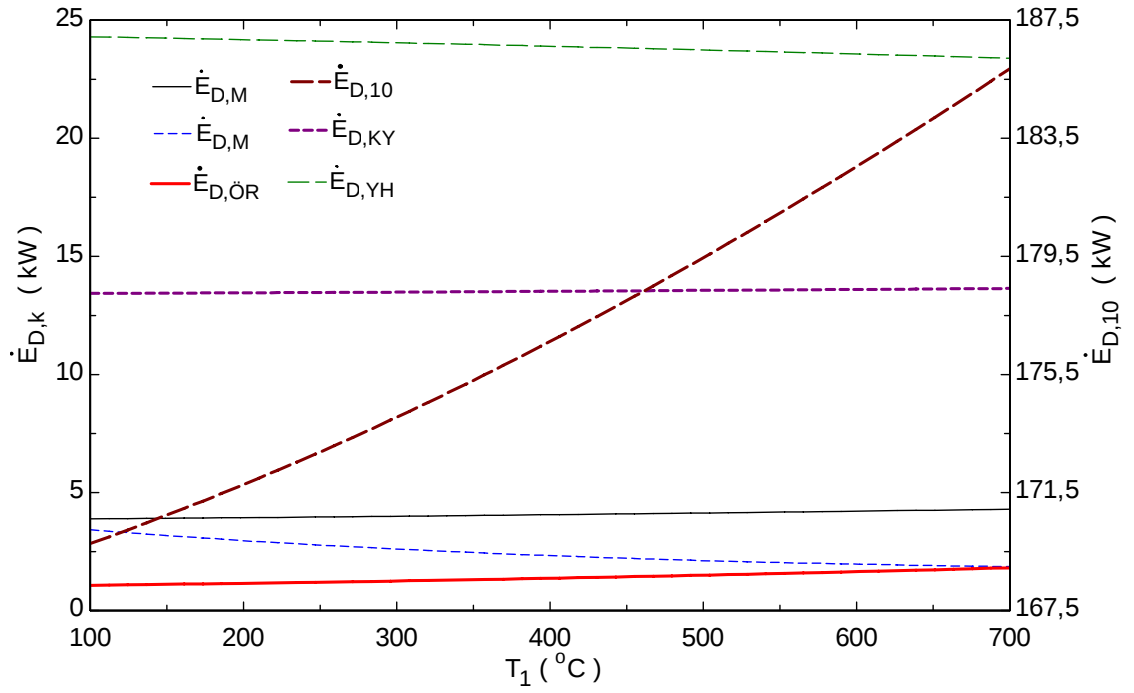
KOYH modülünün komponentlerindeki ekserji kaybının ve ekserji veriminin yakıt giriş sıcaklığı ile değişimi Şekil 3.30 ve Şekil 3.31’de verilmiştir. Yakıt giriş sıcaklığının modül komponentlerinin ekserji kayıpları ve ekserji verimleri üzerinde çok fazla etkili olmadığı görülmektedir.



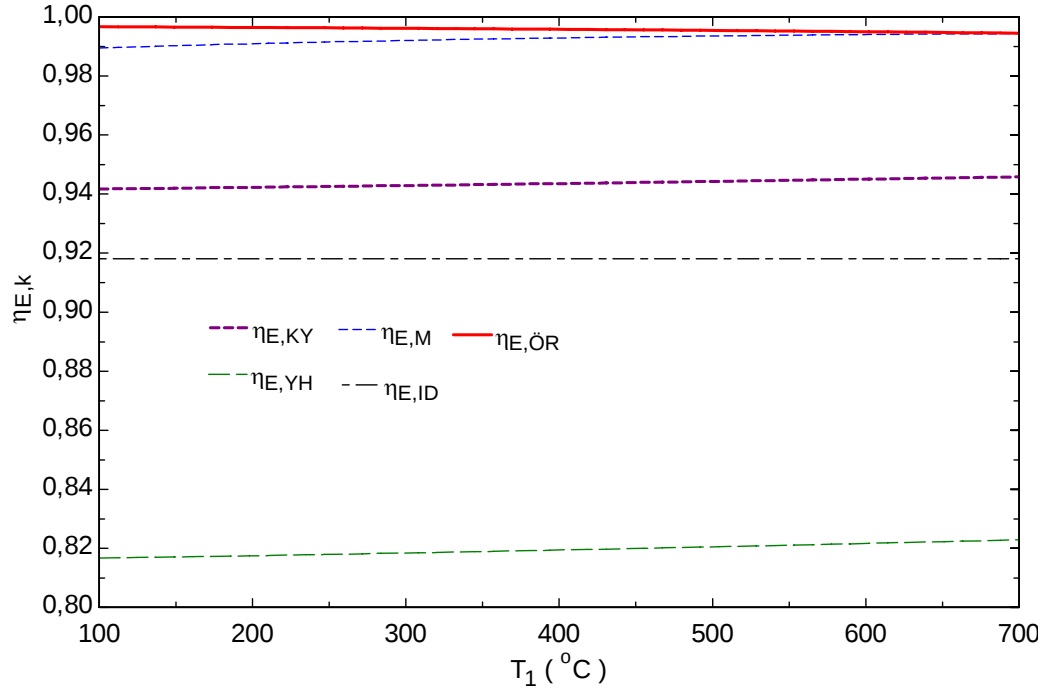
Şekil 3.32 Yakıt giriş sıcaklığına göre KOYH modülünün eksersi performans katsayısı, ekserji verimi, I. kanun verimi değişimleri



Şekil 3.33 Yakıt giriş sıcaklığına göre KOYH modülünün güç ve toplam ekserji kaybı değişimleri



Şekil 3.34 Yakıt giriş sıcaklığına göre KOYH modülünün güç ve toplam ekserji kaybı değişimleri



Şekil 3.35 Yakıt giriş sıcaklığına göre KOYH modül componentlerin ekserji verimlerindeki değişimleri

4. KOYH SİSTEMİNİN PERFORMANS ANALİZİ

Bu bölümde, bir önceki bölümde geliştirilen yakıt olarak metan kullanan KOYH modülüne reküperatör (ön-ısıtıcı) ve kompresör gibi diğer elemanlar eklenerek bir KOYH güç üretim sistemi tasarlanmıştır. Yeni ilave edilen komponentlerin modelleri oluşturulup, KOYH modülünün modeli ile entegre edilerek sistem modeli elde edilmiştir. Bu modele dayalı olarak reküperatör ve kompresör ilavesinin sistem performansına etkileri incelenmiştir. Geliştirilen sistem modeli ile farklı işletme ve dizayn şartlarının belirli değişim aralıklarında performansları (güç, I. Kanun verimi, ekserji kaybı, ekserji verimi, ekserjitik performans katsayısı gibi) nasıl etkilediği araştırılmıştır. Böylece, bir KOYH güç üretim sisteminin hem komponent bazında hemde sistem olarak detaylı bir termodinamik analizi gerçekleştirilmiştir.

4.1 Önceki Çalışmalar

Bedringas vd. (1997), metan yakıtlı ve harici reformasyonlu bir KOYH sisteminin ekserjitik performarmans analizini gerçekleştirmişlerdir. Sistem yakıt ve hava ön ısıtıcılarını, metanı hidrojene dönüştüren reformasyon komponentini ve yakıt hücre modülünde kullanılmayan yakıtın yakıldığı yanma odasını içermektedir. Yanma odasından elde edilen ısı metanın reformasyonunda, suyun buharlaştırılmasında, hava ve yakıtın ön ısıtılmasında kullanılmıştır. Çalışmada göz önüne alınan KOYH sisteminin birinci ve ikinci kanun verimlerinin sırasıyla % 58 ve % 56 olduğu tespit edilmiştir.

Chan vd. (2002), hidrojeni yakıt olarak kullanan bir KOYH sistemi ile metanı yakıt olarak kullanan harici reformasyonlu bir KOYH sistemini enerji ve ekserji yönünden karşılaştırmalı olarak analiz etmişlerdir. Hidrojenle çalıştırılan KOYH sisteminin birinci ve ikinci kanun verimleri sırasıyla % 50.97 ve % 52.28 iken metan ile beslenen KOYH sisteminin birinci ve ikinci kanun verimlerinin sırasıyla % 62.19 ve % 59.96 olduğu sonucu elde edilmiştir.

Kharton vd. (2002) ve Thorstensen (2001), yaptıkları çalışmalarında KOYH sisteminin kısmi yüklerdeki performans değerlendirmesini gerçekleştirmişlerdir. Değişen yük şartları altında KOYH sisteminin oldukça iyi performans sergilediğini ve performansın geniş bir aralıkta neredeyse sabit kaldığını belirtmişlerdir.

Douvartzides vd. (2003), etanol ile beslenen harici reformasyon, yanma odası, mikser, buharlaştırıcı ve iki ısı değiştirici içeren bir KOYH sistemin enerji ve ekserji analizini gerçekleştirerek, reformasyon faktörü ve hidrojen kullanım faktörünün enerji ve ekserji verimleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yine, Douvartzides vd. (2004), yakıt olarak

metan ve etanol kullanan harici buhar reformasyonlu bir KOYH sisteminde ekserji analizi yapmışlardır. Hava ön-ısıtma ve reformasyon sıcaklığının değişimi ile ekserji kaybı ve ekserji verimlerinin değişimlerini incelemişlerdir. Metan ile beslenen sistemin daha yüksek verim sağladığını belirtmişlerdir.

Lu ve Schaefer (2004), hidrojen-sülfürü doğalgazla birlikte yakıt olarak kullanan atmosferik basınçlı dahili reformasyonlu KOYH sisteminin analizini gerçekleştirmişlerdir. Hidrojen-sülfürden hidrojeni ayırmak için KOYH sisteminin egzoz galarını ısı kaynağı olarak kullanan bir ayrıştırıcı komponent kullanmışlardır. Ayrışan hidrojen ve sülfür bir membrandan geçirilerek hidrojen elde edilmiş ve bunu doğalgaz ile karıştırarak yakıt kalitesinin artmasını sağlamışlardır. Göz önüne alınan sistemdeki ayrıştırma komponentinin verimi, yakıt kullanım faktörü gibi parametrelerin sistem verimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

Yokoo vd. (2004), bir KOYH ile polimer elektrotlu yakıt hücresinden oluşan sistemin nümerik simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. 190 kW'lık AC güç üreten bu sistemin elektrik verimini % 59 olarak hesaplamışlardır. Yazarlar diğer çalışmalarında, aynı sistemin farklı yakıt besleme yöntemleri uygulanması durumunda performansın nasıl değiştiğini (Yokoo vd., 2006) ve en yüksek verimi sağlayacak optimal akım yoğunluğunu (Yokoo vd., 2007) araştırmışlardır.

Chan ve Ding (2005), düzlemsel bir KOYH güç sisteminin ısı transferi ve gaz dinamiği yönünden detaylı modelini sunmuşlardır. Ele aldıkları sistem iki adet ön-ısıtıcı, bir katalitik yakıcı, bir buharlaştırıcı, bir mikser (yakıt ve buhar için) ve bir reformer oluşmaktadır. Her komponentin giriş ve çıkışında akış özellikleri hesaplanarak her noktanın ekserjileri belirlenmiştir. Isı transferi ve komponent karakterisitkleri birleştirilerek, sistem komponentlerinin performansı hesaplanmıştır. Ayrıca, her komponentin ekserji kayıpları hesaplanmıştır. Sonuçta, % 70 yakıt kullanım faktörü, 1 atm hava ve yakıt basıncında, 973 ve 1173 K hava ve yakıt giriş sıcaklığında sistemin I. ve II. Kanun verimleri % 47 ve % 48.9 olarak bulunmuştur. Yakıt kullanım faktörünün artması ile elektrik veriminin artacağı, hava ve yakıt giriş sıcaklıklarının verim üzerinde oldukça etkili olduğu tespit edilmiştir.

Yi vd. (2005), doğal gaz, biogaz ve biokütle ve kömür gazlaştırmasından elde edilen farklı yakıtların reformasyon prosesine ve KOYH sisteminin performansına etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak KOYH sisteminin yakıt kompozisyonundaki değişimleri kompanse edebilme yeteneğine rağmen, sistemin işletme ve dizayn şartlarının yakıt tipine göre yeniden düzenlenmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

Matelli ve Bazzo (2005), yakıt olarak doğal gaz kullanan küçük ölçekli yüksek sıcaklı KOYH ve ergiyik karbonatlı yakıt hücre sistemleri için bir simülasyon yöntemi sunmuşlardır. Doğal gazdan hidrojen üretimi için dahili buhar reformasyon prosesini dikkate almışlardır. Modelde hücre voltajı, hücre gücü, modüldeki hücre sayısı, doğal gaz kompozisyonu ve hidrojen kullanım faktörü giriş parametreleri olarak gözönüne alınarak, sistemin termodinamik ve elektrokimyasal verimleri incelenmiştir. KOYH ve ergiyik karbonatlı yakıt hücre sistemlerinin performansları karşılaştırılarak, KOYH sisteminin ergiyik karbonatlı yakıt hücre sistemine göre enerji ve ekserji performansı yönünden daha avantajlı bir sistem olduğunu belirtmişlerdir.

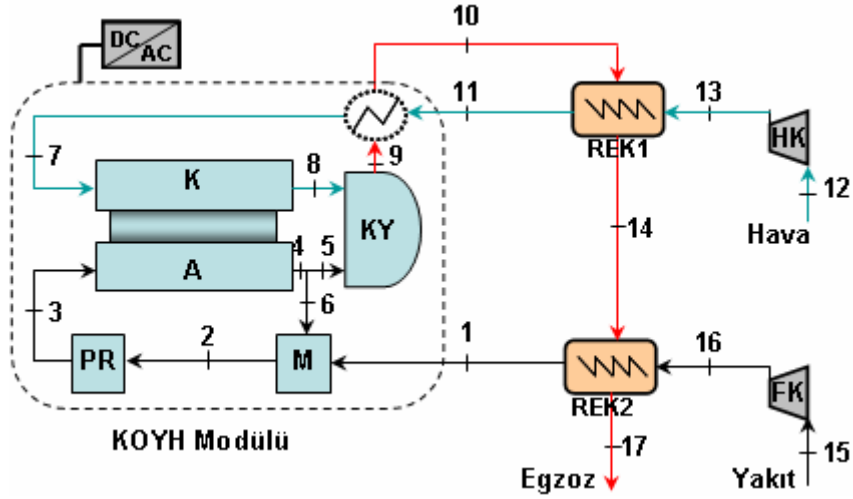
Araki vd. (2006), yüksek sıcaklı KOYH ile düşük sıcaklı KOYH modüllerini seri şekilde birbirine bağlayarak iki kademeli KOYH sistemi oluşturmuşlar ve geliştirdikleri modelin analizini yaparak, sistemin elektrik verimini % 50.3 olarak bulmuşlardır.

Ivanov (2007), dahili metan buhar reformasyonlu KOYH için gaz karışımının termodinamik modellemesine dayanan bir matematik model geliştirmiştir. Modelde, reformasyon reaksiyonu ve konsantrasyon polarizasyonunu hesaplamak için, doğrusal olmayan kinetik ve gaz difüzyonunu içeren makroskopik gözenekli-elektrot teorisi kullanılmıştır. Tanıtılan modelin KOYH içeren termodinamik çevrimlerin parametrik analizini geniş bir aralıkta gerçekleştirebileceği vurgulanmıştır.

4.2 KOYH Sistem Modeli

Oluşturulan KOYH sistemin genel şematik yapısı Şekil 4.1’de verilmektedir. Bu KOYH güç üretim sistemi, KOYH modülü, ön-ısıtma amacıyla kullanılan iki reküperatör ve gerekli çalışma basıncını sağlamak için iki kompresörden oluşmaktadır.

Üçüncü bölümde oluşturulan KOYH modül modelinde hava ve yakıt giriş şartları (sıcaklık ve basınç değerleri gibi) sabit parametreler olarak gözönüne alınmıştır. Fakat bir sistem analizi gözönünde bulundurulduğunda, KOYH modüne giren hava ve yakıtın (11 ve 1 noktası) termodinamik özellikleri, hem KOYH modülünün hem de diğer sistem elemanlarının işletme ve dizayn parametreleri ile değişeceğinden sistem performansını etkileyecektir. Ayrıca sisteme gönderilen hava veya yakıt debileri değiştiğinde ya da sistem farklı işletme basınçlarında çalıştırıldığında kompresörlerde harcanan güç ve buna bağlı olarak sistem performansı değişecektir. Gerçek bir sistemde olduğu gibi bu etkileri hesaplamak için reküperatör ve kompresör komponentleri modele ilave edilmiştir.



Şekil 4.1 KOYH güç üretim sistemi

Komponent ve sistem modelleri oluşturulurken yapılan kabuller aşağıda sıralanmıştır:

- Sistem komponentleri sürekli rejimde çalışmaktadır.
- İdeal gaz karışım prensipleri dikkate alınmıştır.
- Yakıt olarak metan kullanılmıştır.
- Sistem komponentlerinde ısı kaybı olmamaktadır.

4.2.1 Reküperatörler

Sistemde kullanılan reküperatörlerin iki önemli görevi vardır. Birincisi KOYH modülünden çıkan egzoz gazlarının sahip olduğu enerjinin bir kısmının geri kazanılmasını sağlamaktır. İkincisi KOYH'nin girişindeki akışkanların sıcaklığını yükselterek termal gerilimleri azaltmaktır. Bu amaçla KOYH modülünden çıkan yüksek sıcaklıklı gaz karışımı ile kompresörler tarafından basınçlandırılan hava ve yakıtın yakıt hücresine girmeden önce reküperatörler tarafından ön ısıtılması sağlanır.

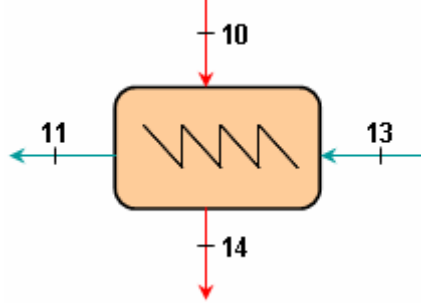
4.2.1.1 Reküperatör 1

Şekil 4.2'de görülen reküperatör 1'e soğuk akışkan olarak kompresörden çıkan hava (13 noktası), sıcak akışkan olarak KOYH modülünden çıkan gaz karışımı (10 noktası) girmektedir.

Soğuk akışkanın reküperatör çıkışındaki (11 noktası) sıcaklık değeri, reküperatör etkinlik katsayısına bağlı olarak değişmektedir. Hava tarafı için reküperatörün etkinlik ifadesi Denklem 4.1'de verilmiştir. Bu denklem kullanılarak T_{11} sıcaklığı etkinlik katsayısı değerine bağlı olarak Denklem 4.2'deki gibi yazılabilir:

$$\varepsilon_{R1} = \frac{T_{11} - T_{13}}{T_{10} - T_{13}} \quad (4.1)$$

$$T_{11} = T_{13} + \varepsilon_{R1}(T_{10} - T_{13}) \quad (4.2)$$



Şekil 4.2 Reküperatör 1

13 noktasının bileşenleri ve molar debisi, 11 noktası ile aynı olduğu için bulunan T_{11} sıcaklığı ile 11 noktasındaki entalpi değeri hesaplanır. Hava kompresörü ve KOYH modülünün çıkış şartları için reküperatörde enerji dengesi yazılarak, 14 noktasına ait entalpi değeri hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_{REK1} - \dot{W}_{REK1} + \sum_i (\dot{n}_{13,i} \bar{h}_{13,i} + \dot{n}_{10,i} \bar{h}_{10,i})_g - \sum_i (\dot{n}_{11,i} \bar{h}_{11,i} + \dot{n}_{14,i} \bar{h}_{14,i})_c = 0 \quad (4.3)$$

Reküperatörde çevreyle ısı ve iş alış-verişi olmadığı için Denklem 4.3'deki ısı ve iş ile ilgili terimler dikkate alınmamalıdır. 14 ve 10 noktalarında gaz bileşenleri ve molar debiler değişmediği için 14 noktasının hesaplanan entalpi değeri yardımıyla T_{14} sıcaklığı iterasyon ile bulunur.

Bu komponente ait ekserji kaybı ve ekserji verimini bulmak için her noktanın ekserji değerlerinin bulunması gerekir. 10 ve 11 noktalarının ekserji hesapları 3. bölümdeki yakıt hücre modülü için verilmişti. Bu nedenle aşağıda sadece 13 ve 14 noktalarının ekserji ifadeleri verilmiştir.

13 noktası: Kompresör tarafından basınçlandırılan havanın reküperatöre giriş noktasıdır. Kimyasal ekserji değeri 11 noktasının kimyasal ekserji değeri ile aynıdır. Bu noktanın fiziksel ekserji değeri ise Denklem 4.4'de verilmiştir.

$$\dot{E}_{13}^f = \sum_i \dot{n}_{13,i} [\bar{h}_{13,i} - \bar{h}_{o13,i} - T_o (\bar{s}_{13,i} - \bar{s}_{o13,i})] \quad (4.4)$$

14 noktası: Sıcak akışkanın reküperatör 1'den çıktığı noktadır. 14 noktasının kimyasal ekserji değeri 3. bölümde açıklanan 10 noktasındaki kimyasal ekserji değerine eşittir. Fiziksel ekserji değeri ise Denklem 4.5'deki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{E}_{14}^f = \sum_i \dot{n}_{14,i} [\bar{h}_{14,i} - \bar{h}_{o14,i} - T_o (\bar{s}_{14,i} - \bar{s}_{o14,i})] \quad (4.5)$$

Reküperatör 1 komponenti ile ilgili giriş çıkış noktalarının ekserji değerleri hesaplandığında ekserji denge denkleminde komponentin ekserji kaybı bulunabilir:

$$\dot{E}_{D,REK1} = \cancel{\dot{Q}_{REK1}} \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) - \cancel{\dot{W}_{REK1}} + (\dot{E}_{10} + \dot{E}_{13})_g - (\dot{E}_{11} + \dot{E}_{14})_c \quad (4.6)$$

Reküperatör 1 komponentinde çevreyle ısı ve güç alış verişi olmadığından, Denklem 4.6 yeniden düzenlenerek ekserji kaybı Denklem 4.7'deki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{E}_{D,REK1} = \dot{E}_{10} + \dot{E}_{13} - \dot{E}_{11} - \dot{E}_{14} \quad (4.7)$$

Reküperatör 1 komponentin ekserji verimi, Denklem 4.8'de gösterildiği gibi soğuk akışkandaki ekserji değişiminin sıcak akışkandaki ekserji değişimine oranı ile ifade edilebilir (Bejan vd, 1995):

$$\eta_{E,REK1} = \frac{\dot{E}_{11} - \dot{E}_{13}}{\dot{E}_{10} - \dot{E}_{14}} \quad (4.8)$$

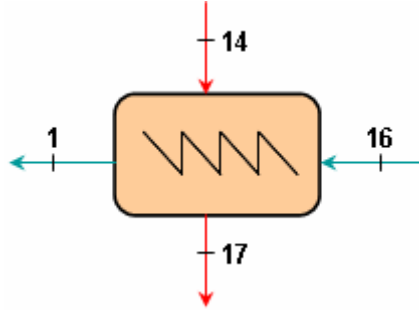
4.2.1.2 Reküperatör 2

Reküperatör 2'de ise soğuk akışkan olarak yakıt kompresöründe basınçlandırılan yakıt (16 noktası), sıcak akışkan olarak reküperatör 1'den çıkan gaz karışımı (14 noktası) girmektedir (Şekil 4.3).

Reküperatör etkinlik katsayısı ve etkinlik değerine bağlı olarak T_1 sıcaklığı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\varepsilon_{R2} = \frac{T_1 - T_{16}}{T_{14} - T_{16}} \quad (4.9)$$

$$T_1 = T_{16} + \varepsilon_{R2}(T_{14} - T_{16}) \quad (4.10)$$



Şekil 4.3 Reküperatör 2

Soğuk akışkanın reküperatörün giriş ve çıkış noktalarında (sırasıyla 16 ve 1) molar debiler ve gaz bileşenlerinde bir değişim olmadığı için T_1 sıcaklığından hareketle 1 noktasının entalpi değeri hesaplanır. Reküperatör 2 için enerji dengesi yazılarak, 17 noktasının entalpi değeri bulunabilir:

$$\dot{Q}_{\text{REK2}} - \dot{W}_{\text{REK2}} + \sum_i (\dot{n}_{16,i} \bar{h}_{16,i} + \dot{n}_{14,i} \bar{h}_{14,i})_g - \sum_i (\dot{n}_{1,i} \bar{h}_{1,i} + \dot{n}_{17,i} \bar{h}_{17,i})_g = 0 \quad (4.11)$$

Reküperatör 2’de sıcak akışkanın giriş ve çıkış noktalarında (14 ve 17 noktası) gaz bileşenleri ve molar debiler değişmediği için 17 noktası için hesaplanan entalpi değerinden T_{17} sıcaklığı iterasyon ile bulunur.

Reküperatör 2 komponentine ait noktaların ekserji değerleri hesaplandığında ekserji kaybı ve ekserji verimi hesaplanabilir. 1 noktasına ait ekserji ifadeleri Denklem 3.9-3.10 ve 14 noktasına ait ekserji ifadesi ise Denklem 4.5’de verildiğinden aşağıda sadece 16 ve 17 noktalarının ekserji ifadeleri sunulmuştur.

16 noktası: Kompresörde basınçlandırılan yakıtın reküperatör 2’ye girdiği noktadır. Bu noktanın fiziksel ekserji değeri Denklem 4.12’de gösterilmiştir. Kimyasal ekserji değeri 1 noktasıyla aynıdır.

$$\dot{E}_{16}^f = \sum_i \dot{n}_{16,i} [\bar{h}_{16,i} - \bar{h}_{o16,i} - T_o (\bar{s}_{16,i} - \bar{s}_{o16,i})] \quad (4.12)$$

17 noktası: Reküperatör 2’den çıkan gaz karışımının egzoz gazı olarak atmosfere atıldığı noktadır. Denklem 4.13 bu noktanın fiziksel ekserjisini göstermektedir. Kimyasal ekserji değeri 14 noktasının ekserjisine eşittir.

$$\dot{E}_{17}^f = \sum_i \dot{n}_{17,i} [\bar{h}_{17,i} - \bar{h}_{o17} - T_o (\bar{s}_{17,i} - \bar{s}_{o17})] \quad (4.13)$$

Rekuperatör 2 komponenti ile ilgili noktalarının ekserji değerleri hesaplandığında ekserji denge denkleminde rekuperatör 2'nin ekserji kaybı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\dot{E}_{D,REK2} = \dot{Q}_{REK2} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) - \dot{W}_{REK2} + (\dot{E}_{14} + \dot{E}_{16})_g - (\dot{E}_{17} + \dot{E}_1)_\zeta \quad (4.14)$$

Rekuperatör 2 komponentinde ısı kaybı ve güç üretimi olmadığı için Denklem 4.14 yeniden düzenlenerek ekserji kaybı aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{E}_{D,REK2} = \dot{E}_{14} + \dot{E}_{16} - \dot{E}_{17} - \dot{E}_1 \quad (4.15)$$

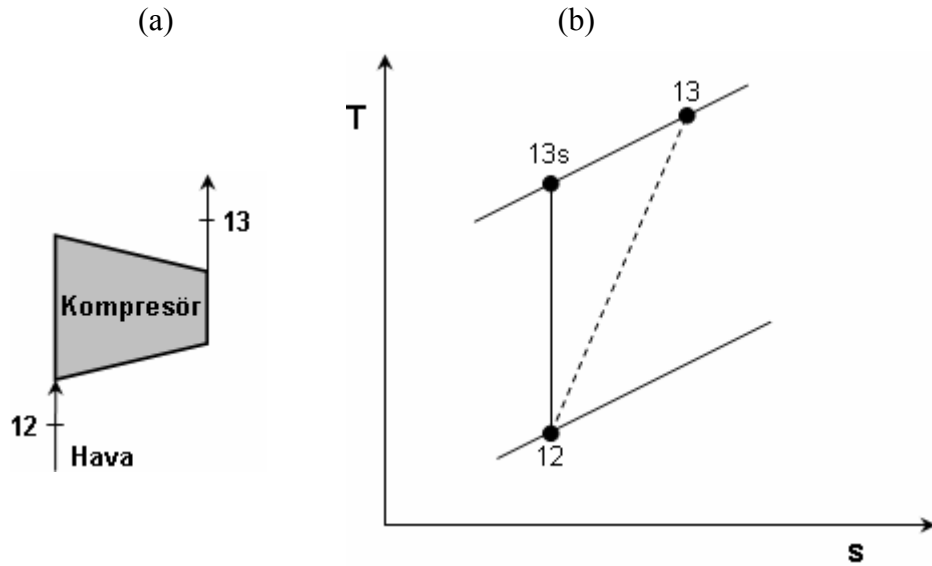
Rekuperatör 2 komponentinin ekserji verimi ise Denklem 4.16'daki ifadeyle belirlenebilir(Bejan vd, 1995):

$$\eta_{E,REK2} = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_{16}}{\dot{E}_{14} - \dot{E}_{17}} \quad (4.16)$$

4.2.2 Kompresörler

4.2.2.1 Hava kompresörü

Hava kompresöründe ideal sıkıştırma (izentropik sıkıştırma) durumu için Şekil 4.4'de gösterildiği gibi 12 ve 13s noktalarının entropileri eşittir. Bu durum Denklem 4.17'de ifade edilmiştir.



Şekil 4.4 (a) Hava kompresörü, (b) kompresördeki sıkıştırma prosesinin sıcaklık-entropi diyagramı

$$\dot{S}_{13s} - \dot{S}_{12} = \sum_i (\dot{n}_{13s,i} \bar{s}_{13s,i}) - \sum_i (\dot{n}_{12,i} \bar{s}_{12,i}) = 0 \quad (4.17)$$

Kompresör giriş basınç ve sıcaklığı (P_{12} ve T_{12}) bilinmektedir. Kompresör çıkış basıncı (P_{13}) kompresör basınç oranına ($P_{rc}=P_{13}/P_{12}$) bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Denklem 4.17 yardımıyla T_{13s} sıcaklığı iterasyonla elde edilir. Bulunan T_{13s} sıcaklığına karşılık gelen 13s noktasının entalpisi bulunur. 13 noktasının entalpisi Denklem 4.18’de verilen izentropik verim ifadesinden hareketle Denklem 4.19’daki gibi elde edilir. Bu entalpi değerine karşılık gelen T_{13} sıcaklığı da kolayca belirlenir.

$$\eta_{HK} = \frac{\bar{h}_{13s} - \bar{h}_{12}}{\bar{h}_{13} - \bar{h}_{12}} \quad (4.18)$$

$$\bar{h}_{13} = \bar{h}_{12} + \frac{\bar{h}_{13s} - \bar{h}_{12}}{\eta_{HK}} \quad (4.19)$$

Giriş ve çıkış şartları bilinen hava kompresör komponentinde enerji dengesi yazılarak, kompresörün ihtiyaç duyduğu güç belirlenebilir.

$$\dot{Q}_{HK} - \dot{W}_{HK} + \sum_i (\dot{n}_{12,i} \bar{h}_{12,i})_g - \sum_i (\dot{n}_{13,i} \bar{h}_{13,i})_ç = 0 \quad (4.20)$$

Ekserji hesabı için 12 ve 13 noktalarının fiziksel ve kimyasal ekserji değerlerinin bilinmesi gerekir. 13 noktasının ekserjisi reküperatör 1 komponentinde ifade edilmişti. 12 noktası çevre şartları olduğu için ekserjisi sıfırdır. Hava kompresörü için ekserji dengesinden ekserji kaybı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\dot{E}_{D,HK} = \dot{Q}_{HK} \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) - \dot{W}_{HK} + (\dot{E}_{12})_g - (\dot{E}_{13})_ç \quad (4.21)$$

Çevre ile kompresör arasında bir ısı transferi olmadığı kabulüyle ve hava üzerine iş yapıldığı için güç teriminin ilave eksi değer alması gerekmesinden dolayı Denklem 4.21 aşağıdaki Denklem 4.22’deki gibi yeniden düzenlenebilir:

$$\dot{E}_{D,HK} = -\dot{W}_{HK} + \dot{E}_{12} - \dot{E}_{13} \quad (4.22)$$

Denklem 4.20’den hareketle hesapanacak kompresör işi negatiftir. Bu ise kompresöre çevreden iş aktarıldığı anlamındadır. Bu çerçevede Denklem 4.22’nin sağ tarafındaki ilk terimin pozitif olacağına dikkat edilmelidir.

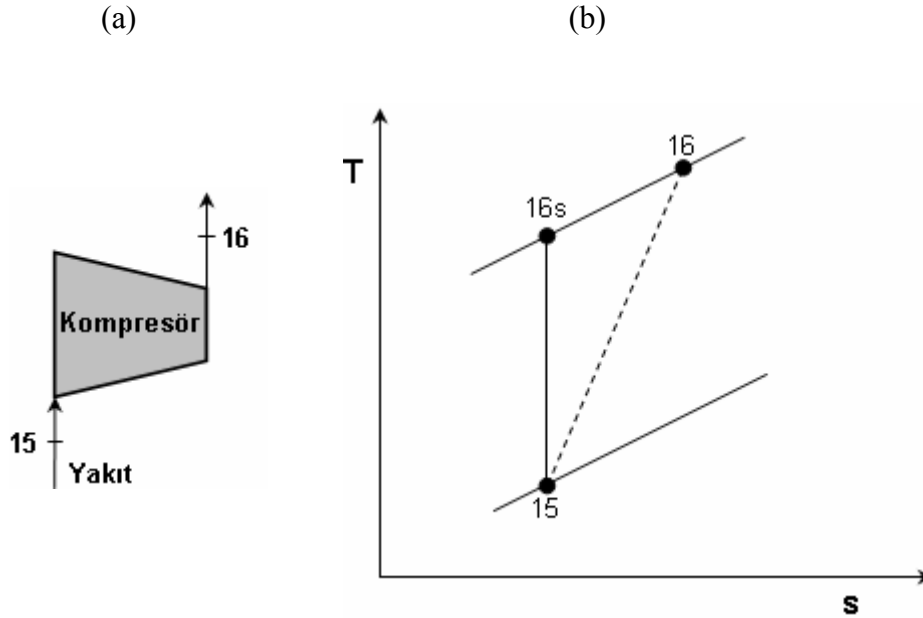
Hava kompresörünün ekserji verimi, Denklem 4.23'deki gibi ifade edilir (Bejan vd, 1995):

$$\eta_{E,HK} = \frac{\dot{E}_{13} - \dot{E}_{12}}{\dot{W}_{HK}} \quad (4.23)$$

4.2.2.2 Yakıt kompresörü

Hava kompresöründe olduğu gibi yakıt kompresöründe de izentropik sıkıştırma durumu için 15 ve 16s noktalarının entropileri Şekil 4.5'de görüldüğü gibi eşit olduğundan bu izentropik proses için Denklem 4.24 ifadesi yazılabilir:

$$\dot{S}_{16s} - \dot{S}_{15} = \sum_i (\dot{n}_{16s,i} \bar{s}_{16s,i}) - \sum_i (\dot{n}_{15,i} \bar{s}_{15,i}) = 0 \quad (4.24)$$



Şekil 4.5 (a) Yakıt kompresörü, (b) kompresördeki sıkıştırma prosesinin sıcaklık-entropi diyagramı

Yakıt kompresörün giriş basınç ve sıcaklığı (P_{15} ve T_{15}) bilinmektedir. Basınç oranı ($P_{re}=P_{16}/P_{15}$) giriş değişkeni olarak bilindiği için P_{16} değeri hesaplanabilir. Denklem 4.24'den T_{16s} sıcaklığı ve bu sıcaklığa karşılık gelen 16s noktasının entalpisi bulunur. 16 noktasının entalpisi ise Denklem 4.25'de verilen izentropik verim ifadesinden hareketle Denklem 4.26'daki gibi elde edilir ve bu entalpi değerine karşılık gelen T_{16} sıcaklığı da kolayca belirlenir.

$$\eta_{YK} = \frac{\bar{h}_{16s} - \bar{h}_{15}}{\bar{h}_{16} - \bar{h}_{15}} \quad (4.25)$$

$$\bar{h}_{16} = \bar{h}_{15} + \frac{\bar{h}_{16s} - \bar{h}_{15}}{\eta_{YK}} \quad (4.26)$$

Yakıt kompresörünün giriş ve çıkış şartları bilindiğinden Denklem 4.27’de verilen enerji dengesi ifadesi yardımıyla yakıt kompresöründe tüketilen güç hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_{YK} - \dot{W}_{YK} + \sum_i (\dot{n}_{15,i} \bar{h}_{15,i})_g - \sum_i (\dot{n}_{16,i} \bar{h}_{16,i})_c = 0 \quad (4.27)$$

Yakıt kompresöründe gerçekleşen ekserji kaybı ve bu komponentin ekserji verimi, hava kompresöründe verilen yaklaşım ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{E}_{D,YK} = -\dot{W}_{YK} + \dot{E}_{15} - \dot{E}_{16} \quad (4.28)$$

$$\eta_{E,YK} = \frac{\dot{E}_{16} - \dot{E}_{15}}{\dot{W}_{YK}} \quad (4.29)$$

Denklem 4.28 ve 4.29’daki 16 noktasının ekserjisinin nasıl hesaplanabileceği 4.2.1.2 bölümünde açıklanmıştır. Yakıtın kompresöre girdiği 15 noktasında (25 °C ve 1.013 bar) yakıtın fiziksel ekserji değeri sıfırdır. Kimyasal ekserjisi ise yakıt olarak kullanılan metanın standart kimyasal ekserji değerinden hesaplanır. Bu değer 1 noktasının ekserji değerine eşittir ve 3. bölümde 1 noktasının kimyasal ekserji hesaplaması verilmiş olduğu için burada tekrar yazılmamıştır.

4.3 KOYH Sisteminin Performans Kriterleri

Sistemin performans analizinde ve değerlendirilmesinde net güç, I. Kanun verimi, ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı ana kriterler olarak göz önüne alınmıştır. Sistemden elde edilen net güç çıktısı, KOYH modülünde üretilen güçten hava ve yakıt kompresörlerinde tüketilen güç değerlerinin çıkartılmasıyla elde edilir:

$$\dot{W}_{NET} = \dot{W}_{KOYH} - \dot{W}_{HK} - \dot{W}_{YK} \quad (4.30)$$

I. Kanun verimi, sistemden elde edilen net gücün birim zamanda sisteme giren ısı miktarına oranı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\eta_1 = \frac{\dot{W}_{NET}}{\dot{n}_{15} \cdot LHV_f} \quad (4.31)$$

Sistemin ekserji verimi ise, sistemden elde edilen toplam ekserjinin giren yakıtın ekserjine bölünmesiyle hesaplanır:

$$\eta_E = \frac{\dot{E}_{Top}}{\dot{E}_{15}} \quad (4.32)$$

Sistemin toplam ekserjisi ($\dot{E}_{Top}$) sistemden elde edilen net güce eşittir ($\dot{E}_{Top} = \dot{W}_{NET}$). Sistemdeki ekserji kaybı, her komponentte meydana gelen ekserji kayıplarının ve sistemden atılan egzoz gazlarının sahip olduğu ekserji değerlerinin toplanmasıyla bulunur:

$$\dot{E}_{D,Top} = \dot{E}_{D,KOYH} + \dot{E}_{D,REK1} + \dot{E}_{D,REK2} + \dot{E}_{D,HK} + \dot{E}_{D,YK} + \dot{E}_{egz} \quad (4.33)$$

Burada, $\dot{E}_{egz}$ 17 noktasının ekserji değerini temsil etmektedir. Sistemin ekserjitik performans katsayısı (*EPK*) Denklem 4.34'deki gibi ifade edilir:

$$EPK = \frac{\dot{E}_{Top}}{\dot{E}_{D,Top}} \quad (4.34)$$

4.4 KOYH Sisteminin Simülasyonu

Simülasyon giriş verileri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Tüpsel KOYH modülünün giriş parametreleri 3. bölümde verilen değerler ile aynıdır. Sadece yeni eklenen komponentlerle ilgili olanlar burada verilmiştir.

Çizelge 4.1 KOYH sistemi için simülasyon giriş verileri

Simülasyon giriş verileri	Değer
Basınç oranı (-)	1.12
Hava kompresörün izentropik verimi (%)	75
Yakıt kompresörün izentropik verimi (%)	75
Rekuperatör 1 etkinlik katsayısı (%)	73
Rekuperatör 2 etkinlik katsayısı (%)	73
Rek. basınç kayıpları (Hava- Yakıt tarafı) (%)	3 - 1
KOYH modülünün çıkış sıcaklığı (10 noktası) (°C)	840

Simülasyon işleminin çalışması şu şekilde açıklanabilir; öncelikle simülasyon giriş verilerine göre yakıt hücre modülünün her noktasındaki özellikler hesaplanır. Özellikle 4 noktasında

gazların hesaplanan molar oran değerleri başlangıçta kabul edilen 6 noktasındaki değerlerle karşılaştırılır. Fark varsa, 4 noktasında hesaplanan molar oran değerlerini 6 noktası için dikkate alarak hesaplama yeniden yapılır. 4 noktasında yeni bulunan değerler 6 noktası için kabul edilen yeni değerlerle tekrar karşılaştırılır. Fark önceden belirlenen hata değerinden yine büyükse iterasyona devam edilir. Fark hata değerinin altına düşünce bir sonraki işleme geçer. 5 ve 8 noktalarının basınç, sıcaklık ve molar oranlarına bağlı olarak katalitik yakıcıda kullanılmayan H_2 , CO ve varsa CH_4 gazlarının yanma reaksiyonları simüle edilerek çıkış özellikleri belirlenir. Isı değıştiricisinden de KOYH modülünün çıkışındaki (10 noktası) sıcaklık ve diğer özellikler belirlenir. Kompresör basınç oranları ve giriş şartları bilindiği için kompresör çıkış veya reküperatör 1 giriş şartları belirlenmiş olur. Havanın reküperatörden çıkış sıcaklığı (T_{11}) reküperatörün etkinlik katsayısından hareketle hesaplanarak başlangıçta kabul edilen simülasyon giriş değeriyle kontrol edilir, fark varsa hesaplanan yeni değer dikkate alınarak tüm hesaplar yeniden yapılır. Hesaplananla bir önceki değer arasındaki fark önceden belirlenen hata miktarından küçük ise bu iterasyon sonlandırılır. Reküperatör enerji dengesinden de T_{14} sıcaklığı hesaplanır. Benzer şekilde reküperatör 2'den çıkan yakıt ve egzoz sıcaklıkları (T_1 ve T_{17}) belirlenir.

Çizelge 4.2 KOYH sistemi için her noktadaki termodinamik özellikler

No	T (°C)	P (bar)	n (kmol/h)	Eks (kW)	Gaz kompozisyonu (%) molar						
					H_2	CH_4	H_2O	CO	CO_2	O_2	N_2
1	232.8	1.101	0.95	221.1	-	100.0	-	-	-	-	-
2	765.0	1.101	5.80	324.3	10.36	16.4	45.43	6.37	21.50	-	-
3	545.7	1.101	6.43	323.2	28.76	9.9	31.34	5.88	24.15	-	-
4	910.0	1.079	7.70	168.1	12.38	-	54.30	7.61	25.71	-	-
5	910.0	1.079	2.85	62.1	12.38	-	54.30	7.61	25.71	-	-
6	910.0	1.101	4.86	106.0	12.38	-	54.30	7.61	25.71	-	-
7	790.6	1.101	42.23	147.4	-	-	-	-	-	21.01	78.99
8	896.4	1.079	40.61	170.5	-	-	-	-	-	17.90	82.10
9	994.9	1.046	43.16	218.9	0.00	-	4.39	0.00	2.19	16.16	77.25
10	840.0	1.046	43.16	170.3	0.00	-	4.39	0.00	2.19	16.16	77.25
11	623.5	1.101	42.23	102.3	-	-	-	-	-	21.01	78.99
12	25.0	1.013	42.23	1.5	-	-	-	-	-	21.01	78.99
13	38.0	1.135	42.23	4.8	-	-	-	-	-	21.01	78.99
14	305.8	1.036	43.16	35.7	0.00	-	4.39	0.00	2.19	16.16	77.25
15	25.0	1.013	0.95	220.5	-	100.0	-	-	-	-	-
16	35.5	1.135	0.95	220.6	-	100.0	-	-	-	-	-
17	300.0	1.025	43.16	34.4	0.00	-	4.39	0.00	2.19	16.16	77.25

Çizelge 4.1'deki giriş verilerinin kullanılması ile simüle edilen KOYH güç üretim sistemin tüm akış noktalarındaki termodinamik özellikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Sistemin simülasyon sonucunda hesaplanan performans değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir. KOYH sisteminin her komponentine ait ekserji verimi, ekserji kaybı ve komponent ekserji kaybının toplam ekserji kaybına oranı Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.3 Simülasyon sonucunda hesaplanan performans değerleri

Performans göstergeleri	Simülasyon sonuçları
Hücre voltajı (V)	0.673
DC KOYH modül gücü (kW)	116.400
AC KOYH modül gücü (kW)	107.700
Hava kompresör gücü (kW)	4.470
Yakıt kompresör gücü (kW)	0.100
Net güç (kW)	103.100
Toplam ekserji (kW)	103.100
Toplam ekserji kaybı (kW)	118.900
Sistemin I. kanun verimi (%)	48.750
Sistemin ekserji verimi (%)	46.760
Ekserjitik performans kriteri (%)	86.700

Çizelge 4.4 Komponentlere ait ekserji performans sonuçları

Komponent	Ekserji verimi (%)	Ekserji kaybı (kW)	Ekserji kaybı oranı (%)
KOYH modülü	70.32	45.46	38.23
Rekuperatör 1	72.39	37.17	31.26
Rekuperatör 2	40.45	0.79	0.66
Hava kompresörü	75.92	1.08	0.90
Yakıt kompresörü	75.75	0.02	0.04
Egzoz gazları	-	34.38	28.91

4.5 Performans Analiz Sonuçları

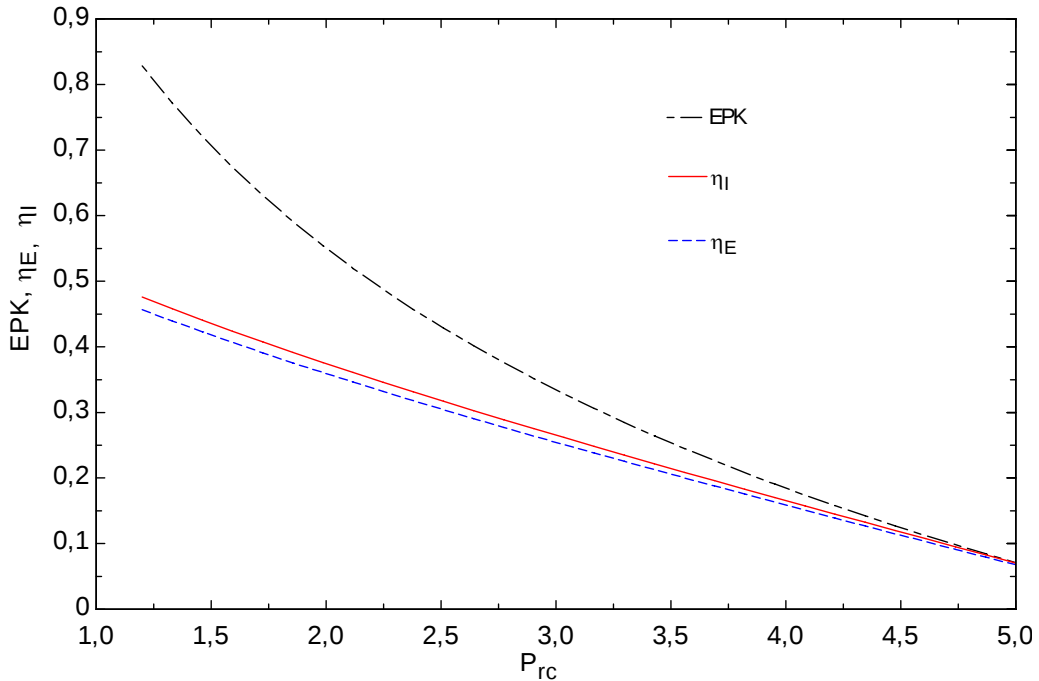
KOYH güç üretim sisteminin analizinde, kompresör basınç oranı (P_{rc}), yakıt hücresi işletme sıcaklığı (T_h), akım yoğunluğu (j), yakıt faktörü (U_f), kompresör izentropik verimleri (η_k), rekuperatör etkinlik katsayıları (ε_R) bağımsız değişken olarak alınmıştır. Bu

parametrelerin belirli aralıktaki değişimleri sonucunda sistem performansına etkileri analiz edilmiştir. Bir parametrenin değişimi incelenirken diğer parametreler sabit tutularak, Çizelge 4.1'deki nominal değerleri kullanılmıştır.

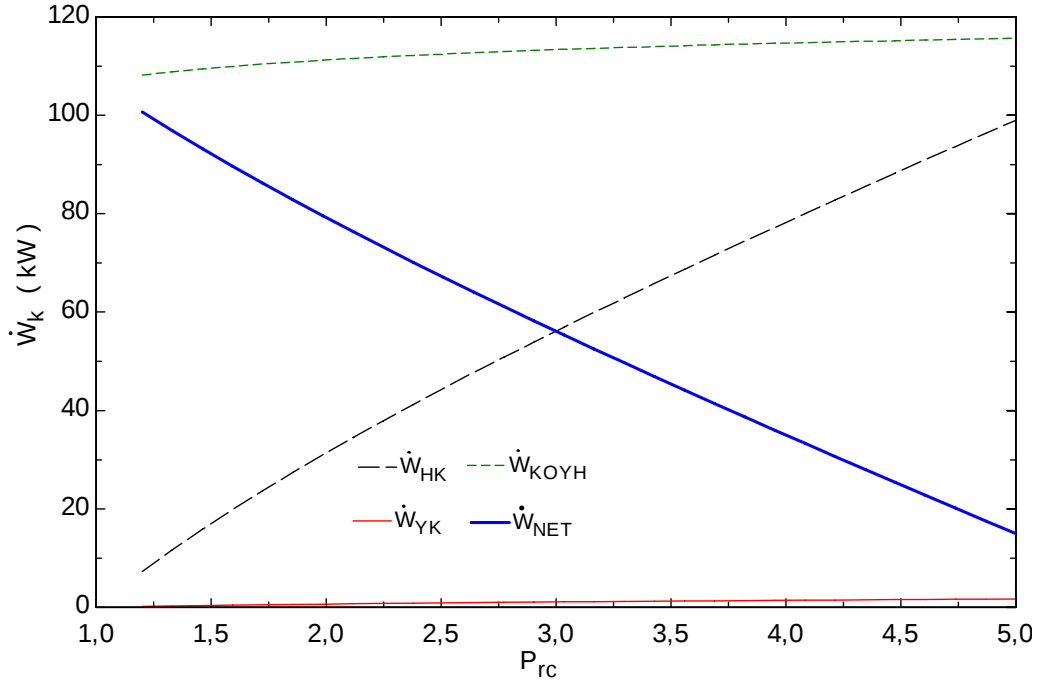
4.5.1 Kompresör basınç oranının etkisi

Kompresör basınç oranının KOYH sistem performansına etkisi Şekil 4.6-4.10'da gösterilmektedir. Şekil 4.6'dan görüleceği üzere basınç oranının artmasıyla I. Kanun verimi, ekserji verimi ve ekserjistik performans katsayısı azalmaktadır. Bu azalmanın en önemli nedeni, Şekil 4.7'de açıkça görüldüğü üzere basınç oranının artmasıyla hava kompresöründe tüketilen güçteki artışın, KOYH modülündeki güç artışından çok daha fazla olmasından yani net gücün azalmasından kaynaklanmaktadır. Ekserjistik performans katsayısının artan basınç oranı ile çok daha hızlı azalmasının nedeni ise Şekil 4.8'den görüldüğü gibi toplam ekserji çıktısının (bu sistem için net güce eşittir) azalmasının yanında toplam ekserji kayıplarının hızla artmasıdır.

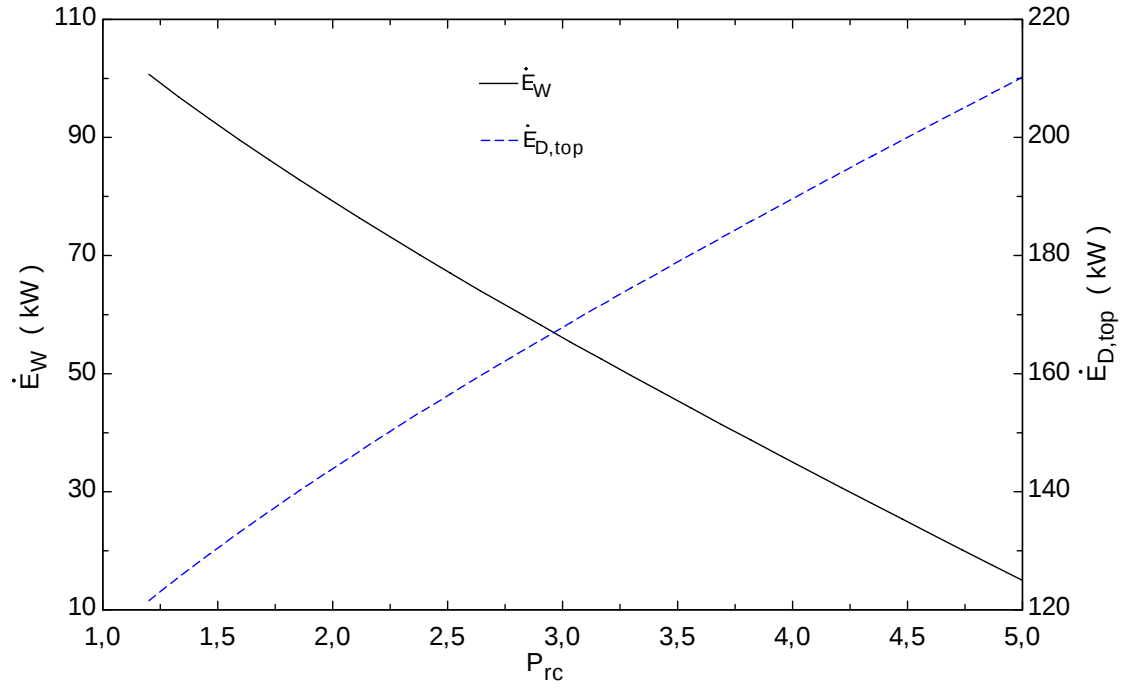
Sistemi oluşturan her bir komponentteki ekserji kayıplarının ve ekserji verimlerinin basınç oranıyla değişimleri Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir. ekserji başlangıçta en çok ekserji kaybının gerçekleştiği komponentin KOYH modülünde olduğu görülmektedir.



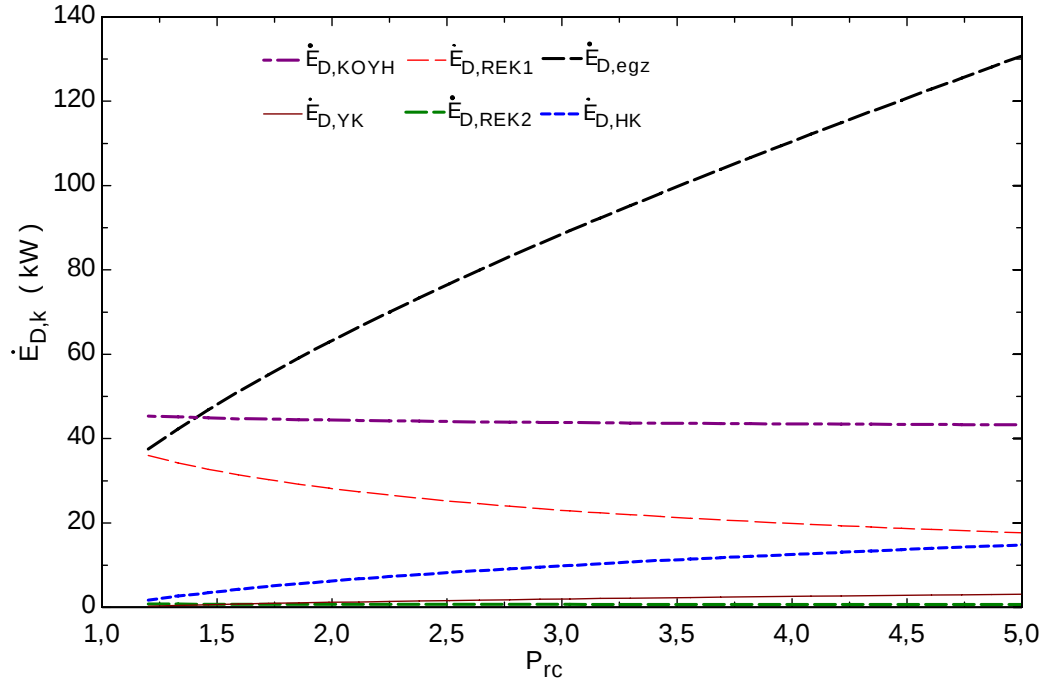
Şekil 4.6 Basınç oranına göre KOYH sisteminin ekserjistik performans katsayısı, ekserji verimi, I. Kanun verimi değişimleri



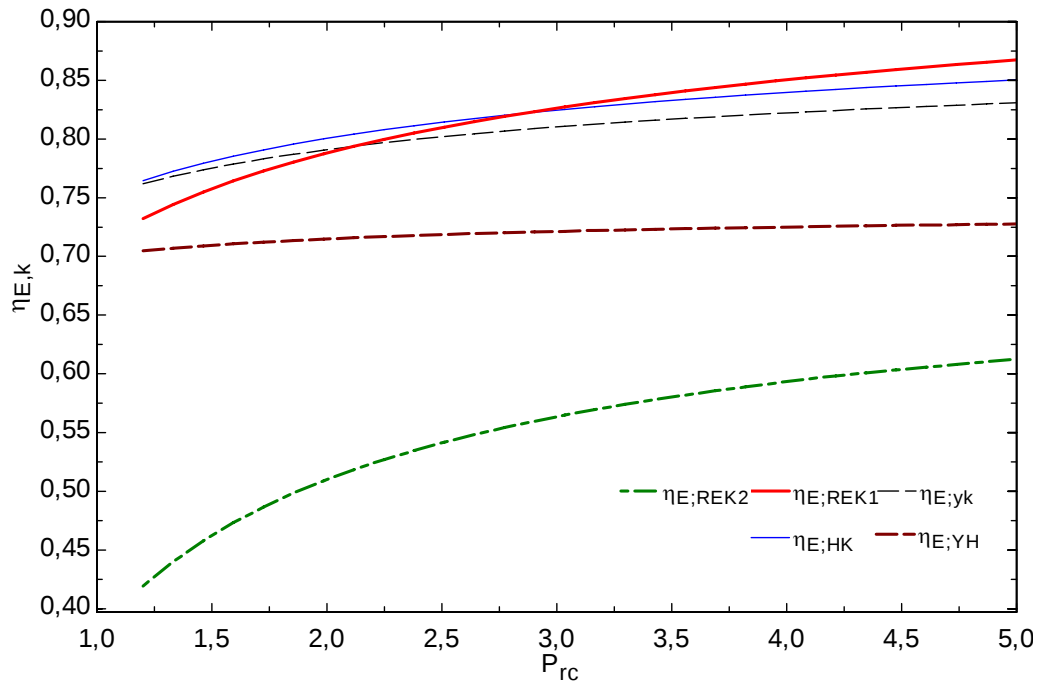
Şekil 4.7 Basınç oranına göre KOYH sisteminde net güç ve diğer komponentlerdeki güç üretiminin veya tüketiminin değişimi



Şekil 4.8 Basınç oranına göre KOYH sistemindeki toplam ekserji ve toplam ekserji kaybı değişimleri



Şekil 4.9 Basınç oranına göre KOYH sistem komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri



Şekil 4.10 Basınç oranına göre KOYH sistem komponentlerinin ekserji verimi değişimleri

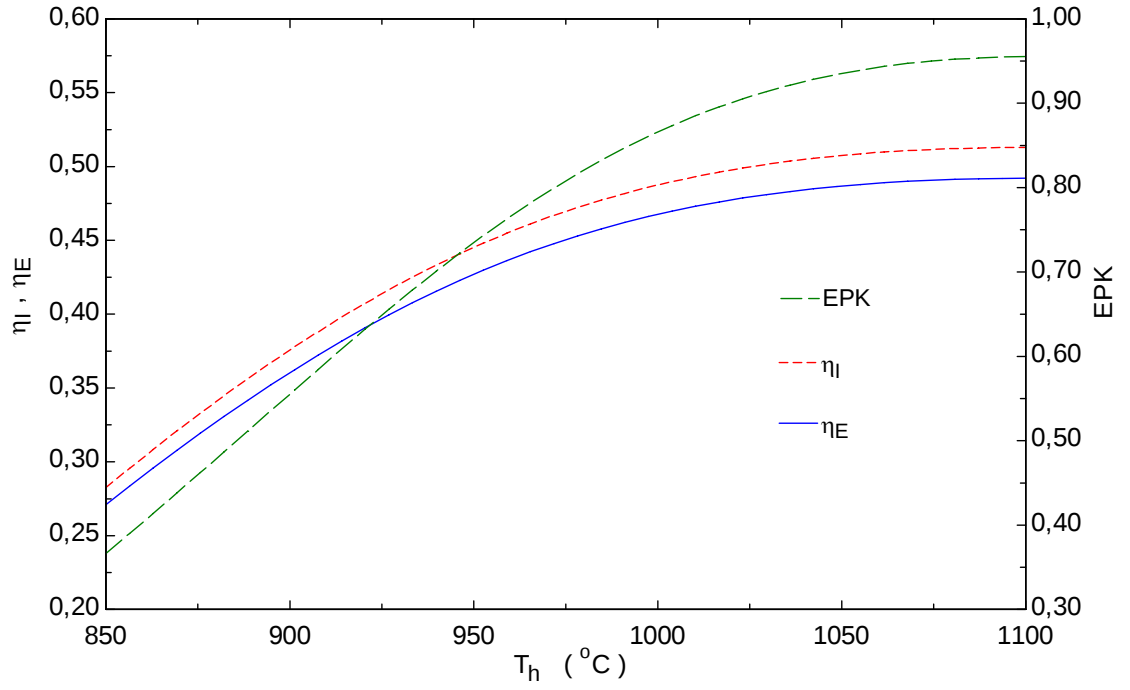
4.5.2 Hücre işletme sıcaklığının etkisi

Hücre işletme sıcaklığının KOYH sisteminin performansına etkisi Şekil 4.11-4.15’de verilmiştir. Şekil 4.11’de hücre işletme sıcaklığının artmasıyla I. Kanun verimi, ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı düşük sıcaklık değerlerinden yüksek sıcaklık değerlerine doğru azalan bir hızla monotonik olarak artmakta ve işletme sıcaklığının 1075 °C değerinden sonra artış oldukça azalmaktadır.

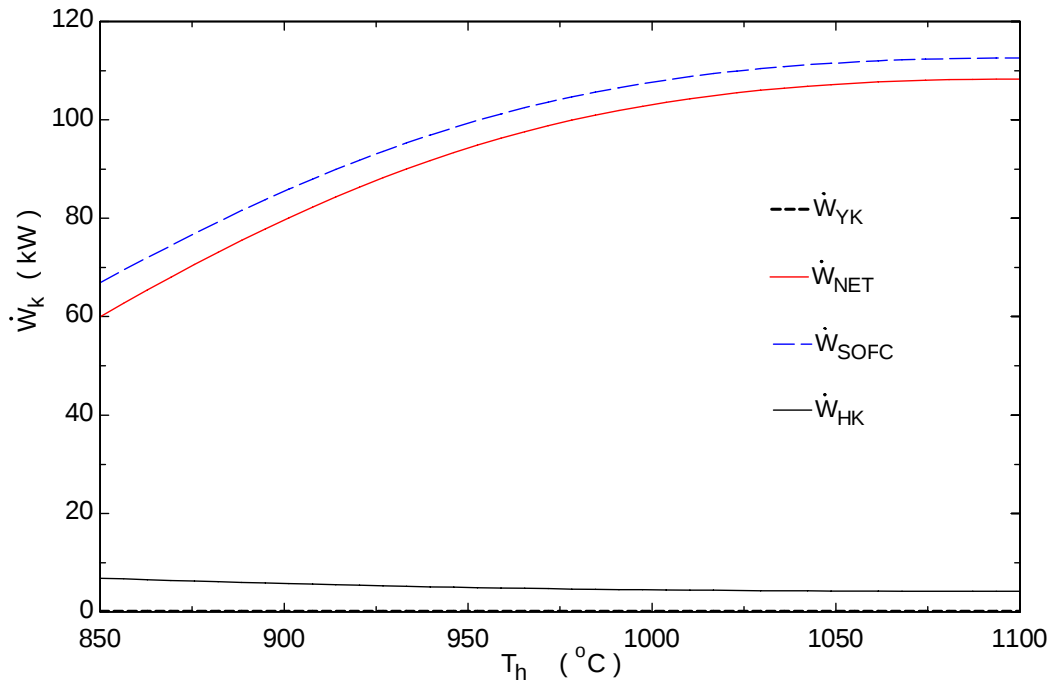
Bu davranışın nedeni Şekil 4.12’de verilen sistemin net güç çıktısının davranışıyla açıklanabilir. Hücre işletme sıcaklığının artmasının kompresörlerde tüketilen güç üzerinde önemli bir etkisi olmamasına rağmen KOYH modülünde üretilen gücü artırmaktadır. Dolayısıyla sistemin net gücünün sıcaklıkla değişimi KOYH modülünün güç çıktısı değişimiyle paralellik göstermektedir. KOYH modülünde üretilen gücün işletme sıcaklığı ile artması hücre voltajındaki değişim ile ilgilidir. KOYH modülünde üretilen güç, hücre voltajının bir fonksiyonudur. Dolayısıyla, hücre işletme sıcaklığının düşük olduğu başlangıç değerlerinde hücredeki polarizasyon değerleri yüksek olduğu için hücre voltajı değeri düşüktür. Sıcaklığın artması voltaj kayıplarını azaltıcı yönde etki yaptığından voltaj değeri artar. Hücre voltajının artması demek yakıt hücresinden elde edilen gücün artması anlamına gelmektedir. Hücre işletme sıcaklığının daha da artması Gibbs enerjisindeki azalma miktarını baskın hale getirdiği için hücre voltajındaki artma eğilimi giderek azalır ve maksimum değerine ulaşır. Bu değerden sonra da hücre işletme sıcaklığı artmaya devam etseydi Gibbs enerjisindeki azalma Nernst potansiyelini daha da düşürecek ve voltaj değeri düşmeye başlayacaktır.

Şekil 4.13’de sistemin toplam ekserji çıktısı ve toplam ekserji kayıplarının işletme sıcaklığı değişimi görülmektedir. İşletme sıcaklığı arttıkça toplam ekserji çıktısı artmakta, toplam ekserji kayıpları ise azalmaktadır. Bu durum, artan işletme sıcaklığı ile ekserjitik performans katsayısının hızlı bir şekilde artması sonucunu doğurmaktadır (Şekil 4.11).

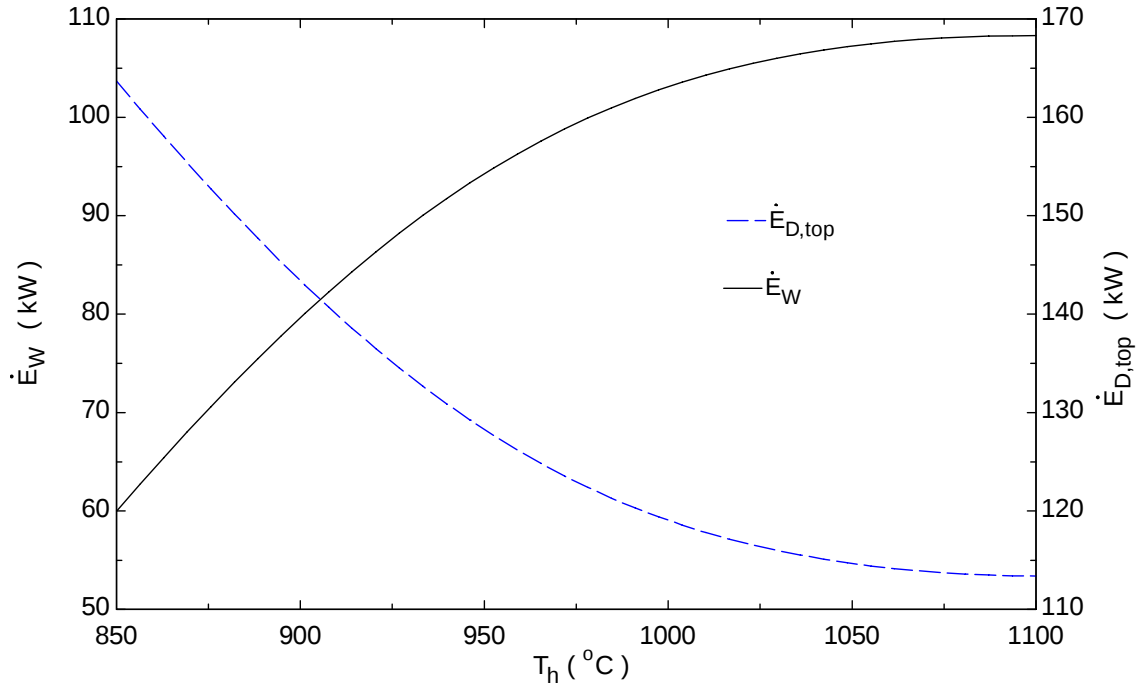
Sistem komponentlerindeki ekserji kayıplarının ve ekserji verimlerinin işletme sıcaklıkları ile değişimleri Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de verilmiştir. Şekil 4.14’den görüleceği üzere işletme sıcaklığının artması, hava, yakıt kompresörü ve reküperatör 2’deki ekserji kayıpları üzerinde etkili olmazken yakıt hücresi modülü, reküperatör 1 ve egzozdan kaynaklanan kayıpları azaltmaktadır. Yakıt hücresi modülünün ekserji verimi diğer komponentlere göre işletme sıcaklığından çok daha fazla etkilenmektedir (Şekil 4.15).



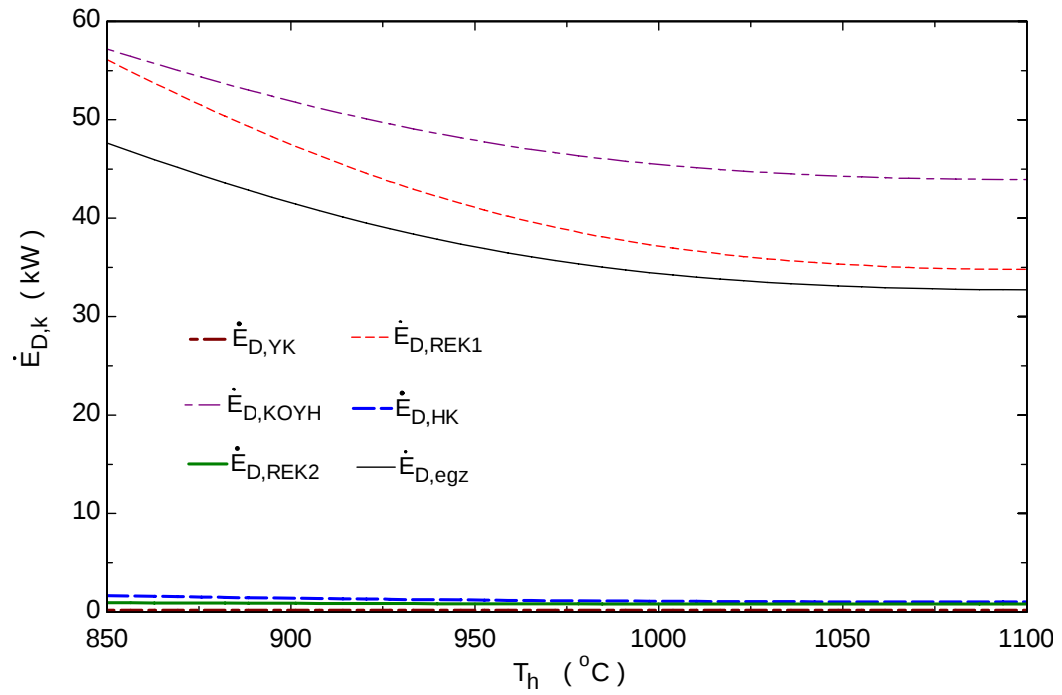
Şekil 4.11 HÜCRE İŞLETME SICAKLIĞINA GÖRE KOYH SİSTEMİNİN EKSERJİTİK PERFORMANS KATSAYISI, EKSERJİ VERİMİ VE I. KANUN VERİMİ DEĞİŞİMLERİ



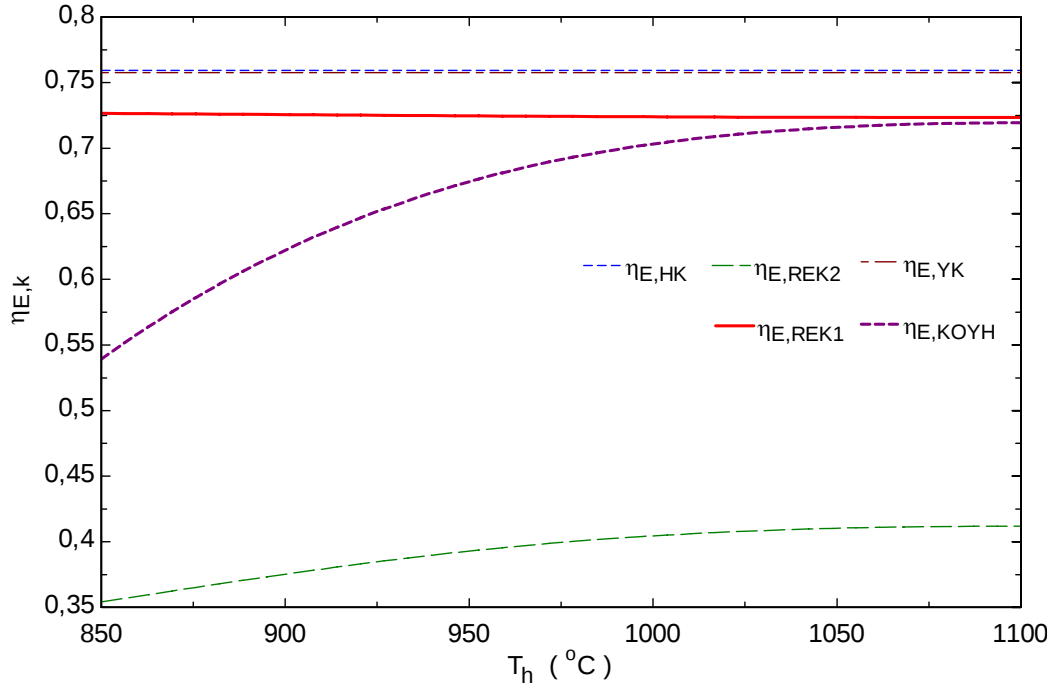
Şekil 4.12 HÜCRE İŞLETME SICAKLIĞINA GÖRE KOYH SİSTEMİNDE NET GÜÇ VE DİĞER KOMPONENTLERDEKİ GÜÇ ÜRETİM VEYA TÜKETİM DEĞİŞİMLERİ



Şekil 4.13 Hücre işletme sıcaklığına göre KOYH sistemindeki toplam ekserji ve toplam ekserji kaybı değişimleri



Şekil 4.14 Hücre işletme sıcaklığına göre KOYH sistem komponentlerinin ekserji kaybı değişimleri



Şekil 4.15 Hücre işletme sıcaklığına göre KOYH sistem komponentlerinin ekserji verimi değişimleri

4.5.3 Akım yoğunluğunun etkisi

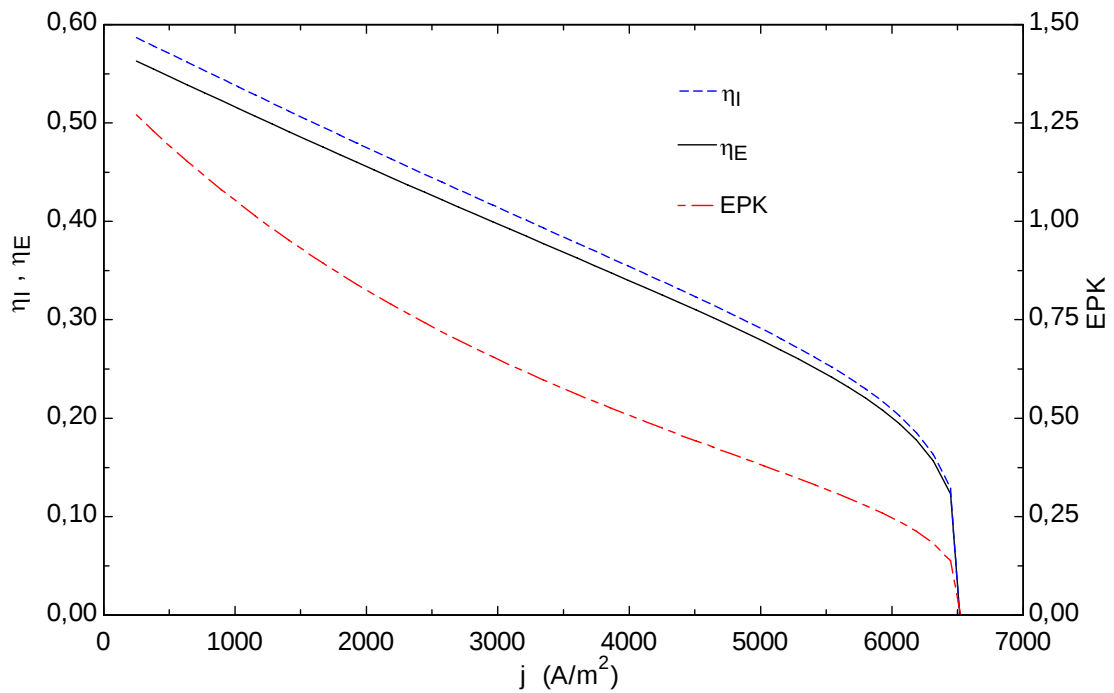
Şekil 4.16-4.20’de KOYH sisteminde akım yoğunluğunun değişimiyle performans değerlerinin nasıl değiştiği gösterilmiştir. Şekil 4.16’dan görüleceği üzere artan akım yoğunluğu ile birlikte I. Kanun verimi, ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı azalarak, limit akım yoğunluğunda sıfır olmaktadır. Şekil 4.17’de hava ve yakıt kompresörlerinin çektiği güç, KOYH modülünde üretilen güç ve KOYH sisteminin net gücü ile akım yoğunluğu arasındaki ilişki görülmektedir. Görüleceği üzere akım yoğunluğu arttıkça net güç artmakta ve akım yoğunluğunun belirli bir değerinde (4800 A/m^2) maksimum olmaktadır. Maksimum güç şartlarından itibaren akım yoğunluğu arttıkça net güç azalarak limit akım yoğunluğunda sıfır olmaktadır. Net güç, I. Kanun verimi, ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı birlikte gözönüne alındığında optimal akım yoğunluğunun maksimum güç şartlarındaki akım yoğunluğundan küçük olması gerektiği Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’nin birlikte değerlendirilmesinden anlaşılır.

Şekil 4.18’de sistemin toplam ekserji değeri ile toplam ekserji kaybının akım yoğunluğu ile değişimi görülmektedir. Gözönüne alınan bu sistemde toplam ekserji çıktısı net güce eşit olduğundan toplam ekserji çıktısının akım yoğunluğu ile değişimi net gücün değişimiyle aynı karakterdedir. Ancak şekilden de görüldüğü üzere akım yoğunluğu attıkça toplam ekserji

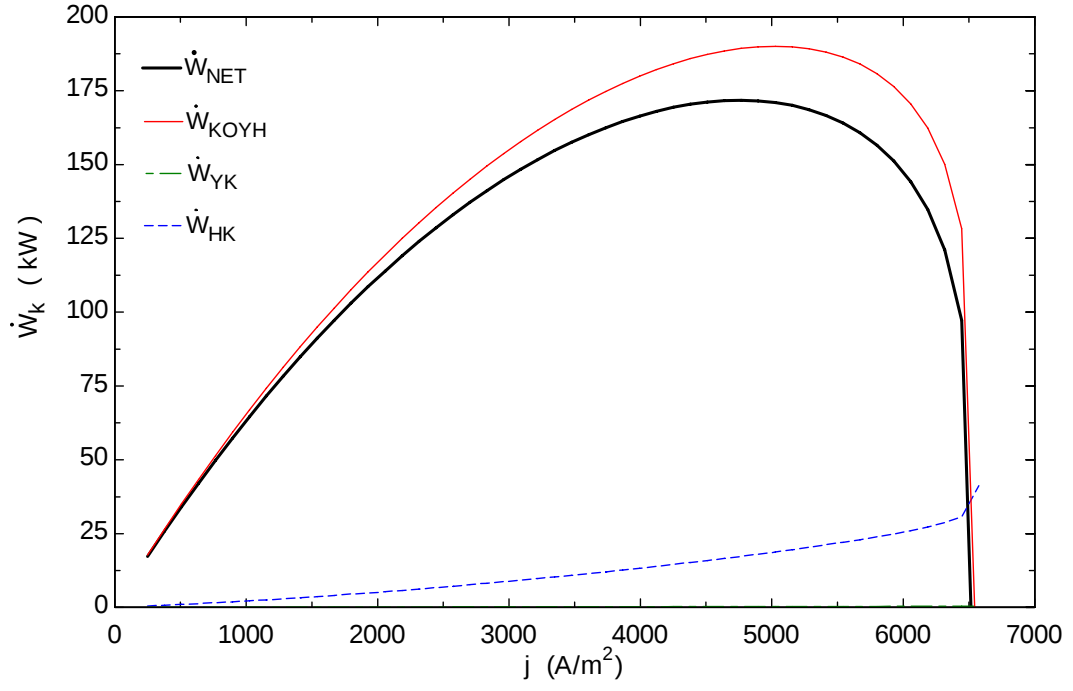
kayıpları artmakta ve bu artış limit akım yoğunluğu değerlerine yaklaştıkça çok hızlı olmaktadır. Bu durum, toplam ekserji çıktısının toplam ekserji kaybına oranı olan ekserjitik performans katsayısının artan akım yoğunluğu ile azalmasına neden olmaktadır.

Şekil 4.19’da sistemi oluşturan komponentlerdeki ekserji kaybının akım yoğunluğu ile değişimleri verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, ekserji kayıplarının ve artan akım yoğunluğu ile bu kayıplardaki artışın yakıt hücresi modülü ve reküperatör 1 ile sistemi terk eden egzoz gazlarında diğer komponentlere göre çok fazla olduğu görülmektedir.

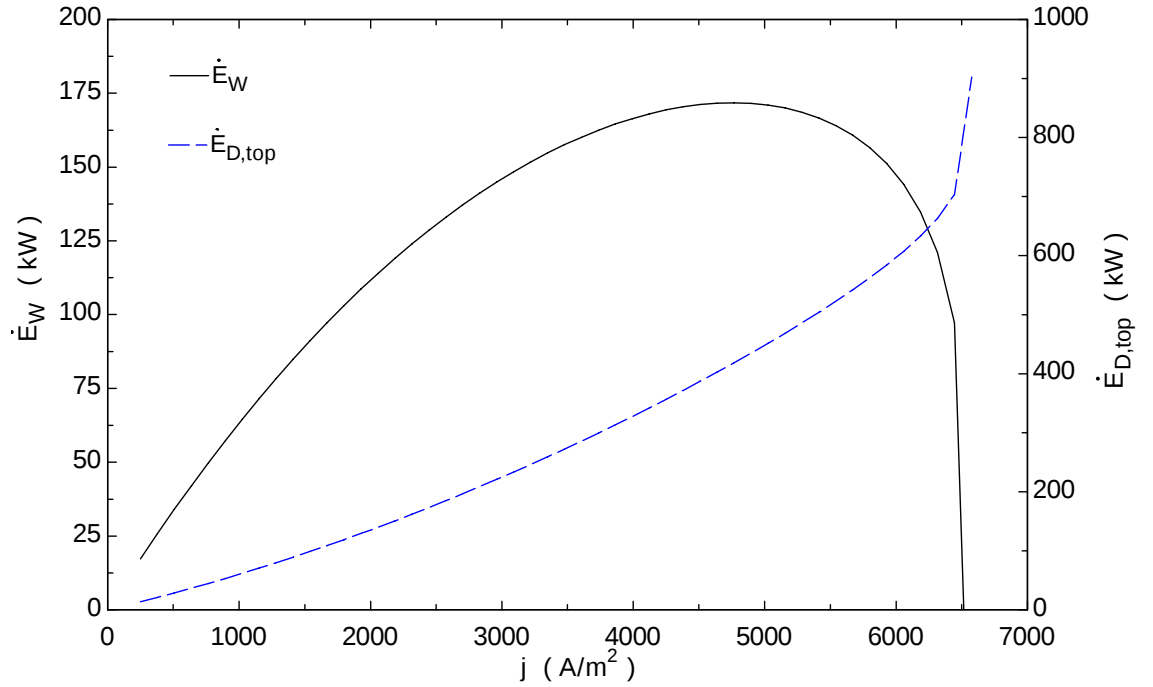
Şekil 4.20’de komponentlerin ekserji verimlerinin akım yoğunluğu ile değişimi görülmektedir. Görüleceği üzere KOYH modülünün ve reküperatör 2’nin ekserji verimi artan akım yoğunluğu ile azalmasına rağmen diğer komponentlerde önemli bir değişiklik olmamaktadır. Akım yoğunluğundaki değişimden en fazla etkilenen KOYH modülünün ekserji verimi olduğu görülür.



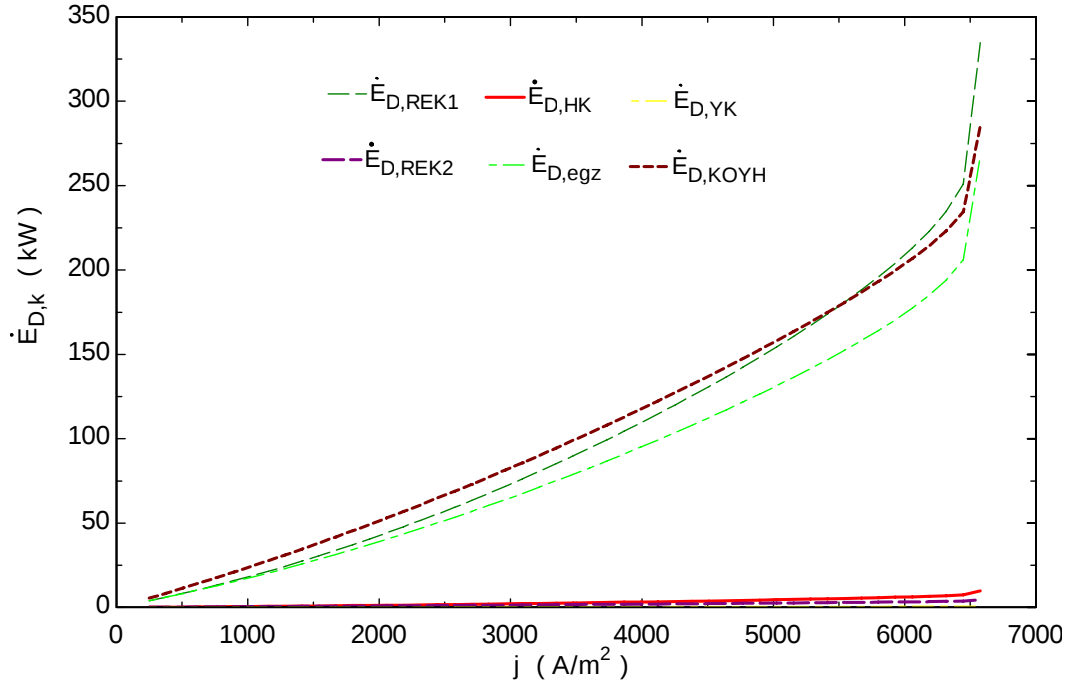
Şekil 4.16 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri



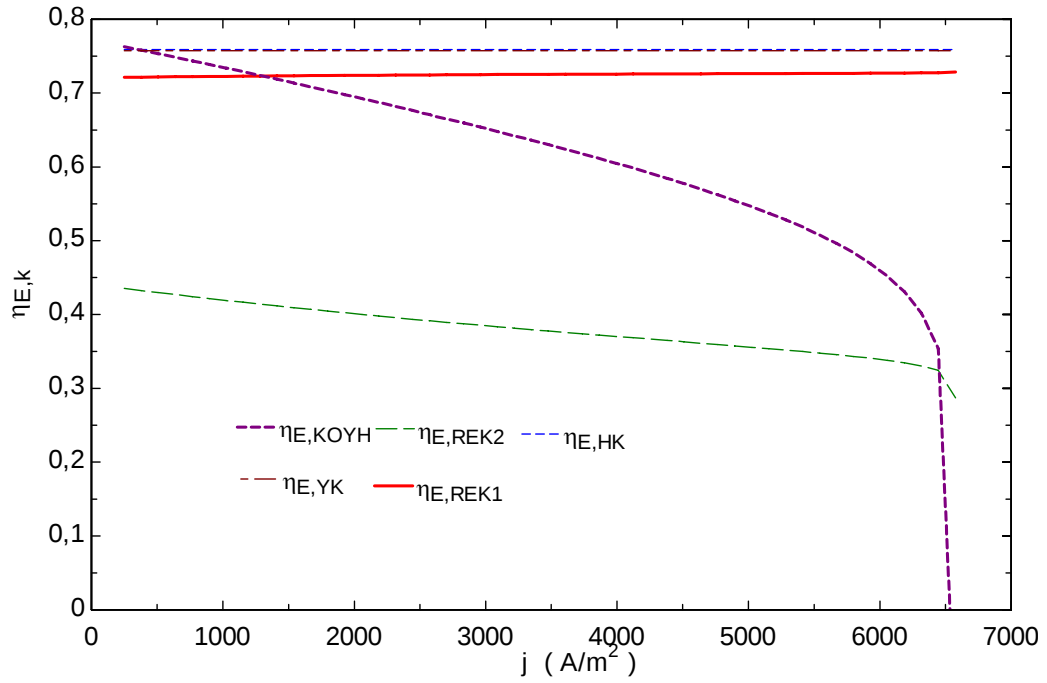
Şekil 4.17 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH sisteminde ilgili komponentlerin güç üretimi, tüketimi ve net gücün değişimleri



Şekil 4.18 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri



Şekil 4.19 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH sistem komponentlerinin ekserji kaybı değişimleri



Şekil 4.20 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH sistemindeki komponentlerinin ekserji verimi değişimleri

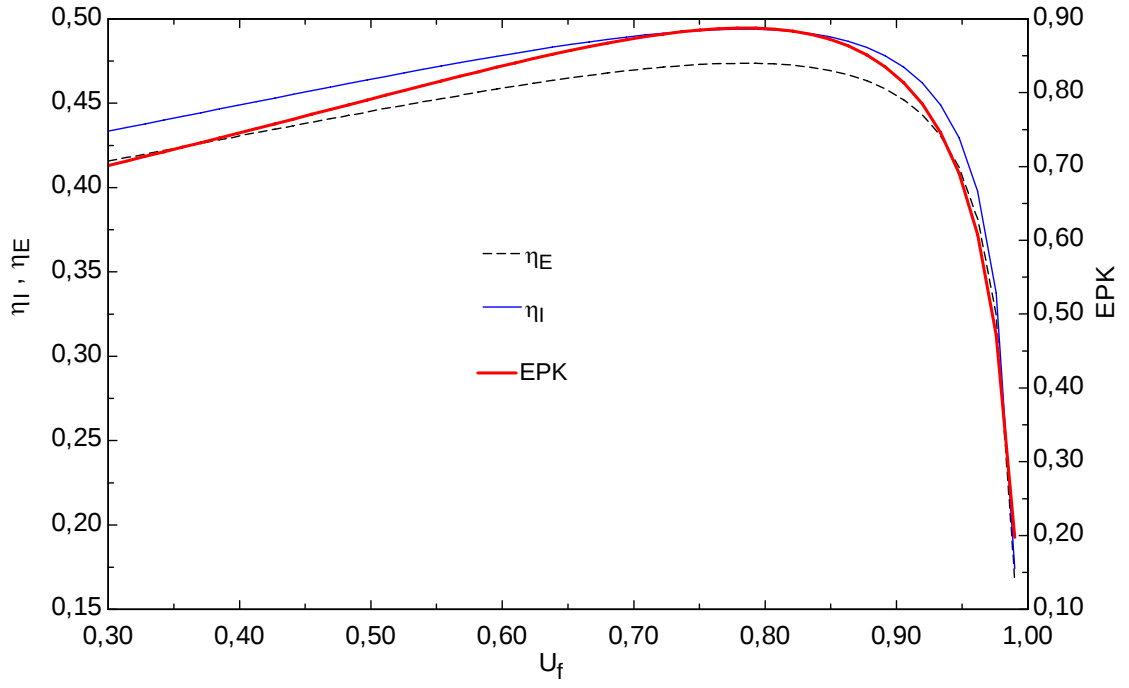
4.5.4 Yakıt kullanım faktörünün etkisi

Yakıt kullanım faktörünün sistem performansına etkileri Şekil 4.21-4.25’de gösterilmiştir. Şekil 4.21’den görüleceği üzere göre I. Kanun verimi, ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı yakıt kullanım faktörünün belirli bir değerinde maksimum olmaktadır. Yakıt kullanım faktörünün her üç performansı maksimum yapan değeri 0.8 civarındadır. Şekil 4.22’de hava ve yakıt kompresörlerinin çektiği güç, KOYH modülünde üretilen güç ve KOYH sisteminin net gücü ile yakıt kullanım faktörü arasındaki ilişki görülmektedir. Bu şekilden yakıt kullanım faktörünün artmasıyla sisteminin net gücünün azalacağı görülmektedir. Bu nedenle en uygun yakıt kullanma faktörü belirlenirken I. Kanun verimi, ekserji verimi, ekserjitik performans katsayısı ile güçteki değişim birlikte göz önünde alınmalıdır.

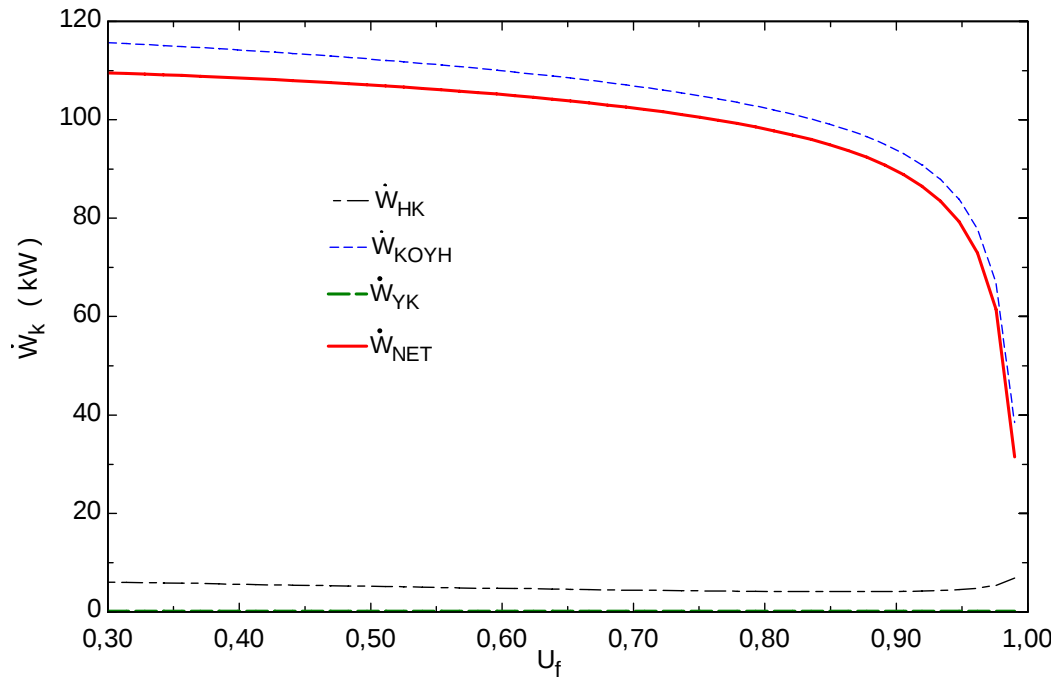
Şekil 4.23’de sistemin toplam ekserji değeri ile toplam ekserji kaybının yakıt kullanım faktörü ile değişimi görülmektedir. Şekilden görüleceği gibi bu sistemde net güce eşit olan toplam ekserji çıktısı artan yakıt kullanma faktörü ile sürekli azalırken, toplam ekserji kaybı önce azalmakta ve minimum bir değerden geçtikten sonra artmaktadır. Toplam ekserji çıktısı ve toplam ekserji kayıplarının Şekil 4.23’deki değişim karakteristiği Şekil 4.21’deki ekserjitik performans katsayısının değişim karakteristiğini oluşturmaktadır.

Şekil 4.24’de artan yakıt kullanım faktörü ile sistemi oluşturan komponentlerdeki ekserji kaybının değişimleri görülmektedir. Ekserji kayıplarının ve artan yakıt kullanım faktörü ile bu kayıplardaki değişimin yakıt hücresi modülü ve reküperatör 1 ile sistemi terk eden egzoz gazlarında çok fazla olduğu görülmektedir. Diğer komponentlerdeki ekserji kayıpları ve bu kayıplar üzerinde yakıt kullanım faktörünün etkisi önemsenmeyecek kadar azdır.

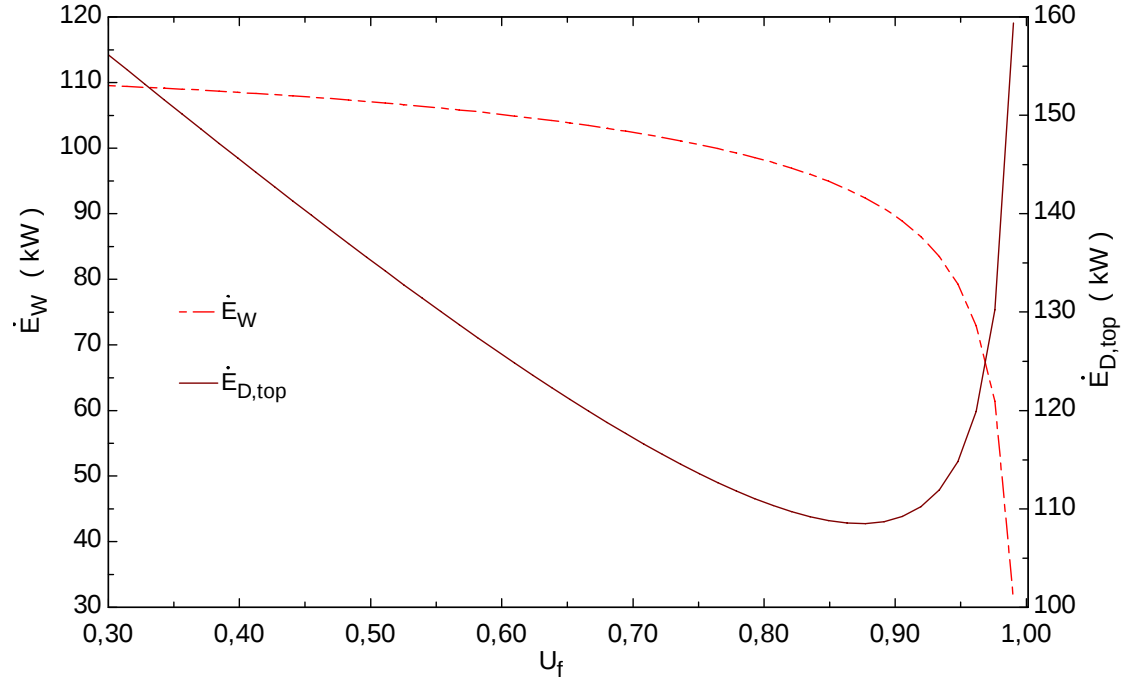
Şekil 4.25’de sistem komponentlerin ekserji verimlerinin yakıt kullanım faöktörü ile değişimi verilmiştir. Yakıt kullanım faktörü en çok yakıt hücre modülünün ve çok azda reküperatör 2 komponentlerin ekserji verimleri üzerinde etkilidir. Diğer komponentlerin ekserji verimi yakıt kullanım faktörü ile değişmemektedir.



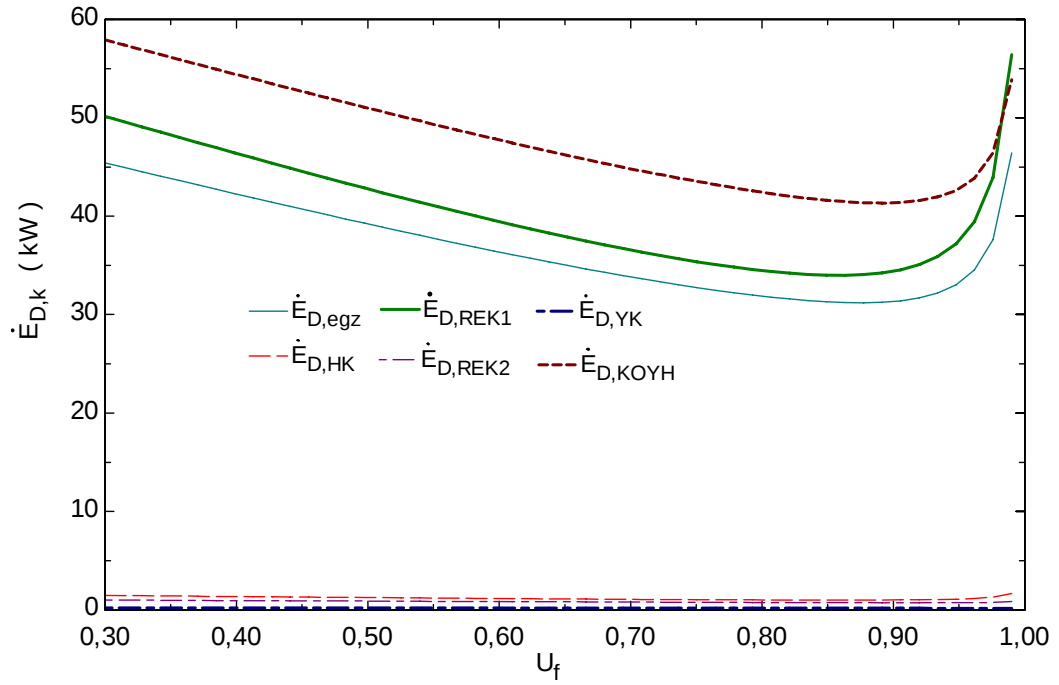
Şekil 4.21 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri



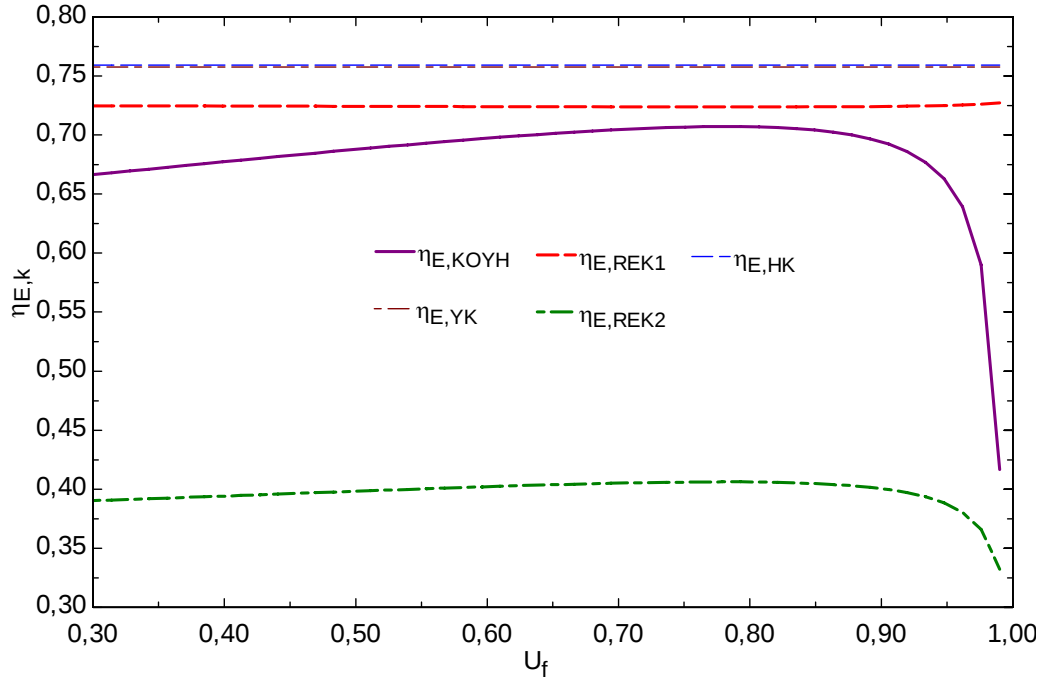
Şekil 4.22 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH sisteminde ilgili komponentlerin güç üretimi, tüketimi ve net gücün değişimleri



Şekil 4.23 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri



Şekil 4.24 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH sistem komponentlerinin ekserji kaybı değişimleri



Şekil 4.25 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri

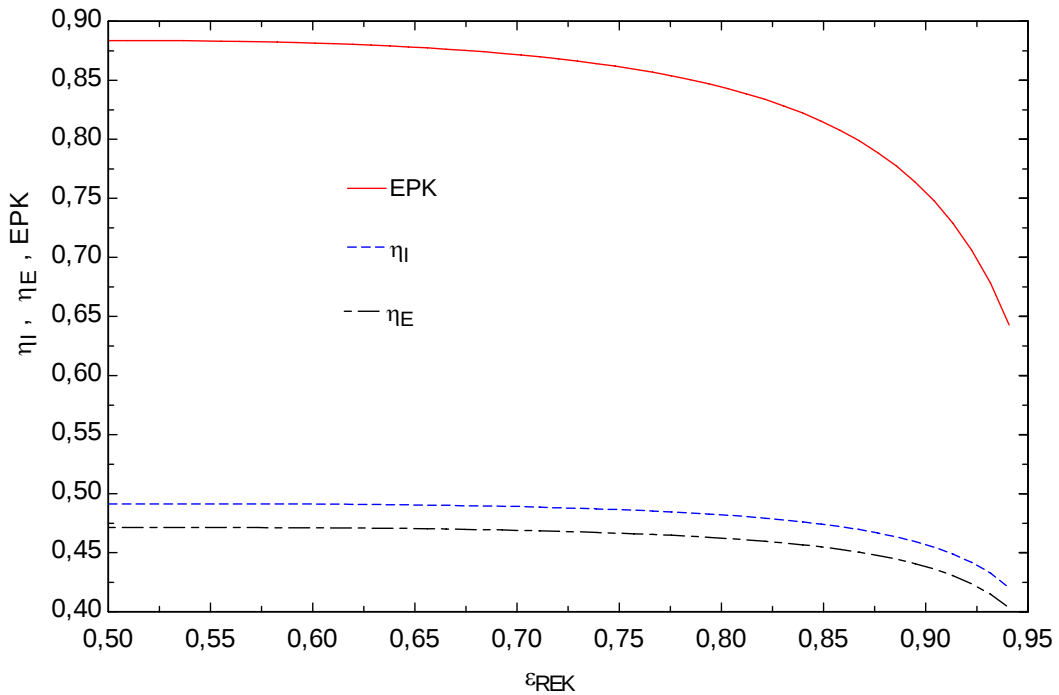
4.5.5 Reküperatör etkinlik katsayısının etkisi

Sistemde kullanılan reküperatör 1 ve 2 komponentlerinin etkinlik katsayıları 0.50 ile 0.95 aralığında değiştirilerek etkinlik katsayısının performans kriterleri üzerindeki etkisi incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4.26- 4.30'de verilmiştir. Reküperatörlerin etkinlik katsayısının, 0.85 değerine kadar I. Kanun verimi ve ekserji verimi üzerinde önemli bir etkisi olmadığı ve etkinlik katsayısının 0.85 değerinden sonra sözkonusu verimler artan etkinlik katsayısı ile birlikte düşmektedir. Reküperatör etkinlik katsayısının ekserjitik performans katsayısı üzerinde çok daha fazla etkili olduğu ve etkinlik katsayısının 0.7 değerinden sonra ekserjitik performans katsayısını hızlı bir şekilde düşürdüğü görülür (Şekil 4.26).

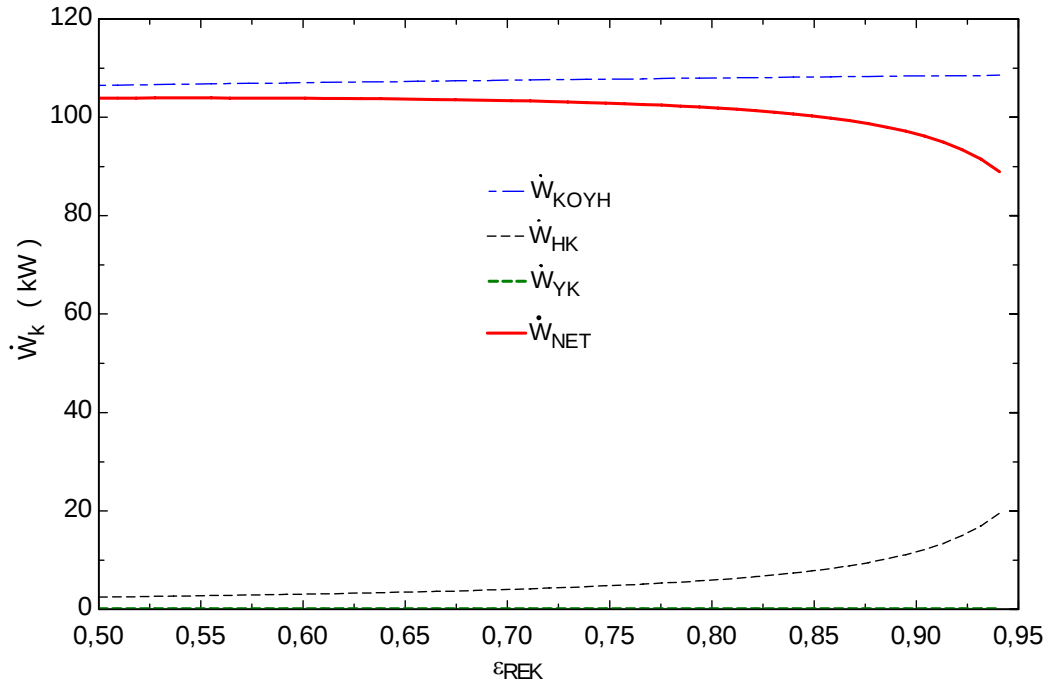
Reküperatörlerin yüksek etkinlik katsayılarının performans üzerinde daha fazla etkili olmasının nedeni şu şekilde açıklanabilir; artan etkinlik katsayısı ile yakıt hücresi modülünden çıkan gazların sahip olduğu ısı enerjisini daha fazla geri kazanılarak yakıt hücresine giren havanın sıcaklığı artmaktadır. Bu sonuç yakıt hücresi modülünün çıkışındaki sıcaklığı artırıcı yönde etki göstermesine karşın, modelde çıkış sıcaklığı sabit olarak göz önüne alındığından, bu sabitliğin sağlanabilmesi amacıyla sisteme daha fazla hava girmesi gerekmektedir. Bu nedenle kompresörde tüketilen güç miktarı, reküperatör etkinlik katsayısının artmasıyla özellikle yüksek reküperatör etkinlik katsayısı değerlerinde hızlı bir

şekilde artmaktadır. Reküperatör etkinlik katsayısının değişimi yakıt hücre modülünün güç çıktısını değiştirmediğinden, etkinlik katsayısının artması ile artan kompresör güç gereksinimi nedeniyle net gücü azalacaktır (Şekil 4.27).

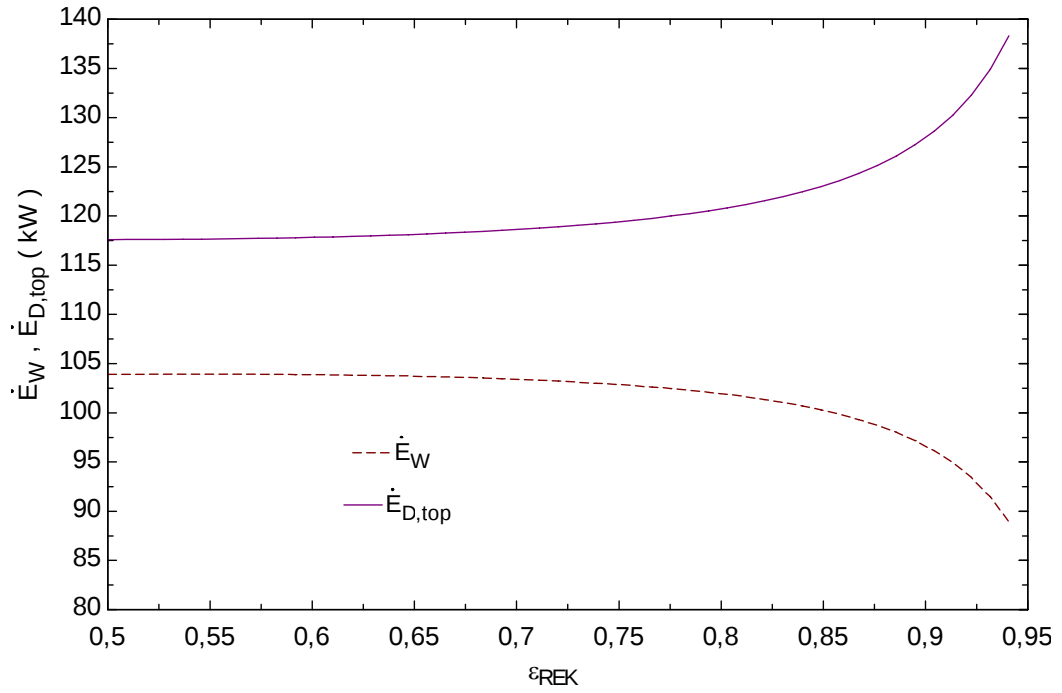
Şekil 4.28’de sistemin toplam ekserji çıktısı ve toplam ekserji kayıplarının reküperatör etkinlik katsayısı ile değişimleri gözükmemektedir. Etkinlik katsayısının 0.7 değerine kadar reküperatörlerin ekserji çıktısı ve ekserji kayıpları üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı 0.7 değerinden sonra ise toplam ekserji kayıplarını hızla artırarak toplam ekserji çıktısını azaltmaktadır. Sistemi oluşturan her bir komponentin ekserji kayıpları ve ekserji verimlerinin reküperatör etkinlik katsayısı ile değişimleri Şekil 4.29 ve Şekil 4.30’da verilmiştir. Artan reküperatör etkinlik katsayısı ile sistemden çıkan egzoz gazlarından kaynaklanan ekserji kayıpları azalırken reküperatör 1’deki ekserji kayıpları artmaktadır. Diğer komponentlerin ekserji kayıpları etkinlik katsayısının değişiminden önemli ölçüde etkilenmemektedir. Reküperatörün etkinlik katsayısının artması ile reküperatör 1’in ekserji verimi lineer artarken, reküperatör 2’nin ekserji verimi etkinlik katsayısının 0.7 değerine kadar değişmemekte ve bu değerden sonra önemli ölçüde azalmaktadır. Diğer komponentlerin ekserji verimlerinin etkinlik katsayısından etkilenmediği görülmektedir.



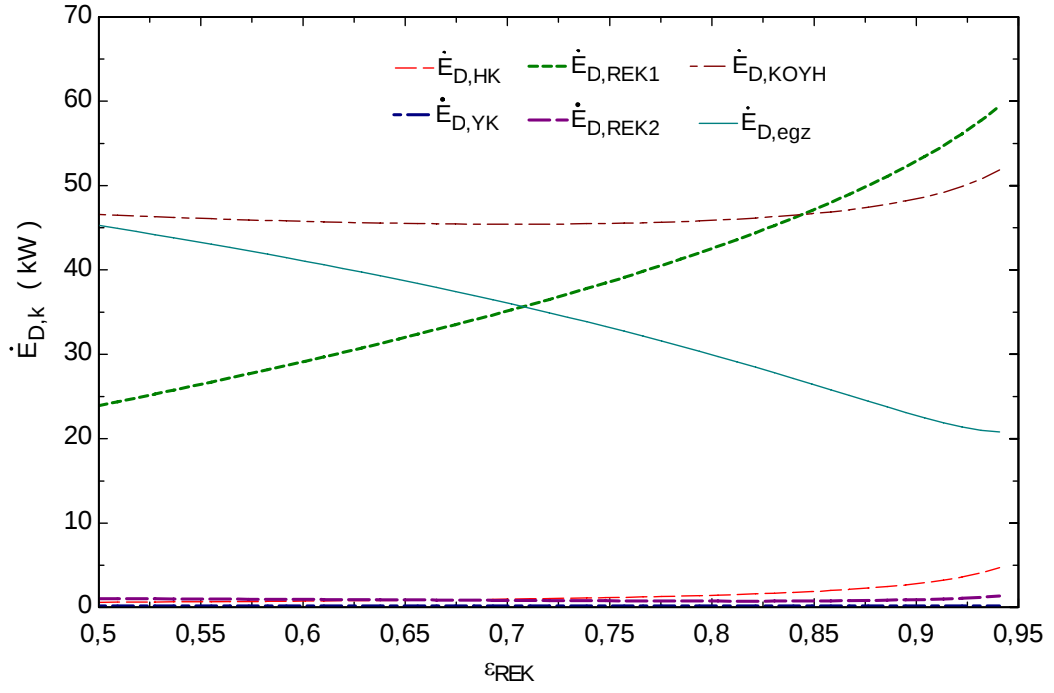
Şekil 4.26 Reküperatör etlinliğine göre KOYH sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjistik performans katsayısı değişimleri



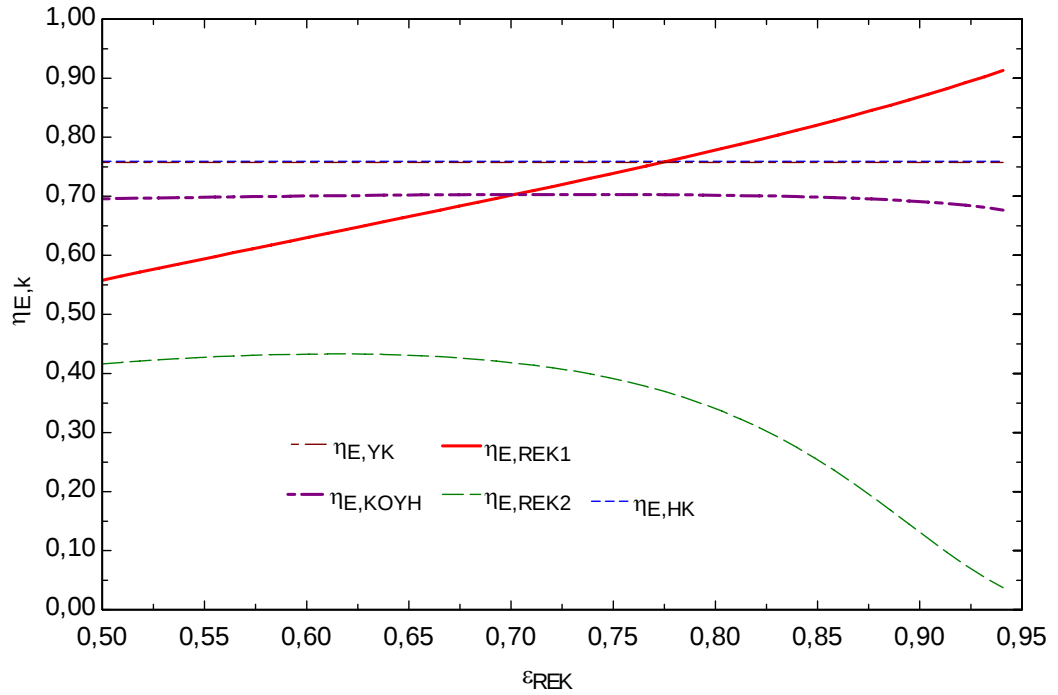
Şekil 4.27 Reküperatör etlinliğine göre KOYH sisteminde ilgili komponentlerin güç üretimi, tüketimi ve net gücün değişimleri



Şekil 4.28 Reküperatör etlinliğine göre KOYH sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri



Şekil 4.29 Reküperatör etlinliğine göre KOYH sistem komponentlerinin ekserji kaybı değişimleri

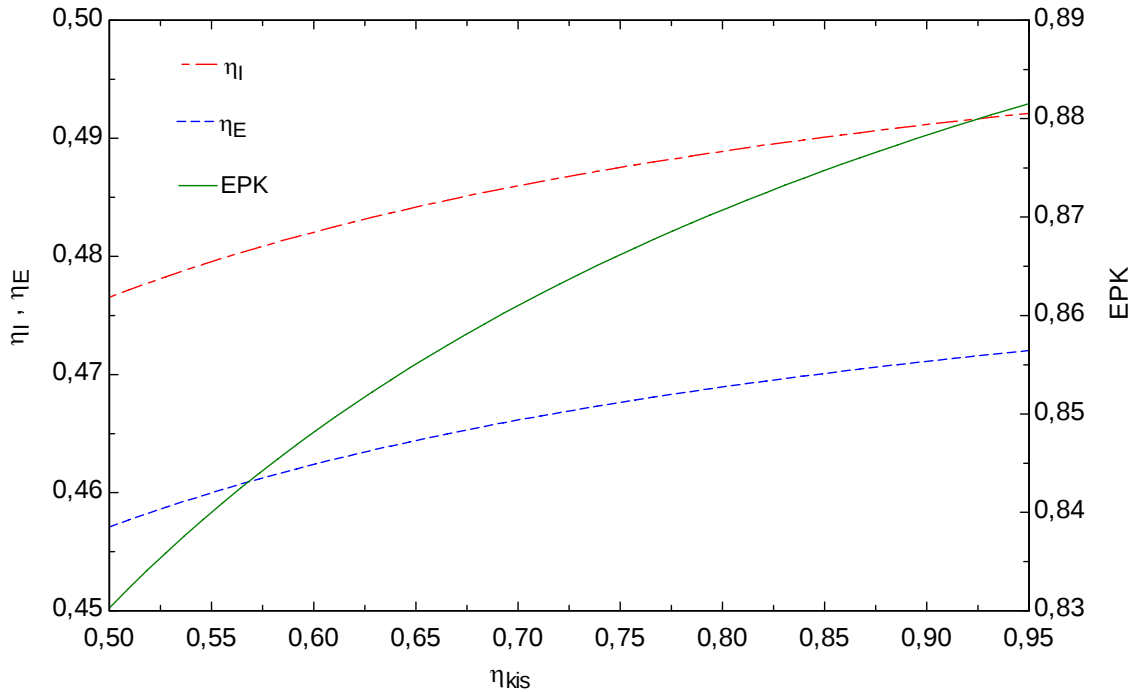


Şekil 4.30 Reküperatör etlinliğine göre KOYH sistemindeki komponentlerinin ekserji verimi değişimleri

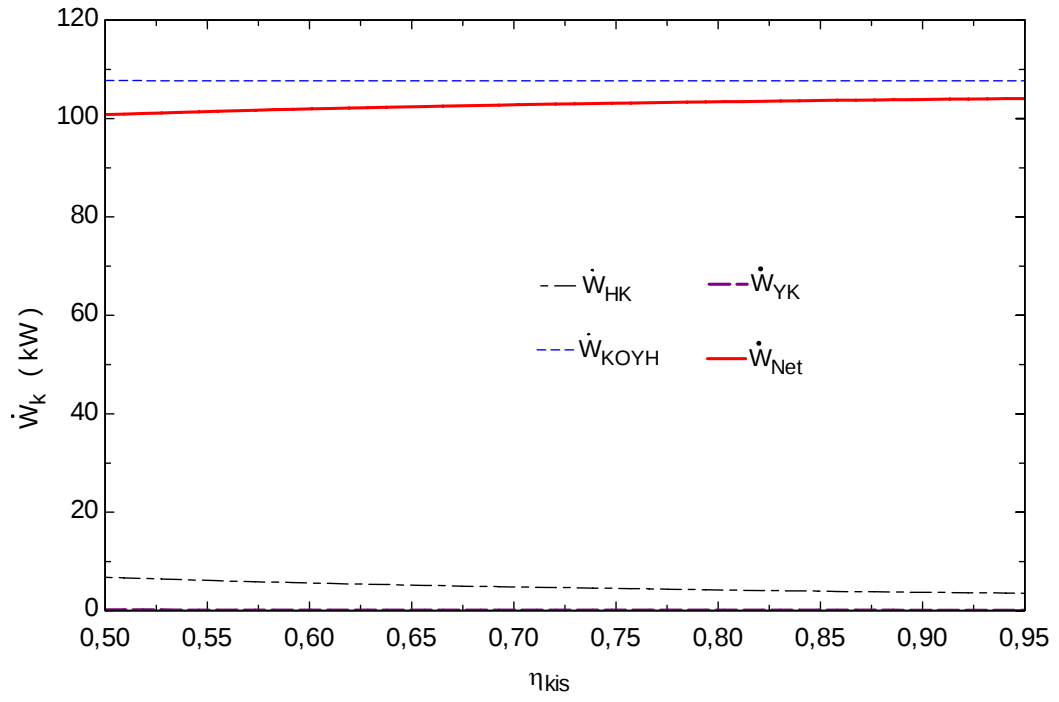
4.5.6 Kompresör izentropik veriminin etkisi

Şekil 4.31’de hava ve yakıt kompresörlerinin izentropik veriminin sistem performansı üzerindeki etkisi görülmektedir. İzentropik verimin artmasıyla tüm performanslar (I. Kanun verimi, ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı) artmaktadır. Kompresörlerin izentropik veriminin 0.50’den 0.95’e artması I. Kanun ve ekserji veriminde yaklaşık %3’lük ekserjitik performans katsayısında ise % 6’lık bir artışa sebep olmaktadır. Bu artışın nedeni, kompresör izentropik verimlerinin artması ile tersinmezliklerin ve buna bağlı olarak güç gereksiniminin azalarak net güç çıktısının artmasıdır (Şekil 4.32). Şekil 4.33’de sistemin toplam ekserji çıktısı ve toplam ekserji kayıplarının kompresör izentropik verimi ile değişimleri görülmektedir. Artan kompresör izentropik verimi ile gözalınan bu sistemde güce eşit olan toplam ekserji çıktısı artmakta ve toplam ekserji kayıpları azalmakta ve buna bağlı olarak ekserjitik performans katsayısı artmaktadır (Şekil 4.31 ve Şekil 4.33).

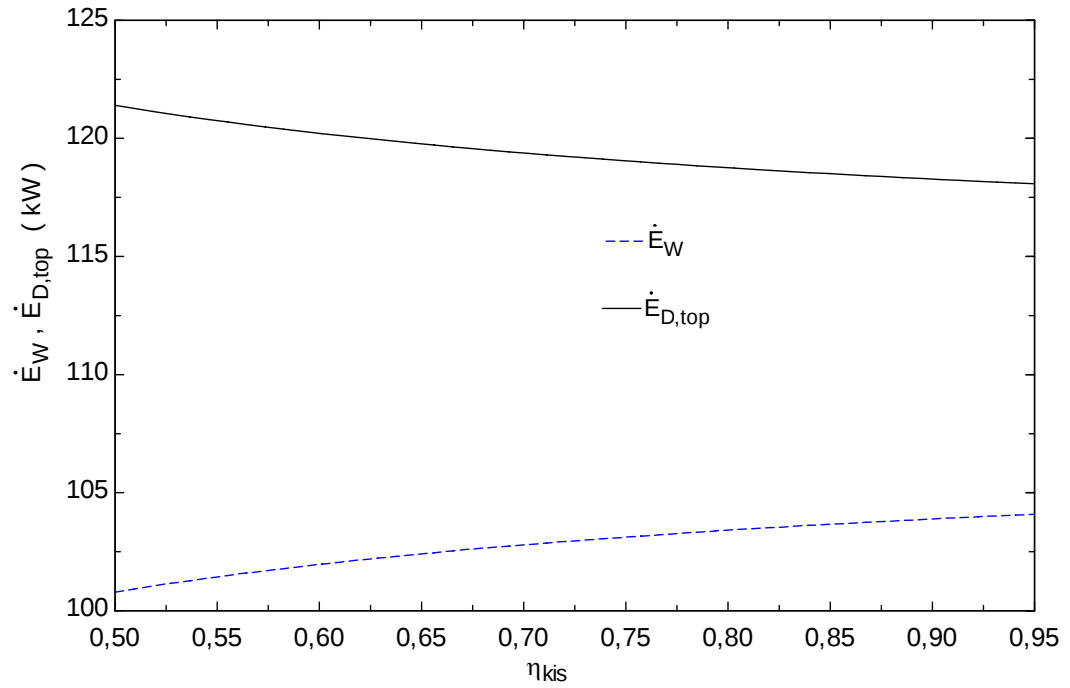
Şekil 4.34 ve Şekil 4.35’de sistemi oluşturan komponentlerdeki ekserji kayıplarının ve komponentlerin ekserji verimlerinin kompresörlerin izentropik verimleri ile değişimleri görülmektedir. İzentropik verimlerinin artması ile hava ve yakıt kompresörlerinin ekserji kayıpları azalmakta ve ekserji verimleri ise artmaktadır. Diğer komponentlerin ekserji kayıpları ve ekserji verimleri üzerinde izentropik verimdeki değişimin çok fazla etkisi olmamaktadır.



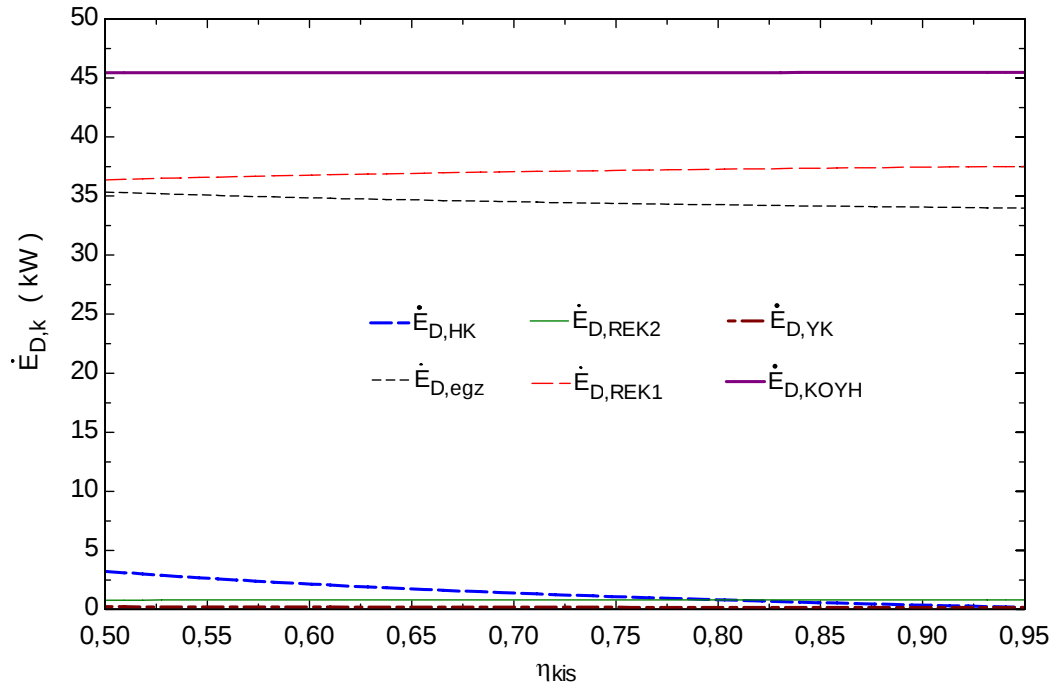
Şekil 4.31 Kompresör izentropik verimlerine göre KOYH sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri



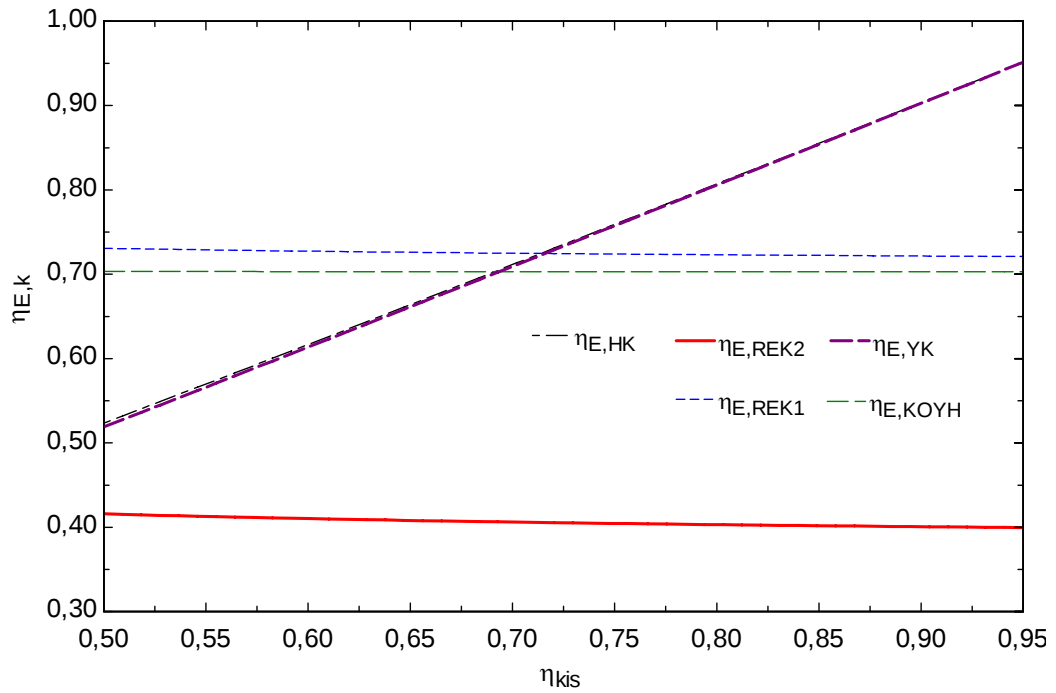
Şekil 4.32 Kompresör izentropik verimlerine göre KOYH sisteminde ilgili komponentlerin güç üretimi, tüketimi ve net gücün değişimleri



Şekil 4.33 Kompresör izentropik verimlerine göre KOYH sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri



Şekil 4.34 Kompresör izentropik verimlerine göre KOYH sistem komponentlerinin ekserji kaybı değişimleri



Şekil 4.35 Kompresör izentropik verimlerine göre KOYH sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri

5. KOYH KOJENERASYON SİSTEMİNİN PERFORMANS ANALİZİ

Bu bölümde, KOYH sistemine atık ısı kazanı (AIK) eklenerek KOYH kojenerasyon sistemi oluşturulmuştur. Böylece KOYH sisteminde çevreye atılan egzoz gazlarının sahip olduğu ısı enerjisinin bir kısmı geri kazanılarak ısı gereksinimleri için kullanılmaktadır. Bu amaçla, AIK komponenti modellenerek KOYH sistem modeline entegre edilmiştir. Oluşturulan KOYH kojenerasyon sistem modeli esas alınarak, alternatif performans kriterlerine dayalı olarak sistemin performans analizi gerçekleştirilmiştir.

5.1 Önceki çalışmalar

Riensch vd. (1998a), 200 kW'lık doğal gaz yakıtlı bir KOYH kojenerasyon sisteminin teknik ve ekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Yakıt hücre modülündeki hava sıcaklığı, dahili reformasyon derecesi, hücre voltajı ve yakıt kullanım faktörü gibi çeşitli işletme parametrelerinin elektrik üretim maliyetine ve sistem verimine etkileri incelenmiştir. Elektrik üretim maliyeti yönünden optimal bir hücre voltajı ve yakıt kullanım faktörü olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmanın devamı niteliğinde olan başka bir çalışmada sistem konfigürasyonundaki değişikliklerinin elektrik maliyeti ve sistem verimi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır (Riensch vd. 1998b).

Sicre (2003), küçük binalar için doğal gazla çalışan bir KOYH kojenerasyon sistemini modellemiştir. Geliştirilen modelin, sistemin ilk çalışma ve kapama sırasındaki geçici rejim performansının ve yeni kontrol algoritmalarının test edilmesinde kullanılacağını belirtmiştir.

Fontell vd. (2004), 250 kW'lık doğalgaz yakıtlı atmosferik basınçlı düzlemsel KOYH'li kojenerasyon sisteminin üretiminin realize edilme amacına yönelik olarak, sistemin komponentlerinin maliyet analizi yapılmış ve toplam maliyetin % 31'i ile KOYH modülü maliyeti en yüksek komponent olarak belirlenmiştir. Daha sonra % 17 ile sistem kontrolü ve % 15 ile güç elektroniği komponentleri gelmektedir. Analiz edilen sistemin elektrik veriminin % 55 ve kojenerasyon veriminin % 85 olabileceği hesaplanmıştır. Düzlemsel KOYH sisteminin 2010 yılına kadar rekabet edebilecek duruma erişebileceği tesbiti yapılmıştır.

Omosun vd. (2004) kojenerasyon amacıyla, yakıtı biokütle gazlaştırma sisteminden elde edilen 200 kW'lık KOYH sisteminin ısı ve güç üretimini incelemişlerdir. Bunun için sürekli rejimde düşük sıcaklık gaz temizleme prosesi ve yüksek sıcaklıkta gaz temizleme prosesi olarak iki model geliştirmişlerdir. Sonuç olarak, elektrik verimi ve toplam sistem verimi sıcak proses için sırasıyla % 23 ve % 60, soğuk proses için sırasıyla % 21 ve % 34 olarak

bulunmuştur. Soğuk prosesli modelin veriminin düşük olmasına rağmen, maliyetinin sıcak olandan daha düşük olduğu ve daha düşük kirlilik seviyesinde gaz akışı sağladığı vurgulanmıştır.

Cali vd. (2006), tüpsel bir KOYH kojenerasyon sisteminin modelini kurarak sistemin performansını etkileyen önemli parametreleri belirlemişlerdir. Başka bir çalışmada Cali vd. (2007), aynı model ile bir optimizasyon çalışması yaparak üretilen güç ve geri kazanılan egzoz ısısına göre optimal işletme şartlarını araştırmışlardır.

Braun vd. (2006), evsel uygulamalarda ısı ve güç üretimi için 5 farklı KOYH sistem konfigürasyonunu dikkate alarak, modelleme ve simülasyon çalışmaları yapmışlardır. Sonuçlara göre maksimum verim, katot ve anot gazlarını geribesleyen ve dahili reformasyonlu konfigürasyonda bulunmuştur. Bu sistemin elektrik verimi % 45, kojenerasyon verimi ise % 88 olarak belirlenmiştir.

Hawkes vd. (2006), binalarda KOYH'li mikro kojenerasyon teknolojisinin potansiyelini değerlendirmek için tekno-ekonomik model geliştirmişlerdir. Değişen akım yoğunluğu şartları altında minimum maliyeti ve optimum modül kapasitelerini araştırmışlardır. Başka bir çalışmada Hawkes vd. (2007), bu sisteme termal enerji deposu ekleyerek oluşturdukları yeni model ile enerji talebini karşılayacak minimum maliyet şartlarını belirlemeye çalışmışlardır.

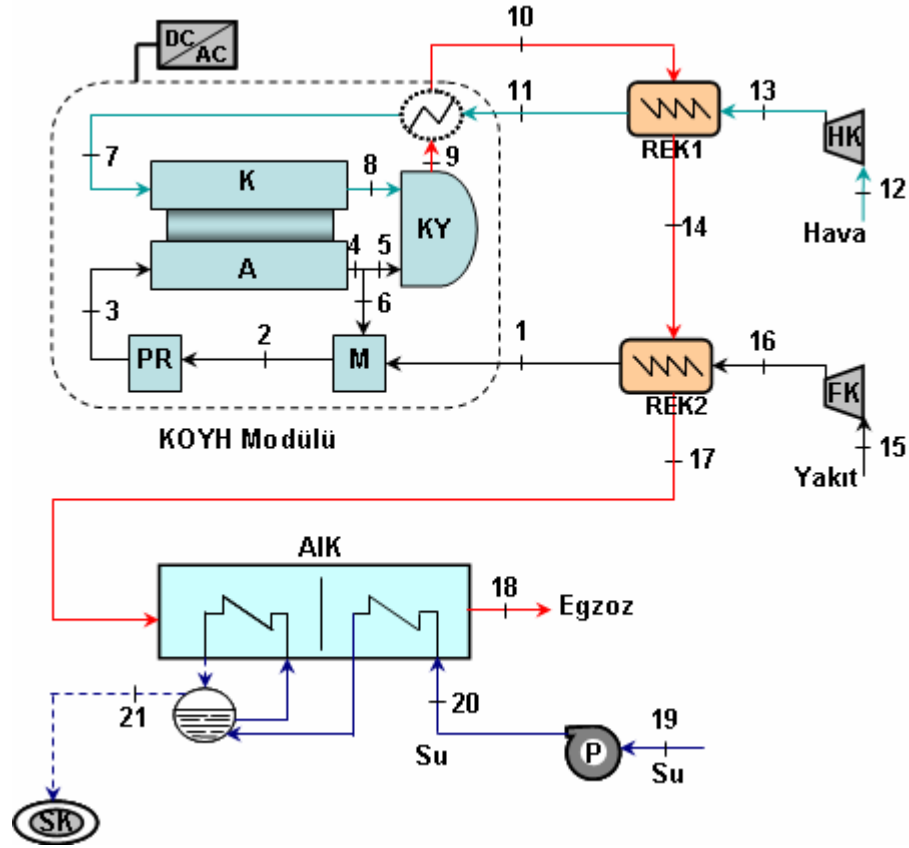
Alanne vd. (2006), tek bir ailenin ikamet ettiği bir ev için KOYH kojenerasyon sistemini ekonomik yönden analiz ederek, sistem boyutuna göre maksimum yatırım maliyetini ve geri ödeme periyodunu belirlemişlerdir. Sonuç olarak küçük bir (1-2 kWe) KOYH sisteminin ekonomik ve uygulanabilir olabileceğini belirtmişlerdir.

Santangelo ve Tartarani (2007), KOYH teknolojisine dayanan küçük ölçekli bir kojenerasyon sistemi ile konvansiyonel kojenerasyon sistemlerini yakıt tüketimi açısından karşılaştırmışlardır. Enerji talebi ve arzı arasındaki dengenin sağlanabilmesi için yakıt hücresi ile birleştirilen bir enerji depolama sistemin gerekliliği vurgulanmıştır.

5.2 KOYH Kojenerasyon Sisteminin Modeli

Çalışmada kurulacak modele esas olan ve analiz edilecek KOYH kojenerasyon sisteminin akış noktalarını gösteren şematik görünümü Şekil 5.1'de verilmiştir. KOYH kojenerasyon sisteminin AIK haricindeki komponentler ve akış noktalarının termodinamik şartları önceki bölümlerde modellenerek hesaplandığı için, burada sadece kojenerasyon amacıyla sisteme

ilave edilen AIK ve pompa komponentleri modellenenecektir.



Şekil 5.1 KOYH kojenerasyon sisteminin şematik gösterimi

KOYH kojenerasyon sisteminde reküperatör 2’den çıkan 17 şartlarındaki gazlar AIK’na girmektedir. Çevre şartlarındaki su ise (19 noktası) istenilen buhar basıncına kadar bir pompa basınçlandırılarak (20 noktası) AIK’nın ekonomayzer bölümüne gönderilir. Burada oyma noktasına kadar sıcaklığı yükselir. Daha sonra evaporatöre girerek istenilen kuru doymuş buhar üretilir (21 noktası) ve son kullanıcıya gönderilir. 17 şartlarında AIK’na giren egzoz gazları ise ısısının bir kısmını suya aktarak 18 şartlarında atmosfere atılır.

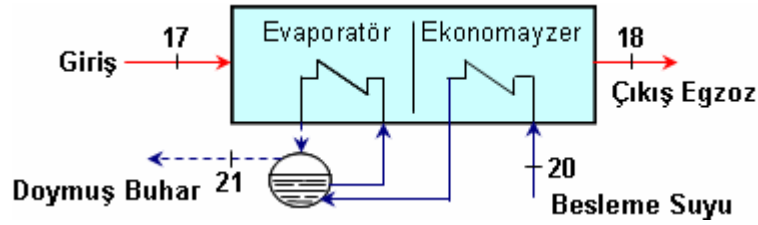
Modelleme esnasında yapılan temel kabuller daha önceki bölümlerde verilenlerle aynıdır. Burada sadece AIK ve pompa ile ilgili yapılan kabuller verilmiştir:

- Besleme suyun pompaya girişteki şartları 25 °C ve 1 bar olarak kabul edilmiştir.
- AIK’nda elde edilen kuru doymuş buhar basıncı 8 bar olarak seçilmiştir.
- AIK’nın gaz karışımı tarafındaki basınç kaybı % 5 olarak dikkate alınmıştır.
- AIK’nın gövdesinden çevreye ısı transferi olmadığı kabul edilmiştir.

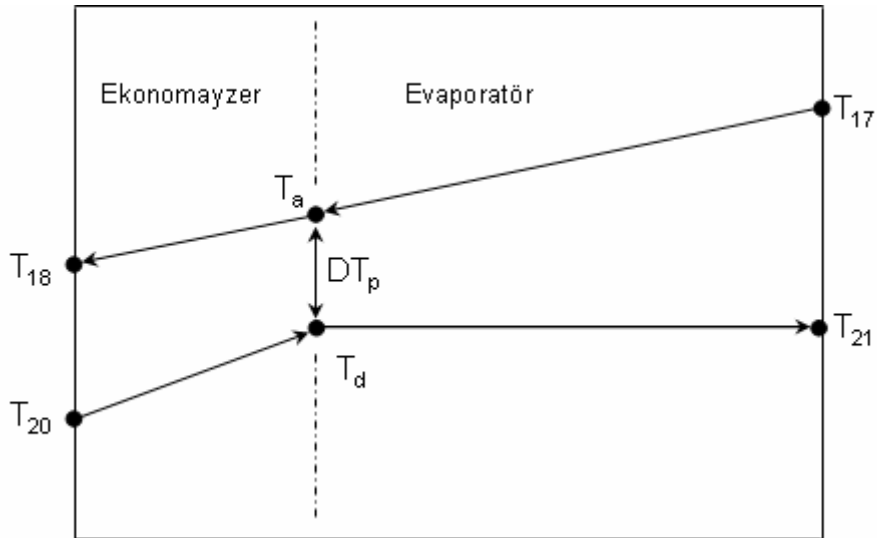
5.2.1 Atık ısı kazanı

Şekil 5.2’de ekonomayzer ve evaporatör bölgelerinden oluşan AIK şematik olarak görülmektedir. KOYH sisteminden çıkan ve şartları önceki bölümde hesaplanan egzoz gazları kojenerasyon sisteminin önemli bir komponenti olan AIK’na girmektedir. Bu gazlar ısısının bir kısmını AIK’da suya aktararak kuru doymuş buhar elde edilmektedir. Seçilen basınç değerine göre buharın doyma sıcaklığı (T_d) belirlidir (Şekil 5.3). Minimum sıcaklık farkı (DT_p) bu değere ilave edilerek suyun ekonomayzerden çıkış sıcaklığı (T_a) Denklem 5.1’den hesaplanabilir:

$$T_a = T_d + DT_p \quad (5.1)$$



Şekil 5.2 Atık ısı kazanı şematik gösterimi



Şekil 5.3 Atık ısı kazanı sıcaklık diyagramı

Buhar kütlesi, T_a sıcaklığına bağlı olarak evaporatör için yazılan enerji denge denkleminde bulunur:

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum_i (\dot{n}_{17,i} \bar{h}_{17,i} + \dot{n}_{d,i} \bar{h}_{d,i})_g + \sum_i (\dot{n}_{a,i} \bar{h}_{a,i} + \dot{n}_{21,i} \bar{h}_{21,i})_\zeta = 0 \quad (5.2)$$

Buhar debisi $\dot{n}_{21} = \dot{n}_d = \dot{n}_b$, gaz debisi $\dot{n}_{17} = \dot{n}_a = \dot{n}_{18}$ olduğundan ve AIK gövdesinden çevreye ısı transferi olmadığı kabulü yapılarak, Denklem 5.2'den buhar debisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{n}_b = \frac{\dot{n}_{17} (\bar{h}_{17} - \bar{h}_a)}{\bar{h}_{21} - \bar{h}_{d,su}} \quad (5.3)$$

Ekonomayzer bölgesi için enerji dengesi yazılarak, egzoz gazlarının atık ısı kazanından çıkış şartları (18 noktası) bulunur.

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum_i (\dot{n}_{17,i} \bar{h}_{17,i})_g + \sum_i (\dot{n}_{20,i} \bar{h}_{20,i})_g - \sum_i (\dot{n}_{18,i} \bar{h}_{18,i})_\zeta - \sum_i (\dot{n}_{21,i} \bar{h}_{21,i})_\zeta = 0 \quad (5.4)$$

Denklem 5.4'den $\bar{h}_{18}$ 'ye öre yeniden düzenlenirse aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\bar{h}_{18} = \bar{h}_{17} + \frac{\dot{n}_b (\bar{h}_{20} - \bar{h}_{21})}{\dot{n}_{18}} \quad (5.5)$$

Denklem 5.5'de hesaplanan $\bar{h}_{18}$ için T_{18} iterasyonla hesaplanabilir.

AIK'nda meydana gelen ekserji kaybı ve ekserji verimini hesaplamak için giriş ve çıkış noktalarına ait ekserji değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. 17 noktası için ekserji ifadeleri ve hesabı daha önceki bölümde verildiği için burada 18, 20 ve 21 noktalarının ekserji ifadeleri ve daha sonra bu ifadeler kullanılarak hesaplanan ekserji değerleri verilecektir.

18 noktası: Buhar üretimi için kullanılan egzoz gazlarının AIK'ndan çıktığı noktadır. Bu noktanın kimyasal ekserjisi daha önce verilen 17 noktasının kimyasal ekserji değerine eşittir. Fiziksel ekserjisi ise Denklem 5.6'da ifade edilmiştir:

$$\dot{E}_{18}^f = \sum_i \dot{n}_{18,i} [\bar{h}_{18,i} - \bar{h}_{o18} - T_o (\bar{s}_{18,i} - \bar{s}_{o18})] \quad (5.6)$$

20 noktası: Suyun AIK'na giriş noktasıdır. Bu noktanın fiziksel ve kimyasal ekserji ifadeleri aşağıda verilmiştir:

$$\dot{E}_{20}^f = \sum_i \dot{n}_{20,i} [\bar{h}_{20,i} - \bar{h}_{o20,i} - T_o (\bar{s}_{20,i} - \bar{s}_{o20,i})] \quad (5.7)$$

$$\dot{E}_{20}^k = \sum_i \dot{n}_{20,i} \sum_i \left(x_{20,i} \bar{e}_{20,i}^{kim} + \bar{R} T_o x_{20,i} \ln(x_{20,i}) \right) \quad (5.8)$$

21 noktası: Üretilen buharın AIK'ndan çıktığı noktadır. Bu noktanın fiziksel ve kimyasal ekserjileri ise Denklem 5.9 ve 5.10'da verilmiştir:

$$\dot{E}_{21}^f = \sum_i \dot{n}_{21,i} \left[\bar{h}_{21,i} - \bar{h}_{o21,i} - T_o (\bar{s}_{21,i} - \bar{s}_{o21,i}) \right] \quad (5.9)$$

$$\dot{E}_{21}^k = \sum_i \dot{n}_{21,i} \sum_i \left(x_{21,i} \bar{e}_{21,i}^{kim} + \bar{R} T_o x_{21,i} \ln(x_{21,i}) \right) \quad (5.10)$$

AIK'nın ekserji kaybı ekserji dengesinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{E}_{D,AIK} = \cancel{\dot{Q}_{AIK}} \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) - \cancel{\dot{W}_{AIK}} + (\dot{E}_{17} + \dot{E}_{20})_g - (\dot{E}_{18} + \dot{E}_{21})_\phi \quad (5.11)$$

Çevre ile iş ve ısı alış verişi olmadığından Denklem 5.11 yeniden düzenlenerek ekserji kaybı Denklem 5.12'deki gibi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\dot{E}_{D,AIK} = \dot{E}_{17} + \dot{E}_{20} - \dot{E}_{18} - \dot{E}_{21} \quad (5.12)$$

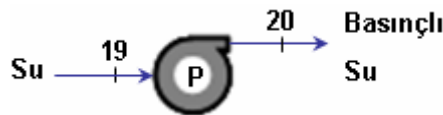
AIK'nın ekserji verimi ise Denklem 5.13'deki gibi ifade edilebilir (Bejan vd, 1995):

$$\eta_{E,AIK} = \frac{\dot{E}_{21} - \dot{E}_{20}}{\dot{E}_{17} - \dot{E}_{18}} \quad (5.13)$$

5.2.2 Pompa

AIK giren suyun basıncını istenilen değere çıkarmak için kullanılan pompanın (Şekil 5.4) harcadığı güç aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{W}_p = \dot{m}_{su} v (P_{19} - P_{20}) \quad (5.14)$$



Şekil 5.4 Pompa komponenti

Denklem (5.14)'de v suyun özgül hacmini göstermektedir ve hesaplamalarda $0.001 \text{ m}^3/\text{kg}$ olarak alınmıştır. $\dot{m}_{su}$ 19 ve 20 noktalarındaki kütleli debiyi temsil etmektedir. P_{19} ve P_{20} ise

pompanın girişindeki ve çıkışındaki suyun basıncını göstermektedir. Yapılan simülasyon hesaplamaları sonucunda pompada harcanan güç elde edilen gücün 1/10000 mertebesinde olduğundan ihmal edilmiştir.

5.3 KOYH Kojenerasyon Sisteminin Performans Kriterleri

KOYH kojenerasyon sisteminin net güç çıktısı bir önceki bölümde incelenen KOYH sisteminin net güç çıktısına eşittir. Kojenerasyon sisteminde iki farklı ürün olduğu için sistemi I. Kanun verimi ile değerlendirmek eksik olacaktır. Kojenerasyon sistemini daha gerçekçi olarak değerlendirebilmek için sistemin ekserjitik performansının kriterlerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Kojenerasyon sisteminin toplam ekserjisi Denklem 5.15’de verilmiştir:

$$\dot{E}_{\text{Top}} = \dot{W}_{\text{NET}} + (\dot{E}_{21} - \dot{E}_{20}) \quad (5.15)$$

Denklem 5.15 aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir:

$$\dot{E}_{\text{Top}} = \dot{E}_W + \dot{E}_Q \quad (5.16)$$

KOYH kojenerasyon sisteminin ekserji verimi sistemden elde edilen toplam ekserjinin sisteme giren yakıtın ekserjine oranı olarak hesaplanır:

$$\eta_E = \frac{\dot{E}_W + \dot{E}_Q}{\dot{E}_{15}} = \frac{\dot{E}_{\text{Top}}}{\dot{E}_{15}} \quad (5.17)$$

KOYH kojenerasyon sistemindeki toplam ekserji kaybı Denklem 5.18’de gösterildiği gibi hesaplanır:

$$\dot{E}_{D,\text{Top}} = \dot{E}_{D,\text{KOYH}} + \dot{E}_{D,\text{REK1}} + \dot{E}_{D,\text{REK2}} + \dot{E}_{D,\text{HK}} + \dot{E}_{D,\text{YK}} + \dot{E}_{D,\text{AIK}} + \dot{E}_{\text{egz}} \quad (5.18)$$

Burada, $\dot{E}_{\text{egz}}$ 18 noktasından atılan egzoz gazlarının ekserjisini göstermektedir. Toplam ekserji kaybı hesaplandığında ekserjitik performans katsayısı (*EPK*) Denklem 5.19 yardımı ile hesaplanabilir:

$$EPK = \frac{\dot{E}_{\text{Top}}}{\dot{E}_{D,\text{Top}}} \quad (5.19)$$

5.4 KOYH Kojenerasyon Sisteminin Simülasyonu

Sistemle ilgili simülasyon giriş verileri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Burada sadece AIK komponenti ile ilgili veriler verilmiştir. KOYH sisteminin komponent bilgileri ise daha önceki bölümlerde verilmiştir.

Çizelge 5.1 KOYH’li kojenerasyon sisteminin simülasyon giriş verileri

Simülasyon giriş verileri	Değer
AIK’ndaki minimum sıcaklık farkı (°C)	20
AIK’ndaki basınç kaybı (%)	5
Suyun giriş sıcaklığı (°C)	25
Buhar basıncı (bar)	8

Çizelge 5.2’de simülasyon sonucunda elde edilen KOYH kojenerasyon sisteminin performans değerleri verilmiştir. Çizelge 5.3’de ise KOYH kojenerasyon sistemindeki AIK’na ait akış noktalarındaki termodinamik özellikler sunulmuştur.

Çizelge 5.2 KOYH kojenerasyon sisteminin simülasyonu sonucunda elde edilen performans değerleri

Performans parametreleri	Değerler
KOYH AC güç çıkışı (kW)	107.70
Hava kompresöründe harcanan güç (kW)	4.47
Yakıt kompresörüne (kW)	0.10
Pompada harcanan güç (kW)	0.01
Sistemin net güç çıkışı (kW)	103.10
Sistemin toplam ekserjisi (kW)	120.71
Sistem toplam ekserji kaybı (kW)	101.30
Sistemin ekserji verimi (%)	55.00
Sistemin ekserjitik performans katsayısı (%)	119.20

Çizelge 5.3 KOYH kojenerasyon sistemi için her noktadaki termodinamik özellikler

No	T (°C)	P (bar)	n (kmol/h)	Eks (kW)	Gaz kompozisyonu (%) molar						
					H ₂	CH ₄	H ₂ O	CO	CO ₂	O ₂	N ₂
17	300.0	1.025	43.16	34.4	0.00	-	4.39	0.00	2.19	16.16	77.25
18	158.7	1.015	43.16	11.9	0.00	-	4.39	0.00	2.19	16.16	77.25
19	25.0	1.013	3.91	0.9	-	-	100	-	-	-	-
20	25.0	8.000	3.91	00.9	-	-	100	-	-	-	-
21	170.4	8.000	3.91	18.6	-	-	100	-	-	-	-

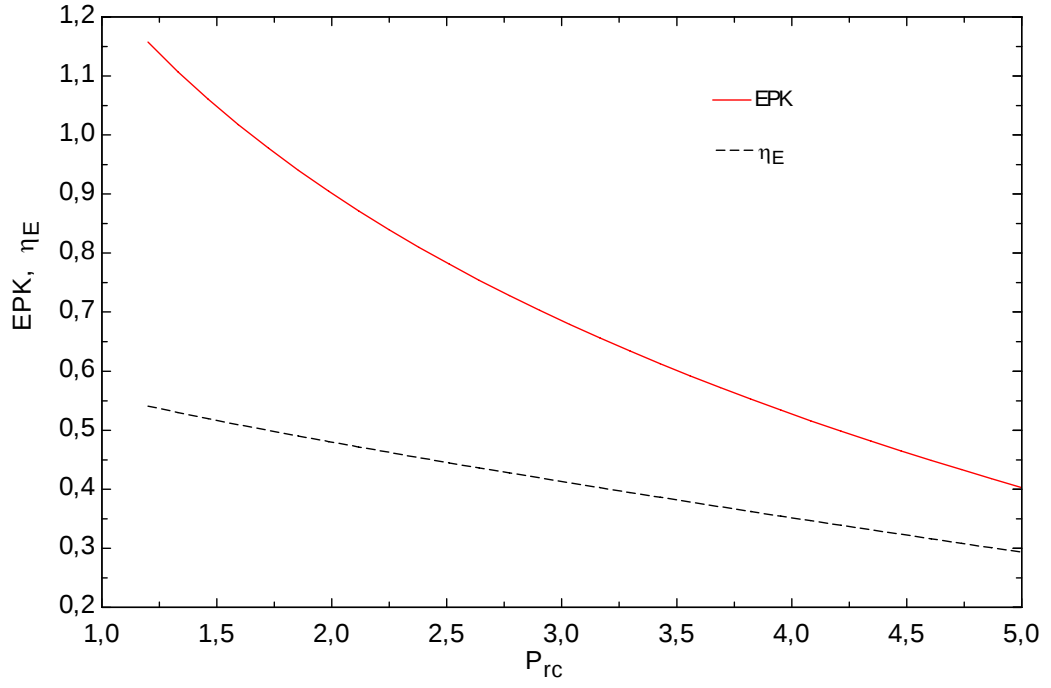
5.5 Performans Analiz Sonuçları

KOYH kojenerasyon sisteminin enerjistik ve ekserjistik performansları üzerinde kompresör basınç oranı, işletme sıcaklığı, akım yoğunluğu, yakıt kullanım faktörü, reküperatör etkinlik katsayısı, kompresör izentropik verimi ve AIK'na ait minimum sıcaklık fark (DT_p) gibi parametrelerin etkileri incelenerek sonuçlar aşağıda verilmiştir.

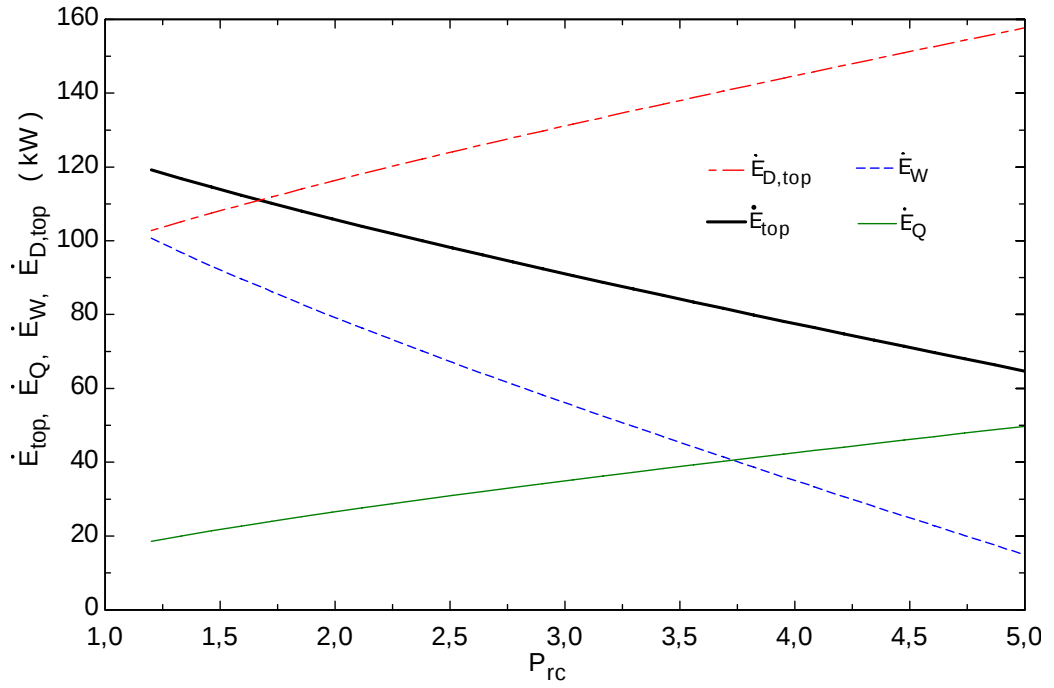
5.5.1 Kompresör basınç oranının etkisi

Şekil 5.5'de KOYH kojenerasyon sisteminde ekserjistik performans katsayısı ve ekserji veriminin kompresör basınç oranı ile değişimi gösterilmiştir. Bu sonuçlar kojenerasyonsuz sistem için verilen sonuçlarla (Şekil 4.6) mukayese edildiğinde tüm basınç oranı değerlerinde KOYH sistemine kojenerasyon uygulamasının ekserjistik performans katsayısında ve ekserji verimi değerlerinde önemli bir artış sağladığı görülür. Örneğin basınç oranı 2 olduğunda ekserji veriminde yaklaşık % 33'lük ve ekserjistik performans katsayısında ise yaklaşık % 64'lük bir artış gerçekleşmektedir.

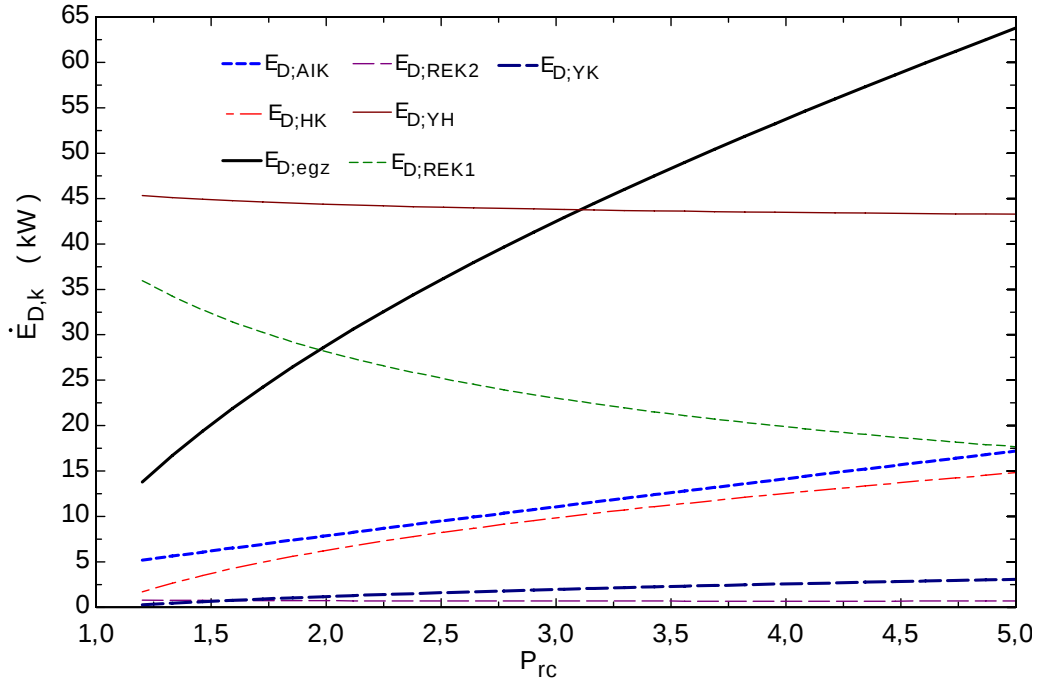
Şekil 5.6'da KOYH sisteminin ekserji çıktısı ($\dot{E}_w$), kojenerasyonla ile geri kazanılan ısının ekserjisi ($\dot{E}_Q$), KOYH kojenerasyon sisteminin toplam ekserjisi ($\dot{E}_{Top} = \dot{E}_w + \dot{E}_Q$) ve toplam ekserji kayıplarının basınç oranı ile değişimleri görülmektedir. Şekilden görüleceği üzere kojenerasyon uygulaması toplam ekserji çıktısını $\dot{E}_Q$ kadar artırmaktadır. Basınç oranının artmasıyla $\dot{E}_Q$ artarken, $\dot{E}_w$ azalmakta olduğundan basınç oranının seçilmesinde $\dot{E}_{Top}$ dikkate alınmalıdır. Ayrıca, kojenerasyon uygulamasının tüm basınç oranlarında toplam ekserji kayıplarını yaklaşık % 20 kadar azalttığı görülür. KOYH kojenerasyon sistemini oluşturan her bir komponentteki ekserji kayıpları ve ekserji verimlerinin basınç oranlarıyla değişimi Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de verilmiştir.



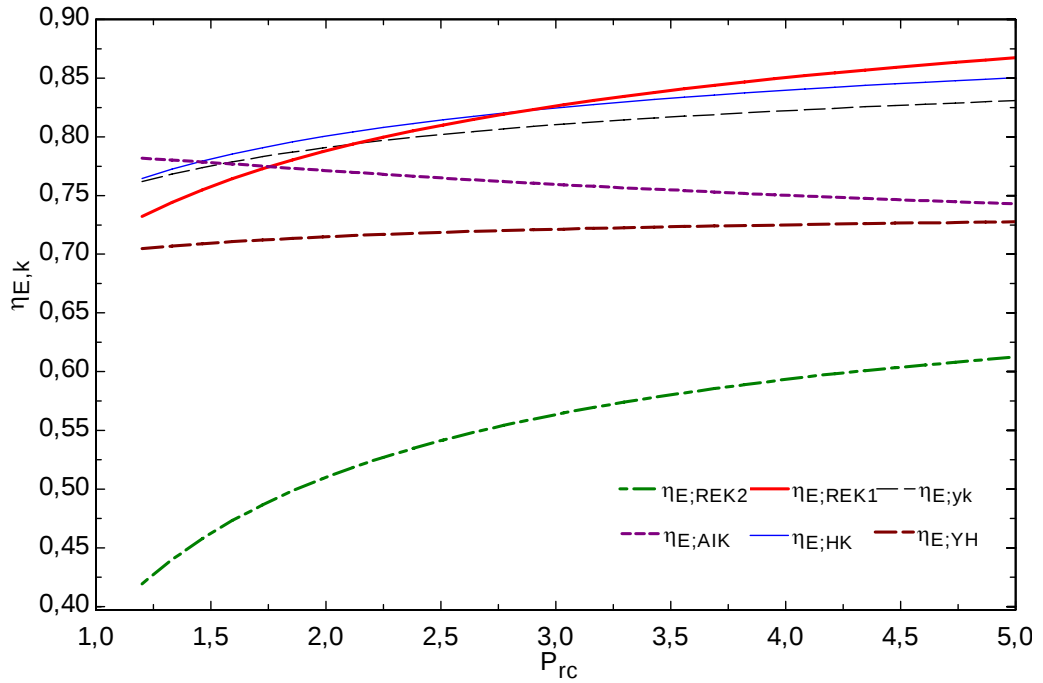
Şekil 5.5 Basınç oranına göre KOYH kojenerasyon sisteminin ekserjitik performans katsayısı ve ekserji verimi değişimi



Şekil 5.6 Basınç oranına göre KOYH kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, toplam ekserji kaybı ve ürünlerin ekserji değerlerinin değişimi



Şekil 5.7 Basınç oranına göre KOYH kojenerasyon sisteminine ait komponentlerdeki ekserji kaybı değişimi



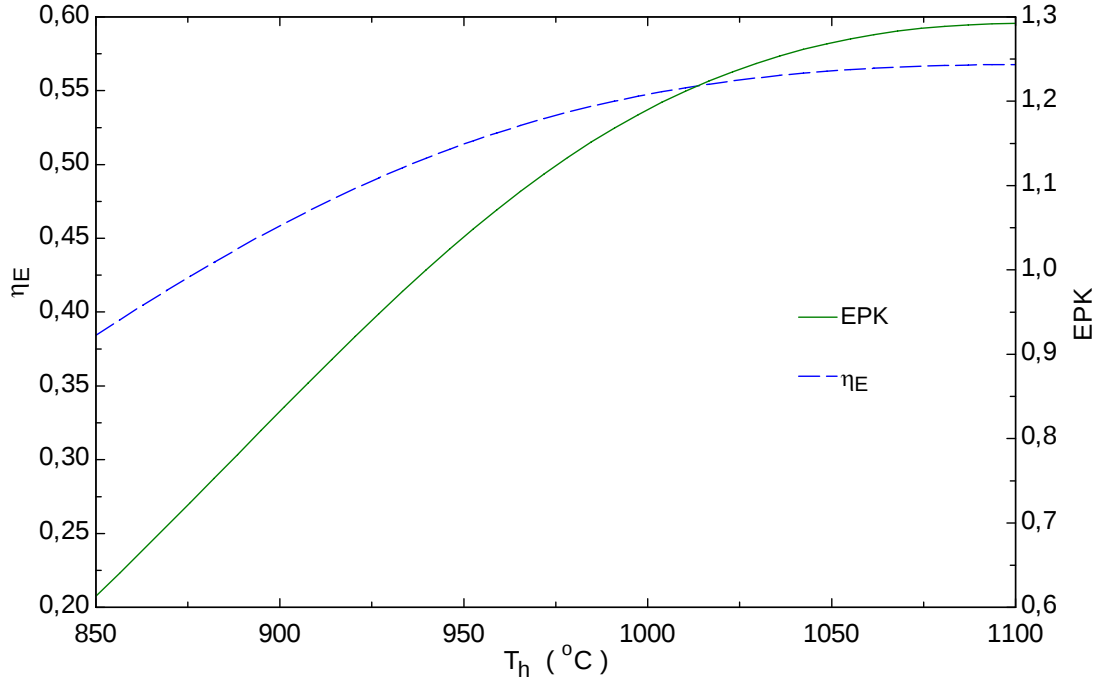
Şekil 5.8 Basınç oranına göre KOYH kojenerasyon sisteminine ait komponentlerin ekserji verimi değişimi

5.5.2 Hücre işletme sıcaklığının etkisi

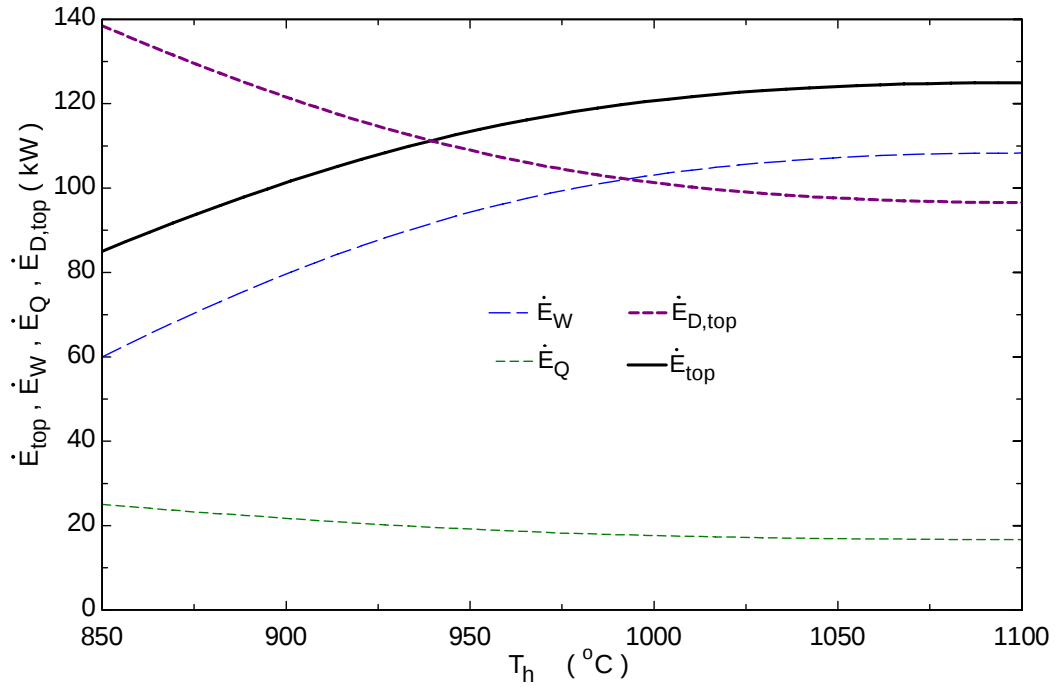
Hücre işletme sıcaklığının KOYH kojenerasyon sisteminin performansına etkisi Şekil 5.9-5.12’de verilmiştir. Şekil 5.9’da KOYH kojenerasyon sistemin ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısının işletme sıcaklığı değişimi görülmektedir. Bu sonuçlar kojenerasyonsuz KOYH sisteminin sonuçlarıyla (Şekil 4.11) karşılaştırıldığında tüm işletme sıcaklıklarında kojenerasyon uygulamasının ekserjitik performans katsayısında ve ekserji verimi değerlerinde önemli bir artış sağladığı görülmektedir. 850 °C hücre işletme sıcaklığında ekserji veriminde %41’lik ve ekserjitik performans katsayısında ise %71 bir artış sağlanmaktadır. Hücre işletme sıcaklığının 1100 °C olması durumunda ise söz konusu artışlar %19 ve %37 olmaktadır. Dolayısıyla bu sonuçlar kojenerasyon uygulamasının sağladığı ekserjitik performans artışlarının hücre işletme sıcaklığına bağlı olduğunu gösterir.

Şekil 5.10’da KOYH kojenerasyon sisteminde elde edilen gücün ekserji değeri ($\dot{E}_W = \dot{W}$) ve elde edilen ısıнын ekserji çıktısı ($\dot{E}_Q$), sisteminin toplam ekserji çıktısı ($\dot{E}_{Top} = \dot{E}_W + \dot{E}_Q$) ve toplam ekserji kayıplarının hücre işletme sıcaklığı ile değişimi görülmektedir. Şekilden görüleceği üzere hücre işletme sıcaklığının artmasıyla $\dot{E}_Q$ ’da önemli bir değişiklik olmazken $\dot{E}_W$ ve buna bağlı olarak toplam ekserji çıktısı önemli ölçüde artmaktadır. Bu artış 1000 °C kadar daha etkili olup 1000 °C’den sonra artış hızı oldukça azalmaktadır. Bu nedenle ekserjitik performans açısından 1000 °C işletme sıcaklığının uygun olacağı söylenebilir.

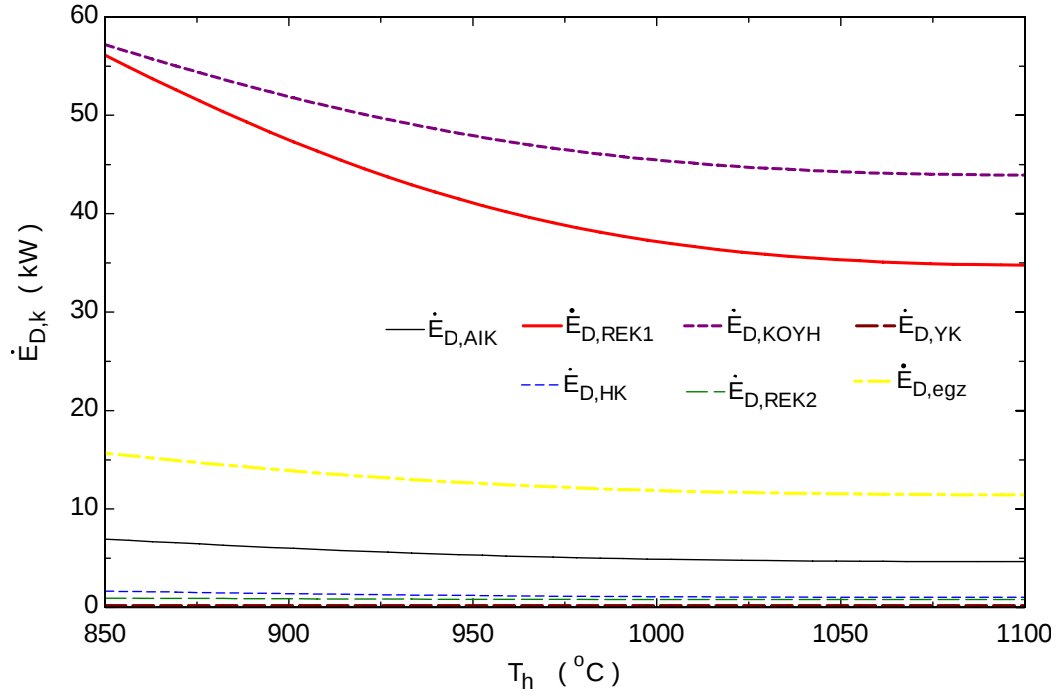
Şekil 5.11’de ve Şekil 5.12’de KOYH kojenerasyon sistem komponentlerinin ekserji kaybı ve ekserji verimlerinin hücre işletme sıcaklığı ile değişimleri verilmiştir. Bu sonuçlar kojenerasyonsuz KOYH sistemi sonuçlarıyla (Şekil 4.14 ve Şekil 4.15) karşılaştırıldığında tüm işletme sıcaklıklarında kojenerasyon uygulamasının egzoz gazlarından kaynaklanan ekserji kaybını önemli ölçüde azalttığı görülür. Ayrıca sonuçlar kojenerasyon uygulaması nedeniyle sisteme ilave edilen AIK’nın ekserji veriminin hücre işletme sıcaklığından etkilenmediğini göstermektedir.



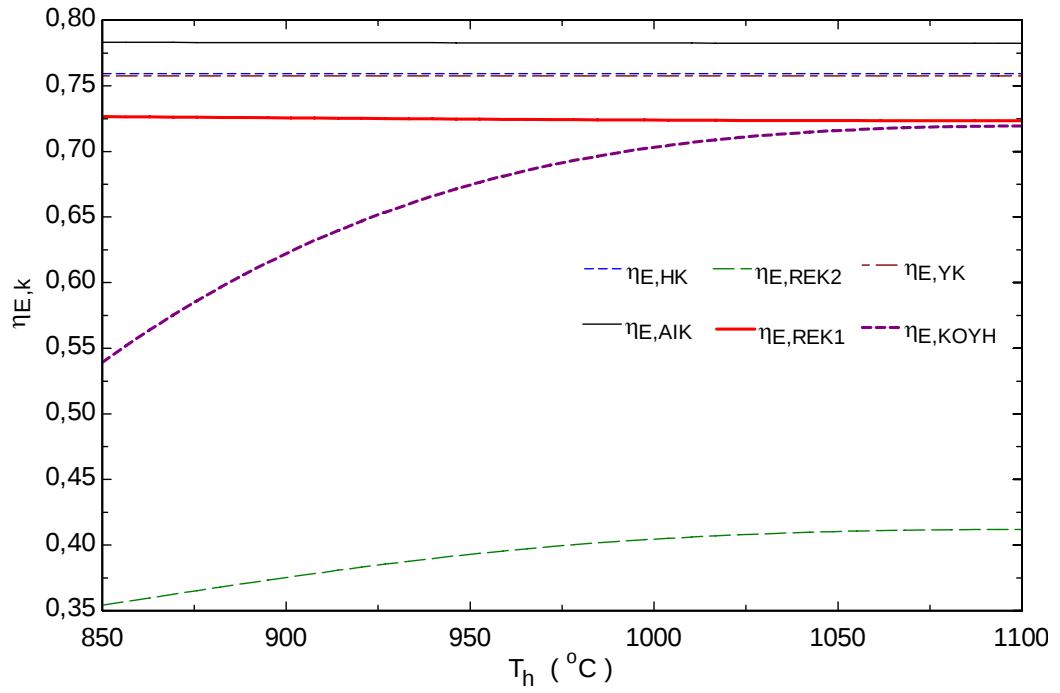
Şekil 5.9 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH kojenerasyon sisteminin ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri



Şekil 5.10 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimi



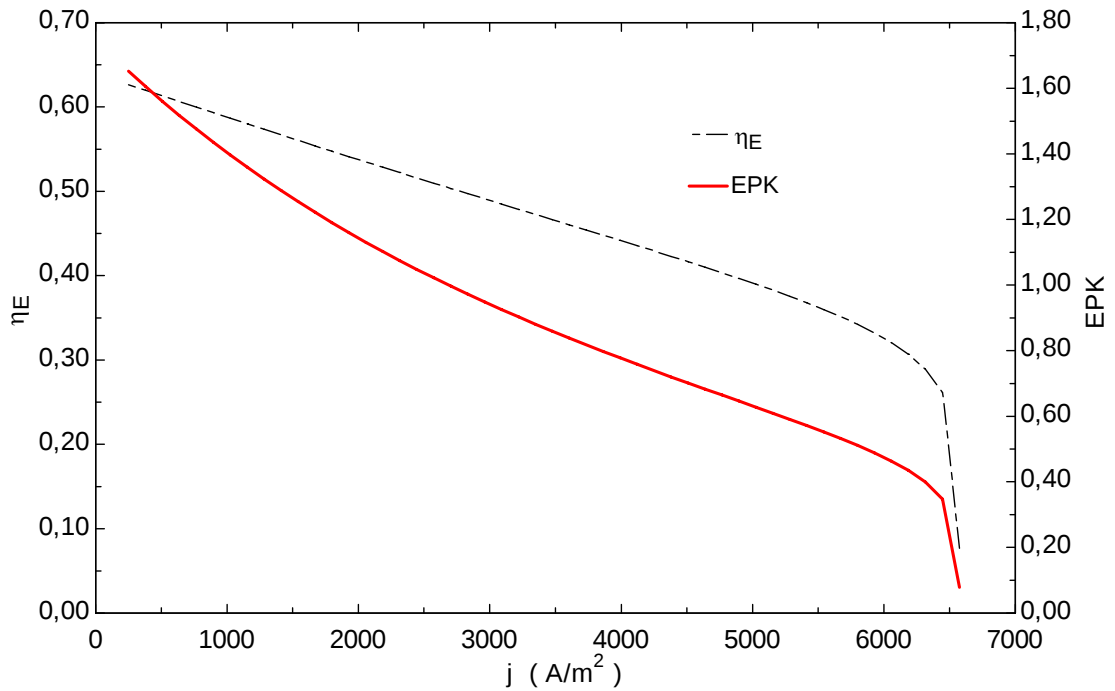
Şekil 5.11 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji kaybı değişimleri



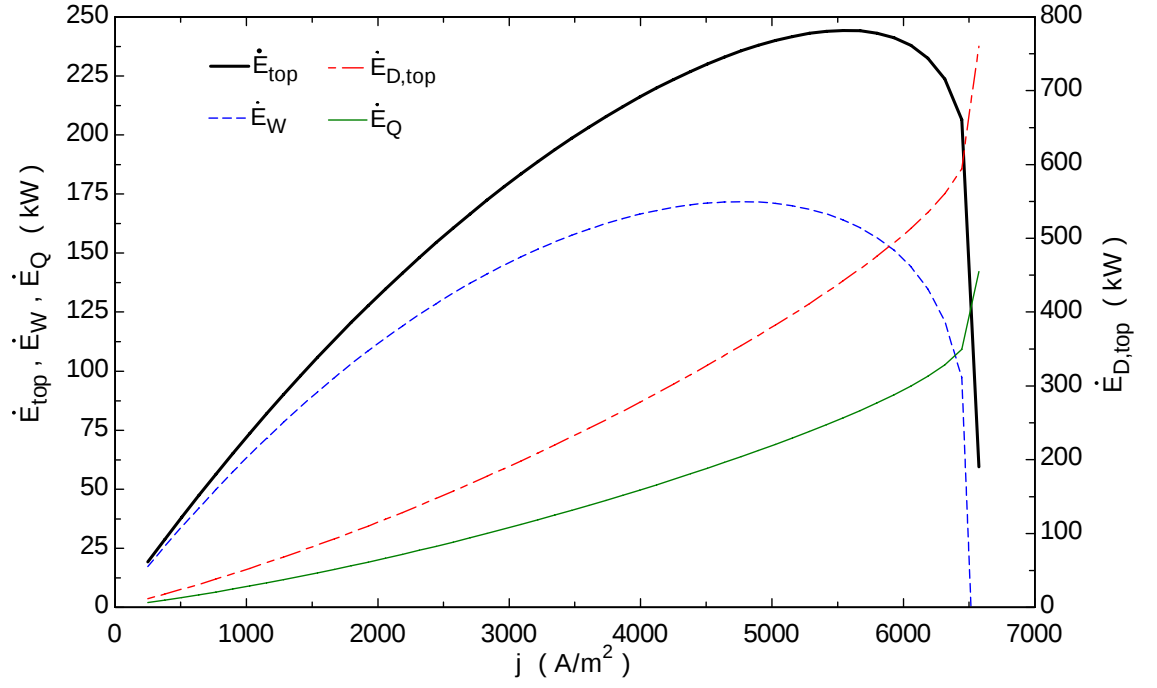
Şekil 5.12 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH kojenerasyon sisteminde ilgili komponentlerin ekserji verim değişimleri

5.5.3 Akım yoğunluğunun etkisi

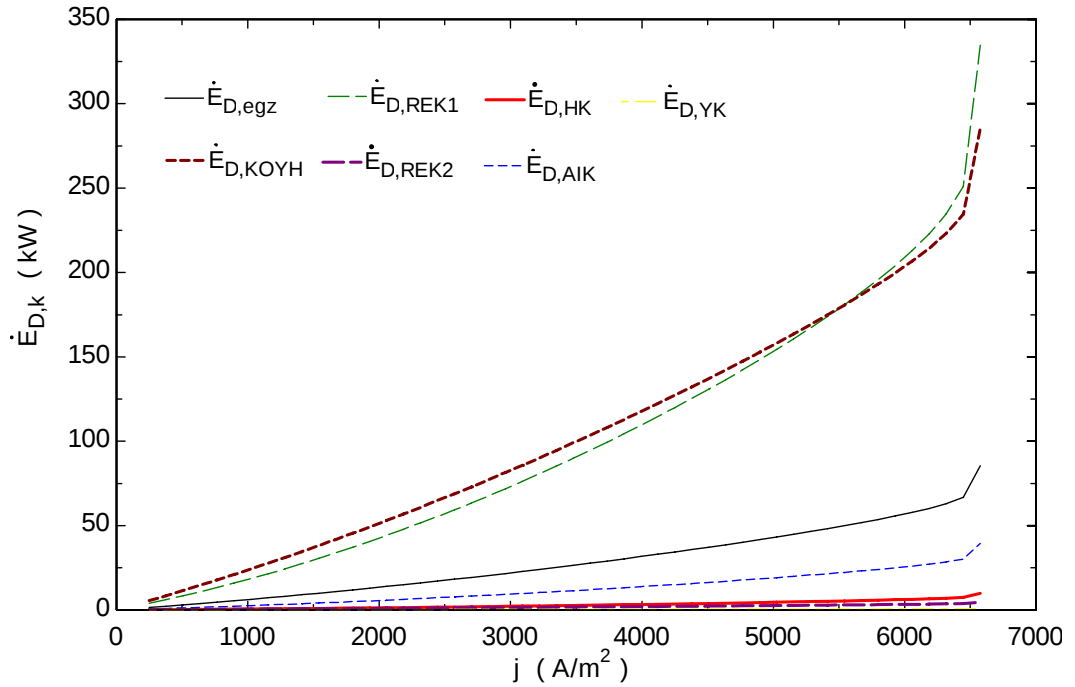
Şekil 5.13-5.16, akım yoğunluğunun KOYH kojenerasyon sisteminin performansına etkilerini göstermektedir. Kojenerasyon sisteminde ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısının genel davranışı akım yoğunluğunun artışı ile azalma göstermektedir (Şekil 5.13). Bu sonuçlar kojenerasyonsuz sistemin sonuçları (Şekil 4.16) ile karşılaştırıldığında aynı akım yoğunluğu değerlerinde hem ekserji veriminin hem de ekserjitik performans katsayısının değerleri daha yüksek olmaktadır. Örneğin akım yoğunluğu 1000 A/m^2 olduğunda kojenerasyon uygulaması ile ekserji verimi % 15 artarak % 59'a ulaşmaktadır. Aynı şekilde ekserjitik performans katsayısı % 55 artış ile 1.4 olmaktadır. Şekil 5.14'de KOYH kojenerasyon sisteminden elde edilen gücün ve ısının ekserji değerleri ($\dot{E}_W$ ve $\dot{E}_Q$), toplam ekserji çıktısı ($\dot{E}_{Top}$) ve toplam ekserji kayıplarının akım yoğunluğu ile değişimi görülmektedir. Kojenerasyon uygulaması kojenerasyonsuz sisteminin ekserji çıktısını ($\dot{E}_W$) $\dot{E}_Q$ kadar artırarak $\dot{E}_{Top}$ değerine yükseltmektedir. Ayrıca kojenerasyonsuz sistemde ekserji çıktısını maksimum yapan akım yoğunluğu 4800 A/m^2 iken kojenerasyonlu sistemde 5600 A/m^2 olmaktadır. Bunun nedeni $\dot{E}_Q$ değerindeki artışın yüksek akım yoğunluklarında daha fazla olmasıdır. KOYH kojenerasyon sistemini oluşturan komponentlerdeki ekserji kayıpları ve ekserji verimlerinin akım yoğunluğu ile değişimi ise Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da görülmektedir.



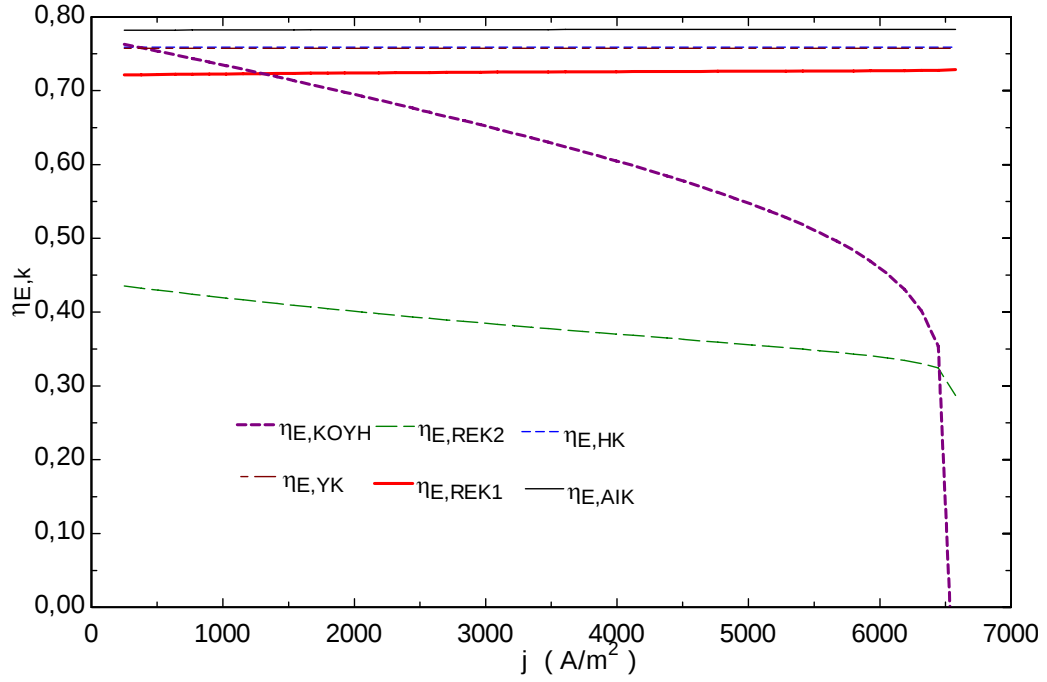
Şekil 5.13 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH kojenerasyon sisteminin ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri



Şekil 5.14 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri



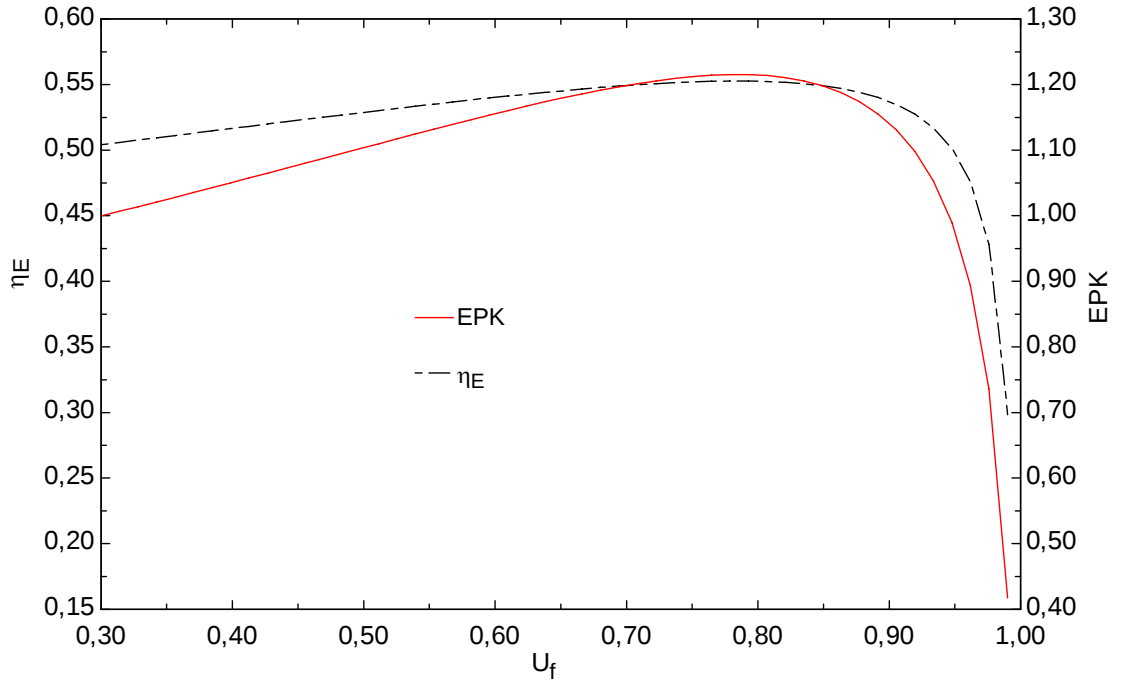
Şekil 5.15 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji kaybı değişimleri



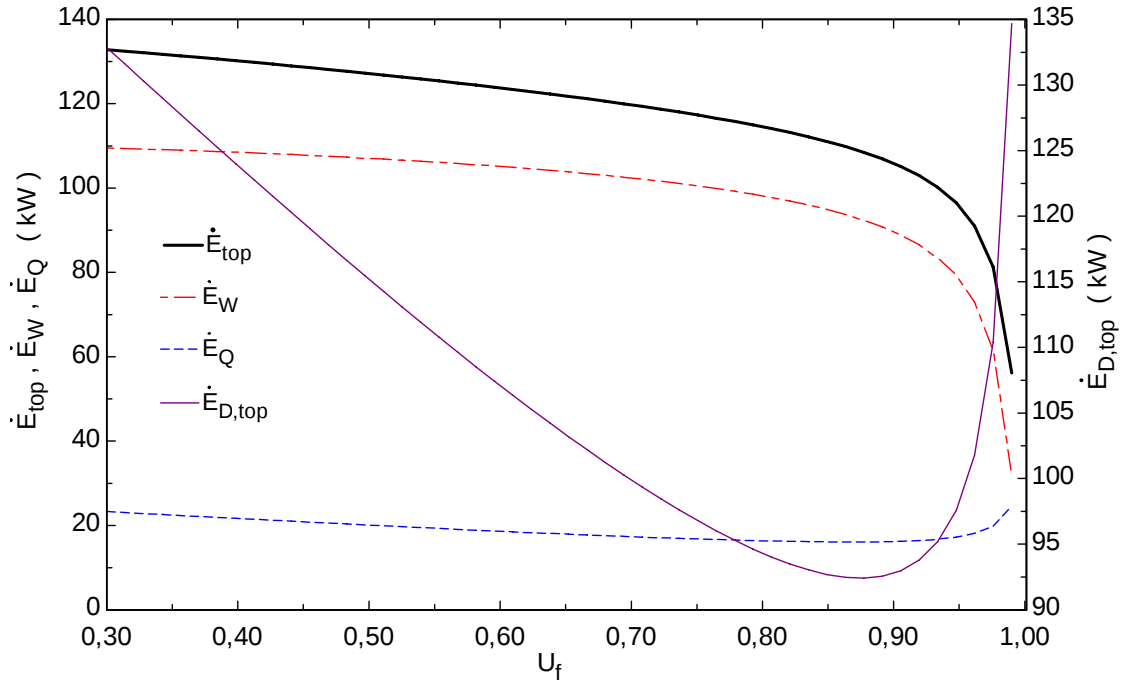
Şekil 5.16 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri

5.5.4 Yakıt kullanım faktörünün etkisi

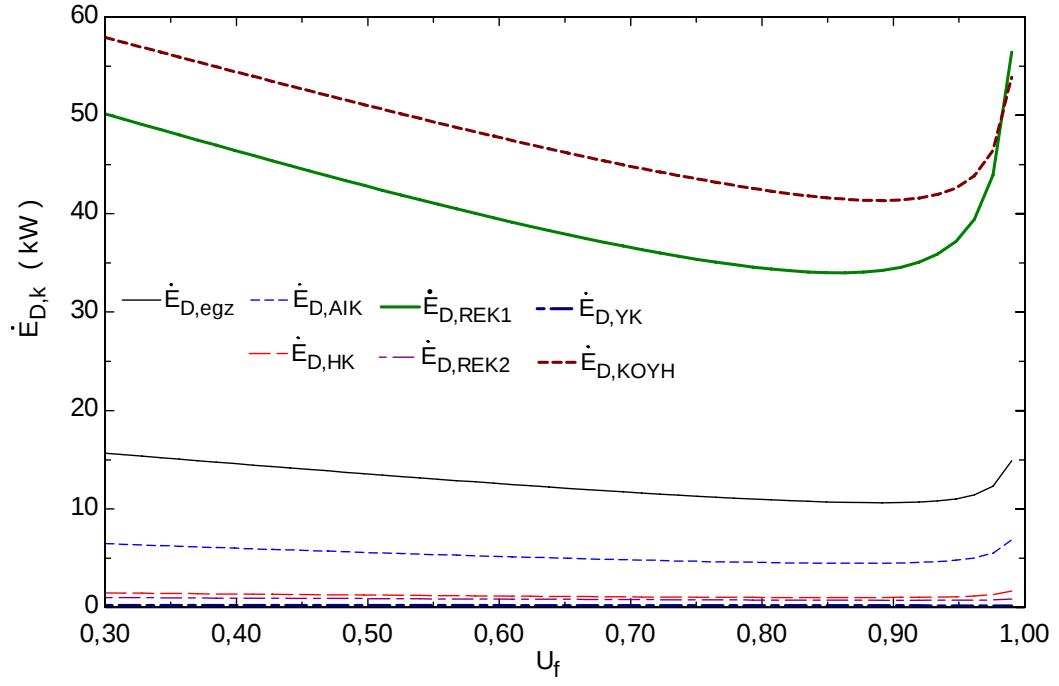
Yakıt kullanım faktörünün KOYH kojenerasyon sisteminin performansına etkileri Şekil 5.17-5.20’de verilmiştir. Şekil 5.17’de KOYH kojenerasyon sisteminin ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısının yakıt kullanım faktörü ile değişimi görülmektedir. Şekil incelendiğinde ekserjitik performansın yakıt kullanım faktörü ile değişim karakteristiği kojenerasyonsuz KOYH sistemi ile aynıdır (Şekil 4.21). Dolayısıyla her iki sistemde de performansı maksimum yapan yakıt kullanım faktörü 0.8 olarak aynı değerdedir. Ayrıca Şekil 4.21 ve Şekil 5.17 mukayese edildiğinde kojenerasyon uygulamasının ekserji verimini ve ekserjitik performans katsayısını önemli ölçüde artırdığı görülür. Yakıt kullanım faktörünün 0.77 değeri için ekserji verimindeki artış % 17 ve ekserjitik performans katsayısındaki artış ise % 37 olmaktadır. Şekil 5.18 performans kriterlerinde gerçekleşen artışın nedenini daha iyi açıklamaktadır. Buharın üretilmesi ile KOYH kojenerasyon sisteminin toplam ekserji değeri kojenerasyonsuz duruma göre aynı yakıt kullanım faktörü değerlerinde karşılaştırıldığında daha yüksek olurken, kojenerasyon sisteminin ekserji kaybının minimum olduğu değer 108 kW’tan 92 kW’a düşmektedir. Şekil 5.19 ve 5.20’de yakıt kullanım faktörünün kojenerasyon sistemini oluşturan komponentlerdeki ekserji kayıpları ve ekserji verimleri üzerindeki etkisi görülmektedir.



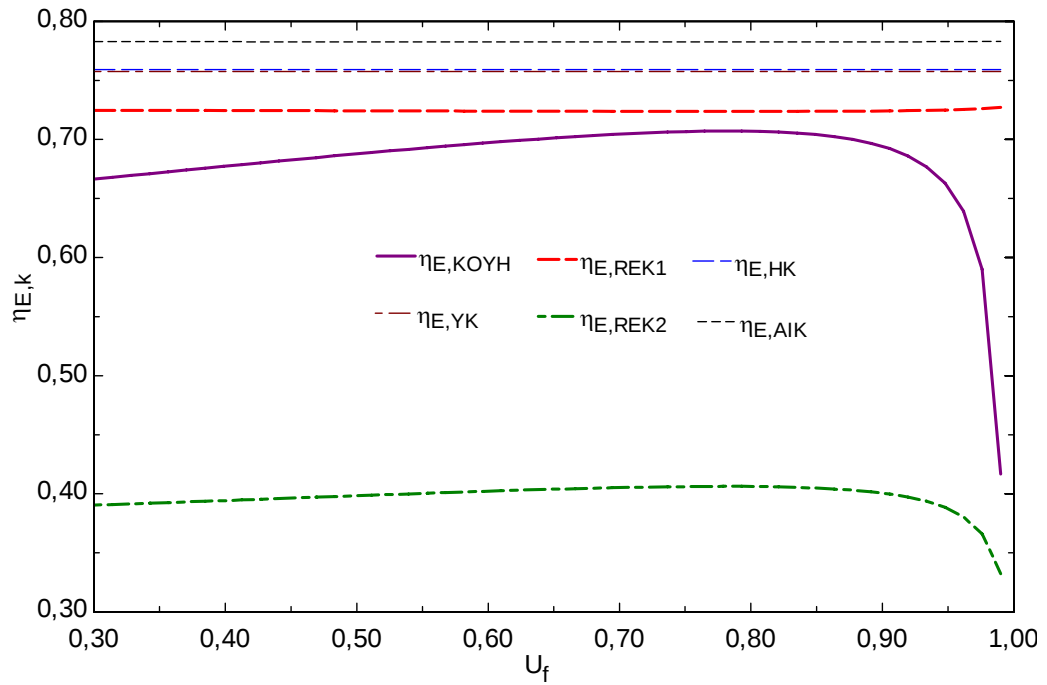
Şekil 5.17 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH kojenerasyon sisteminin ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri



Şekil 5.18 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri



Şekil 5.19 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH kojenerasyon sistem komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri

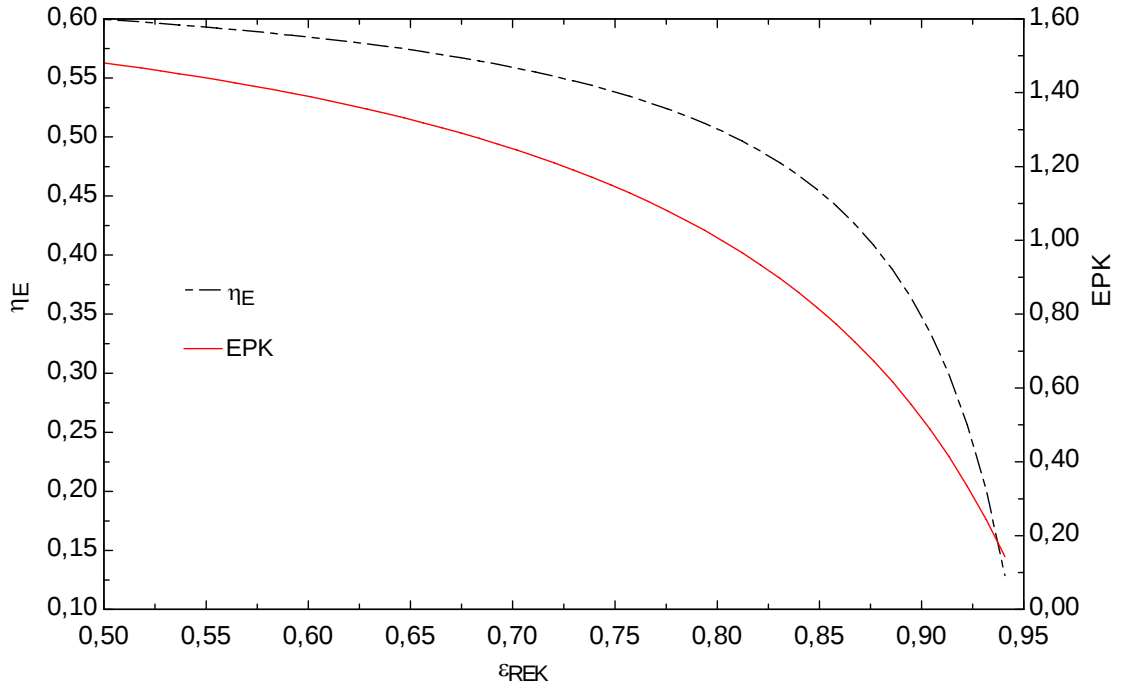


Şekil 5.20 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri

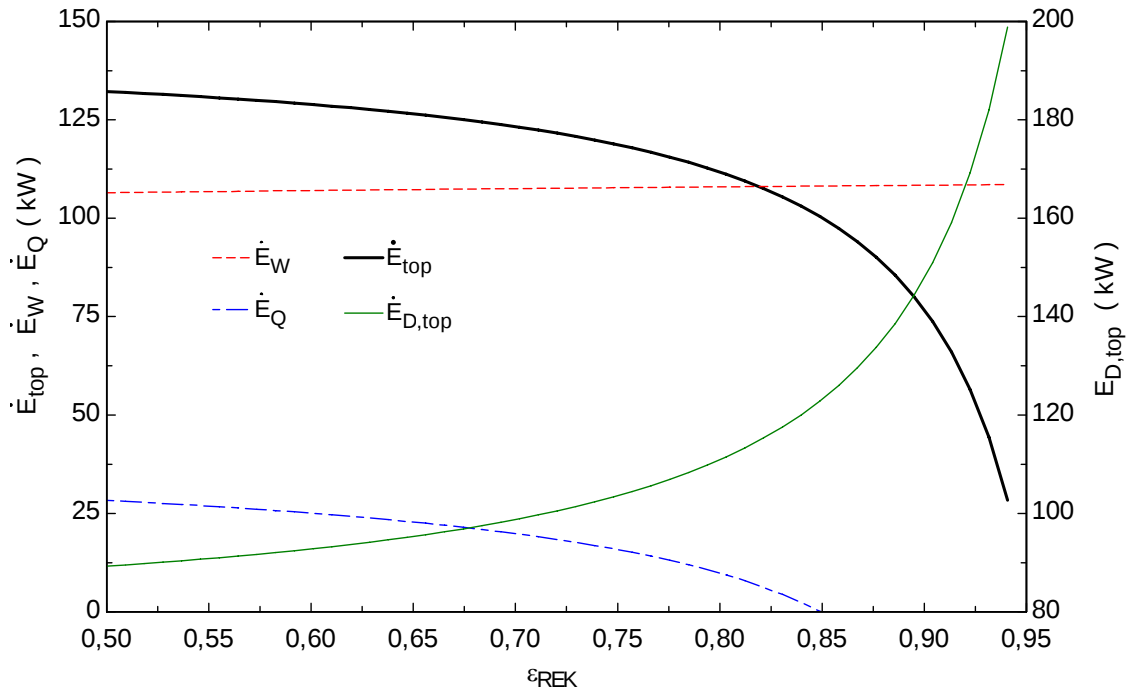
5.5.5 Reküperatör etkinlik katsayısının etkisi

Reküperatör etkinlik katsayısının KOYH kojenerasyon sisteminin performansına etkileri Şekil 5.21-5.24’de verilmiştir. Şekil 5.21’de kojenerasyonlu KOYH sisteminin ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısının reküperatör etkinlik katsayısı ile değişimi görülmektedir. Bu şekilden reküperatör etkinlik katsayısı arttıkça ekserjitik performansın artan bir hızla düştüğü ve reküperatör etkinlik katsayısının 0.85’den daha büyük olduğu durumda ise performansın kojenerasyonsuz sistem ekserjitik performansının (Şekil 4.26) altında kaldığı görülür. Bunun nedeni etkinlik değeri 0.85’den büyük olduğunda reküperatörü terk eden gazların sıcaklığı atık ısı kazanında istenilen şartlardaki buharı elde etmeye imkan vermemekte ve kojenerasyonun sağladığı ekserjitik performans artış ortadan kalkmaktadır. Çünkü Şekil 5.22’den görüleceği gibi reküperatör etkinlik katsayısının artması atık ısı kazanına giren gaz karışımının sıcaklığının düşmesinden dolayı üretilen buhar miktarı ve dolayısıyla ekserjisi azalmaktadır. Özellikle reküperatör etkinlik katsayısının 0.85 olduğu noktadan sonra atık ısı kazanına giren gazların sıcaklığı buhar üretimi için gerekli sıcaklığın altına düşmesinden dolayı atık ısı kazanı buhar üretemez duruma düşmektedir. Bu nedenle reküperatör etkinlik katsayısının 0.85 değerinden sonra atık ısı kazanı ya devreden çıkarılmalı ya da buhar basıncı ve buna bağlı olarak sıcaklığı düşürülerek kojenerasyon uygulaması sürdürülebilir.

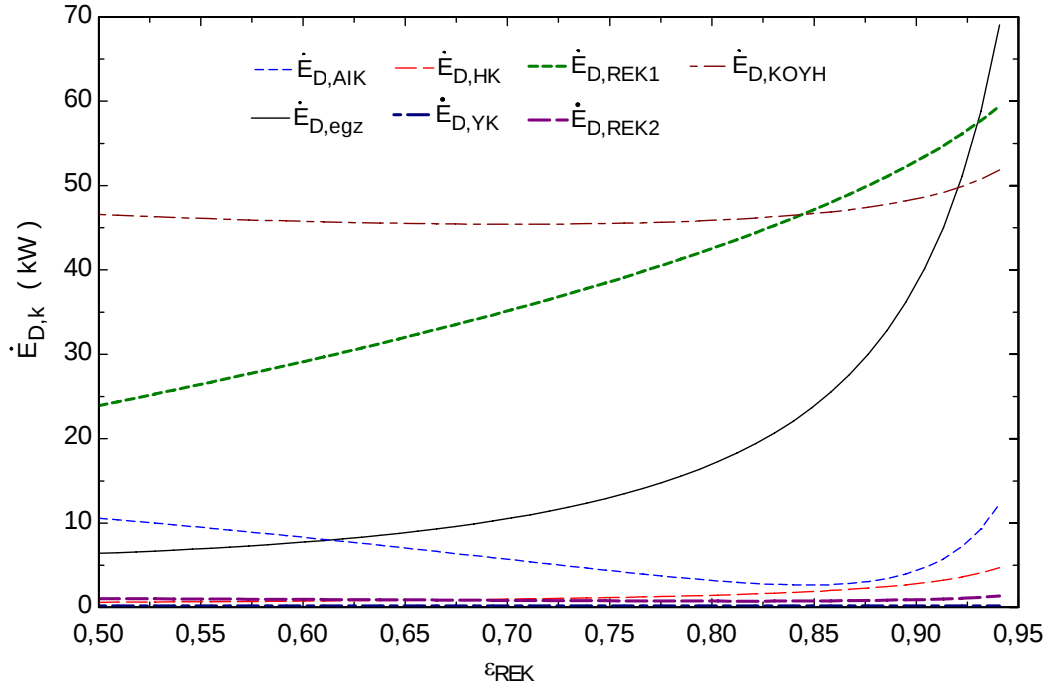
Şekil 5.23 ve Şekil 5.24’de KOYH kojenerasyon sistem komponentlerin ekserji kaybı ve ekserji verimlerinin reküperatör etkinlik katsayısı ile değişimi görülmektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi bu çalışmada göz önüne alınan buhar şartları için (8 bar kuru doymuş buhar) reküperatör etkinlik katsayısının 0.85’den sonraki değerlerinde AIK devre dışı kalacağından sözkonusu etkinlik katsayısı değerinden sonraki performanslar dikkate alınmamalıdır. Reküperatör etkinlik katsayısının 0.85 olması durumunda atık ısı kazanının ekserji veriminin sıfır olması (Şekil 24) bu durumu daha net olarak açıklamaktadır. Kojenerasyon uygulamasının sürdürülebilmesi için üretilen buhar basıncının düşürülmesi gerektiği açıktır.



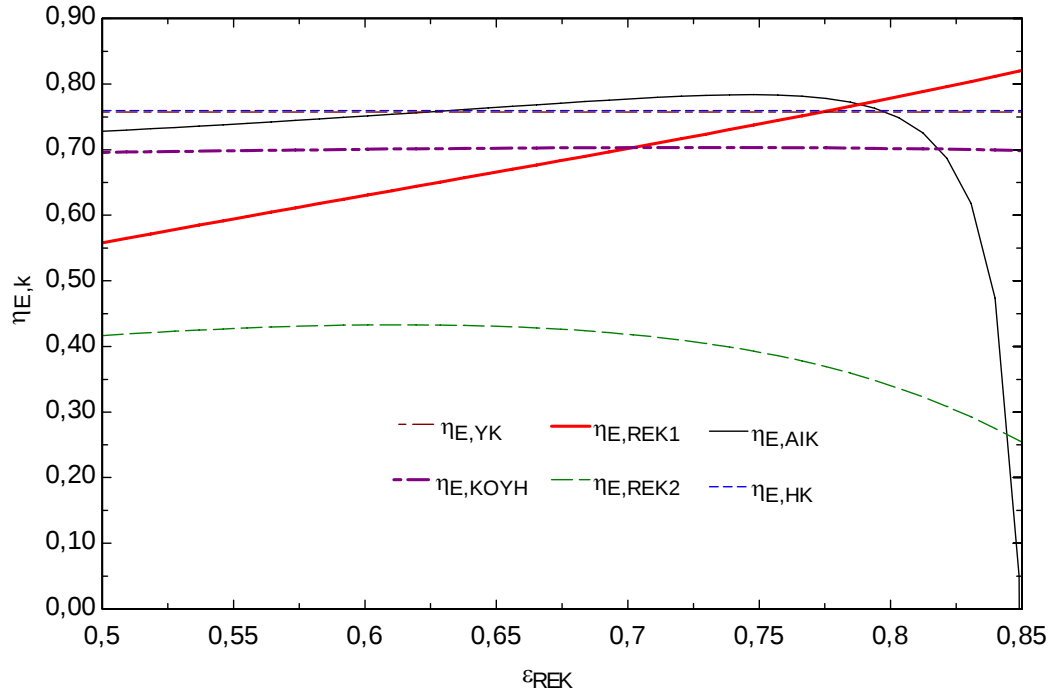
Şekil 5.21 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH'li kojenerasyon sisteminin ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri



Şekil 5.22 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri



Şekil 5.23 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH kojenerasyon sistemindeki ekserji kaybı değişimleri

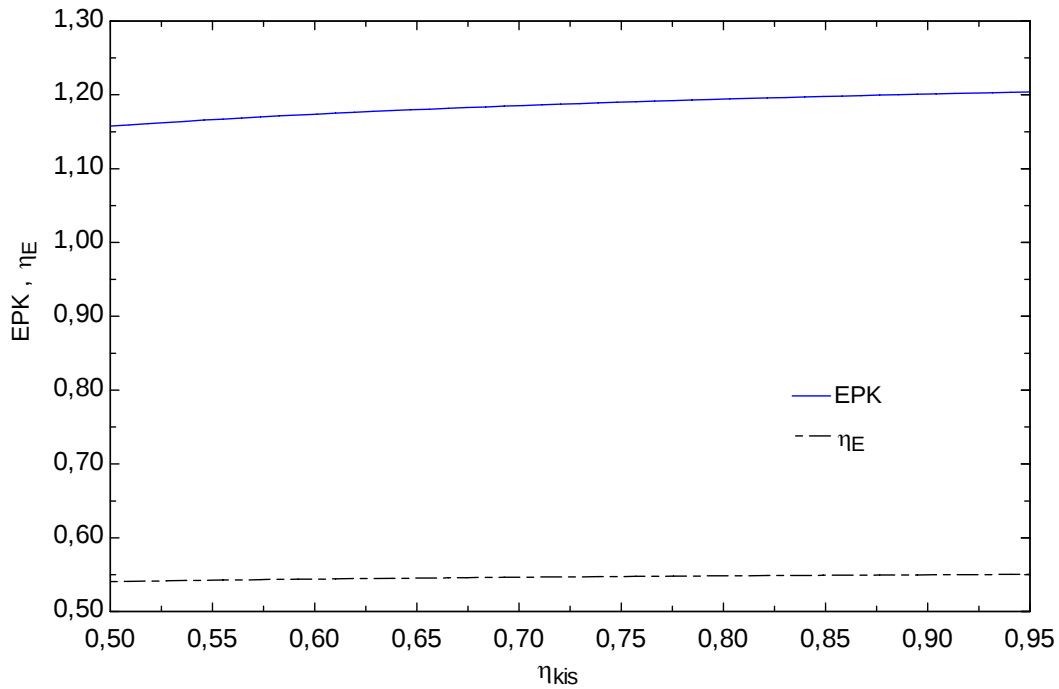


Şekil 5.24 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH kojenerasyon sistemindeki ekserji verimi değişimleri

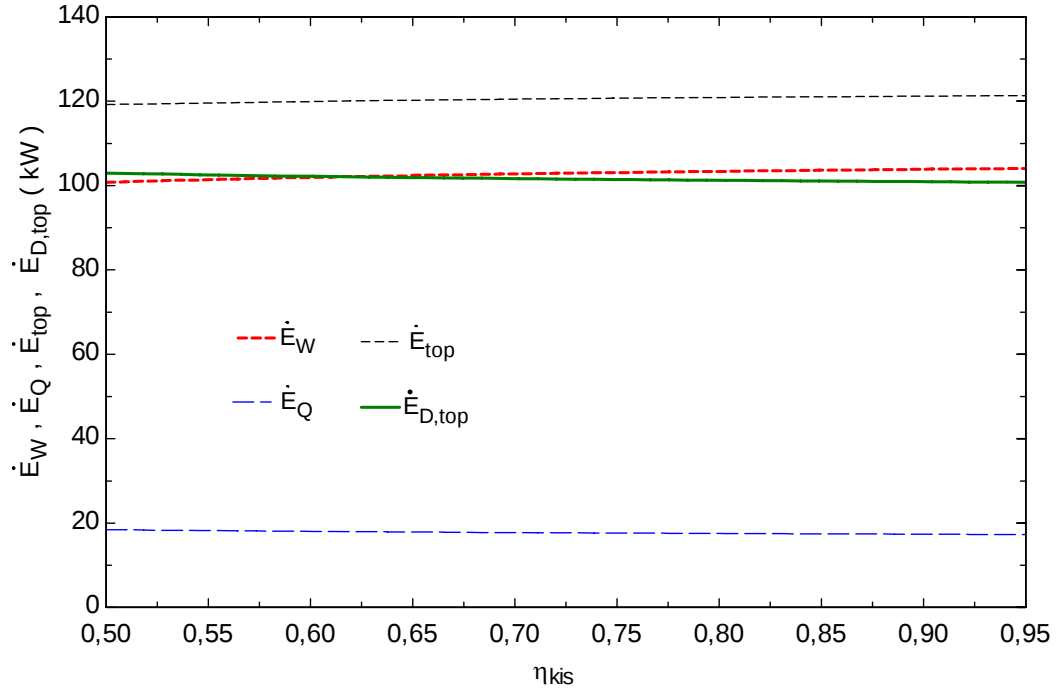
5.5.6 Kompresör izentropik veriminin etkisi

Şekil 5.25-5.28’de kompresör izentropik veriminin KOYH kojenerasyon sisteminin performansı üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Şekil 5.25’den görüleceği gibi kompresörlerinin izentropik verimi arttıkça ekserjistik performans çok az bir artış göstermektedir. KOYH kojenerasyon sisteminin ekserjistik performans analiz sonuçlarıyla kojenerasyonsuz sistemin ekserjistik performans analiz sonuçları (Şekil 4.31) karşılaştırıldığında, tüm izentropik verim aralığı için kojenerasyon uygulamasının ekserji veriminde %15, ekserjistik performans katsayısında ise yaklaşık % 35’lik bir artış sağladığı görülür.

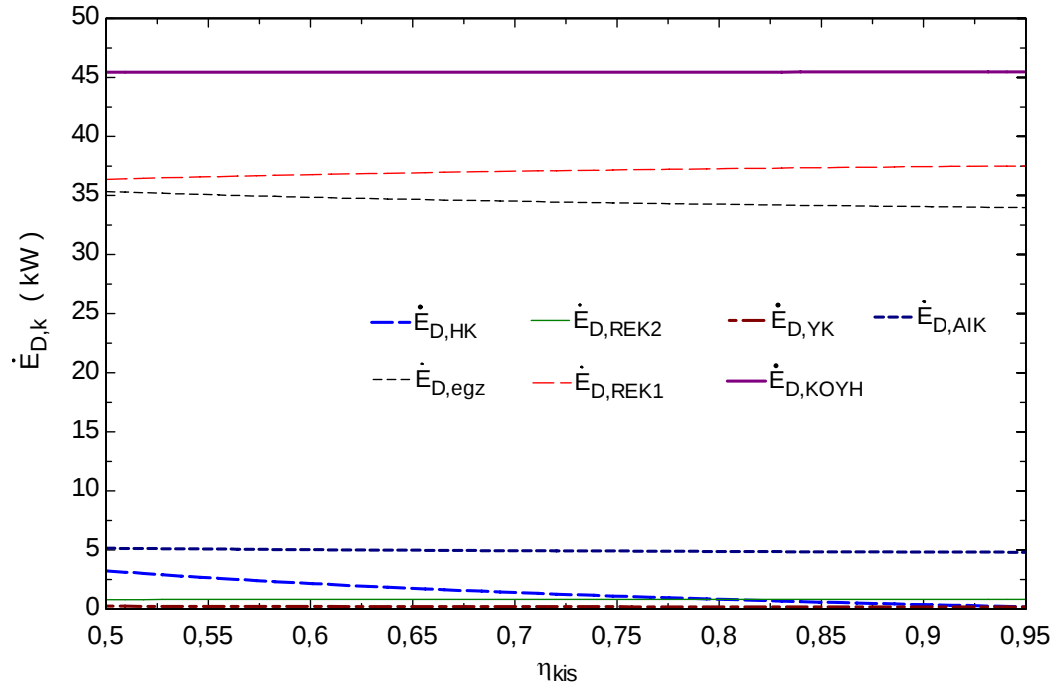
Şekil 5.26’da KOYH kojenerasyon sisteminden elde edilen gücün, ısının ekserjileri ve toplam ekserji çıktısı ile toplam ekserji kayıplarının kompresör izentropik verimi ile değişimleri görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde kompresör izentropik veriminin ekserji çıktıları ve ekserji kayıpları üzerinde çok etkin olmadığı görülür. Bu sonuç, sistemi oluşturan komponentlerin ekserji kaybının ve ekserji veriminin kompresör izentropik verimi ile değişimini gösteren Şekil 5.27 ve Şekil 5.28’den de görülebilir. Şekiller incelendiğinde, kompenetlerin ekserjistik performansının izentropik verim ile çok fazla değişmediği görülür.



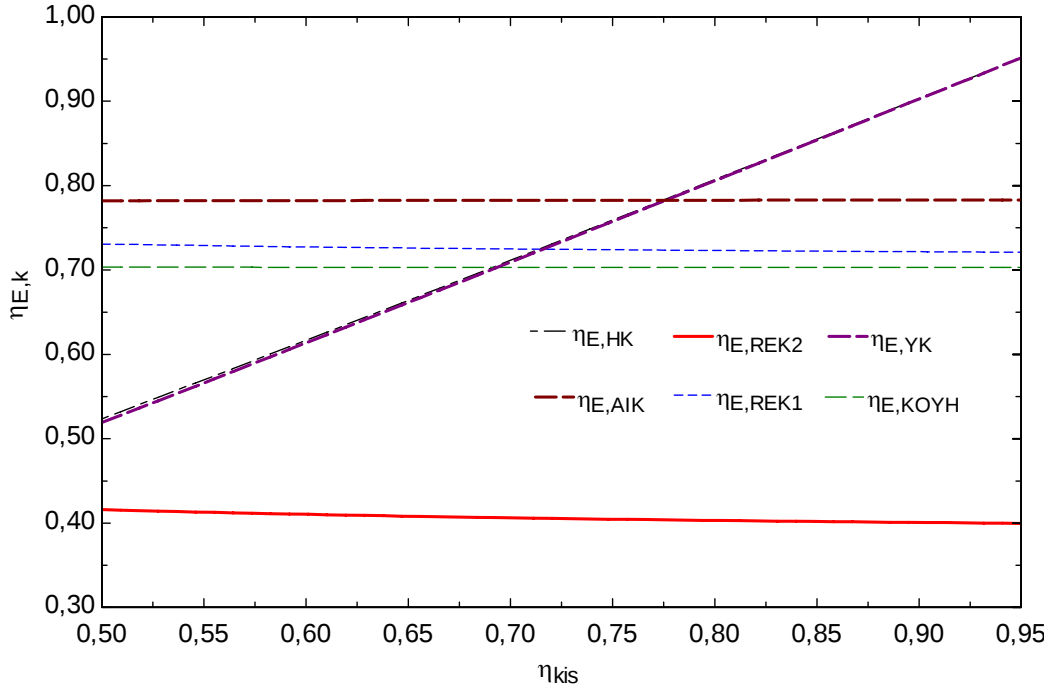
Şekil 5.25 Kompresör izentropik verimlerine göre KOYH kojenerasyon sisteminin ekserji verimi ve ekserjistik performans katsayısı değişimleri



Şekil 5.26 Kompresör izentropik verimlerine göre KOYH kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri



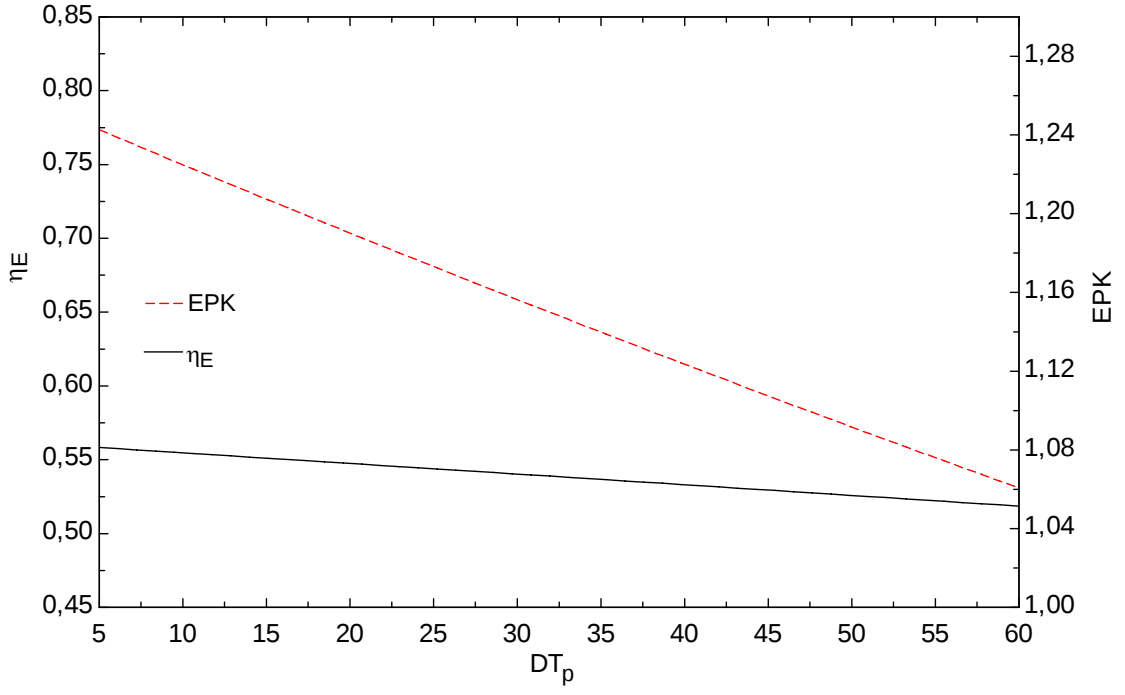
Şekil 5.27 Kompresör izentropik verimlerine göre KOYH kojenerasyon sistem bileşenlerindeki ekserji kaybı değişimleri



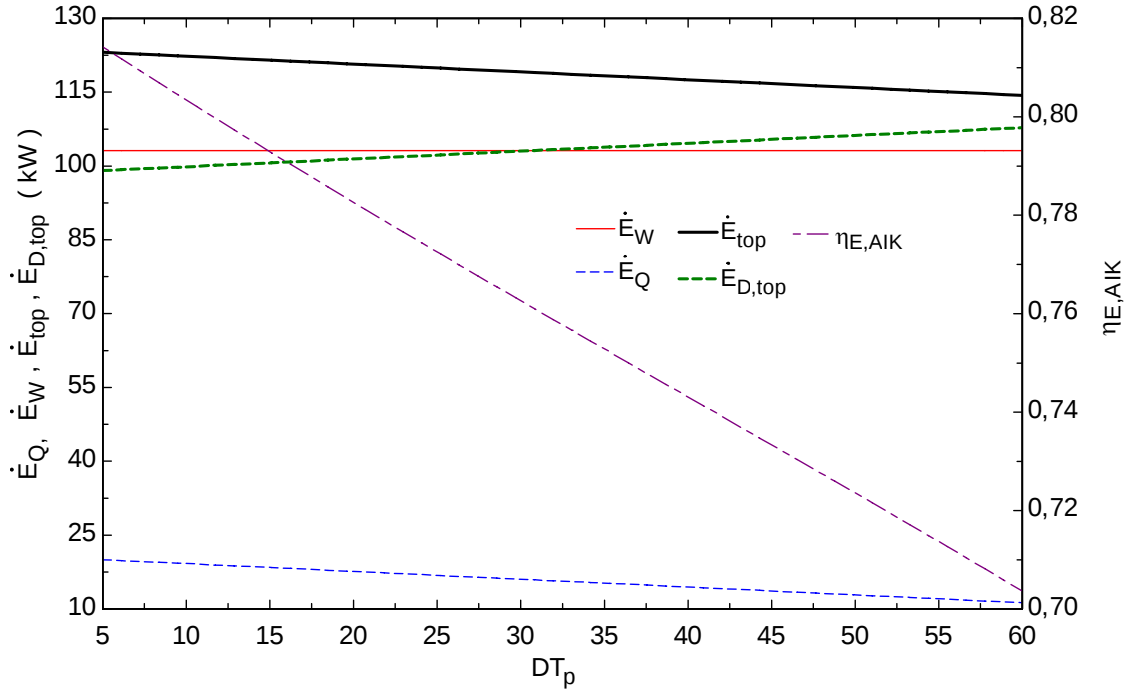
Şekil 5.28 Kompresör izentropik verimlerine göre KOYH kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri

5.5.7 Minimum sıcaklık farkının etkisi

AIK'ndaki minimum sıcaklık farkının KOYH kojenerasyon sisteminin performansına etkileri Şekil 5.29-5.30'da verilmiştir. Minimum sıcaklık farkı 5 °C'den 60 °C çıkarıldığında kojenerasyon sisteminin ekserji verimi % 7'lik ve ekserjitik performans katsayısında ise % 15'lik bir azalma olmaktadır (Şekil 5.29). Çünkü sıcaklık farkı arttıkça üretilen buhar miktarı ve dolayısıyla ekserjisi azalmaktadır. Şekil 5.30'da KOYH kojenerasyon sisteminden elde edilen güç ve ısının ekserji değerleri, toplam ekserji çıktısı ve toplam ekserji kayıplarının minimum sıcaklık farkı ile değişimi görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde minimum sıcaklık farkının artması ile elde edilen güçte bir değişiklik olmamakta, ancak elde edilen ısının ekserji değeri ve buna bağlı olarak toplam ekserji çıktısı azalmaktadır. Bu azalmanın nedeni, minimum sıcaklık farkının artmasının AIK'daki ekserji kayıplarını ve buna bağlı olarak toplam ekserji kayıplarını artırmasıdır.



Şekil 5.29 AIK'ındaki minimum sıcaklık farkına göre KOYH kojenerasyon sisteminin ekserji verimi, ekserjitik performans katsayısı değişimleri



Şekil 5.30 AIK'ındaki minimum sıcaklık farkına göre kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri, toplam ekserji kaybı ve AIK'nın ekserji verimi değişimleri

6. KOYH -GT HİBRİT SİSTEMİN PERFORMANS ANALİZİ

Bu bölümde, KOYH modülünden çıkan yüksek sıcaklıktaki gaz karışımının sahip olduğu enerjiden daha fazla yararlanmak için bir ısı makinası olan gaz türbini kullanılmıştır. Böylece, gaz türbini (GT) ile ilave bir elektrik üretimi gerçekleştirilerek sistem performansının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. KOYH-GT hibrit sisteminin modelinin simülasyon sonuçları literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılarak modelin doğruluğu gösterilmiş ve çeşitli dizayn ve işletme parametrelerinin enerjistik ve ekserjistik performans üzerindeki etkileri incelenmiştir.

6.1 Önceki Çalışmalar

Winkler ve Lorenz (2002), yüksek elektrik üretim verimine sahip yakıt hücreli hibrit sistemlerinin genel bir termodinamik modelini oluşturmayı amaçlamışlardır. Yakıt hücre sistemini birçok küçük modüle bölüp her birinin arasına GT eklemek yoluyla KOYH ile GT kombinasyonun kuralabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca, KOYH rejeneratörlü GT ve buhar türbininden oluşan sistemin % 80 elektrik verimine ulaşabileceğini belirtmişlerdir.

Cunel vd. (2002), KOYH-GT hibrit sistemlerinin optimum konfigürasyonu belirlemek için altı tane farklı sistem konfigürasyonu incelemişlerdir. Bu sistemler net spesifik güç çıktısı ve termik verim açısından karşılaştırılmıştır. Yaptıkları analiz sonucunda rejeneratörlü KOYH-GT sisteminin küçük ve orta ölçekte güç üretimi için en iyi seçim olacağını vurgulamışlardır. Bu sistemde, bu sistemde maksimum termik verim % 64.1, maksimum spesifik güç 571 kWs/kg ve bu şartlardaki kompresör basınç oranı ise 14 olmaktadır. Sisteme arasoğutma eklendiğinde maksimum termik verim % 69.6, maksimum spesifik güç 626 kWs/kg ve bu şartlardaki basınç oranı ise 30 olmaktadır. Sistemde yüksek ve alçak basınç türbinleri arasına ara ısıtma amaçlı ikinci bir KOYH ilave edilmesi durumunda maksimum termik verimin % 76.4, maksimum spesifik güç çıktısının 489 kWs/kg olabileceği vurgulanmıştır.

Selimovic ve Palsson (2002) bir ağ yapısıyla birleştirilmiş KOYH modülleri ile gaz türbininden oluşan hibrit sistemin modellenmesi ve analizini gerçekleştirmişlerdir. Yakıtın akış yönünde yakıt hücresi sistemlerinin seri şekilde bağlanması ile yakıt hücresinin ve tüm sistemin performansının artacağı vurgulanmıştır. Hava ve yakıtın seri şekilde bağlandığı ve havanın paralel yakıtın seri bağlandığı iki farklı KOYH sistemi içeren KOYH-GT sistemlerin performansları karşılaştırılmıştır. Yakıtın ve havanın seri olarak bağlandığı durumda sistem veriminin oldukça arttığı, sadece yakıtın seri bağlanması durumunun ise sistem verimini azaltıcı bir etki yaptığı belirtilmiştir.

Kimijima ve Kasagi (2002), küçük ölçekli ticari sektörlerde artan enerji ihtiyacını karşılamak için mevcut enerji üretim sistemlerinden çok daha küçük sistemler geliştirmeye çalışmışlardır. Bu sistem mikro rejenatif GT çevrimine üst çevrim olarak KOYH'si eklenmesiyle oluşmaktadır. İlk adım olarak 30 kW'lık KOYH-GT sisteminin dizayn ve kısmi yük şartlarında yüksek verimde çalıştırılabilmesi için işletme stratejilerini araştırmışlardır. Kısmi yük şartlarında sabit devir devir sayısı yerine yüke göre değişken devir sayısı uygulaması sistem performansını sabit devir sayısına göre iyileştirecektir. %50 ile % 100 güç aralığındaki kısmi yüklerde GT izentropik verimi %10 azalmasına rağmen sistem verimi % 60 civarında tutulabilmektedir. Ayrıca, Chan vd. (2003) bir dahili reformasyonlu KOYH-GT hibrit sisteminin kısmi yüklerdeki performans analizlerini yapmışlardır.

Kuchonthara vd. (2003), yakıt olarak hidrojen kullanan üç farklı hibrit sistemi karşılaştırmışlardır. Bu konfigürasyonlar KOYH-GT'nin sonuna buhar türbini ekleyerek KOYH-GT-ST sistemi, buhar enjeksiyonlu KOYH-GT ve nemli hava türbinli KOYH-GT sistemlerinden oluşmaktadır. Bu üç çevrim arasında en iyi verime sahip olan sistemin nemli hava türbinli KOYH-GT sistemi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Lundberg vd. (2003), basınçlı bir KOYH ile mevcut bir GT'nin birleşmesinden oluşan 20 MW sınıfında bir hibrit güç üretim sistemi tasarımını teorik olarak araştırmışlardır. Dizayn çalışmasının odak noktası kapasitesi belli olan mevcut GT'ne uygun KOYH sisteminin kapasitesini belirlemektir. Bunu belirlerken dikkate alınan kriter spesifik maliyet olmuştur.

Rao ve Samuelsen (2003), tüpsel KOYH sistemini temel alan farklı hibrit sistemlerin enerji ve maliyet hesaplarını yaparak en iyi hibrit sistemi belirlemeye çalışmışlardır. Hibrit sistemlerin karşılaştırılmasında, ara soğutmalı ve rejeneratif gaz türbinli tüpsel KOYH sistemini temel sistem olarak seçmişlerdir. Bu temel sisteme nemli hava türbini (HAT) eklenerek KOYH-HAT hibrit sistemi oluşturulmuştur. KOYH-HAT sisteminde GT'nin yanma odası yerine ikinci bir KOYH eklenerek farklı bir sistem daha oluşturmuşlardır. Çalışma sonucunda, ikili KOYH-HAT sisteminin termal verimi %75.98 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, KOYH-HAT sisteminin elektrik üretim maliyeti 3.54 cent/kWh, ikili KOYH-HAT sisteminin elektrik üretim maliyeti ise 4.02 cent/kWh olarak belirlenmiştir.

Inui vd. (2003), CO₂ giderici bir komponent içeren yüksek performanslı bir KOYH-MHD-GT hibrit sistemin performansını incelemişlerdir. KOYH'nin egzoz gazındaki kullanılmayan yakıt saf O₂ ile tekrar yanma reaksiyonuna girerek, açığa çıkan yanma ısısı bir ısı eşanjörü vasıtasıyla bir alt çevrime aktarılır. Alt çevrim olarak bir kapalı MHD-GT çevrimi seçilmiştir.

Bu sistemin termik verimi % 70.64 olarak hesaplanmıştır. CO₂ giderici içeren bir sistem için bu verimin çok yüksek olduğu ve sistemin uygulama yönünden geliştirilmeye ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır.

Moller vd. (2004), bir KOYH-GT konfüğürasyonuna CO₂ giderici sisteminin eklenmesinin çevresel açıdan daha duyarlı bir sistem oluşturacağını belirterek, çok değişkenli doğrusal olmayan genetik algoritma metodu ile sistemi optimize etmeye çalışmışlardır. Optimizasyon sonuçlarına göre CO₂ yakalama sistemi içeren KOYH-GT sistemin % 60'ın üzerinde elektriksel verime ulaştığını belirtmişlerdir.

Uechi vd. (2004), küçük işyerleri ve apartmanlar için 30 kW'lık KOYH-GT sisteminin performansı üzerine dizayn parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. Hibrit sistemin bu seviyedeki gaz türbinlerine göre çok daha iyi performans sergilediklerini söylemişlerdir. Sistemin optimal dizayn şartlarında % 65'in üzerinde verim elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

Magistri vd. (2004), anot ve katottaki gaz konsantrasyonlarının giriş ve çıkış değerlerinin ortalama değerlerinin daha kompleks bir hibrit sistemde kullanıldığı zaman daha hassas sonuçlara ulaşıldığını tüpsel bir KOYH için göstermişlerdir. Sonuçlar KOYH-GT hibrit sisteminde detaylandırılmış ve basitleştirilmiş KOYH modeli kullanılarak sürekli rejimde yapılan simülasyonlar ile karşılaştırılmıştır.

Yi vd. (2004), KOYH içeren ara soğutmalı GT'li bir hibrit sistemin performansını nem oranı, hava debisi ve basınç oranları gibi farklı dizayn ve işletme parametreleri için incelemişlerdir. Elektrik veriminin % 75.8'e ulaşabileceğini göstermişlerdir.

Song vd. (2005), tüpsel bir KOYH modülünün performans hesaplaması için iki boyutlu bir model geliştirmişlerdir. Ayrıca farklı modül içi düzenlemelerinin ve komponent özelliklerinin ısı transferini oldukça etkilediğini belirtmişler ve bu modelden elde edilen sonuçları tüpsel bir KOYH ve mikro gaz türbininden oluşan hibrit sistemde değerlendirmişlerdir.

Stilller vd. (2005), düzlemsel ve tüpsel KOYH'nin iki boyutlu sürekli rejim modellerini sonlu hacimler metoduna göre oluşturmuşlardır. Anot gazının geri besleme oranı, hava giriş sıcaklığı, işletme sıcaklığı, türbin giriş sıcaklığı ve katalitik yakıcının hava fazlalık oranı gibi farklı parametrelerin değişimiyle KOYH-GT sistem veriminin nasıl değiştiğini analiz etmişlerdir. KOYH modülünde tüpsel dizaynın düzlemsel olana göre daha az verimli olduğu, hibrit sistemde ise tüpsel dizaynın düzlemsel olana göre veriminin daha yüksek olduğu

sonucuna varmışlardır.

Song vd. (2006), KOYH'nin mevcut bir gaz tubini ile birleştirilmesi neticesinde oluşturulan KOYH-GT sisteminin performansını araştırmışlardır. Performans analizleri sonucunda kısmi yük şartlarında yakıt ve havanın eş zamanlı olarak değiştirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Yang vd. (2006), basınçlandırılmış bir KOYH-GT hibrit güç üretim sisteminin dahili ve harici reformasyon şeklindeki konfüğürasyonlarının performanslarını karşılaştırmışlardır. Aynı şartlar altında dahili reformasyonun güç ve elektrik verimi açısından daha iyi bir sonuç verdiğini belirtmişlerdir.

Kandepu vd. (2007), bir şebeke ağına bağlı KOYH-GT hibrit sisteminde, hibrit sistem ile şebeke arasındaki ilişkiyi incelemek için bir model geliştirmişlerdir. Sonuçlardan, PI kontrolü ile istenen sonuçların elde edilebileceği vurgulanmıştır.

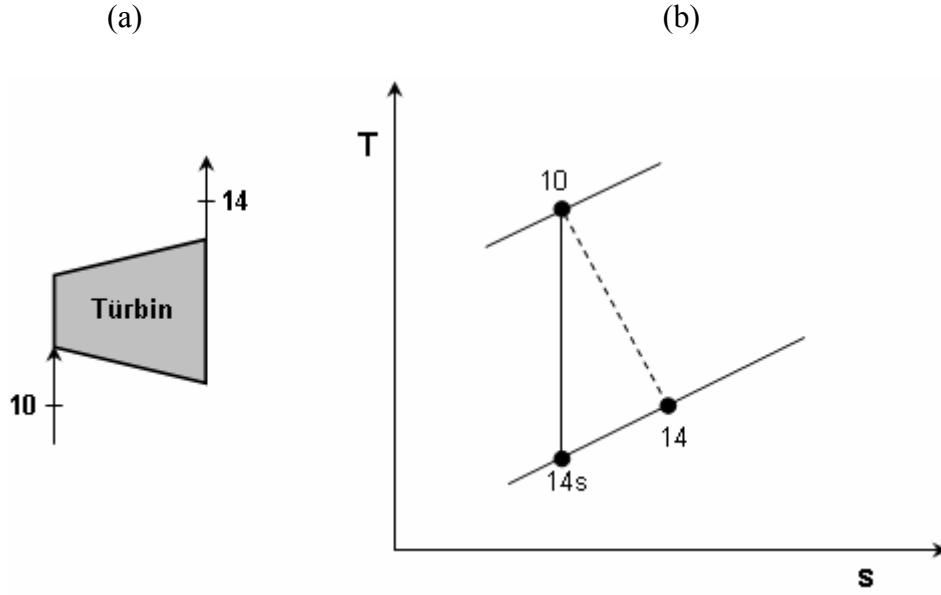
Zhang vd. (2007), iki farklı KOYH-GT hibrit sistem konfüğürasyonu için sistem simülasyonu ve analizini "Apsen Custom Modeler" simülasyon aracı yardımı ile gerçekleştirmişlerdir. Sistemlerden biri, KOYH modülünden çıkan gazların ısısı ile reküperatörde havayı ön ısıtırken, diğer sistem ise KOYH modülünden çıkan gazlar ile kompresörden gelen hava karıştırarak ön ısıtmayı gerçekleştirmektedir. Simülasyon sonuçlarından, karışım tipli sistemin veriminin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Granovskii vd. (2007), reformasyon prosesinde karbon oluşumunu engelleyecek gerekli buhar-karbon oranını sağlayan iki farklı KOYH-GT sistem konfüğürasyonunu karşılaştırmışlardır. Birinci konfüğürasyon, bir ısı değiştiricisi ile buhar üretimini içeren ve gaz türbini ile birleştirilmiş sistem. İkincisi ise KOYH modülünün anot tarafından çıkan egzoz gazlarının bir kısmının geri beslenmesi şeklindeki konfüğürasyondur. Yapılan performans analizi sonucunda ikinci konfüğürasyonun daha yüksek ekserji ve enerji verimine sahip olduğu belirtilirken, birinci konfüğürasyonun daha yüksek güç üretim kapasitesi olduğu vurgulanmıştır.

6.2 KOYH-GT Hibrit Sistem Modeli

Şekil 6.1'de KOYH-GT hibrit sisteminin şematik akış diyagramı verilmiştir. Hibrit sistemin çalışma şekli şu şekilde özetlenebilir; KOYH modülünden çıkan yüksek sıcaklıktaki gaz karışımı gaz türbinine gönderilir. Burada gazların sahip olduğu enerji mekanik enerjiye dönüştürülür. Mekanik enerjinin bir kısmı ile hava kompresörü tahrik edilirken, geriye kalan kısmı ise jeneratörde elektrik enerjisine dönüştürülür. Gaz türbininden çıkan gazlar hala

Verilen türbin giriş şartları (P_{10} ve T_{10}) ve türbin basınç oranı ($P_{\tau}=P_{10}/P_{14}$) için P_{14} değeri belirlidir. Denklem 6.1 yardımıyla T_{14s} sıcaklığı iterasyonla bulunur ve bu sıcaklığa karşılık gelen 14s noktasının entalpisi hesaplanır. Denklem 6.2’de verilen türbin izentropik verimi kullanılarak, türbin çıkışındaki 14 noktasının entalpisi Denklem 6.3 ifadesiyle hesaplanır ve bu değere karşılık gelen T_{14} sıcaklığı belirlenir:



Şekil 6.2 (a)Gaz türbini komponenti, (b) performansını değerlendirmek için kullanılan sıcaklık-entropi diyagramı

$$\eta_{\text{tis}} = \frac{\bar{h}_{10} - \bar{h}_{14}}{\bar{h}_{10} - \bar{h}_{14s}} \quad (6.2)$$

$$\bar{h}_{14} = \bar{h}_{10} - \eta_{\text{tis}} (\bar{h}_{10} - \bar{h}_{14s}) \quad (6.3)$$

Giriş ve çıkış şartları hesaplanan türbin komponenti için Denklem 6.4’de verilen enerji dengesinden türbin gücü hesaplanabilir:

$$\dot{\mathcal{Q}}_{GT} - \dot{W}_{GT} + \sum_i (\dot{n}_{10,i} \bar{h}_{10,i})_g - \sum_i (\dot{n}_{14,i} \bar{h}_{14,i})_\zeta = 0 \quad (6.4)$$

Ekserji hesabı için 10 ve 14 noktalarının fiziksel ve kimyasal ekserji değerlerinin bilinmesi gerekir. 10 noktasının ekserji ifadeleri daha önce verilmişti. 14 noktasının kimyasal ekserjisi, gaz karışımının molar oranlarında bir değişme olmadığı için 10 noktasının kimyasal ekserji değerine eşittir. Denklem 6.5’de 14 noktasının fiziksel ekserji ifadesi verilmiştir:

$$\dot{E}_{14}^f = \sum_i \dot{n}_{14,i} [\bar{h}_{14,i} - \bar{h}_{o14,i} - T_o (\bar{s}_{14,i} - \bar{s}_{o14,i})] \quad (6.5)$$

Gaz türbini komponenti ile ilgili ekserji dengesi yazıldığında gaz türbinin ekserji kaybı aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{E}_{D,GT} = \dot{\mathcal{Q}}_{GT} \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) - \dot{W}_{GT} + (\dot{E}_{10})_g - (\dot{E}_{14})_\zeta \quad (6.6)$$

Gaz türbini komponentinde çevre ile ısı transferi olmadığı kabulü gereğince Denklem 6.6 yeniden düzenlenerek aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{E}_{D,GT} = \dot{E}_{10} - \dot{E}_{14} - \dot{W}_{GT} \quad (6.7)$$

Gaz türbinin ekserji verimi Denklem 6.8’de gösterildiği gibi ifade edilebilir (Bejan vd., 1995):

$$\eta_{E,GT} = \frac{\dot{W}_{GT}}{\dot{E}_{10} - \dot{E}_{14}} \quad (6.8)$$

6.3 Hibrit Sistem için Performans Kriterleri

KOYH-GT hibrit sisteminin net güç çıkışı, KOYH modülünde üretilen güce ilave olarak gaz türbininde üretilen gücün toplamından kompresörlerde tüketilen güçlerin çıkartılmasıyla elde edilir:

$$\dot{W}_{NET} = \dot{W}_{KOYH} + \dot{W}_{GT} - \dot{W}_{HK} - \dot{W}_{YK} \quad (6.9)$$

Hibrit sistemin net güç çıkışı belirlendiğinde I. kanun verimi Denklem 6.10’daki gibi ifade edilebilir:

$$\eta_1 = \frac{\dot{W}_{NET}}{\dot{n}_{12} \cdot LHV_f} \quad (6.10)$$

Hibrit sistemin ekserji verimi, sistemden elde edilen toplam ekserjinin yakıtın ekserjine oranı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\eta_E = \frac{\dot{E}_{Top}}{\dot{E}_{12}} \quad (6.11)$$

Hibrit sistemin toplam ekserjisi ($\dot{E}_{Top}$) hibrit sistemden elde edilen net güç çıkışına eşittir ($\dot{E}_{Top} = \dot{W}_{NET}$).

KOYH-GT hibrit sistemindeki ekserji kaybı, her komponentte meydana gelen ekserji kayıplarının ve sistemden atılan egzoz gazlarının sahip olduğu ekserji değerlerinin toplamından oluşur ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{E}_{D,Top} = \dot{E}_{D,KOYH} + \dot{E}_{D,GT} + \dot{E}_{D,REK} + \dot{E}_{D,HK} + \dot{E}_{D,YK} + \dot{E}_{egz} \quad (6.12)$$

Burada, $\dot{E}_{egz}$ 16 noktasının ekserji değerini temsil etmektedir. Hibrit sistemin ekserjistik performans katsayısı (EPK) ise aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$EPK = \frac{\dot{E}_{Top}}{\dot{E}_{D,Top}} \quad (6.13)$$

6.4 Simülasyon ve Modelin Doğrulanması

Simülasyon giriş verileri Çizelge 6.1’de, simüle edilen KOYH-GT hibrit güç üretim sisteminin akış noktalarındaki termodinamik özellikleri ise Çizelge 6.2’de verilmiştir. Hibrit sistemin simülasyonu sonucunda hesaplanan bazı performans değerlerinin Siemens-Westinghouse tarafından verilen sonuçlarla karşılaştırılması Çizelge 6.3’de sunulmuştur. Sonuçlardan oluşturulan KOYH-GT hibrit sistem modelinin, hibrit sisteminin performans değerlendirmesini başarılı bir şekilde yerine getirdiği görülmektedir. KOYH-GT hibrit sisteminin her komponentine ait ekserji verimi, ekserji kaybı ve komponent ekserji kaybının toplam ekserji kaybına oranı Çizelge 6.4’de gösterilmektedir.

Çizelge 6.1 KOYH-GT hibrit sistem modeli için simülasyon giriş verileri

Parametreler	Değerler
Buhar-karbon oranı	2.5
Toplam yakıt kullanım faktörü	0.85
Ortalama akım yoğunluğu (A/m ²)	3200
Hücre işletme sıcaklığı (°C)	1000
Katalitik yakıcıdaki basınç kaybı (%)	5
Katalitik yakıcının yanma verimi (%)	98
DC-AC dönüştürücü verimi (%)	94
İşletme sıcaklığı ile anot çıkışı sıcaklık farkı (°C)	90
Kompresör basınç oranı (-)	2.9
Türbin giriş sıcaklığı (°C)	840
Kompresör izentropik verimi (%)	78
Türbin izentropik verimi (%)	82
Rekuperatör etkinlik katsayısı (%)	88
Rekuperatördeki basınç kayıpları (hava-yakıt)(%)	3- 1
GT mekanik x jeneratör verimi (%)	94

Çizelge 6.2 SOFC-GT hibrit sisteminin simülasyon sonuçlarının doğrulanması

Parametre	Siemens-Westinghouse (George, 2000)	Simülasyon
Hücre işletme voltajı (V)	0.610	0.6095
Hava debisi (kg/s)	0.5897	0.5829
DC KOYH gücü (kW)	187	187.4
AC KOYH gücü (kW)	176	176.2
GT gücü (kW)	47	46.86
I. Kanun verimi (%)	57	58.7
Net güç çıkışı (kW)	220	220.9

Çizelge 6.3 Hibrit sistemin her akış noktasındaki özellikleri ve molar oranları

Nok.	T (°C)	P (bar)	m (kg/s)	Eks. (kJ)	Molar oranlar (%)						
					CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
1	144.0	2.940	0.0075	393.7	100	-	-	-	-	-	-
2	787.9	2.940	0.0856	657.5	12.35	6.68	22.51	10.88	47.58	-	-
3	639.1	2.940	0.0856	655.7	8.22	6.62	23.95	23.04	38.17	-	-
4	910.0	2.880	0.1111	383.8	0	7.62	25.69	12.41	54.28	-	-
5	910.0	2.880	0.0330	114.0	0	7.62	25.69	12.41	54.28	-	-
6	910.0	2.880	0.0781	270.0	0	7.62	25.69	12.41	54.28	-	-
7	784.5	2.820	0.5829	310.2	-	-	-	-	-	21.01	78.99
8	915.7	2.770	0.5574	360.2	-	-	-	-	-	17.87	82.13
9	1012.0	2.710	0.5905	450.2	0	0.01	2.19	0.02	4.38	16.17	77.25
10	840.0	2.710	0.5905	354.2	0	0.01	2.19	0.02	4.38	16.17	77.25
11	598.8	2.850	0.5829	220.3	-	-	-	-	-	21.01	78.99
12	25.0	1.013	0.0075	392.1	100	-	-	-	-	-	-
13	25.0	1.013	0.5829	2.6	-	-	-	-	-	21.01	78.99
14	658.6	1.094	0.5905	212.9	-	0.01	2.19	0.02	4.38	16.17	77.25
15	159.8	2.940	0.5829	74.2	-	-	-	-	-	21.01	78.99
16	244.0	1.083	0.5905	48.1	-	0.01	2.19	0.02	4.38	16.17	77.25

Çizelge 6.4 Hibrit sistemindeki komponentlerin ekserji kaybı, ekserji verimi ve ekserji kaybı oranları

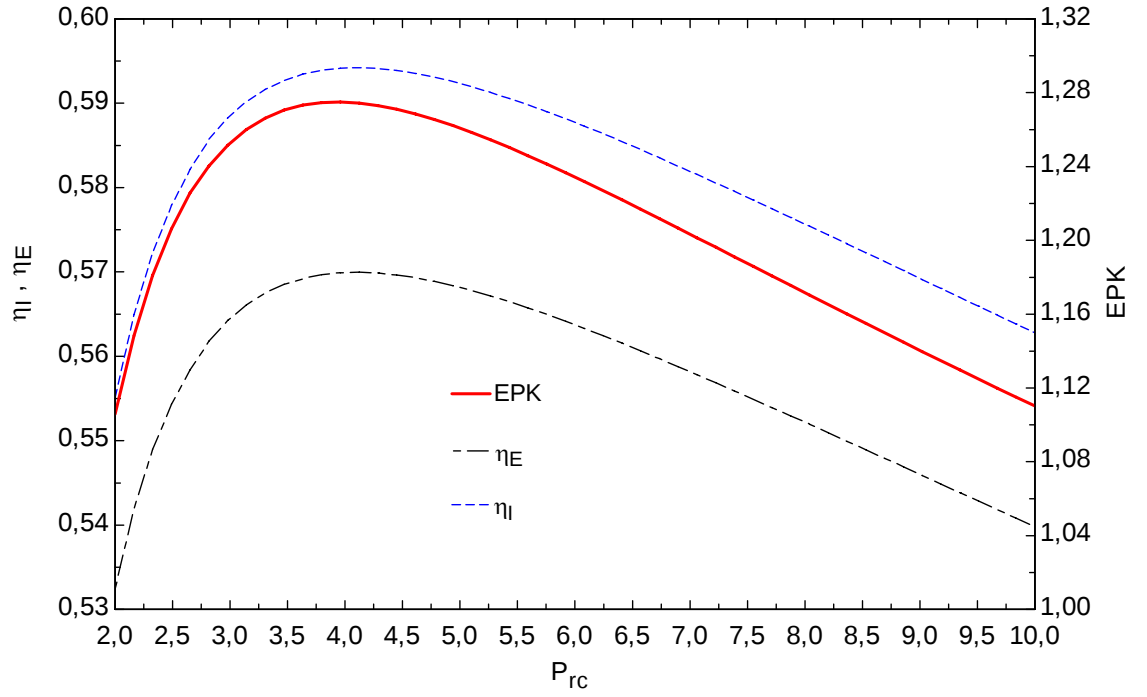
Komponent	Ekserji kaybı (kW)	Ekserji verimi (%)	Ekserji kaybı oranı (%)
Yakıt kompresörü	03.74	73.72	2.00
Hava kompresörü	12.95	84.31	7.31
KOYH modülü	83.58	67.84	47.18
Gaz türbini	12.10	91.43	6.83
Rekuperatör	16.71	89.86	9.43
Egzoz gazları	48.10	-	27.15
Hibrit sistem	177.20	56.31	-

6.5 Performans Analiz Sonuçları

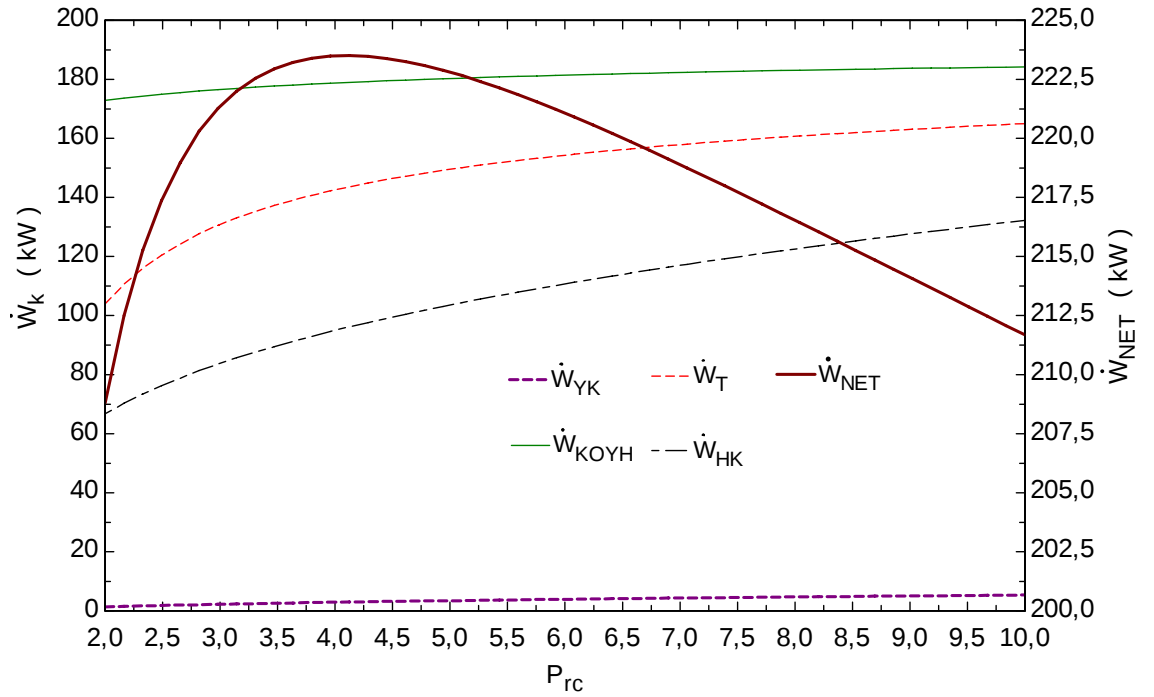
KOYH-GT hibrit güç üretim sisteminin performans analizi için yukarıda verilen matematik model kullanılarak kompresör basınç oranı (P_{rc}), yakıt hücresi işletme sıcaklığı (T_h), akım yoğunluğu (j), yakıt kullanım faktörü (U_f), kompresör izentropik verimleri (η_k), gaz türbini izentropik verimi (η_t) ve rekuperatör etkinlik katsayısı (ϵ_R) gibi dizayn ve işletme parametrelerinin sistem performansına etkileri incelenmiş ve sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

6.5.1 Kompresör basınç oranının etkisi

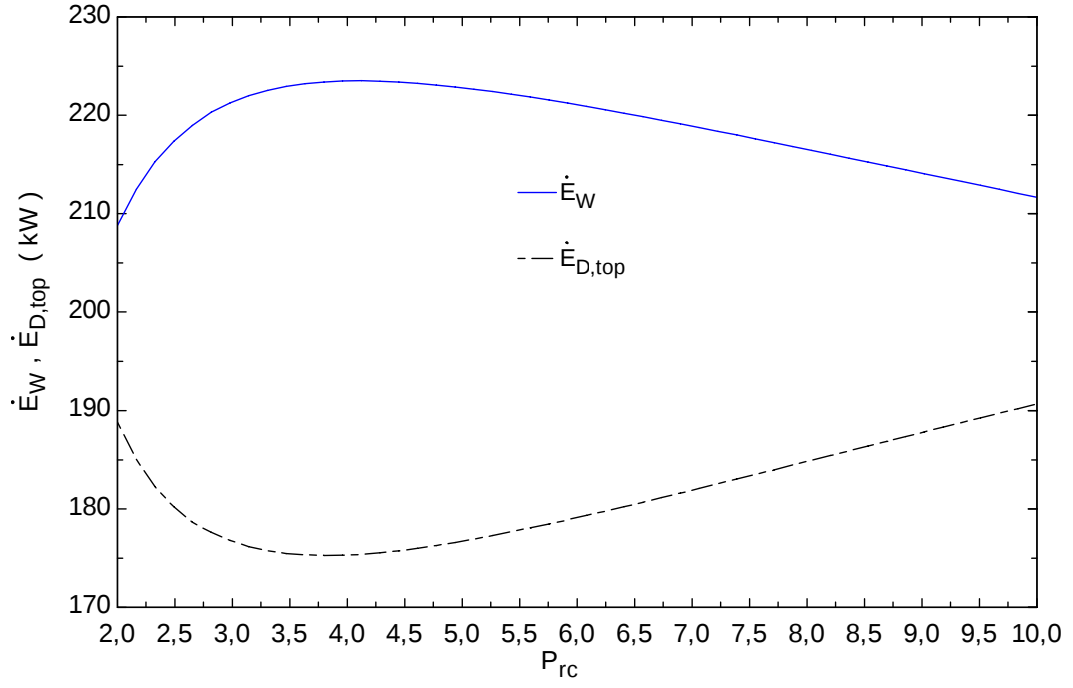
Kompresör basınç oranının KOYH-HT hibrit sistem performansına etkisi Şekil 6.3-6.7’de sunulmuştur. İncelenen basınç oranı değişim aralığında performans kriterlerini maksimum yapan bir basınç oranı olduğu Şekil 6.3’den görülmektedir. I. Kanun verimi, ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısını maksimum yapan kompresör basınç oranının 4 civarında olduğu görülür. Bu basınç oranında ekserji verimi % 57, I. kanun verimi % 59.4 ve ekserjitik performans katsayısı 1.28 olmaktadır. Şekil 6.4’de hibrit sisteminin ilgili komponentlerinde üretilen ve tüketilen güç ile net güç çıktısının basınç oranıyla değişimi görülmektedir. Şekilden görüleceği üzere net güç çıktısını maksimum yapan basınç oranı da 4 civarındadır. Bu sonuç tüm performansı kriterlerini maksimum yapan kompresör basınç oranının aynı olduğunu göstermektedir. Şekil 6.5’de hibrit sisteminin toplam ekserji çıktısı (üretilen net güce eşit) ve toplam ekserji kaybının basınç oranı ile değişimleri verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, toplam ekserji kaybını minimum yapan kompresör basınç oranı, performans kriterlerinin maksimum olduğu 4 değerine yakındır. Hibrit sistemindeki komponentlerin ekserji kayıpları ve ekserji verimlerinin kompresör basınç oranı ile değişimleri Şekil 6.6 ve 6.7’de verilmiştir.



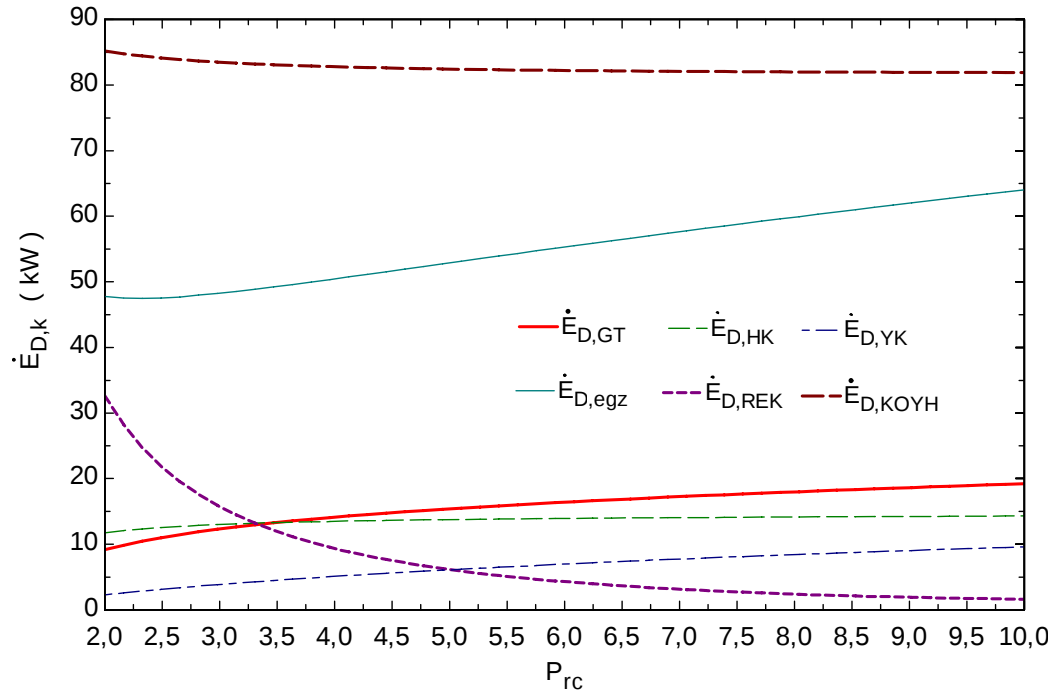
Şekil 6.3 Basınç oranına göre KOYH-GT hibrit sisteminin EPK, I.Kanun verimi ve ekserji verimi değişimleri



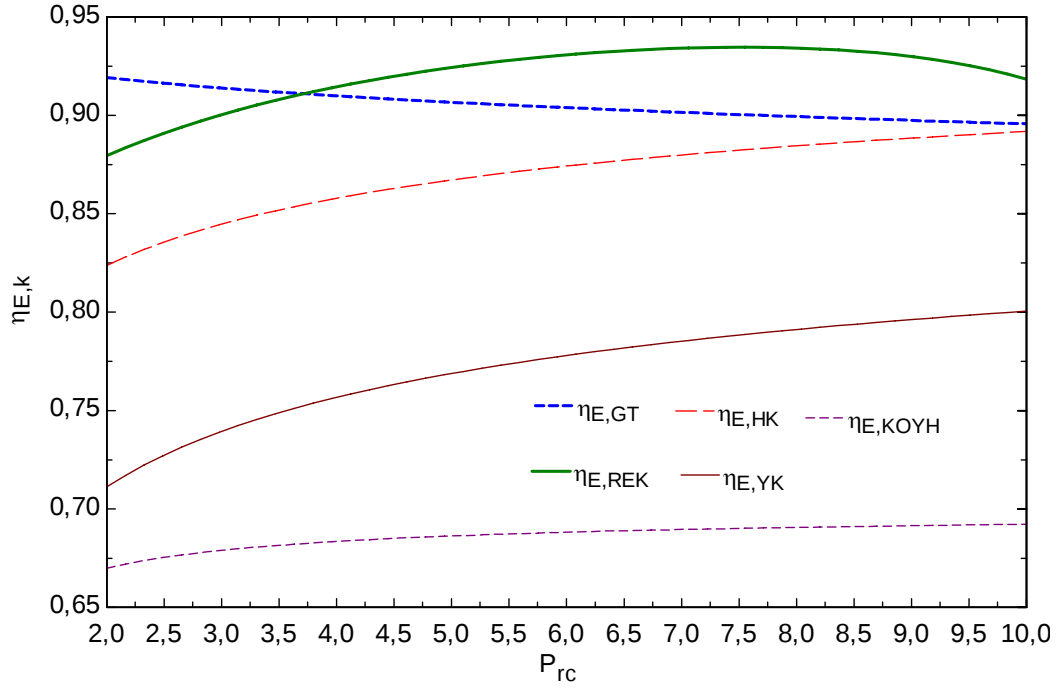
Şekil 6.4 Basınç oranına göre KOYH-GT hibrit sisteminde net güç ve diğer komponentlerdeki güç üretim ve tüketim değişimleri



Şekil 6.5 Basınç oranına göre KOYH-GT hibrit sisteminin toplam ekserji kaybı ve ürünlerin ekserji değişimleri



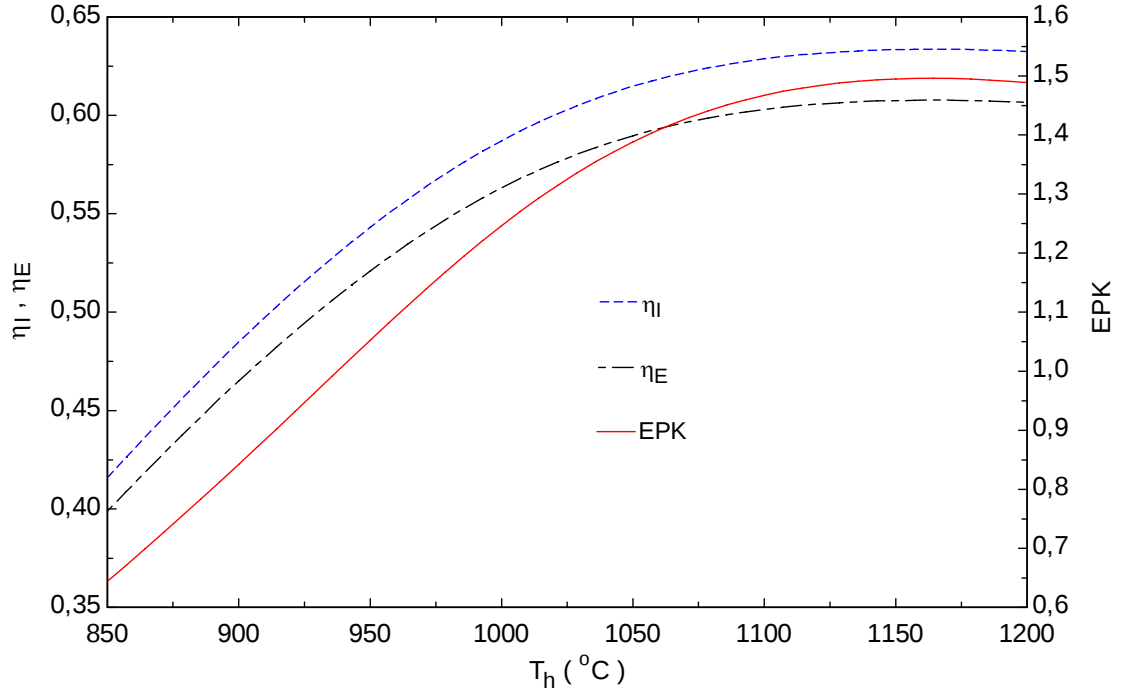
Şekil 6.6 Basınç oranına göre KOYH-GT hibrit sistemine ait bileşenlerdeki ekserji kaybı değişimleri



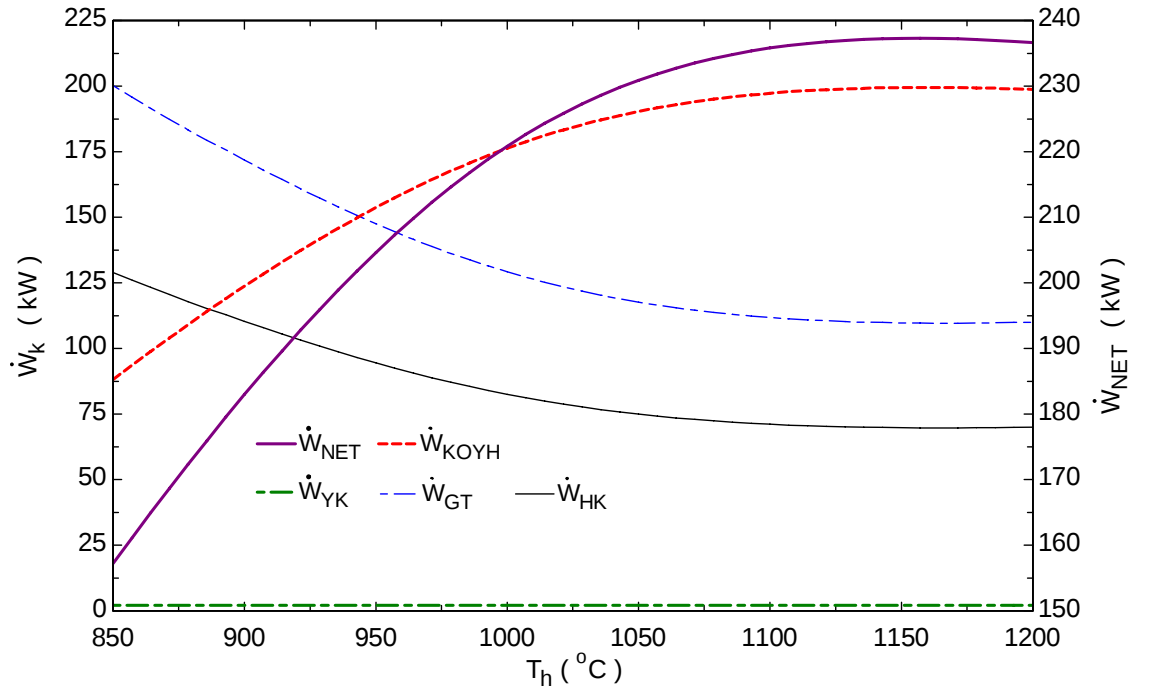
Şekil 6.7 Basınç oranına göre KOYH-GT hibrit sisteminde ait komponentlerin ekserji verimi değişimleri

6.5.2 Hücre işletme sıcaklığının etkisi

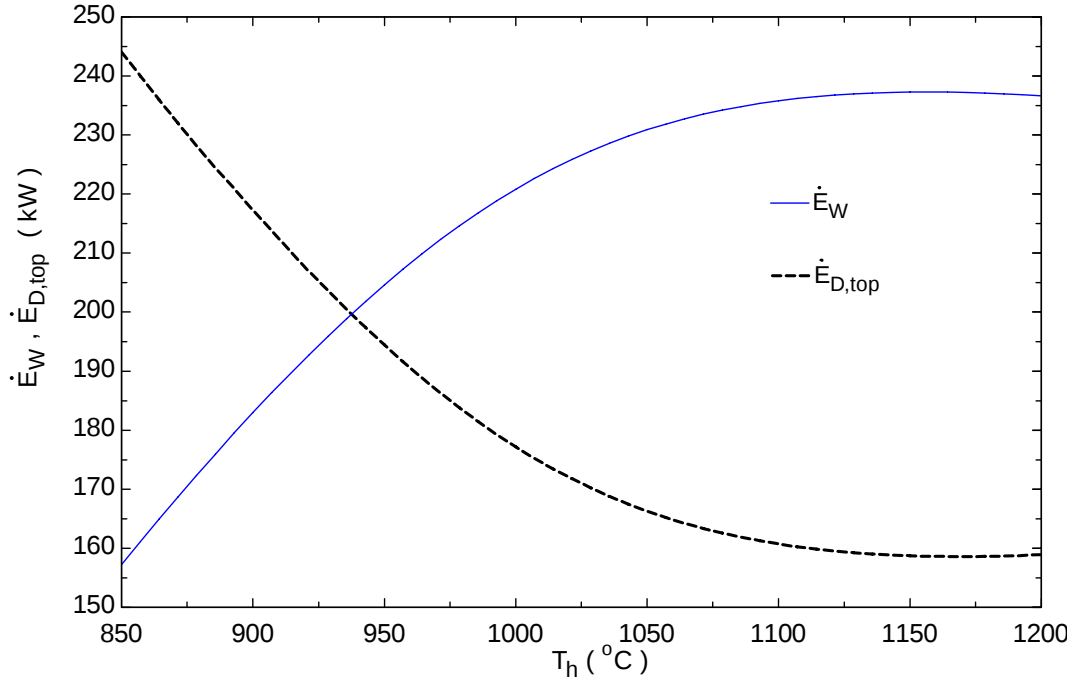
KOYH-GT hibrit sistem performansının hücre işletme sıcaklığı ile değişimi Şekil 6.8-6.12’de verilmiştir. Şekil 6.8’de görüldüğü üzere hücre işletme sıcaklığının artışı ile I. Kanun verimi, ekserji verimi ve ekserjistik performans katsayısı artarak 1160 °C’da maksimum değerlerine ulaşmaktadır. Maksimum I. Kanun verimi % 63, ekserji verimi % 60 ve ekserjistik performans katsayısı da 1.5 olmaktadır. Şekil 6.9’da hücre işletme sıcaklığının artması ile KOYH modülünde üretilen güç artarken, GT’nde üretilen güç ile kompresörde tüketilen gücün azaldığı görülmektedir. Bu azalmanın nedeni hücre işletme sıcaklığı arttıkça sisteme giren hava miktarının azalmasıdır. Hibrit sistemin net güç çıkışının işletme sıcaklığı ile artarak yaklaşık 1160 °C’da maksimum olduğu görülür. Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’da verilen sonuçlar, gözönüne alınan performans kriterlerine göre optimal sıcaklığının 1160 °C civarında olduğunu vurgular. Hücre işletme sıcaklığının artması ile toplam ekserjinin (toplam net güç çıkışına eşit) arttığı ve toplam ekserji kaybının azaldığı görülmektedir (Şekil 6.10). Ekserjistik performanstaki bu davranışın nedeni, hücre sıcaklığı arttıkça komponentlerdeki ekserji kaybının azalmasıdır (Şekil 6.11). Hücre işletme sıcaklık artışının hibrit sistemin komponentleri arasında sadece KOYH modülünün ekserji verimini artırdığı diğer komponentlerin ekserji veriminde önemli bir etki yapmadığı Şekil 6.12’de gözlenmektedir.



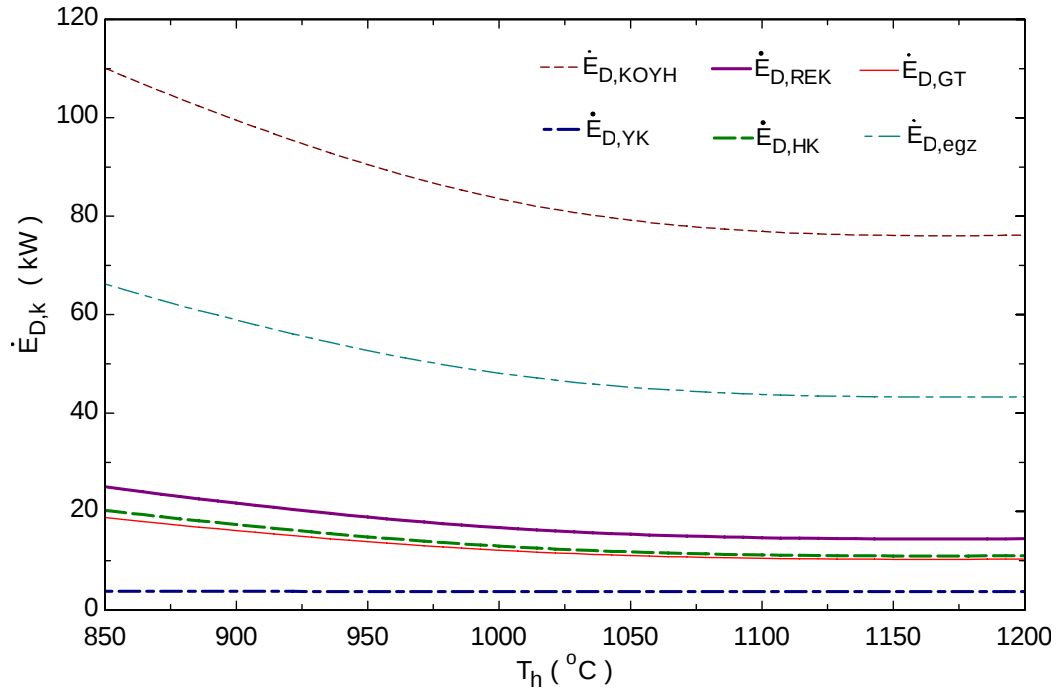
Şekil 6.8 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH-GT hibrit sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri



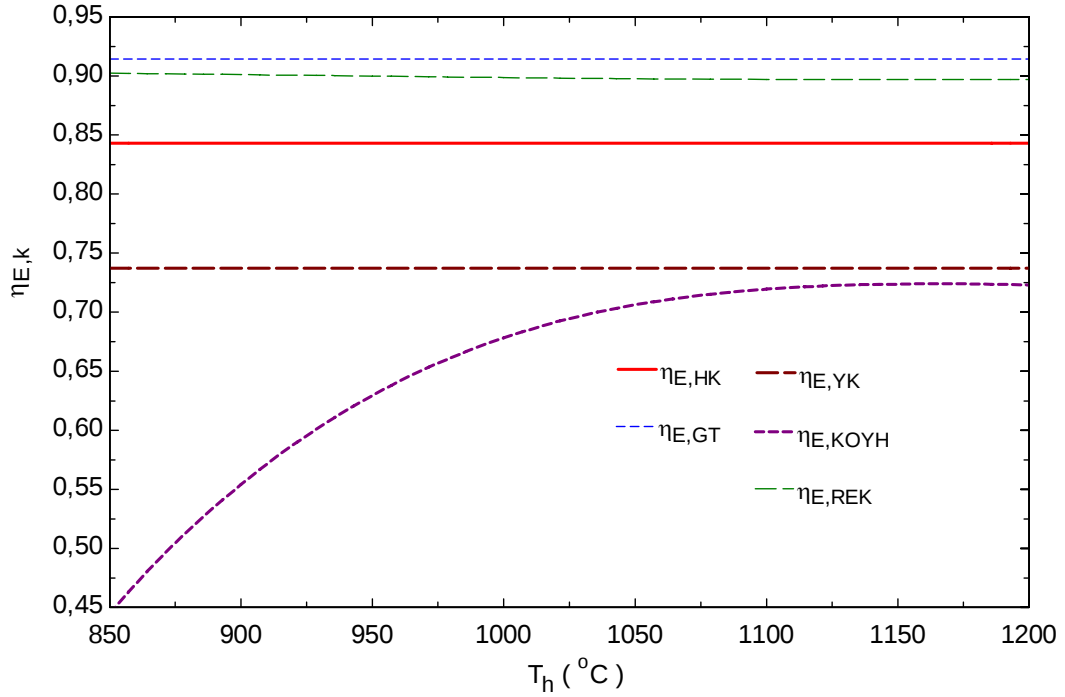
Şekil 6.9 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH-GT hibrit sisteminde ilgili komponentlerin güç üretim, tüketim ve net güç değişimleri



Şekil 6.10 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH-GT hibrit sisteminin ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri



Şekil 6.11 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH-GT hibrit sistemindeki komponentlerin ekserji kaybı değişimleri



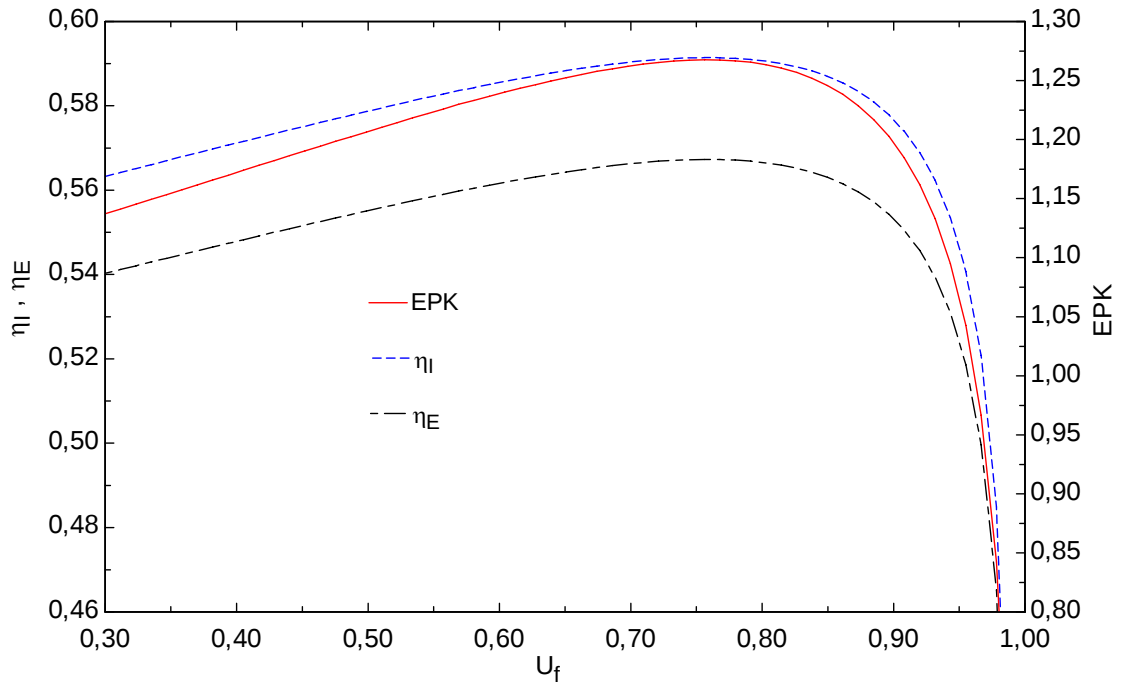
Şekil 6.12 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH-GT hibrit sisteminde ilgili komponentlerin ekserji verim değişimleri

6.5.3 Yakıt kullanım faktörünün etkisi

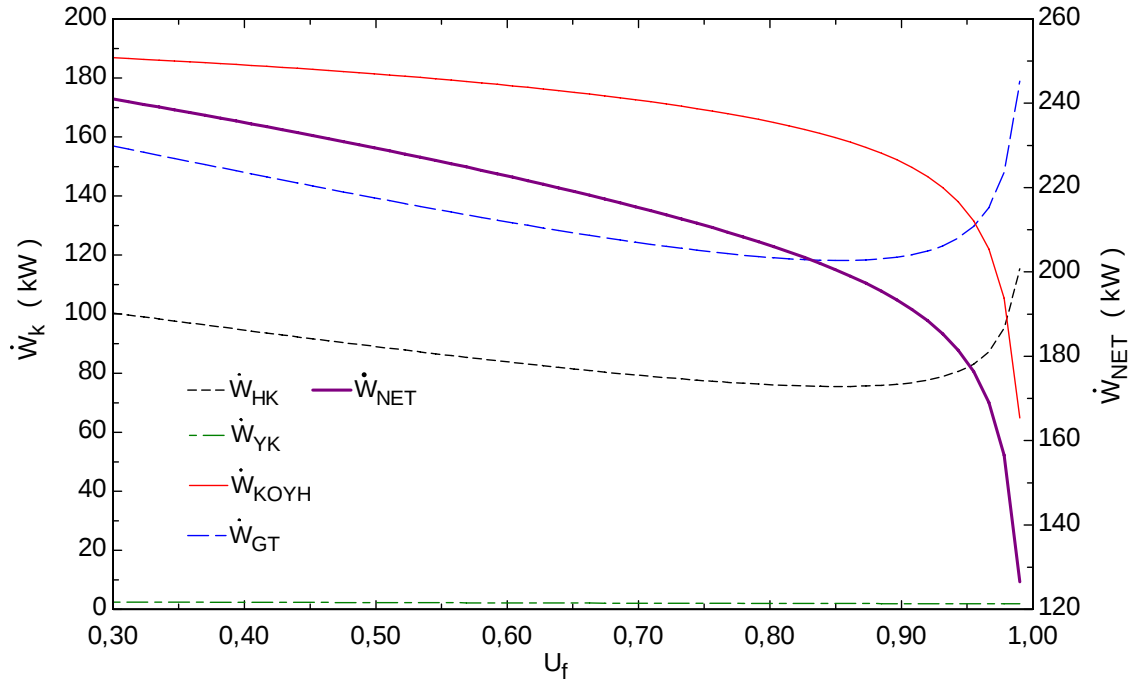
Şekil 6.13-6.17’de yakıt kullanım faktörünün KOYH-GT hibrit sistemin performansına etkileri verilmiştir. I. Kanun verimi, ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı Şekil 6.13’de görüldüğü gibi yakıt kullanım faktörünün 0.75 olduğu yerde maksimumdan geçmektedir. Maksimum noktada I. Kanun verimi % 59, ekserji verimi % 56.7 ve ekserjitik performans katsayısı 1.27 olmaktadır.

Şekil 6.14, yakıt kullanım faktörünün incelenen değişim aralığında hibrit sistemde komponentlerde üretilen ve tüketilen güç ile bunlara bağlı olarak toplam net gücün değişimini göstermektedir. Gaz türbininde üretilen güç yakıt kullanım faktörünün 0.85 olduğu noktada minimum olmaktadır. Çünkü aynı yakıt kullanım faktörü değerinde gaz türbinine giren gaz debisi minimum olmaktadır. I. Kanun verimi, ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısını maksimum yapan yakıt kullanım faktörünün 0.75 değerinde net güç maksimum olmamaktadır (Şekil 6.13 ve Şekil 6.14). Bu sonuçlar, tüm kriterler birlikte değerlendirildiğinde yakıt kullanım faktörünün optimal değerinin 0.75’den küçük olacağını göstermektedir.

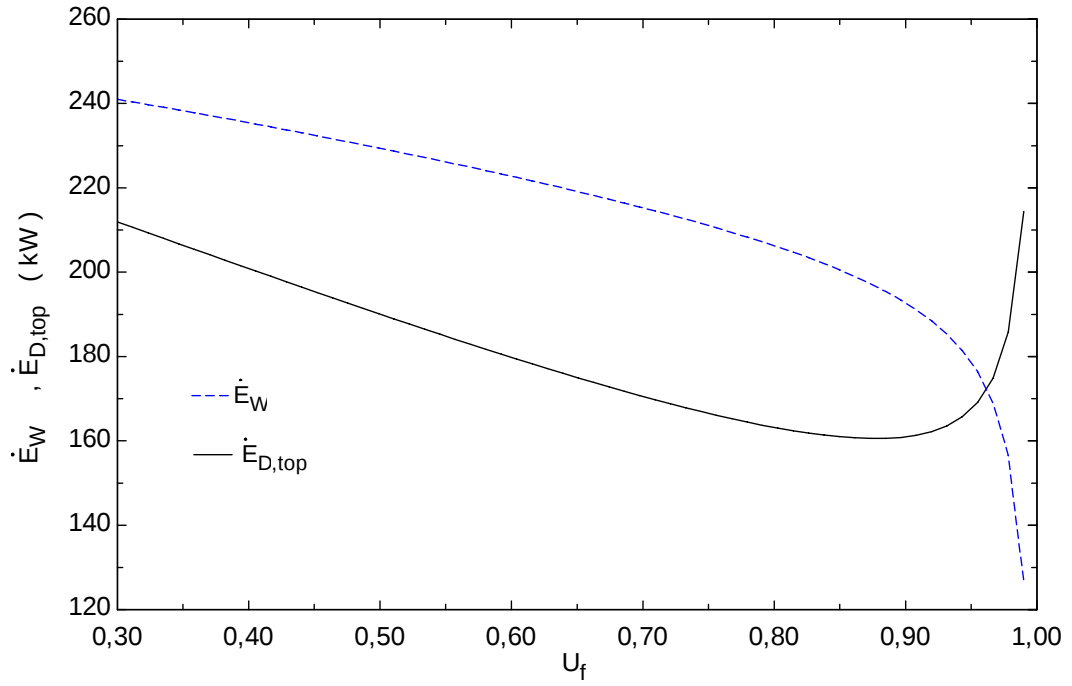
Şekil 6.15’de hibrit sistemdeki toplam ekserji çıktısı ve toplam ekserji kaybının yakıt kullanım faktörü ile değişimleri verilmiştir. Yakıt kullanım faktörünün 0.88 olması durumunda toplam ekserji kaybı minimum olmaktadır. Şekil 6.16 ve Şekil 6.17’de hibrit sistemi oluşturan komponentlerdeki ekserji kaybı ve ekserji verimi üzerinde yakıt kullanım faktörünün etkisi görülmektedir. KOYH modülünün ekserji veriminin yakıt kullanım faktörünün değişiminden önemli ölçüde etkilenmesine karşın diğer komponentlerde bir değişme olmadığı görülmektedir.



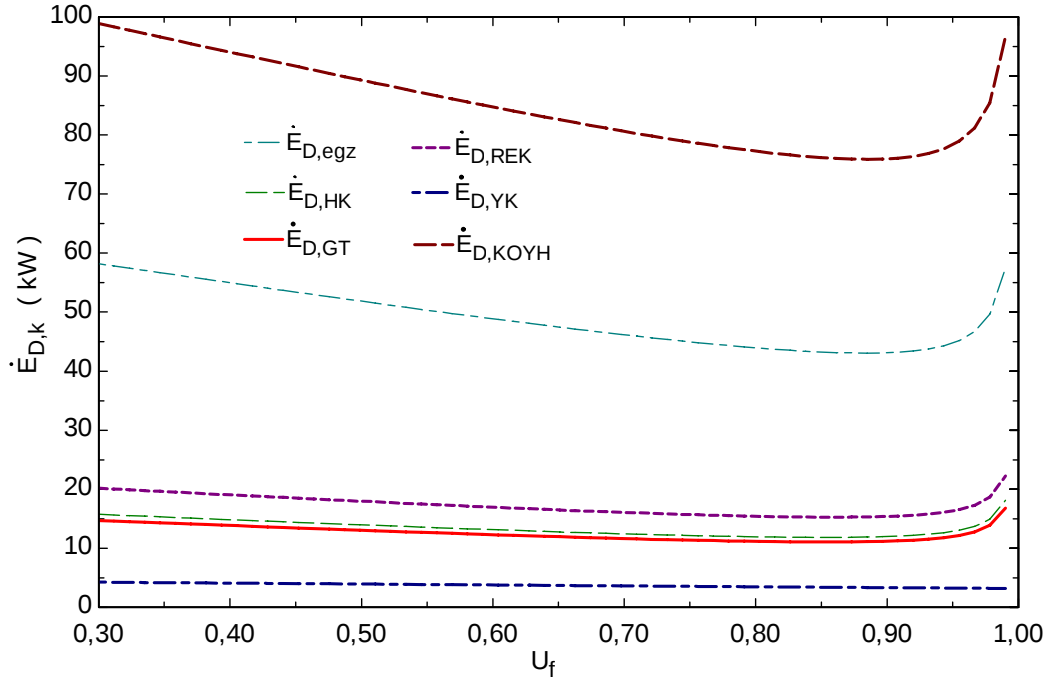
Şekil 6.13 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH-GT hibrit sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjistik performans katsayısı değişimleri



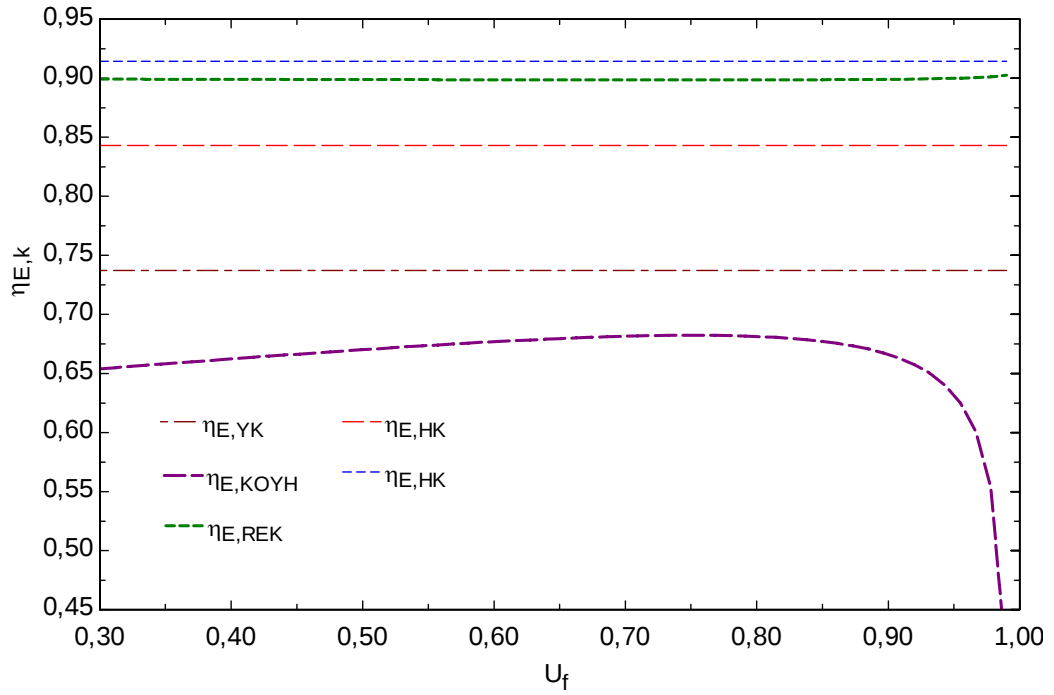
Şekil 6.14 Yakıt kullanım faktörüne göre HOYH-GT hibrit sisteminde ilgili komponentlerin güç üretimi, tüketimi ve net gücün değişimleri



Şekil 6.15 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH-GT hibrit sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri



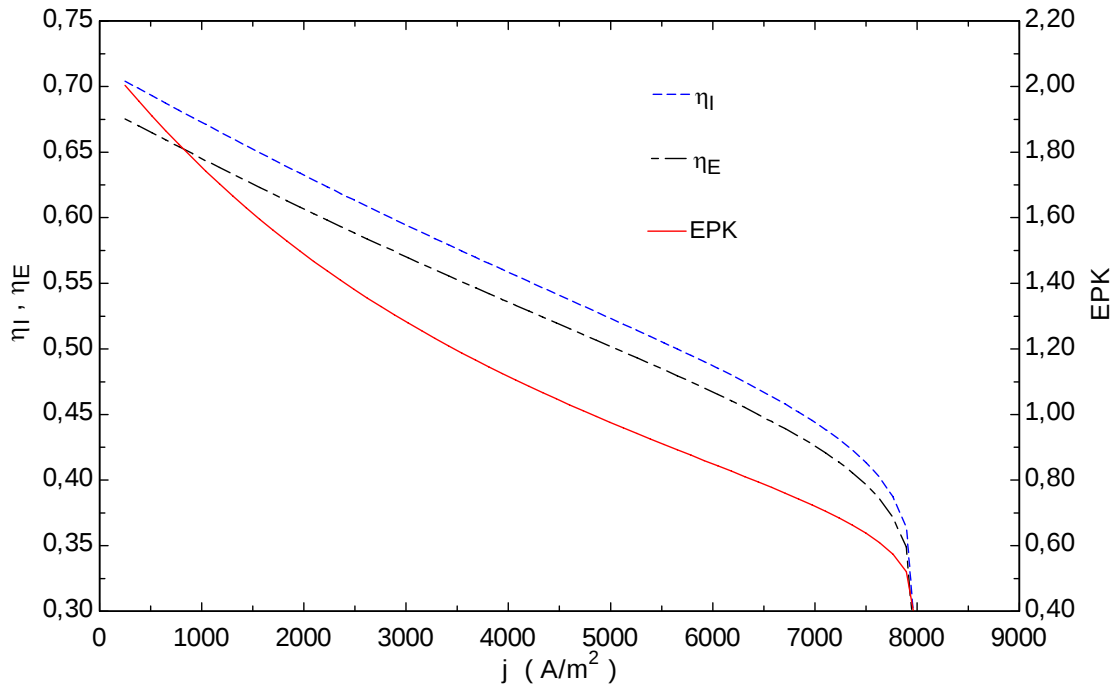
Şekil 6.16 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH-GT hibrit sistem komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri



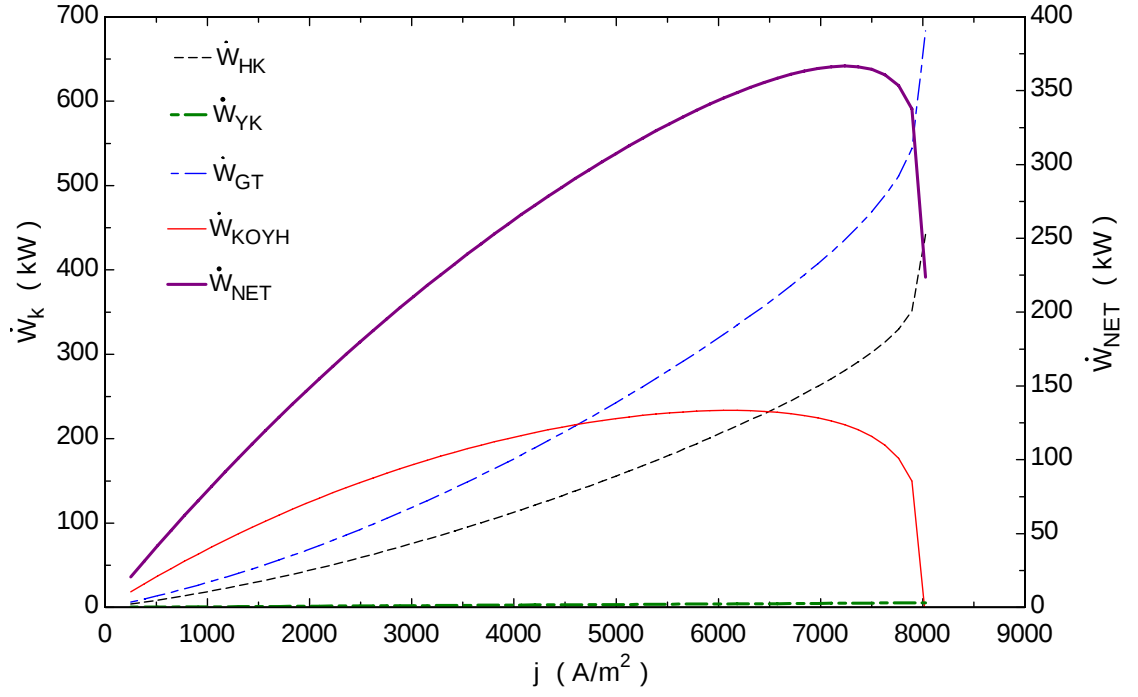
Şekil 6.17 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH-GT hibrit sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri

6.5.4 Akım yoğunluğunun etkisi

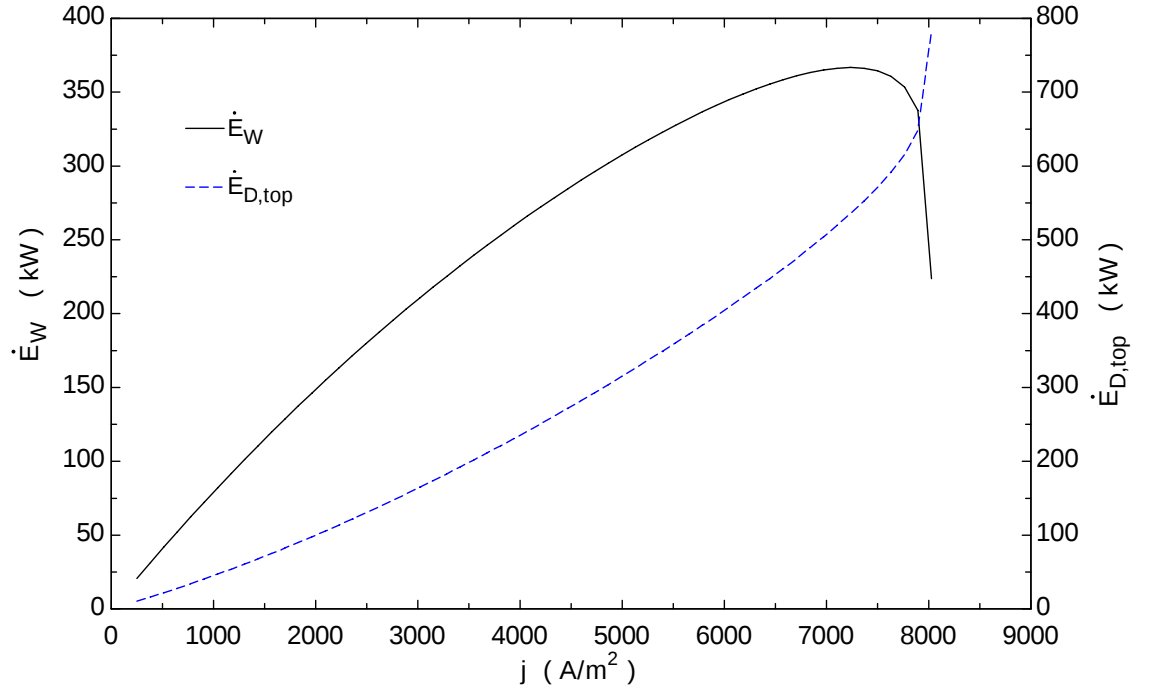
Akım yoğunluğunun KOYH-GT hibrit sistem performansına etkisi Şekil 6.18-6.22’de verilmiştir. Şekil 6.18’den görüldüğü üzere I. Kanun verimi, ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı değerleri akım yoğunluğunun en düşük olduğu yerde en yüksek değerdedir ve akım yoğunluğu arttıkça performans kriterlerinin değerleri azalarak, limit akım yoğunluğunda (8000 A/m^2) bu değerler sıfır olmaktadır. Şekil 6.19, incelenen akım yoğunluğu aralığında KOYH modülünde, gaz turbininde üretilen güç ile hava ve yakıt kompresöründe tüketilen gücün ve bunlara bağlı olarak net gücün değişimini göstermektedir. Hibrit sistemin net güç çıktısı akım yoğunluğunun 7200 A/m^2 olduğu noktada maksimum değerine ulaşarak yaklaşık 360 kW olmaktadır. Net güç çıktısını maksimum yapan akım yoğunluğundan itibaren limit akım akım yoğunluğuna yaklaştıkça toplam ekserji kayıplarının hızla arttığı ve ekserji çıktısının ise hızla azaldığı görülür (Şekil 6.20). Şekil 6.21’de akım yoğunluğunun artması ile ekserji kaybının tüm komponentlerde arttığı görülmektedir. Şekil 6.22’de ise akım yoğunluğundaki artışın KOYH modülünün ekserji verimini azalttığı diğer komponentlerin ekserji verimlerinde önemli bir değişiklik yapmadığı görülür.



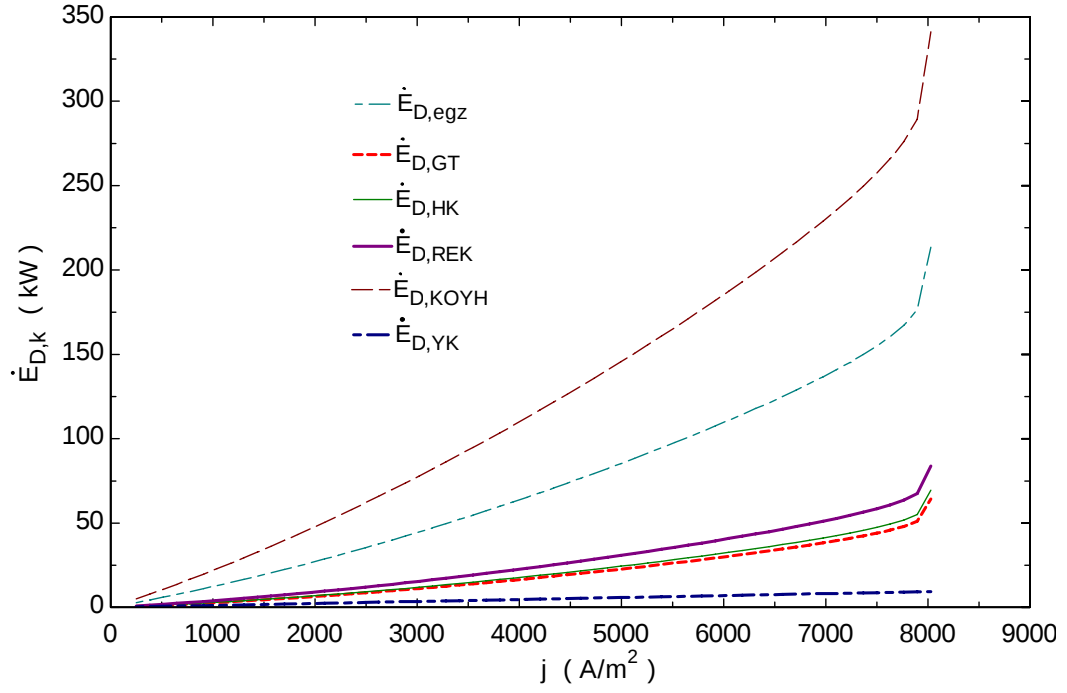
Şekil 6.18 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH-GT sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri



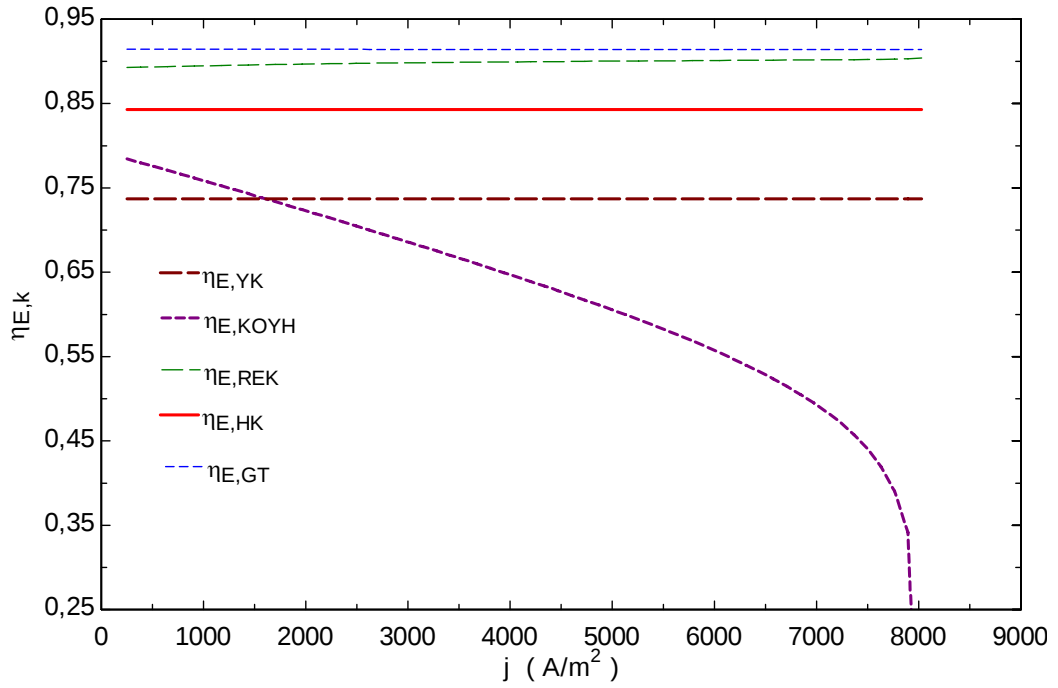
Şekil 6.19 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH-GT sisteminde ilgili komponentlerin güç üretimi, tüketimi ve net gücün değişimleri



Şekil 6.20 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH-GT sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri



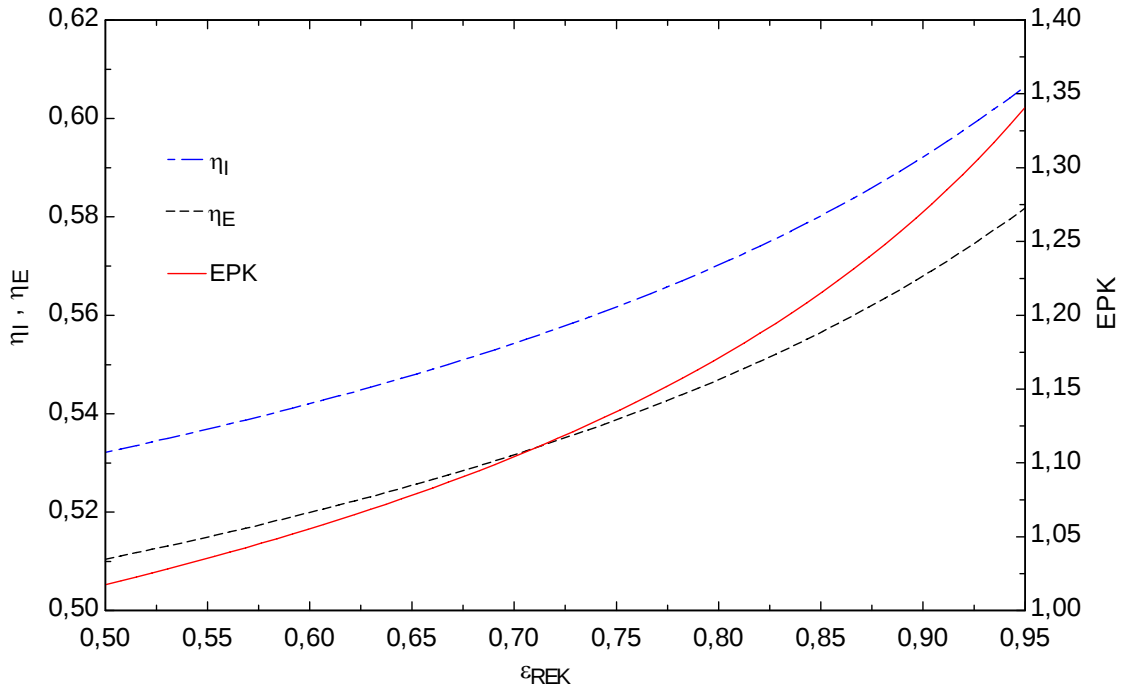
Şekil 6.21 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH-GT sistemindeki komponentlerin ekserji kaybı değişimleri



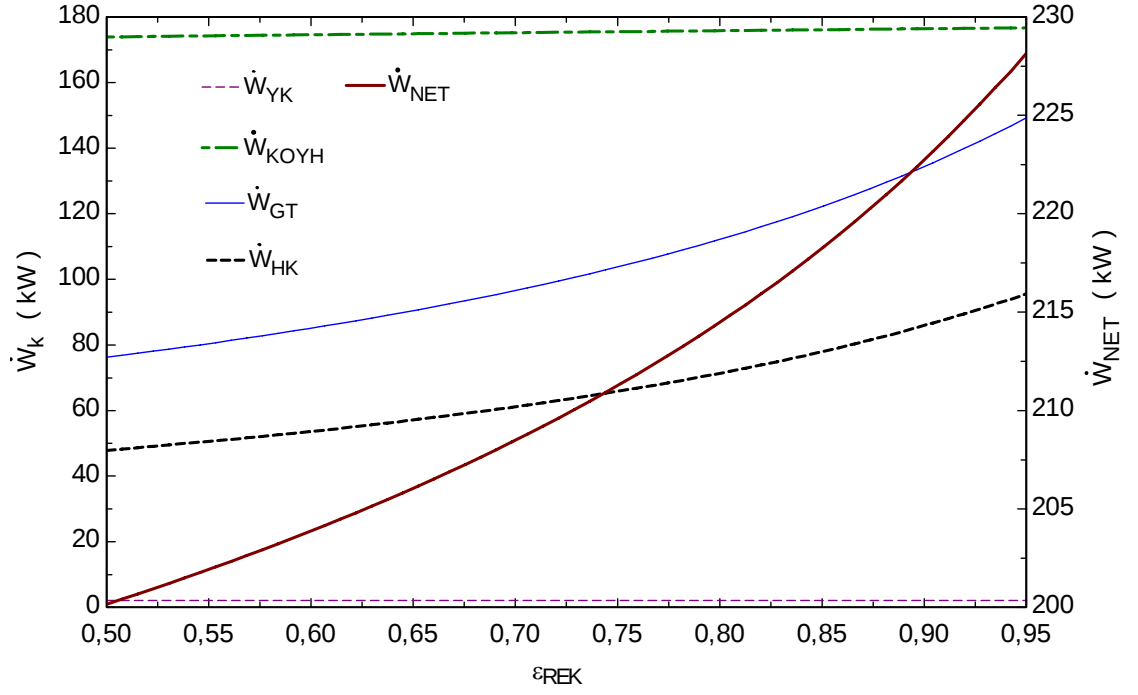
Şekil 6.22 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH-GT sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri

6.5.5 Reküperatör etkinlik katsayısının etkisi

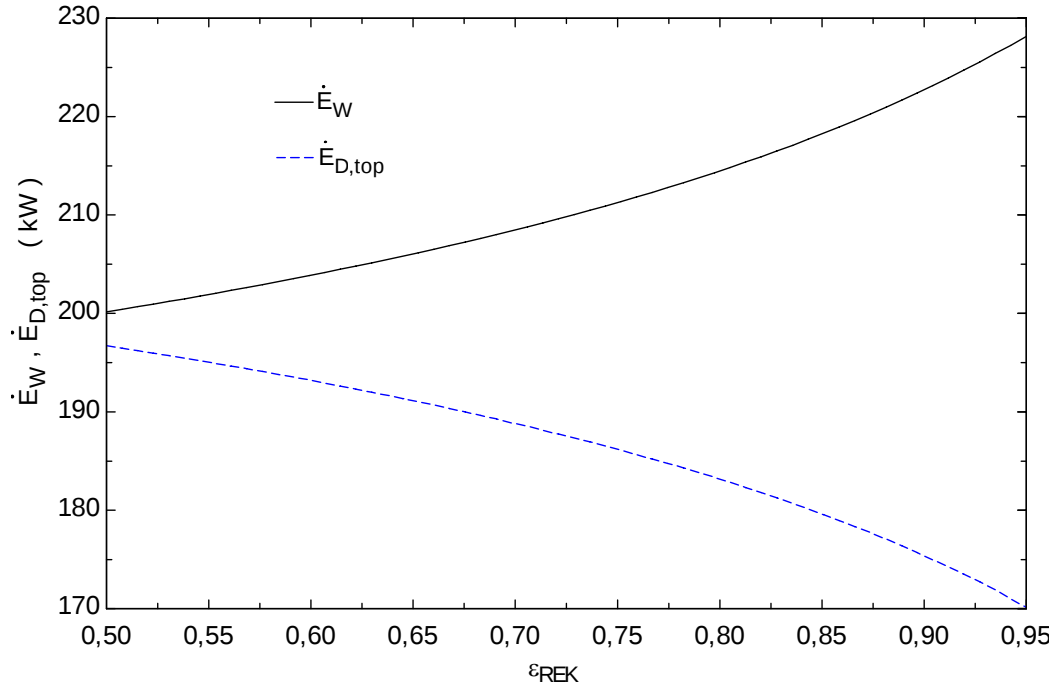
Şekil 6.23-6.27’de reküperatör etkinlik katsayısının KOYH-GT hibrit sistem performansına etkisi gösterilmiştir. Reküperatör etkinlik katsayısının 0.50’den 0.95’e çıkması durumunda I. Kanun verimi % 53.2’den %60.7’ye çıkarak % 14, ekserji verimi % 51’den % 58.2’ye çıkarak % 14 ve ekserjistik performans katsayısı ise 1.02’den 1.34’e çıkarak % 31.8’lik artış göstermiştir. Performans kriterlerindeki bu artışın en önemli nedeni Şekil 6.24’de görüldüğü gibi gaz türbininde üretilen gücün reküperatör etkinlik katsayısının artması ile artmasıdır. KOYH modülünde üretilen güç miktarında önemli bir değişiklik olmamasına rağmen net güç çıktısı incelenen aralıkta 200 kW’tan yaklaşık 230 kW’a çıkmaktadır. Şekil 6.25’de KOYH-GT hibrit sisteminde toplam ekserjisi çıktısı ve toplam ekserji kayıplarının reküperatör etkinlik katsayısı ile değişimi verilmiştir. Etkinlik katsayısının artışı ile toplam ekserji kaybı azalırken toplam ekserji çıktısının arttığı görülür. Bu sonuç, hem ekserji verimini hem de ekserjistik performans katsayısını artırmaktadır. Şekil 6.26’dan reküperatör etkinlik katsayısının artması ile egzoz gazlarının neden olduğu ekserji kaybının önemli ölçüde azaldığı gözlenmektedir. İncelenen reküperatör etkinlik katsayısı aralığında reküperatörün ekserji verimi % 70’den % 94’e çıkarak % 34.3’lük artış göstermektedir. Diğer komponentlerin ekserji verimlerinde önemli bir değişiklik olmamaktadır (Şekil 6.27).



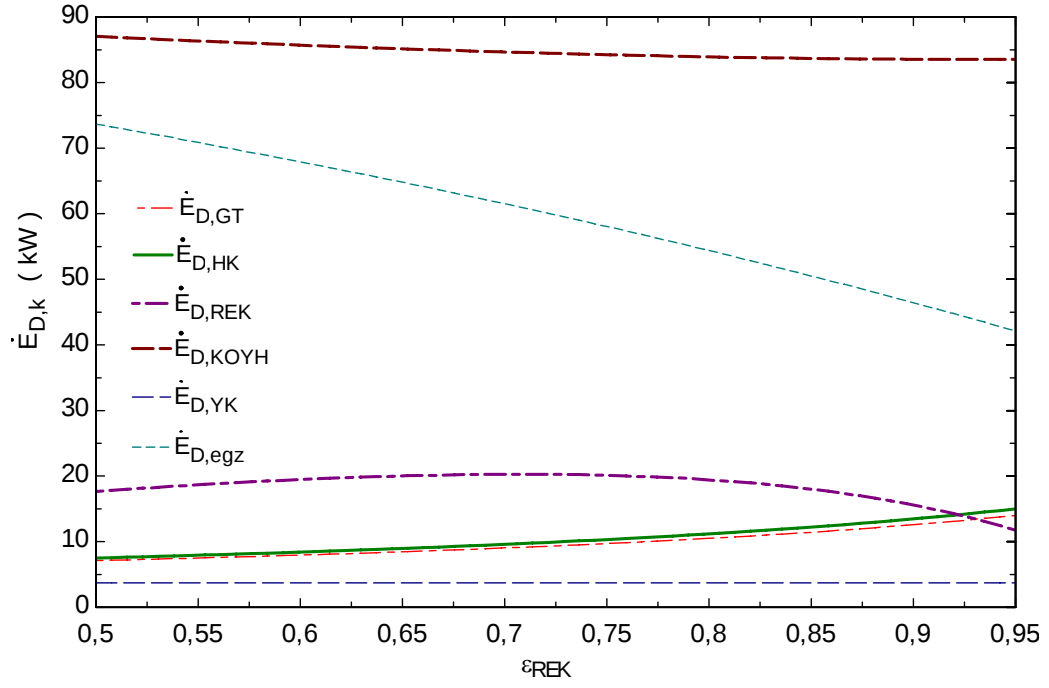
Şekil 6.23 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH-GT sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjistik performans katsayısı değişimleri



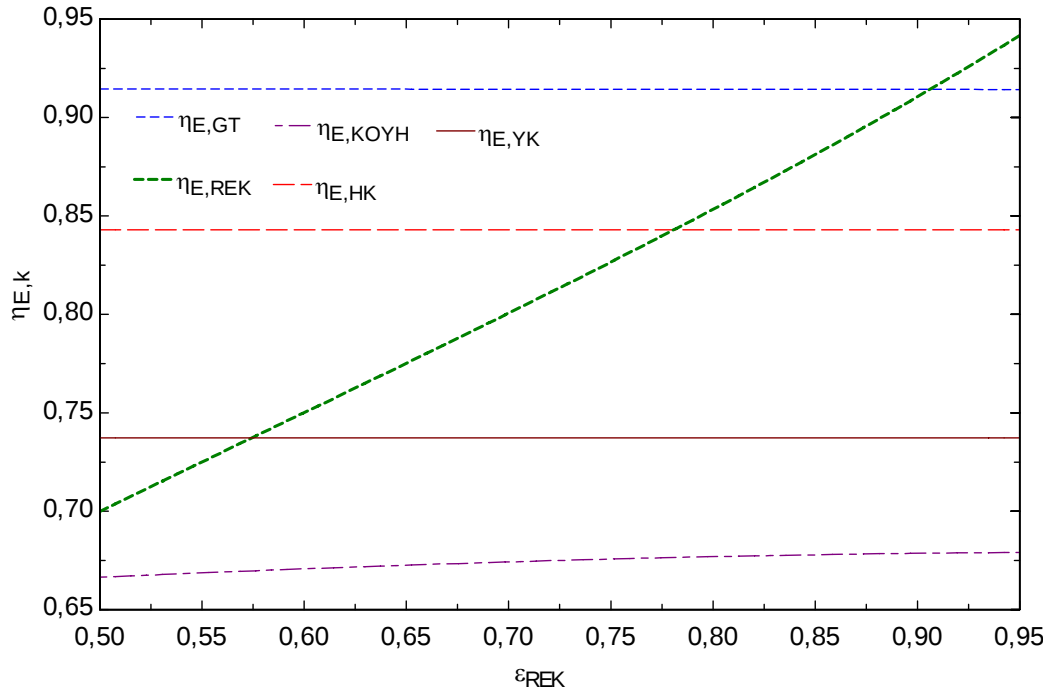
Şekil 6.24 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH-GT sisteminde ilgili komponentlerin güç üretimi, tüketimi ve net gücün değişimleri



Şekil 6.25 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH-GT sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri



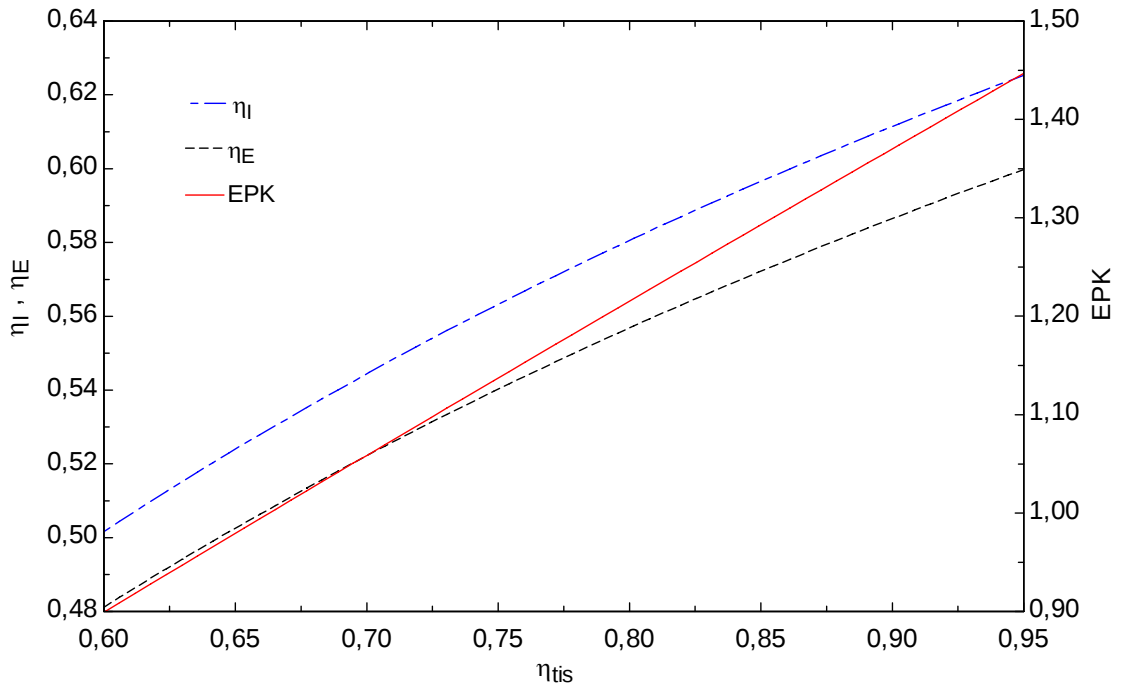
Şekil 6.26 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH-GT sistemin komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri



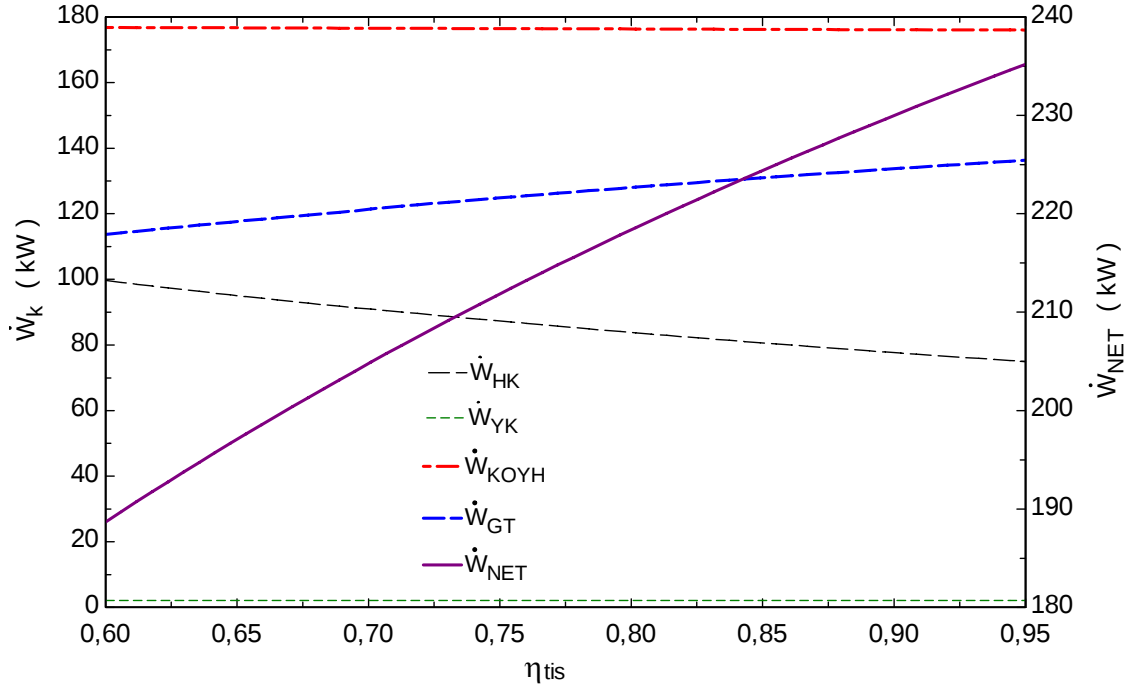
Şekil 6.27 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH-GT sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri

6.5.6 Gaz türbini izentropik veriminin etkisi

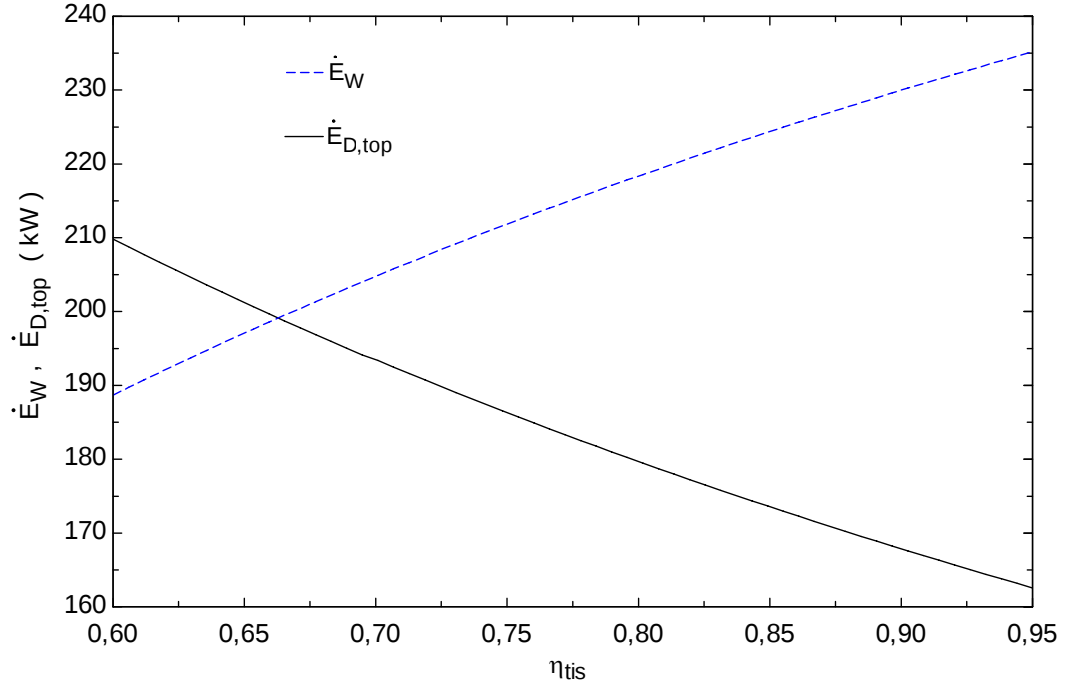
Şekil 6.28-6.32’de gaz türbini izentropik veriminin KOYH-GT hibrit sistem performansına etkileri verilmiştir. Gaz türbinin izentropik veriminin 0.60’dan 0.95’e çıkarılması ile I. Kanun verimi % 50.2’den % 62.5’e çıkarak % 24.5, ekserji verimi % 48’den % 60’a çıkarak % 25 ve ekserjistik performans katsayısı da 0.9’dan 1.45’e yükselerek % 61’lik bir artış sağlanmaktadır. Şekil 6.29’dan görüleceği üzere, türbin izentropik veriminin artması KOYH modülünden elde edilen güçte bir değişiklik oluşturmazken gaz türbininden elde edilen gücü artırmakta ve hava kompresöründe tüketilen gücü ise azaltmaktadır. Bu nedenle türbin izentropik veriminin artışı ile net güç çıktısı artmaktadır. Şekil 6.30’da izentropik verimin artışı ile toplam ekserji çıktısının arttığı ve buna karşın toplam ekserji kaybının azaldığı gözlenmektedir. Toplam ekserji kaybının azalmasında birinci derecede egzoz gazları, ikinci derecede gaz türbini ve daha sonra da reküperatör komponentindeki ekserji kaybındaki azalma etkili olduğu Şekil 6.31’den görülmektedir. İzentropik verim artışının sadece gaz türbini komponentinin ekserji verimini artırdığı (izentropik verimin 0.60’dan 0.90’a çıkması ile ekserji veriminde % 18.5 artış sağlanmaktadır) diğer komponentlerin ekserji verimine etki etmediği görülür (Şekil 6.32).



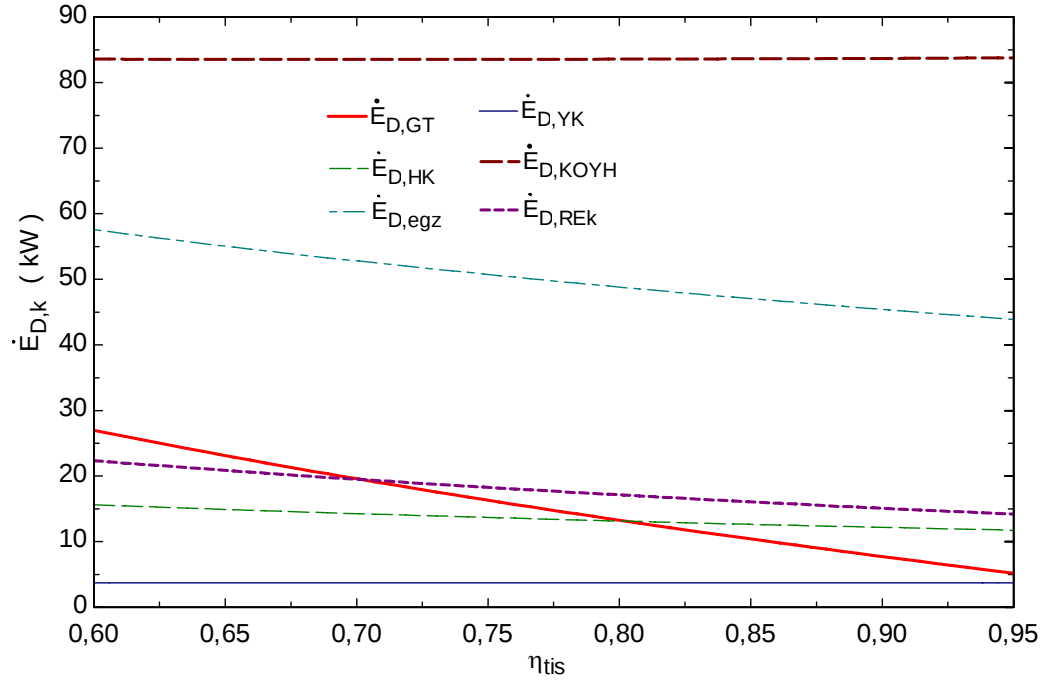
Şekil 6.28 Gaz türbini izentropik verimine göre KOYH-GT sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjistik performans katsayısı değişimleri



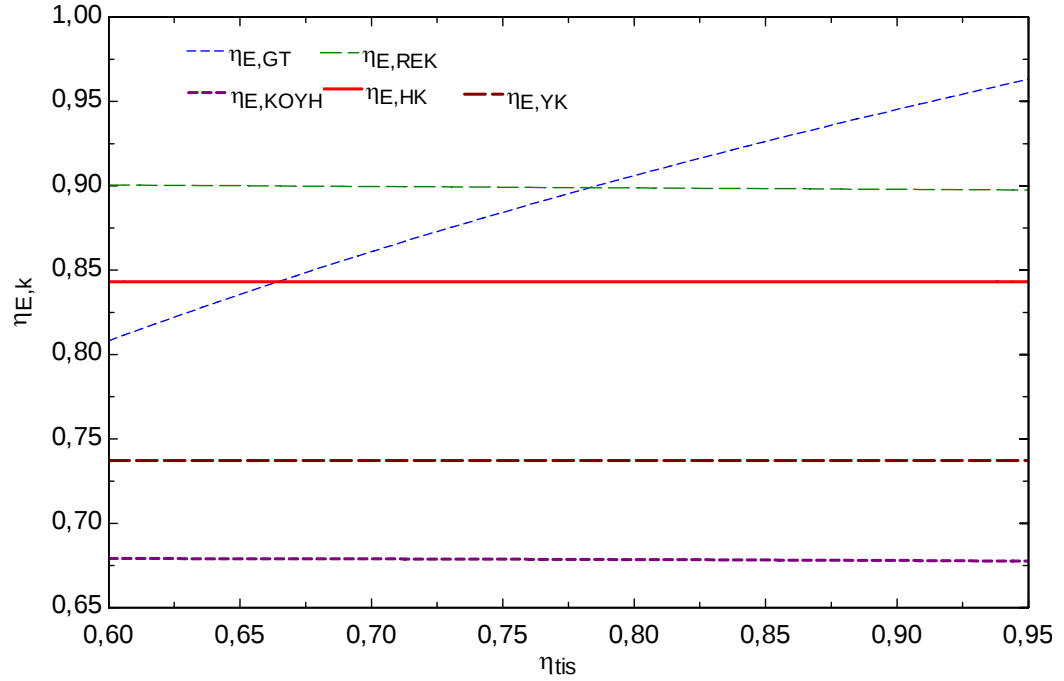
Şekil 6.29 Gaz türbini izentropik verimine göre KOYH-GT sisteminde ilgili komponentlerin güç üretimi, tüketimi ve net gücün değişimleri



Şekil 6.30 Gaz türbini izentropik verimine göre KOYH-GT sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri



Şekil 6.31 Gaz türbini izentropik verimine göre KOYH-GT sistemin komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri



Şekil 6.32 Gaz türbini izentropik verimine göre KOYH-GT sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri

7. KOYH-GT KOJENERASYON SİSTEMİNİN PERFORMANS ANALİZİ

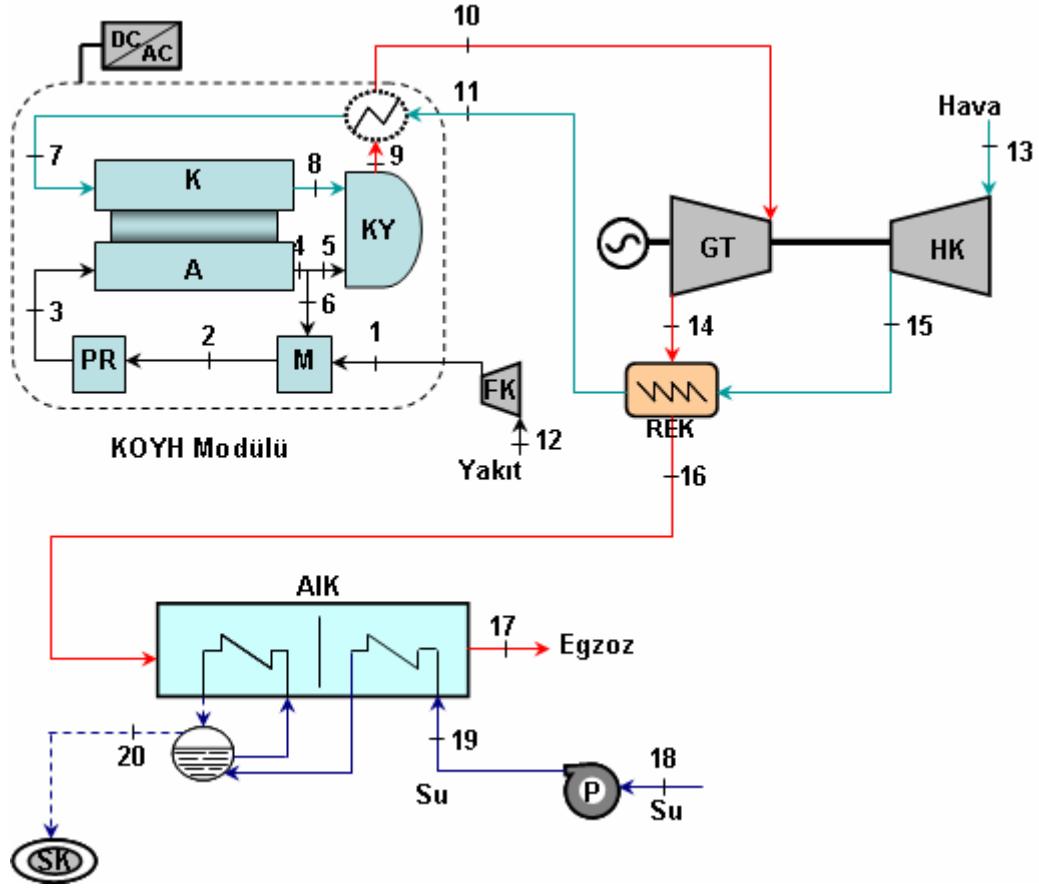
Literatürde KOYH-GT kojenerasyon sistemlerinin performanslarını detaylı olarak inceleyen çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Mevcut çalışmalarda KOYH-GT kojenerasyon sistemlerinin sürekli rejim modelleri kullanılarak elektriksel verimin % 60 toplam verimin ise % 80 olabileceğini göstermişlerdir (Palsson vd., 2000; Chan vd., 2002; Chan vd. 2003). Ancak elektrik ve ısı üretiminin toplamını enerji çıktısı olarak göz önüne alan toplam verim kojenerasyon sisteminin performansını tek başına değerlendirmede yetersizdir. Çünkü üretilen elektrik ve ısıнын toplamının yakıt yolu ile sisteme aktarılan ısı enerjisine oranı şeklinde tanımlanan toplam verim üretilen elektrik ve ısıнын kalitesini dikkate almamaktadır. Bu nedenle sistem performansını daha gerçekçi bir şekilde değerlendirebilmek için ekserjitik performansın dikkate alındığı toplam ekserji, ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı gibi kriterlere göre bir değerlendirme yapılması gereklidir.

Bu bölümde 6. bölümde geliştirilen KOYH-GT hibrit sistemine atık ısı kazanının entegrasyonu ile KOYH-GT kojenerasyon sistem modeli oluşturularak, sistemin enerjistik ve ekserjistik kriterlere dayalı performansı ve performans üzerinde dizayn ve işletme şartlarının etkileri incelenmiştir.

7.1 KOYH-GT Kojenerasyon Sistemin Modeli

Şekil 7.1 KOYH-GT kojenerasyon sisteminin şematik akış diyagramını göstermektedir. Bu sistemde reküperatörden çıkan gaz karışımının sahip olduğu enerji AIK’nda buhar üretmek için kullanılmaktadır.

Sistem komponentlerinin matematik modelleri önceki bölümlerde verilmiştir. Bu komponentlerin entegrasyonu ile oluşturulan KOYH-GT kojenerasyon sisteminin göz önüne alınan kriterlere dayalı performans analizi aşağıda sunulmuştur.



Şekil 7.1 KOYH-GT kojenerasyon sistemi

7.2 KOYH-GT Kojenerasyon Sistemi için Performans Kriterleri

KOYH-GT kojenerasyon sisteminin toplam ekserjisi Denklem 7.1’de verilmiştir.

$$\dot{E}_{\text{Top}} = \dot{W}_{\text{NET}} + (\dot{E}_{20} - \dot{E}_{19}) \quad (7.1)$$

Kojenerasyon sisteminin toplam ekserjisi elde edilen ürünlerin ekserjileri toplamı olarak Denklem 7.2’de gösterildiği gibi ifade edilebilir:

$$\dot{E}_{\text{Top}} = \dot{E}_W + \dot{E}_Q \quad (7.2)$$

burada, $\dot{E}_W$ sistemden elde edilen net elektriksel gücü, $\dot{E}_Q$ ise elde edilen ısıнын ekserji değerini göstermektedir. Denklem 7.3’de ise KOYH-GT kojenerasyon sisteminin ekserji verimi ifade edilmiştir:

$$\eta_E = \frac{\dot{E}_W + \dot{E}_Q}{\dot{E}_{12}} = \frac{\dot{E}_{Top}}{\dot{E}_{12}} \quad (7.3)$$

Toplam ekserji kaybı tüm komponentlerin ekserji kaybı ile egzoz gazların sahip olduğu ekserjinin toplamına eşittir ve Denklem 7.4'deki gibi yazılabilir:

$$\dot{E}_{D,Top} = \dot{E}_{D,KOYH} + \dot{E}_{D,GT} + \dot{E}_{D,REK} + \dot{E}_{D,HK} + \dot{E}_{D,YK} + \dot{E}_{D,AIK} + \dot{E}_{egz} \quad (7.4)$$

KOYH-GT kojenerasyon sisteminin ekserjitik performans katsayısı ise elde edilen toplam ekserji çıktısının toplam ekserji kaybına oranı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$EPK = \frac{\dot{E}_{Top}}{\dot{E}_{D,Top}} \quad (7.5)$$

7.3 Sistem Simülasyonu

KOYH-GT kojenerasyon sisteminin simülasyonu için kullanılan veriler 6. bölümde verilen Çizelge 6.1 ile aynı değerlerdir. Bu değerlere ilave olarak AIK için gerekli veriler bölüm 5'deki Çizelge 5.1'den alınmıştır.

Çizelge 7.1'de simülasyon sonucunda elde edilen performans sonuçları verilmiştir. Çizelge 7.2'de ise KOYH-GT kojenerasyon sisteminin akış noktalarındaki termodinamik özellikler gösterilmiştir. AIK komponentinden önceki noktaların değerinde bir değişme olmadığı için burada tekrarlanmamıştır.

Çizelge 7.1 KOYH-GT kojenerasyon sisteminin simülasyonu sonucunda elde edilen performans değerleri

Performans parametreleri	Değerler
Sistemin net güç çıkışı (kW)	220.80
Sistemin toplam ekserjisi (kW)	236.10
Sistem toplam ekserji kaybı (kW)	177.20
Sistemin ekserji verimi (%)	60.20
Sistemin ekserjitik performans katsayısı (-)	1.46

Çizelge 7.2 KOYH-GT kojenerasyon sistemi için her noktadaki termodinamik özellikler

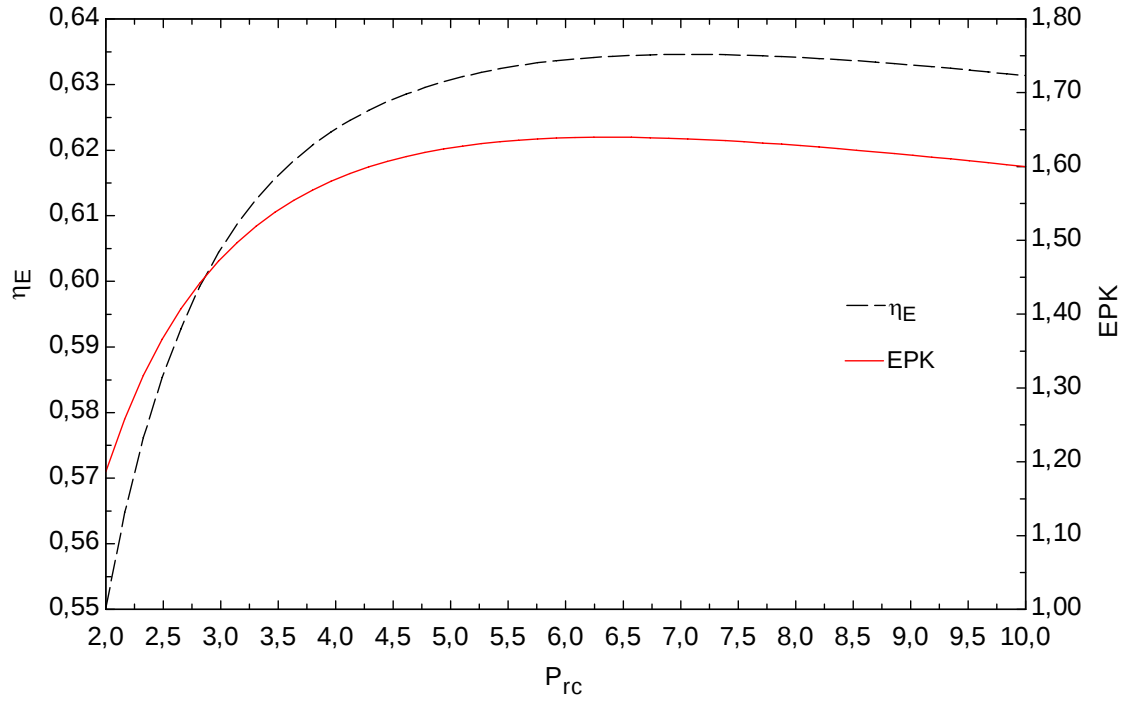
No	T (°C)	P (bar)	m (kg/s)	Eks (kW)	Molar oranlar (%)						
					CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
16	244.0	1.083	0.5905	48.1	-	0.01	2.19	0.02	4.38	16.17	77.25
17	174.2	1.029	0.5905	28.2	-	0.01	2.19	0.02	4.38	16.17	77.25
18	25.0	1.013	0.017	0.8	-	-	-	-	100	-	-
19	25.0	8.0	0.017	0.9	-	-	-	-	100	-	-
20	170.4	8.0	0.017	16.1	-	-	-	-	100	-	-

7.4 Performans Analiz Sonuçları

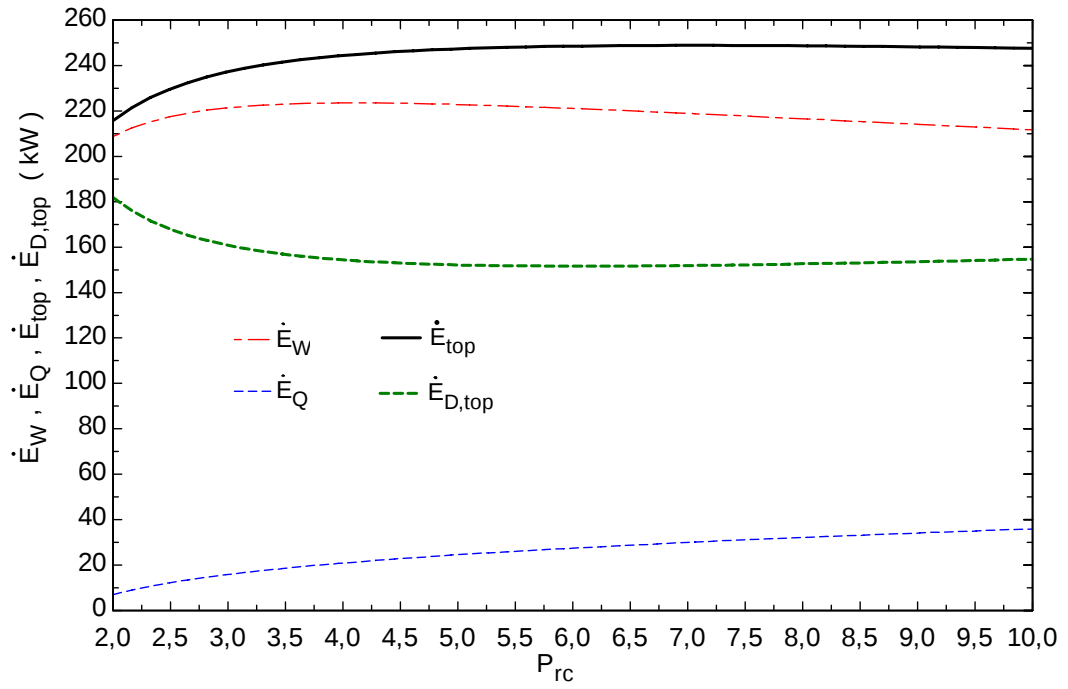
KOYH-GT kojenerasyon sisteminin analizinde, bir önceki bölümde incelenen parametrelere ilave olarak atık ısı kazanı komponentine ait minimum sıcaklık fark (DT_p) parametresi de göz önüne alınmıştır. Göz önüne alınan dizayn ve işletme parametrelerinin performans üzerindeki etkileri aşağıda incelenmiştir.

7.4.1 Kompresör basınç oranının etkisi

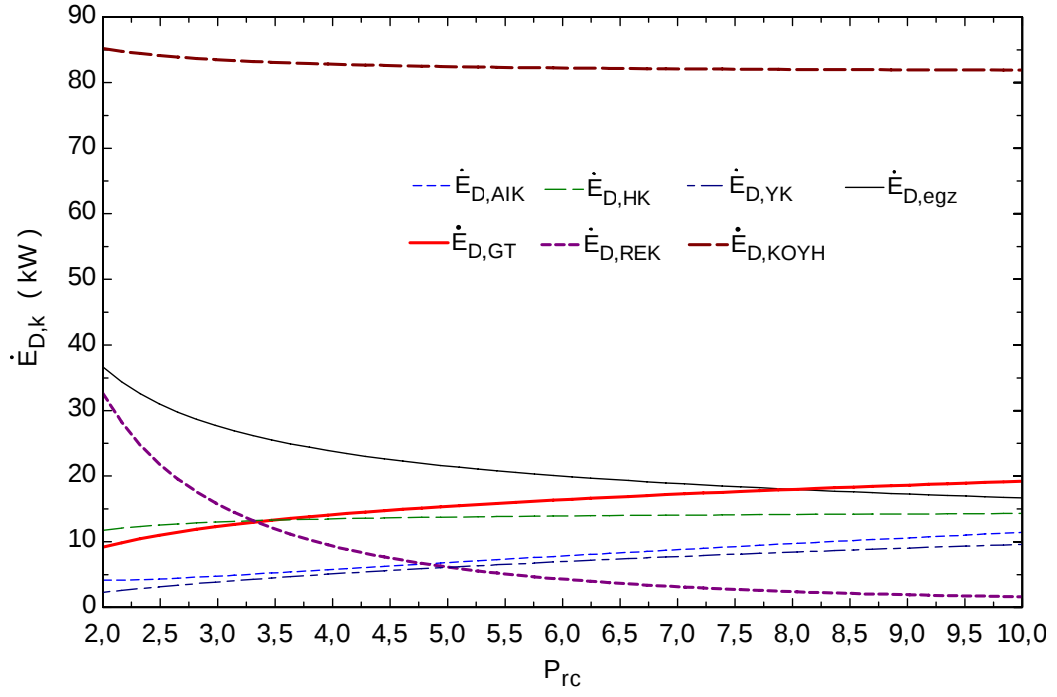
Şekil 7.2’de KOYH-GT kojenerasyon sisteminde ekserjitik performans katsayısı ve ekserji veriminin kompresör basınç oranı ile değişimi gösterilmiştir. Bu sonuçlar kojenerasyonsuz hibrit sistem için verilen sonuçlarla (Şekil 6.3) karşılaştırıldığında tüm basınç oranı değerlerinde KOYH-GT sistemine kojenerasyon uygulamasının ekserjitik performans katsayısında ve ekserji verimi değerlerinde önemli bir artış sağladığı görülür. Ayrıca, Şekil 7.2’den görüleceği üzere kojenerasyon sisteminin ekserji verimini ve ekserjitik performans katsayısını maksimum yapan kompresör basınç oranları farklıdır. Basınç oranı 7.1 olduğunda KOYH-GT kojenerasyon sisteminin ekserji verimi maksimum değere ulaşarak yaklaşık % 63.5 olmaktadır. Basınç oranının 6.4 değerinde ekserjitik performans katsayısı 1.64 değerine ulaşarak maksimum olmaktadır. Şekil 7.3, KOYH-GT kojenerasyon sisteminin toplam ekserji çıktısının ve toplam ekserji kaybının basınç oranı ile değişimini vermektedir. Basınç oranı 6.1 olduğu zaman toplam ekserji kaybı en düşük değeri olan 151.6 kW olurken, basınç oranı 7.1 olduğunda toplam ekserji en yüksek değerine ulaşarak 248.9 kW olarak gerçekleşmektedir. KOYH-GT kojenerasyon sistemini oluşturan her bir komponentteki ekserji kayıpları ve ekserji verimlerinin basınç oranlarıyla değişimi Şekil 7.4 ve Şekil 7.5’de verilmiştir.



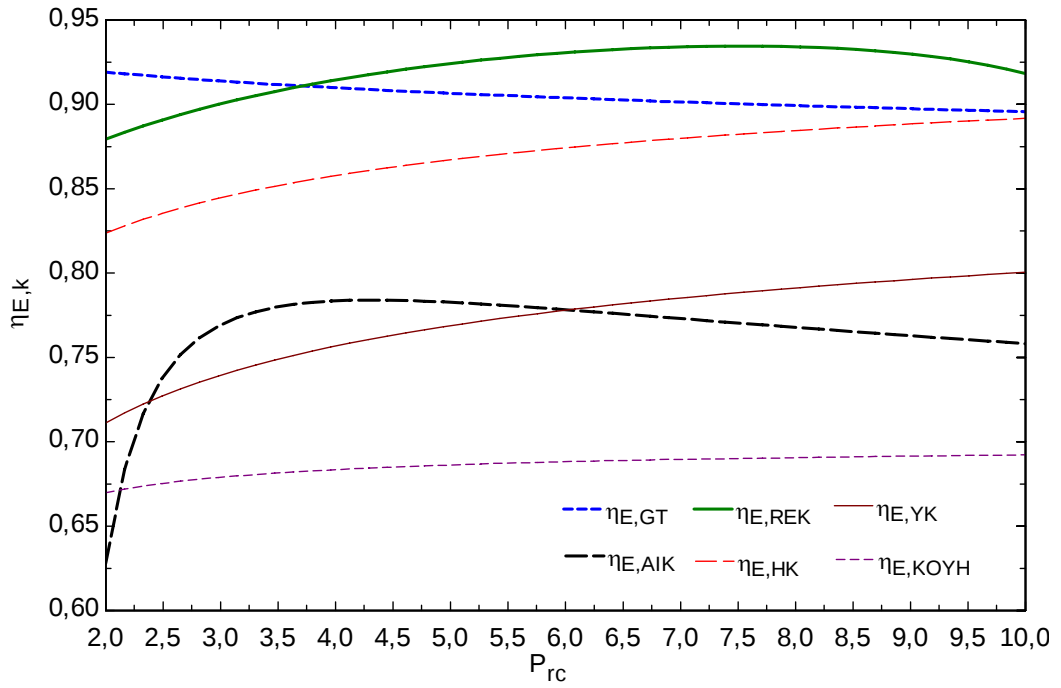
Şekil 7.2 Basınç oranına göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin EPK ve ekserji verimi değişimi



Şekil 7.3 Basınç oranına göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin toplam ekserji kaybı, toplam ekserji ve ürünlerin ekserji değişimleri



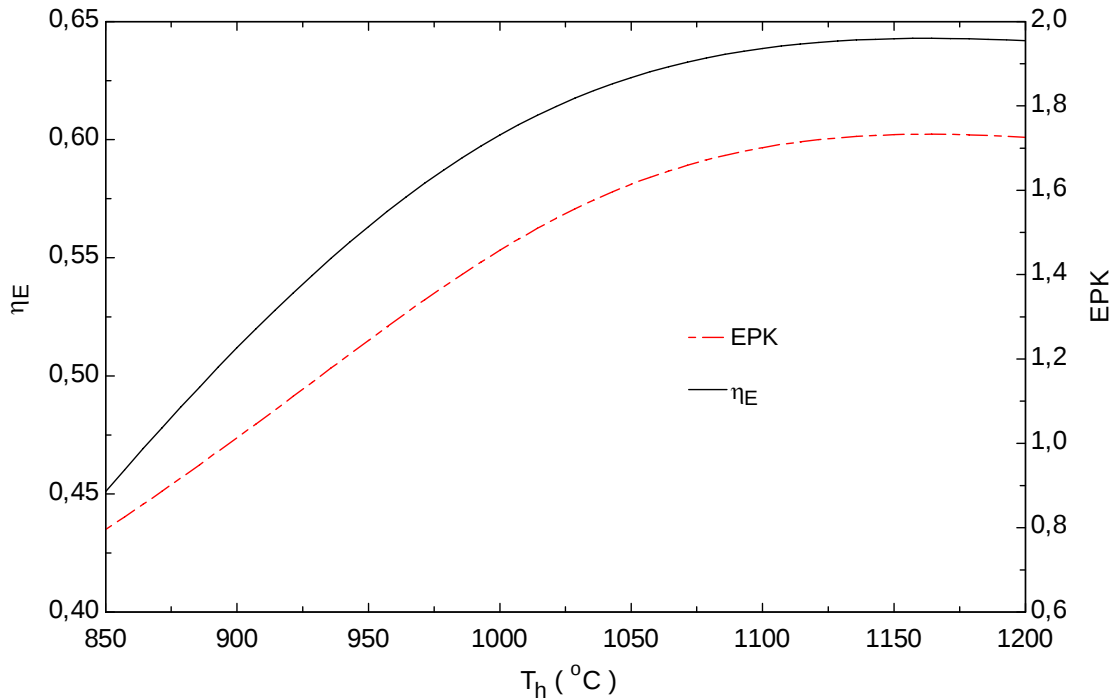
Şekil 7.4 Basınç oranına göre KOYH-GT kojenerasyon sistemine ait komponentlerdeki ekserji kaybı değişimleri



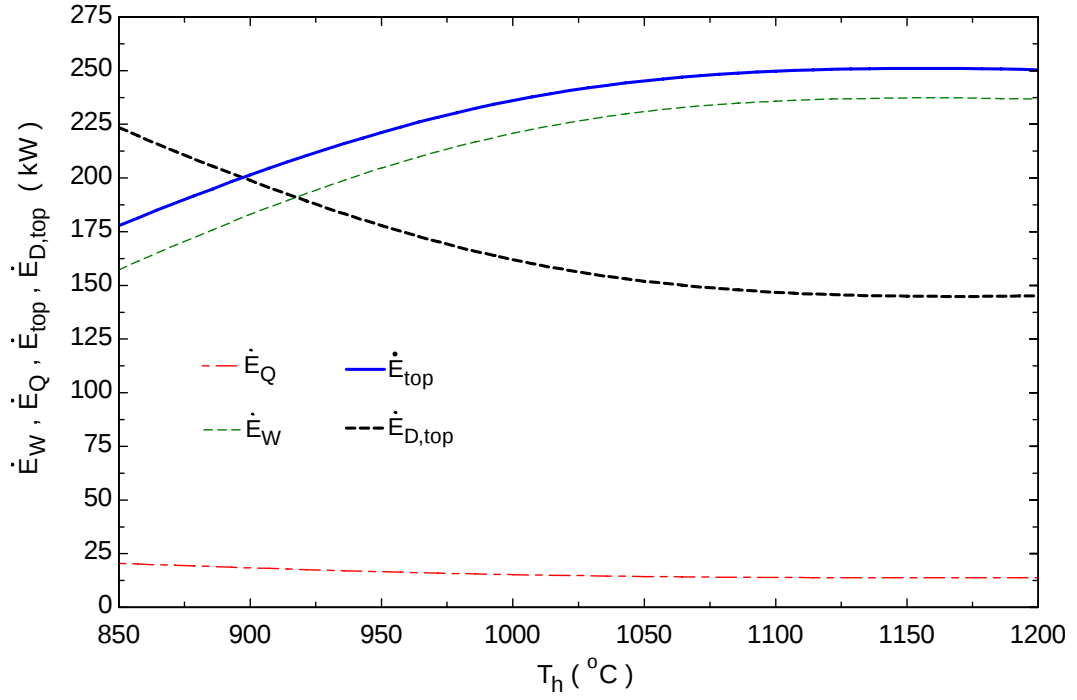
Şekil 7.5 Basınç oranına göre KOYH-GT'li kojenerasyon sistemine ait komponentlerin ekserji verimi değişimleri

7.4.2 Hücre işletme sıcaklığının etkisi

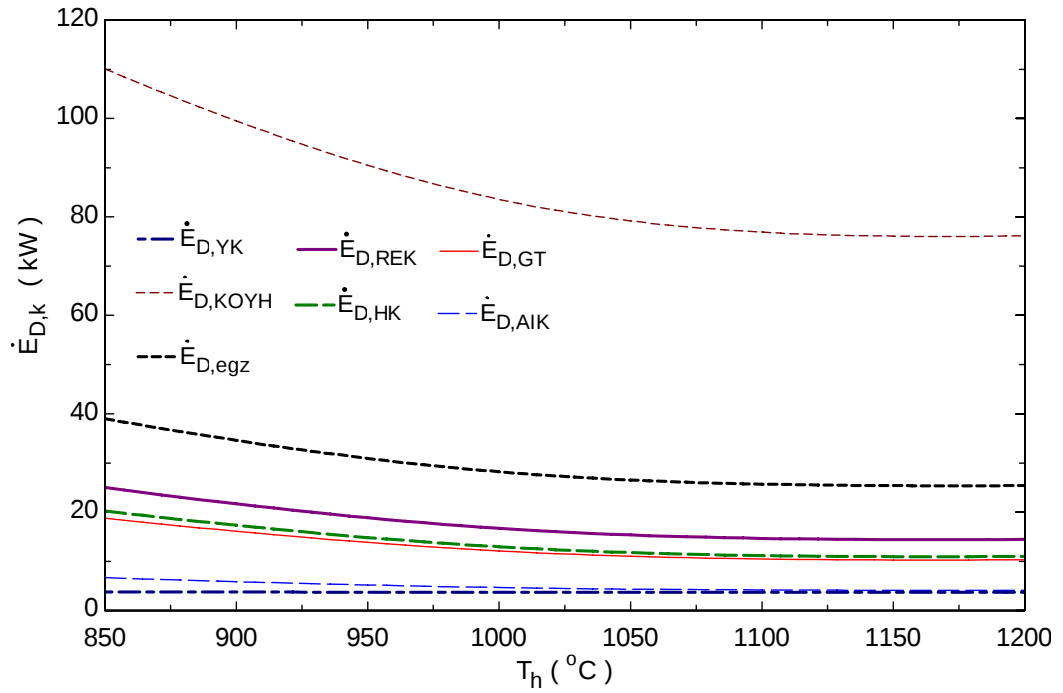
Hücre işletme sıcaklığının KOYH-GT kojenerasyon sisteminin performansına etkisi Şekil 7.6-7.9'da verilmiştir. Şekil 7.6'dan KOYH-GT kojenerasyon sisteminde ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısını maksimum yapan hücre işletme sıcaklığının kojenerasyonsuz sistem için verilen sonuçlarla (Şekil 6.8) aynı olduğu görülmektedir (1160 °C). Fakat, bu kriterlerin maksimum değerleri kojenerasyonsuz hibrit sistem için verilen sonuçlarla (Şekil 6.8) karşılaştırıldığında ekserji veriminde % 5.8 artışla % 64.3 ve ekserjitik performans katsayısında ise % 15.8 artışla 1.73'e ulaştığı görülmektedir. Şekil 7.7'den toplam ekserji çıktısı hücre işletme sıcaklığı ile artarken toplam ekserji kaybının azaldığı görülmektedir. Toplam ekserji ve toplam ekserji kaybı yaklaşık olarak yine 1160 °C'da maksimum ve minimumdan geçmektedir. Şekil 7.8'de KOYH-GT kojenerasyon sistem komponentlerinin ekserji kaybı değişimlerinin hücre işletme sıcaklığının artışı ile azalma eğilimi içinde oldukları izlenmektedir. Hücre işletme sıcaklığının değişiminden en çok etkilenen sistem komponentinin KOYH modülü olduğu Şekil 7.9'dan görülmektedir.



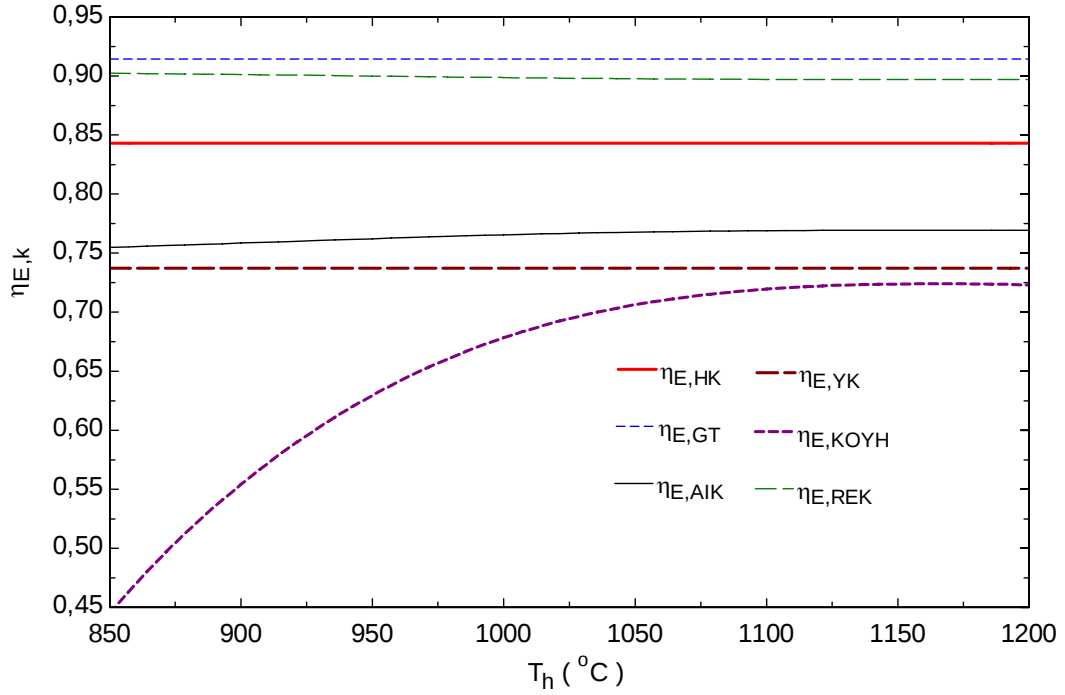
Şekil 7.6 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri



Şekil 7.7 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri



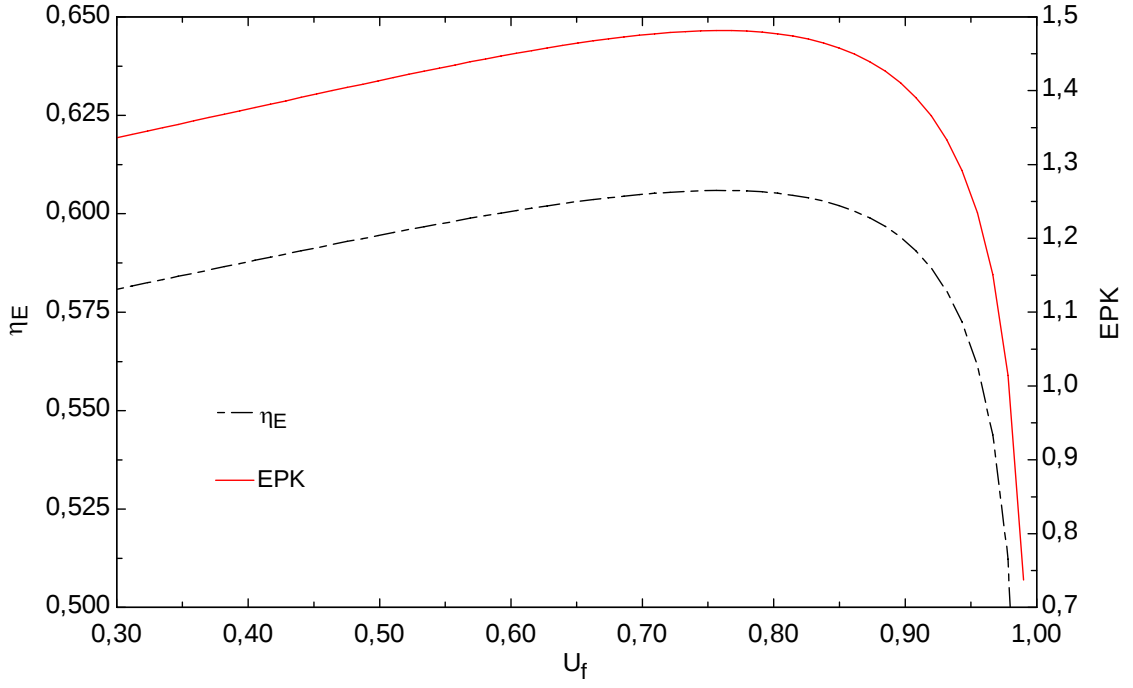
Şekil 7.8 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH-GT kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji kaybı değişimleri



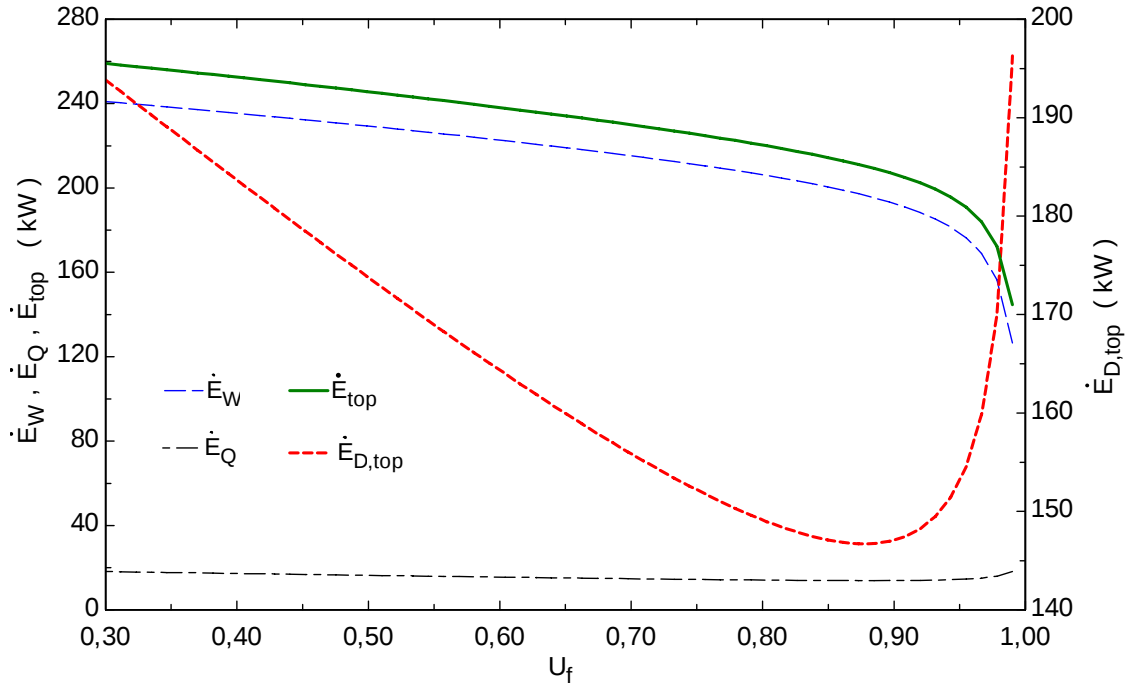
Şekil 7.9 Yakıt hücresi işletme sıcaklığına göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminde ilgili komponentlerin ekserji verim değişimleri

7.4.3 Yakıt kullanım faktörünün etkisi

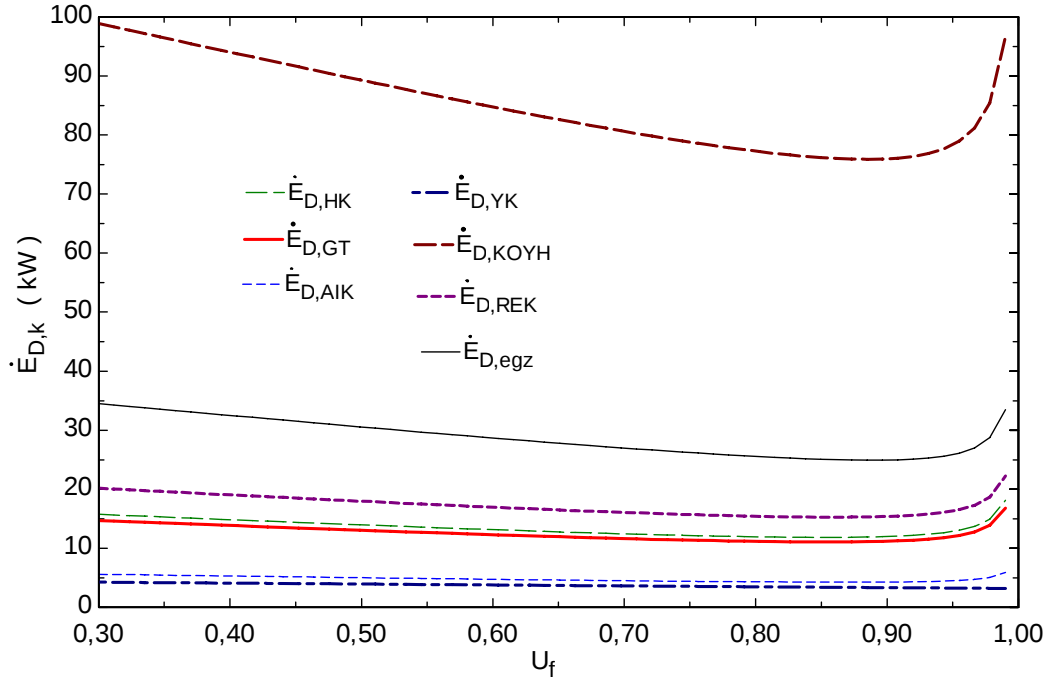
Şekil 7.10-7.13’de yakıt kullanım faktörünün KOYH-GT kojenerasyon sistem performansına etkileri verilmiştir. Şekil 7.10’da görüldüğü gibi ekserji verimini ve ekserjitik performans katsayısını maksimum yapan yakıt kullanım faktörünün 0.75 (kojenerasyonsuz sistemle aynı) olmaktadır. Bu şartlardaki maksimum ekserji veriminin % 60.6 (kojenerasyonsuz sisteme göre artış % 6.8), maksimum ekserjitik performans katsayısının ise 1.48 (kojenerasyonsuz sisteme göre artış % 16.9) olduğu görülür. Şekil 7.11’den toplam ekserji kaybının kojenerasyonsuz sistemde olduğu gibi yakıt kullanım faktörünün 0.88 değerinde minimumdan geçtiği anlaşılmaktadır. Şekil 7.12 yakıt kullanım faktörünün değişimiyle KOYH-GT kojenerasyon sistem komponentlerindeki ekserji kaybı değişimi gösterilmektedir. İncelenen yakıt kullanım faktörü aralığında en fazla ekserji kaybı KOYH modülünde, sonra egzoz gazlarında, daha sonra da reküperatörde meydana gelmektedir. Şekil 7.13, KOYH modülü dışındaki komponentlerin ekserji verimleri yakıt kullanım faktörünün değişiminden önemli ölçüde etkilenmediğini göstermektedir.



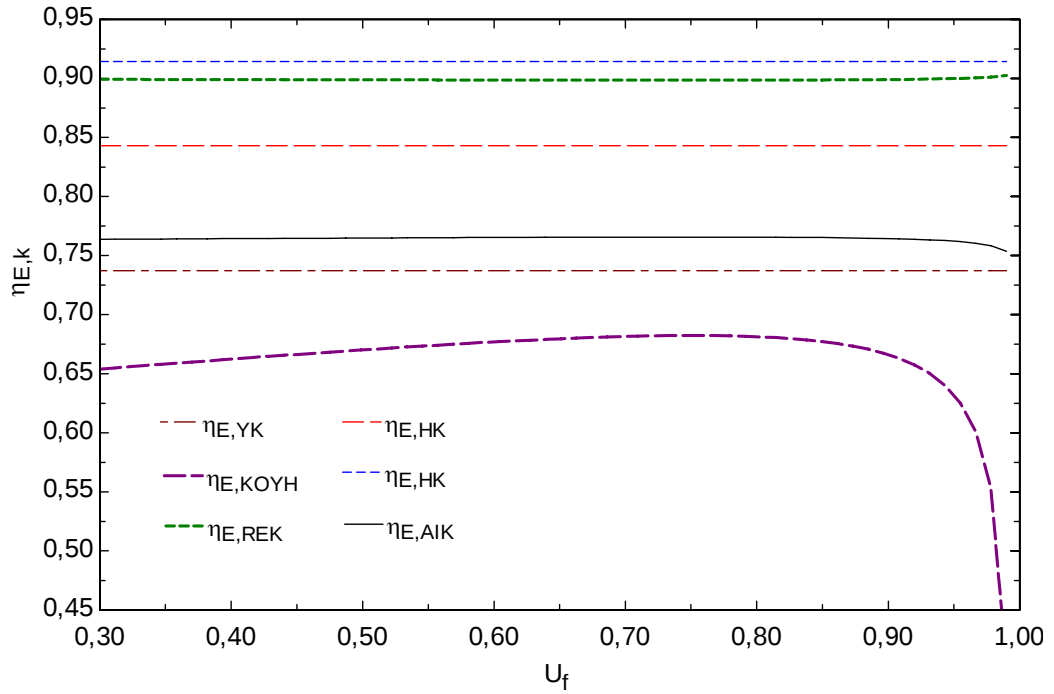
Şekil 7.10 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri



Şekil 7.11 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri



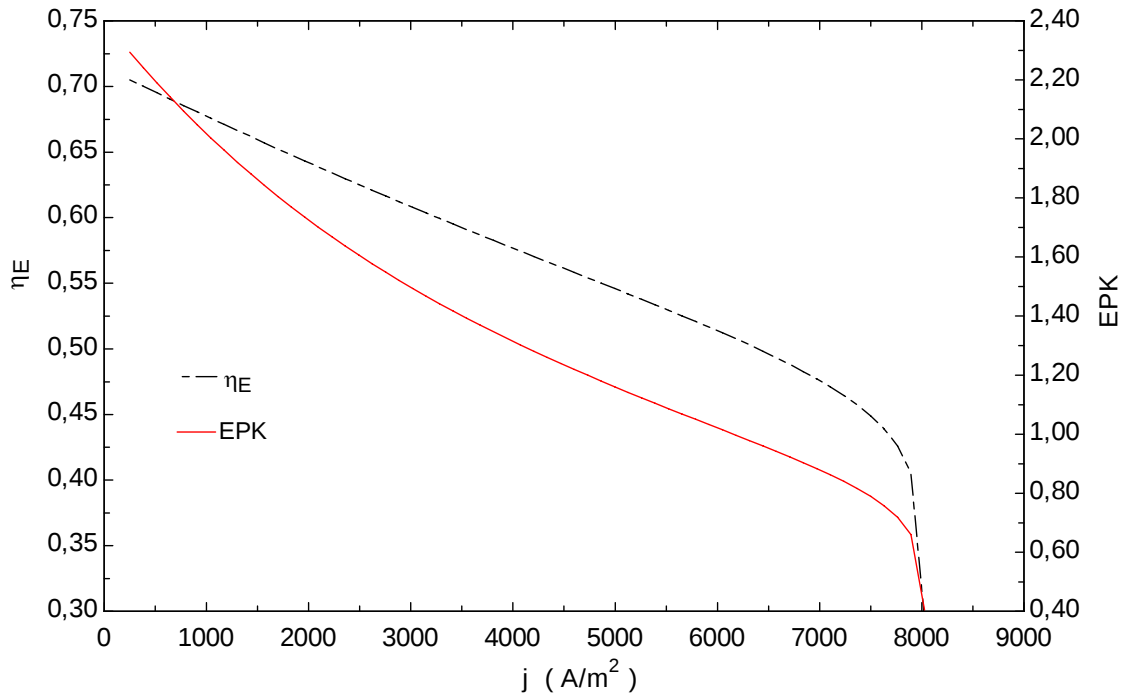
Şekil 7.12 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH-GT kojenerasyon sistem komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri



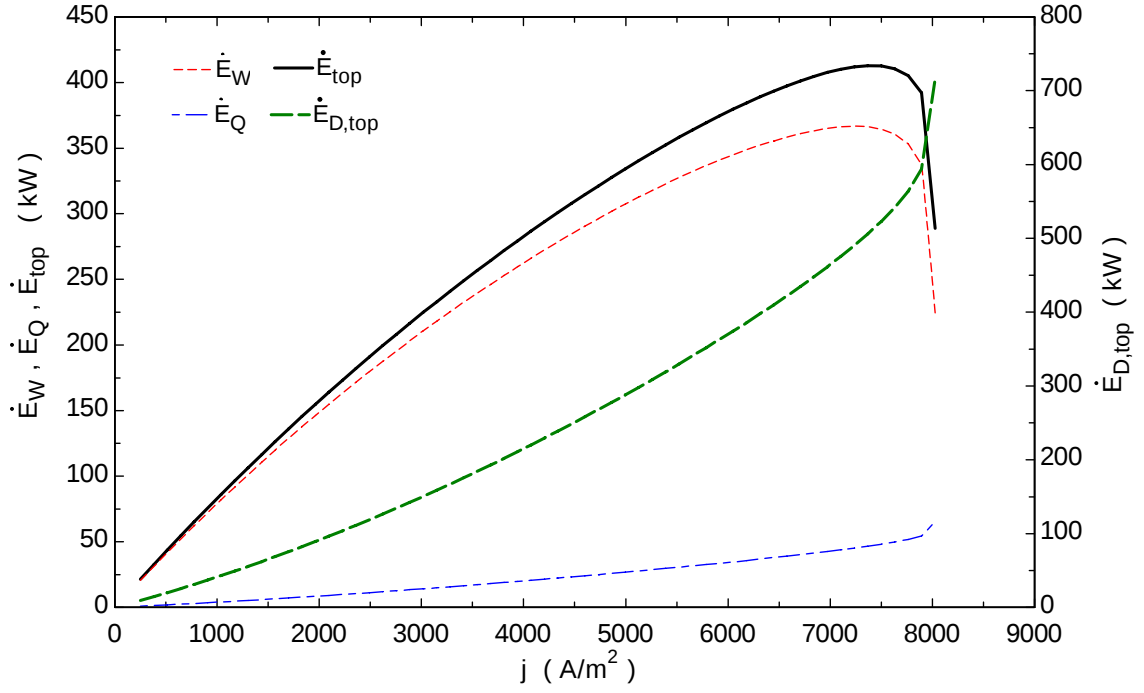
Şekil 7.13 Yakıt kullanım faktörüne göre KOYH-GT kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri

7.4.4 Akım yoğunluğunun etkisi

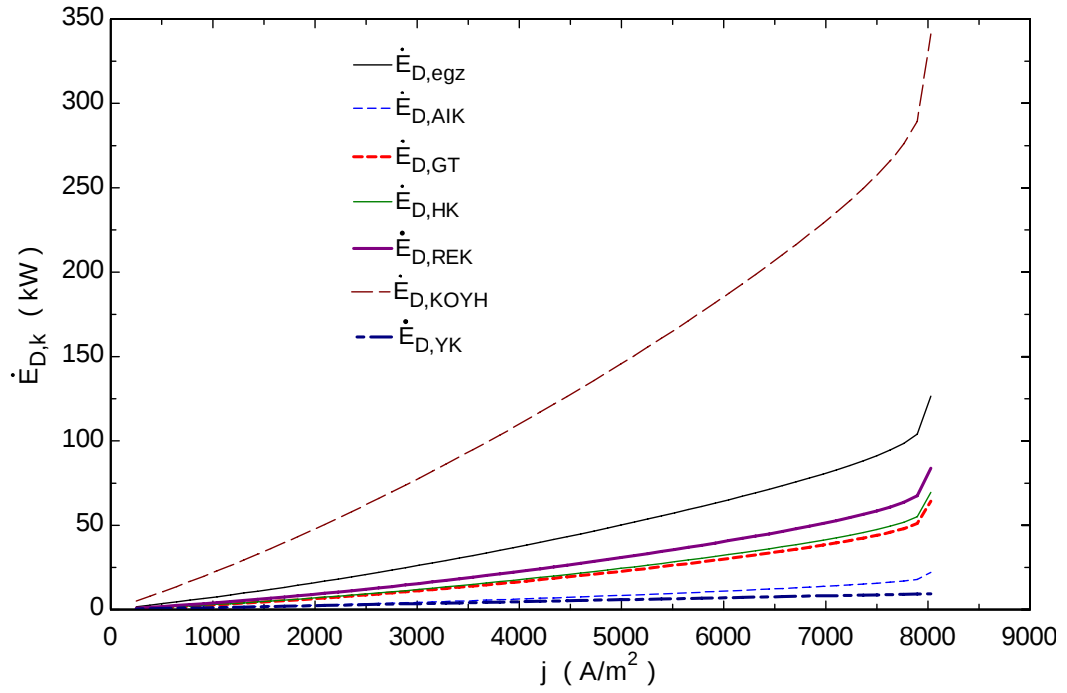
Akım yoğunluğunun KOYH-GT kojenerasyon sisteminin performansına etkisi Şekil 7.14-7.17’de verilmiştir. İncelenen akım yoğunluğu aralığında, ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı kriterlerinin genel karakteristiğinde kojenerasyonsuz sisteme göre bir değişiklik olmamasına rağmen, değerleri artmıştır (Şekil 7.14). Örnek olarak, 4000 A/m² akım yoğunluğu için kojenerasyonsuz sisteme göre ekserji verimi % 7.7 artarak %57.5 olurken, ekserjitik performans katsayısı ise % 17.8 artış göstererek 1.3 değerine ulaşmaktadır. Şekil 7.15, akım yoğunluğuna göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin elektrik ve ısı ekserjileri ile toplam ekserji çıktısı ve toplam ekserji kaybının değişimlerini göstermektedir. Sonuçlar, KOYH-GT kojenerasyon sisteminin maksimum toplam ekserji çıktısının kojenerasyonsuz sisteme göre % 14 daha fazla olduğunu gösterir. Fakat toplam ekserjinin maksimum olduğu akım yoğunluğunun değeri değişmemektedir. Şekil 7.16’dan görüleceği üzere komponentlerdeki ekserji kaybı artan akım yoğunluğu ile artmaktadır. Akım yoğunluğundaki değişim KOYH modülünün ekserji verimini önemli ölçüde etkilerken diğer komponentlerin ekserji verimleri üzerindeki etkisi önemsizdir (Şekil 7.17).



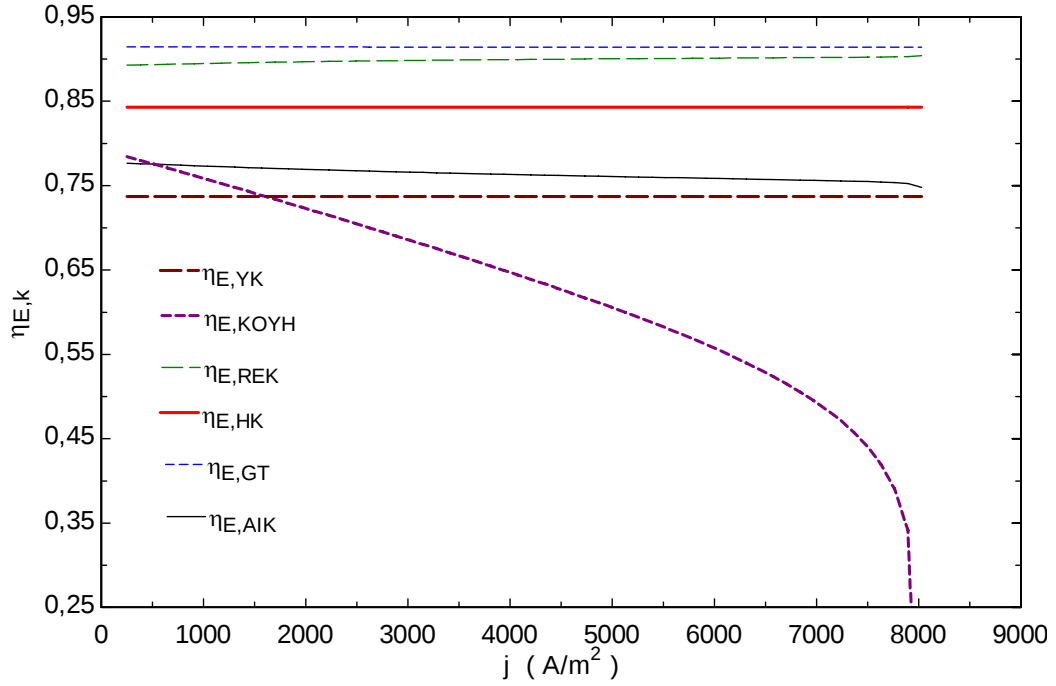
Şekil 7.14 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin ekserji verimi, ekserjitik performans katsayısı değişimleri



Şekil 7.15 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri



Şekil 7.16 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH-GT kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji kaybı değişimleri



Şekil 7.17 Ortalama akım yoğunluğuna göre KOYH-GT kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri

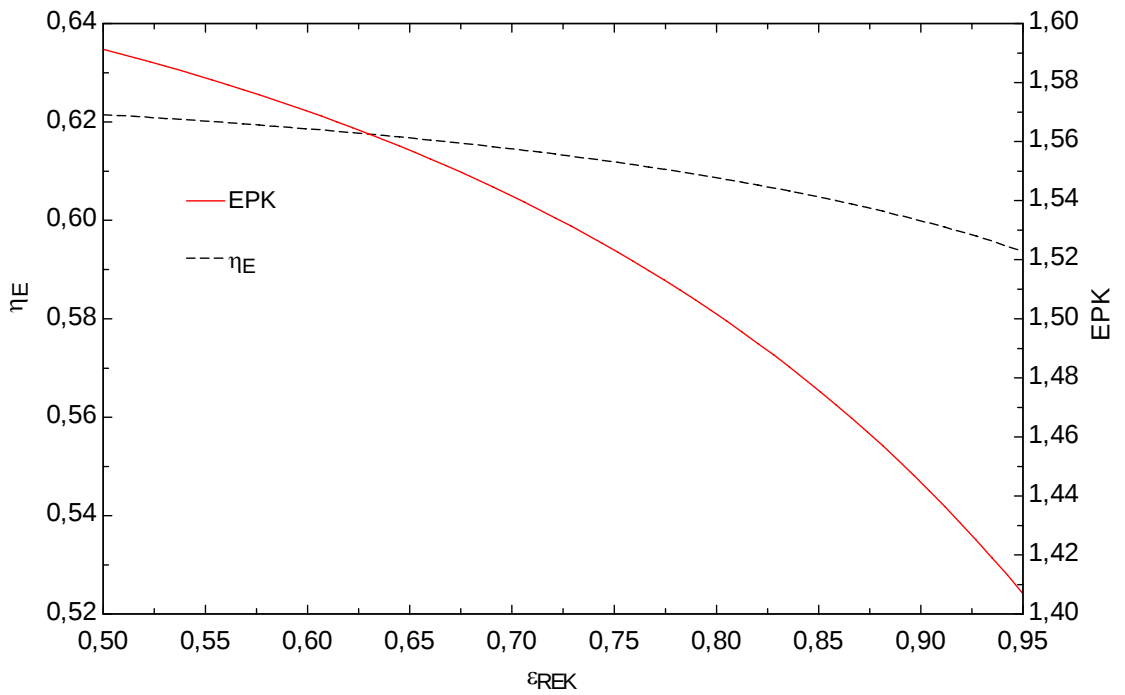
7.4.5 Reküperatör etkinlik katsayısının etkisi

Şekil 7.18'den hem ekserji veriminin hem de ekserjitik performans katsayısının reküperatör etkinliğinin incelenen aralığında azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Reküperatör etkinlik katsayısının 0.50'den 0.95'e değişmesi durumunda, ekserji verimi % 62.2'den % 59.4'e düşerek % 4.5 azalırken ekserjitik performans katsayısı 1.59'dan 1.41'e düşerek % 11.4 azalmaktadır. Fakat KOYH-GT kojenerasyon sistemi ile kojenerasyonsuz KOYH-GT sistem karşılaştırıldığında, KOYH-GT kojenerasyon sisteminin tüm reküperatör etkinlik değerlerinde göz önüne alınan kriterler yönünden daha yüksek performansa sahip olduğu görülür. Örneğin, reküperatör etkinlik katsayısının 0.65 değerinde kojenerasyonsuz sisteminin ekserji verimi % 52.6 olurken kojenerasyonlu sistemde % 17.3 artış ile % 61.7 olmaktadır (Şekil 6.23 ve Şekil 7.18). Benzer şekilde kojenerasyonlu sistemin ekserjitik performans katsayısı da aynı reküperatör etkinlik değerinde kojenerasyonsuz sistemin ekserjitik performans katsayısından (1.08) % 44.4 daha fazla gerçekleşerek 1.56 olmaktadır (Şekil 6.23 ve Şekil 7.18).

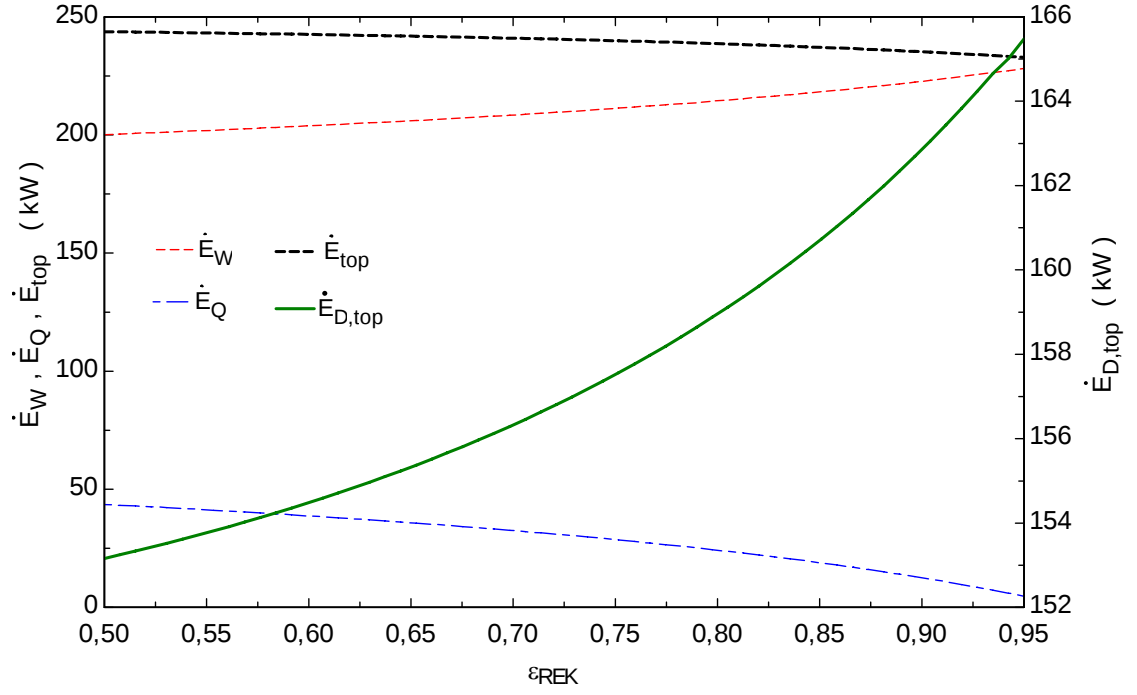
Şekil 7.19'da üretilen elektriğin ekserjisi reküperatör etkinlik katsayısı ile artarken, elde

edilen ısınnın ekserji değeri azalmaktadır. Isının ekserji değeriindeki bu azalma, elektriğin ekserji değeriindeki artıştan daha fazla olduğundan toplam ekserjinin azaldığı görülmektedir.

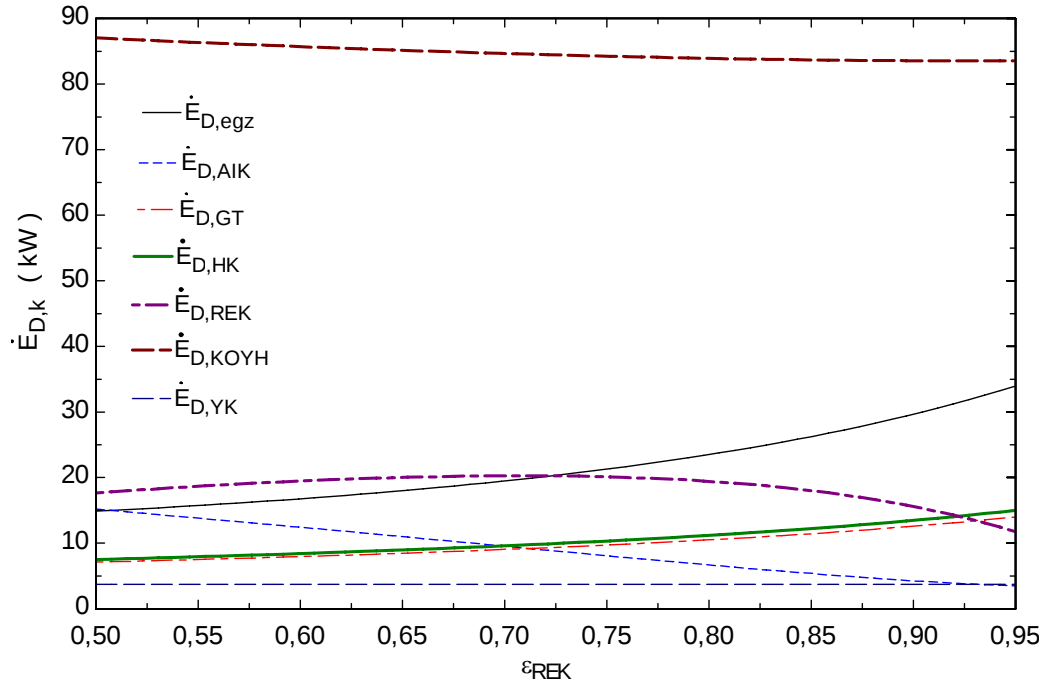
Şekil 7.20 ve Şekil 7.21’de sistemi oluşturan komponentlerin ekserji kayıpları ve ekserji verimleri görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, kojenerasyon uygulamasına geçiş ile sistemden çevreye bırakılan egzoz gazları nedeniyle oluşan ekserji kaybının önemli ölçüde azaldığı görülür. Ayrıca, AIK’nın ekserji verimini maksimum yapan bir reküperatör etkinlik katsayısının olduğu gözlenmektedir ve bu değer yaklaşık olarak 0.80’dir.



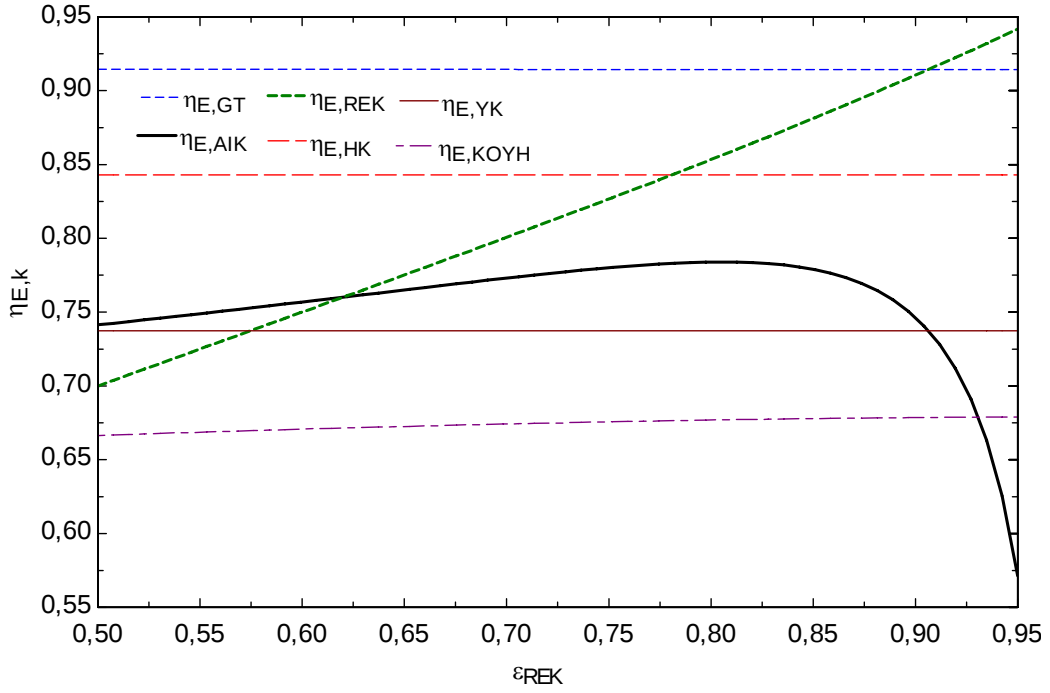
Şekil 7.18 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri



Şekil 7.19 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri



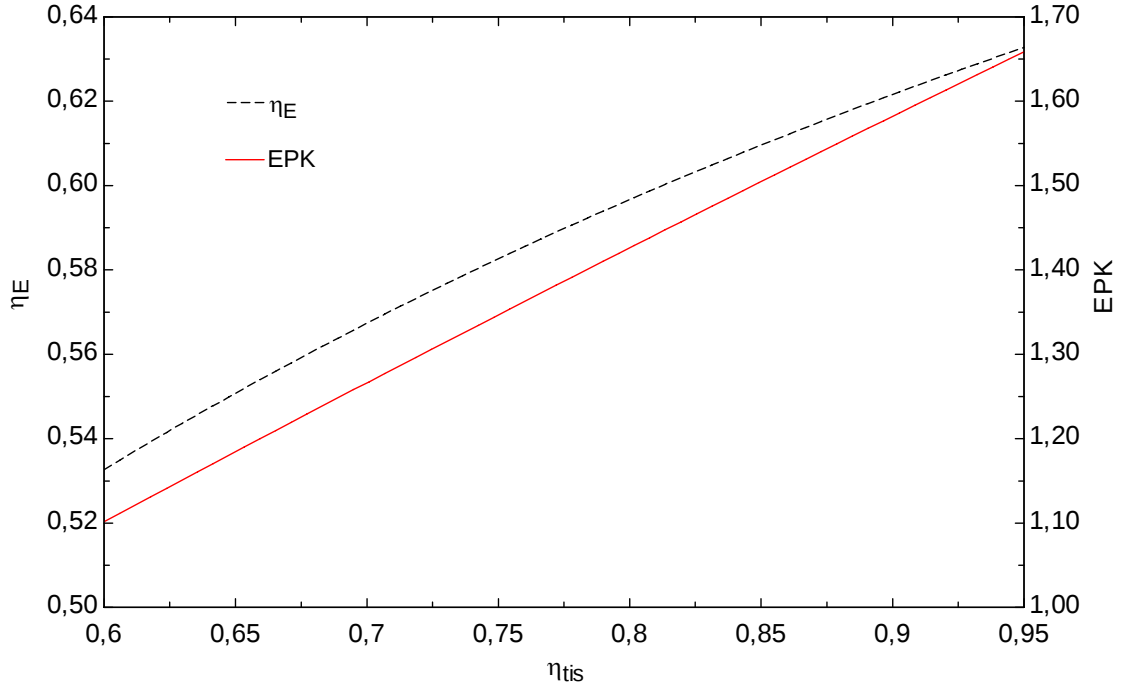
Şekil 7.20 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH-GT kojenerasyon sistemin komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri



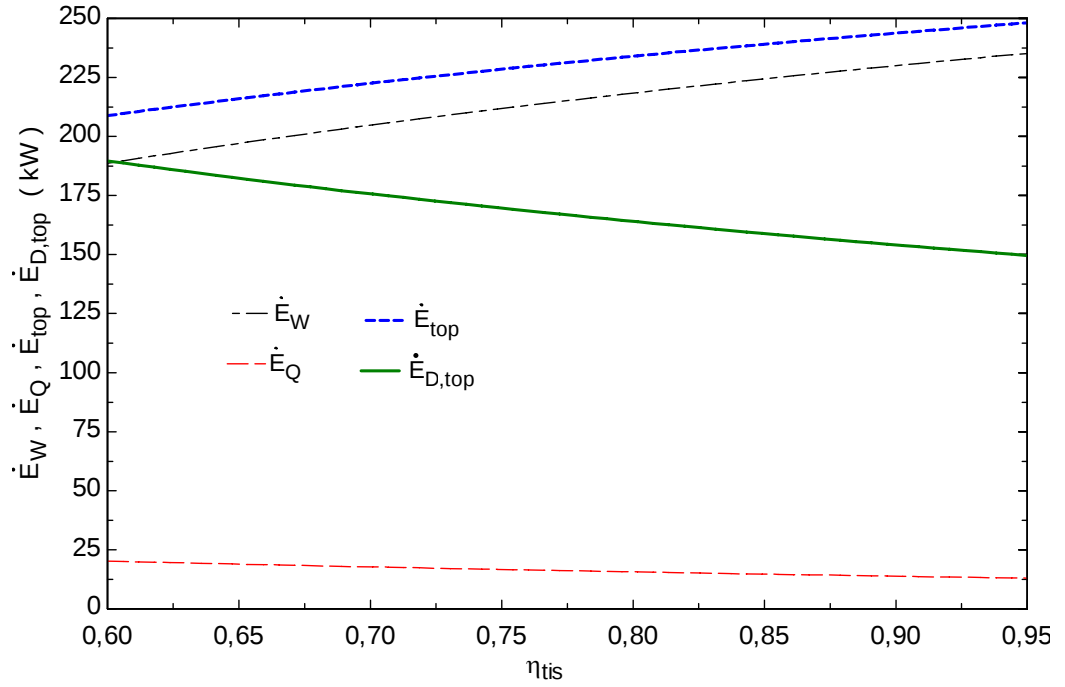
Şekil 7.21 Reküperatör etkinlik katsayısına göre KOYH-GT kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri

7.4.6 Gaz türbini izentropik veriminin etkisi

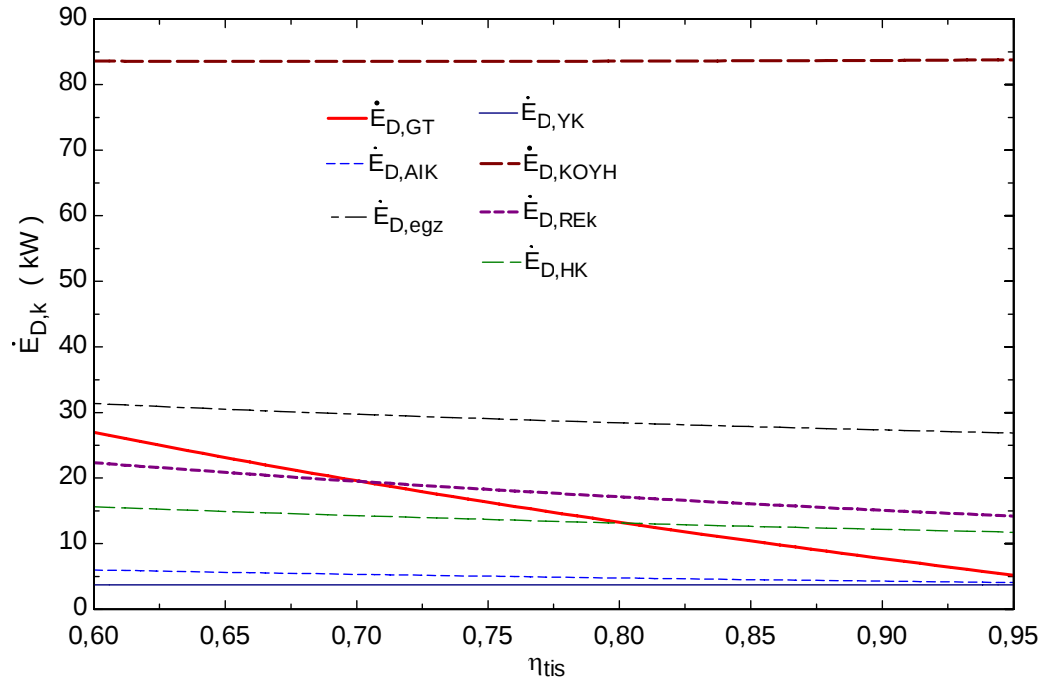
Gaz türbini izentropik veriminin KOYH-GT kojenerasyon sistem performansına etkisi Şekil 7.22-7.25’de gösterilmiştir. Ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı kojenerasyonsuz sistemde olduğu gibi gaz türbini izentropik veriminin artmasıyla artış gösterdiği Şekil 7.22’den görülmektedir. Fakat KOYH-GT kojenerasyon sistemi ile kojenerasyonsuz KOYH-GT sistem karşılaştırıldığında, tüm türbin izentropik verim değerlerinde KOYH-GT kojenerasyon sisteminin göz önüne alınan kriterler yönünden daha yüksek performansa sahip olduğu görülür. Örnek olarak, izentropik verimin 0.80 değerinde, kojenerasyonlu sistemin ekserji verimi (% 59.7) kojenerasyonsuz sisteme göre % 7.1 ve ekserjitik performans katsayısı (1.43) ise % 17.3 daha fazladır. Şekil 7.23’de artan izentropik verim ile elde edilen ısıнын ekserjisinin çok azda olsa azaldığı fakat buna karşın elektrik çıktısının ekserji değeri daha çok arttığı için toplam ekserjinin arttığı görülmektedir. Toplam ekserji kaybının da artan izentropik verim ile azaldığı gözlenmektedir. Toplam ekserji kaybının azalmasında en önemli faktörün gaz türbinindeki ekserji kaybının azalması olduğu Şekil 7.24’de görülmektedir. Bunun dışında egzoz gazlarındaki ve reküperatördeki ekserji kaybındaki azalışın da önemli bir katkısı vardır. İzentropik verimin artması ile gaz türbinin ekserji verimi artarken diğer komponentlerin ekserji verimlerinde önemli değişiklikler olmamaktadır (Şekil 7.25).



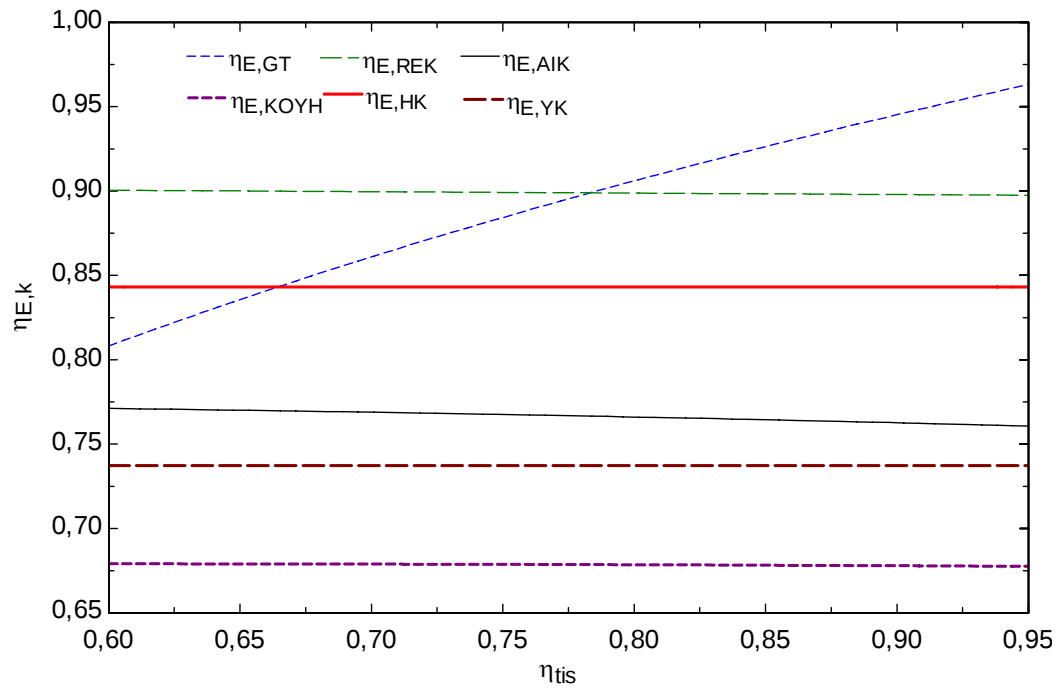
Şekil 7.22 Gaz türbini izentropik verimine göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin ekserji verimi, I. Kanun verimi ve ekserjitik performans katsayısı değişimleri



Şekil 7.23 Gaz türbini izentropik verimine göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri ve toplam ekserji kaybı değişimleri



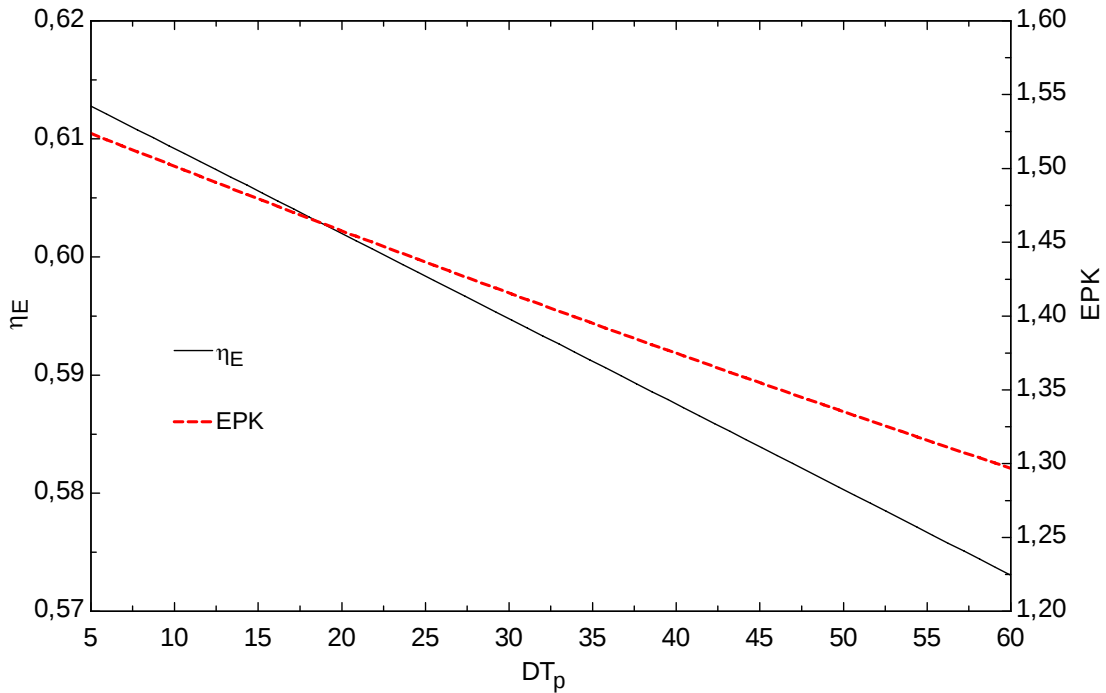
Şekil 7.24 Gaz türbini izentropik verimine göre KOYH-GT kojenerasyon sistemin komponentlerindeki ekserji kaybı değişimleri



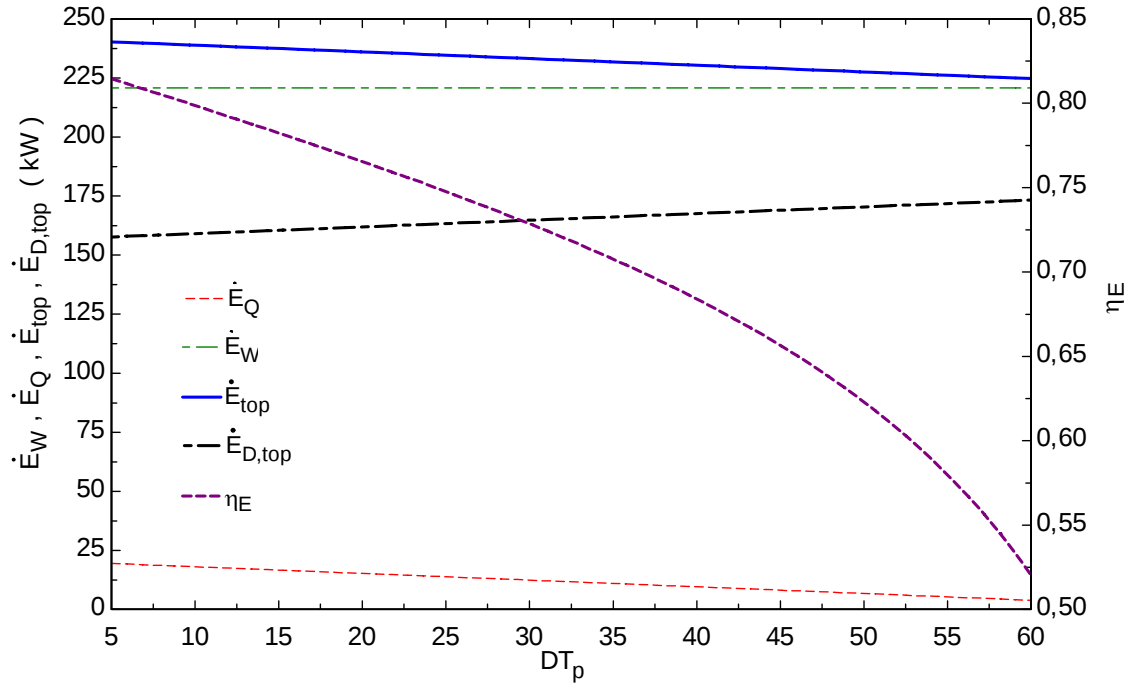
Şekil 7.25 Gaz türbini izentropik verimine göre KOYH-GT kojenerasyon sistemindeki komponentlerin ekserji verimi değişimleri

7.4.7 Minimum sıcaklık farkının etkisi

Şekil 7.26 ve 7.27’de AIK’ındaki minimum sıcaklık farkının KOYH-GT kojenerasyon sisteminin performansına etkileri verilmiştir. Şekil 7.26’dan görüleceği üzere minimum sıcaklık farkı arttıkça ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı düşmektedir. Örneğin, minimum sıcaklık farkının 5 °C’den 60 °C’a yükselmesi ile ekserji verimi % 6.5 azalarak % 61.3’ten % 57.3’e ve ekserjitik performans katsayısı ise % 14.5 azalma ile 1.52’den 1.3’e düşmektedir (Şekil 7.26). Bunun nedeni ise sıcaklık farkının artması ile AIK’nda üretilen buhar miktarının ve buna bağlı olarak ekserjisinin azalmasıdır. Şekil 7.27’de KOYH-GT kojenerasyon sisteminden elde edilen güç ve ısının ekserji değerleri, toplam ekserji çıktısı ve toplam ekserji kayıplarının minimum sıcaklık farkı ile değişimi görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde minimum sıcaklık farkının artması ile elde edilen güçte bir değişiklik olmamakta, ancak elde edilen ısının ekserji değeri ve buna bağlı olarak toplam ekserji çıktısı azalmaktadır. Toplam ekserji kaybı da minimum sıcaklık farkı arttıkça artış göstermektedir. bu artışın en önemli nedeni, artan sıcaklık farkı ile sistemden çevreye atılan egzoz gazlarından kaynaklanan ekserji kaybının artmasıdır.



Şekil 7.26 AIK’ındaki minimum sıcaklık farkına göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin ekserji verimi, ekserjitik performans katsayısı değişimleri



Şekil 7.27 AIK'ındaki minimum sıcaklık farkına göre KOYH-GT kojenerasyon sisteminin toplam ekserji, ürün ekserjileri, toplam ekserji kaybı ve AIK'nın ekserji verimi değişimleri

8. GENEL SONUÇ

Katı oksit yakıt hücreleri yüksek verimli, çevreye duyarlı, yakıt kullanım esnekliği ve hibrit sistem oluşturma gibi önemli avantajlarından dolayı son yıllarda üzerinde çalışılan yeni enerji dönüşüm teknolojileri arasında en ileri seviyede olanıdır. Bu yeni teknolojiye dayalı enerji üretim sistemlerinin geliştirilmesi konusunda yapılan son çalışmalar sistemin enerjistik performansının geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. Literatürdeki yer alan performans analizleri daha çok termodinamiğin I. kanuna dayalı enerjistik performans analizleridir. KOYH teknolojisine dayalı enerji üretim tesislerinin komponent ve sistem bazında performanslarını değerlendirerek optimal dizayn ve işletme şartlarını belirleyebilmek için, termodinamiğin II. kanuna dayalı ekserjistik performans analizlerinin yapılma gereksinimi vardır.

Bu çerçevede, bu tez çalışmasında KOYH teknolojiye dayanan çeşitli enerji üretim sistemlerinin matematik modelleri kimyasal, elektrokimyasal ve termodinamik prensipleri temel alarak sistematik olarak oluşturulmuştur. Öncelikle KOYH teknolojiye dayanan enerji üretim sistemlerinin en temel parçası olan bir adet tüpsel katı oksit yakıt hücresinin performansını değerlendirebilen doğrulanmış bir elektrokimyasal model ortaya konmuştur. Daha sonra belirli sayıdaki tüpsel hücreden oluşan KOYH modülü oluşturulmuştur. KOYH modülü kullanılarak daha kompleks yapıda olan KOYH sistemi, KOYH kojenerasyon sistemi, KOYH-GT hibrit sistemi ve KOYH-GT kojenerasyon sistem konfigürasyonları tasarlanmıştır.

Tüm KOYH sistemlerinin enerjistik (net güç çıktısı, I.kanun verimi) ve ekserjistik (ekserji verimi, toplam ekserji çıktısı ve ekserji kaybı) performansları ve bu performansların işletme ve dizayn parametreleri (hücre sıcaklığı, kompresör basınç oranı, akım yoğunluğu, yakıt kullanım faktörü, reküperatör etkinlik katsayısı, minimum sıcaklık farkı, kompresör ve türbin izentropik verimleri) ile değişimleri incelenmiştir. Ayrıca, bu tez kapsamında ilk defa ekserjistik performans katsayısı adı verilen ve sistemdeki toplam ekserji çıktısının toplam ekserji kaybına oranı şeklinde tanımlanan alternatif bir kriter, yakıt hücreli sistemlerin performans değerlendirmesi için kullanılmıştır. KOYH teknolojisine dayalı enerji üretim sistemlerinin performansı alternatif performans kriterlerine göre mukayeseli olarak analiz edilmiş ve sonuçlar ilgili bölümlerde detaylı olarak tartışılmıştır. Bu sonuçlardan bazıları özet olarak aşağıda tekrar vurgulanmıştır:

KOYH sisteminin tüm performansları açısından (I. kanun verimi, ekserji verimi, ekserjistik performans katsayısı, güç, toplam ekserji ve toplam ekserji kaybı) kompresör basınç oranının mümkün olduğunca düşük değerde seçilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Göz önüne alınan tüm

performans kriterleri açısından en uygun hücre işletme sıcaklığı 1075 °C olarak tespit edilmiştir. Performans kriterlerinin akım yoğunluğu ile ilişkisi incelendiğinde; I. kanun verimi, ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı açısından düşük akım yoğunluklarının tercih edilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Fakat, verilen işletme şartlarında net gücü maksimum yapan akım yoğunluğunun 4800 A/m² olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, optimal akım yoğunluğunun belirlenmesinde güç ile birlikte diğer performans kriterlerinin de göz önüne alınması gerektiğini göstermiştir. Yakıt kullanım faktörünün performans üzerindeki etkisi araştırıldığında; yakıt kullanım faktörünün 0.8 değerinde I. kanun verimi, ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısının maksimum olduğu görülmüştür.

KOYH sistemine AIK eklenmesi ile oluşturulan KOYH'li kojenerasyon sistemi uygulamasının tüm işletme ve dizayn parametreleri için performansları önemli ölçüde artırdığı görülmüştür. Örneğin basınç oranı 2 olduğunda KOYH kojenerasyon sisteminin kojenerasyonsuz KOYH sistemine göre ekserji veriminde yaklaşık % 33'lük ve ekserjitik performans katsayısında ise yaklaşık % 64'lük bir artış gerçekleşmiştir. Ayrıca net güç çıktısını maksimum yapan akım yoğunluğu kojenerasyonsuz KOYH sisteminde 4800 A/m² iken kojenerasyonlu KOYH sisteminde 5600 A/m²'ye çıktığı görülmüştür. Bu nedenle KOYH'li kojenerasyon sistemi dizayn edilirken güç çıktısını maksimum yapan akım yoğunluğundaki bu artış dikkate alınmalıdır.

KOYH sistemine gaz türbini ekleyerek oluşturulan KOYH-GT hibrit sistemin performansı analiz edildiğinde; kompresör basınç oranının 4 olması durumunda I. kanun verimi, ekserji verimi, ekserjitik performans katsayısı, net güç ve toplam ekserji değeri maksimum olmaktadır. Sözkonusu basınç oranı değerinde toplam ekserji kaybının da minimum olduğu gösterilmiştir. Hücre işletme sıcaklığına göre yapılan duyarlılık analiz sonucunda KOYH-GT hibrit sisteminin tüm performans kriterlerini maksimum yapan optimal hücre işletme sıcaklığı 1160 °C olarak tespit edilmiştir. Yakıt kullanım faktörünün performanslara etkileri incelendiğinde I. kanun verimi, ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısının değeri yakıt kullanım faktörünün 0.75 değerinde maksimum olmaktadır. Akım yoğunluğuna göre duyarlılık analizi yapıldığında; I. kanun verimi, ekserji verimi ve ekserjitik performans katsayısı yönünden akım yoğunluğunun düşük değerlerde seçilmesi gerektiği gözlemlenirken net güç çıktısını maksimum yapan akım yoğunluğunun 7200 A/m² olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda KOYH-GT hibrit sistemi tasarlanırken tüm performans kriterleri birlikte dikkate alınarak optimal akım yoğunluğu belirlenmelidir.

KOYH-GT hibrit sistemine AIK ekleyerek oluşturulan KOYH-GT kojenerasyon sistemi için yapılan analizler sonucunda tüm performansların kojenerasyonsuz KOTH-GT sistemine göre artış gösterdiği tespit edilmiştir. Ekserji verimini ve ekserjitik performans katsayısını maksimum yapan kompresör basınç oranları kojenerasyonsuz KOYH-GT hibrit sisteminde aynı olmasına rağmen kojenerasyonlu KOYH-GT sisteminde farklı olduğu gösterilmiştir. KOYH-GT kojenerasyon sisteminde ekserji verimi maksimum yapan kompresör basınç oranı 7.1 iken ekserjitik performans katsayısını maksimum yapan kompresör basınç oranı 6.4 olmaktadır. KOYH-GT kojenerasyon sisteminde ekserji verimi, ekserjitik performans katsayısı ve net güç çıktısını maksimum yapan hücre işletme sıcaklığının kojenerasyonsuz KOYH-GT hibrit sistem için verilen sonuçlarla aynı olduğu görülmüştür. Ekserji verimini ve ekserjitik performans katsayısını maksimum yapan yakıt kullanım faktörünün 0.75 olarak kojenerasyonsuz KOYH-GT hibrit sistemle aynı olduğu bulunmuştur. KOYH-GT kojenerasyon sisteminde toplam ekserjiyi maksimum yapan akım yoğunluğu 7300 A/m^2 olarak tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma sistem ve komponent bazında enerjitik ve ekserjitik performansları analiz etme ve performansları iyileştirilme yönünde gerekli yönlendirmeyi sağladığı gibi tüm alternatif performans kriterlerini dikkate alarak optimum işletme ve dizayn parametrelerinin belirlenmesinde teorik bir temel oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

- Achenbach E., (1994), "Three-dimensional and time-dependent simulation of a planar solid oxide fuel cell stack", *Journal of Power Source*, 49: 333-348.
- Aguiar P., Chadwick D, Kershenbaum L.,(2002), "Modelling of an indirect internal reforming solid oxide fuel cell." *Chemical Engineering Science*, 57(10): 1665-1677.
- Aguiar P., Adjiman C.S., Brandon N.P., (2004), "Anode-supported intermediate temperature direct internal reforming solid oxide fuel cell. I: model-based steady-state performance", *Journal of Power Sources*, 138(1-2): 120-136.
- Alanne K., Sari A., Ugursal I., Good J., (2006), "The financial viability of an SOFC cogeneration system in single-family dwellings", 158: 4003-416.
- Araki T., Ohba T., Takezawa S., Onda K., Sakaki Y., (2006), "Cycle analysis of planar SOFC power generation with serial connection of low and high temperature SOFCs", *Journal of Power Sources*, 158(1): 52-59.
- Basu R.N., Blass G., vd., (2005), "Simplified processing of anode-supported thin film planar solid oxide fuel cells", *Journal of the European Ceramic Society*, 25(4): 463-471.
- Bedringas K.W., Ertesvag I.S., (1997), "Exergy analysis of solid oxide fuel cell systems", *Energy*, 22: 403-412.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M., (1995), *Thermal Design and Optimization*, Wiley: New York.
- Benjamin T.G., Camera E.H., Marianowski L.G., (1995), *Handbook of fuel cell performance*. Institute of Gas Technology.
- Bessette N.F., Wepfer W.J., Winnick J., (1995), "A mathematical model of a solid oxide fuel cell", *Journal of Electrochemical Society*, 142: 3792-3800.
- Bessette N.F., Wepfer W.J., (1995a), "A mathematical model of a tubular solid oxide fuel cell", *Journal of Energy Research Technology*, 117, 43-49.
- Bessette N.F., Wepfer W.J., (1995b), "Prediction of solid oxide fuel cell power system performance through multi-level modeling", *Journal of Energy Research Technology*, 117: 307-317.
- Bessette N.F., Wepfer W.J., (1996), "Prediction on-design and off-design performance of a solid oxide fuel cell power module", *Energy Conversion and Management*, 37(3): 281-293.
- Bevc F., (1997), "Advances in solid oxide fuel cells and integrated power plants", *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 211: 359-366.
- Bove R., Lunghi P., Sammes N.M., (2005a), "SOFC mathematic model for systems simulations. Part one: from a micro-detailed to macro-black-box model", *International Journal of Hydrogen Energy*, 30: 181-187.
- Bove R., Lunghi P., Sammes N.M., (2005b), "SOFC mathematic model for systems simulations Part 2: definition of an analytical model", *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(2): 189-200.

- Braun R.J., Klein S.A., Reindl D.T., (2006), "Evaluation of system configurations for solid oxide fuel cell-based micro-combined heat and power generators in residential applications", 158: 1290-1305.
- Burt A.C., Celik I.B., Gemmen R.S., Smirnov A.V., (2004), "A numerical study of cell to cell variations in a SOFC stack", *Journal of Power Sources*, 126: 76-87.
- Cali M., Santarelli M.G.L., Leone P., (2006), "Computer experimental analysis of the CHP performance of a 100 kWe SOFC field unit by a factorial design", *Journal of Power Sources*, 156(2): 400-413.
- Cali M., Santarelli M.G.L., Leone P., (2007), "Design of experiments for fitting regression models on the tubular KOFC CHP 100 kWe: Screening test, response surface analysis and optimization", *International Journal of Hydrogen Energy*, 32: 343-358.
- Campanari S., (2001), "Thermodynamic model and parametric analysis of a tubular SOFC module", *Journal of Power Sources*, 92: 26-34.
- Campanari S., Iora P., (2004), "Definition and sensitivity analysis of a finite volume SOFC model for tubular cell geometry", *Journal of Power Sources*, 132: 113-126.
- Cengel Y.A., Boles M. A., (2002), *Thermodynamics: A Engineering Approach*, McGraw-Hill.
- Chan S.H., Khor K.A., Xia Z.T., (2001), "A complete polarization model of a solid oxide fuel cell and its sensitivity to the change of cell component thickness", *Journal of Power Sources*, 93: 130-140.
- Chan S.H., Ho H.K., Tian Y., (2002), "Modelling of simple hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine power plant", *Journal of Power Sources*, 109: 111-120.
- Chan S.H., Low C.F., Ding O.L., (2002), "Energy and exergy analysis of simple solid oxide fuel cell power system", *Journal of Power Sources*, 103: 188-200.
- Chan S.H., Xia Z.T., (2002), "Polarization effects in electrolyte/electrode-supported solid oxide fuel cells", *Journal of Applied Electrochemistry*, 32: 339-347.
- Chan S.H., Ho H.K., Tian Y., (2003a), "Modeling for part load operation of solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid power plant", *Journal of Power Sources*, 114: 213-227.
- Chan S.H., Ho H.K., Tian Y., (2003b), "Multi level modelling of SOFC-gas turbine hybrid system", *International Journal of Hydrogen Energy*, 28: 889-900.
- Chan S., Ding O.L., (2005), "Simulation of a solid oxide fuel cell power system fed by methane", *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(2): 167-179.
- Chan S., Ho H.K., Ding O.L., (2005), "Analysis of a simple solid oxide fuel cell system with gas dynamics in afterburner and connecting pipes", *Fuel Cells*, 5(1): 25-33.
- Clarke S.H., Dicks A.L., Pointon K., Smith T.A., Swan A., (1997), "Catalytic aspect of the steam reforming of hydrocarbons in internal reforming fuel cells", *Catalysis Today*, 38: 411-423.
- Colpan C.O., Dincer I., Hamdullahpur F., (2007), "Thermodynamic modeling of direct internal reforming solid oxide fuel cells operating with syngas", *International Journal of Hydrogen Energy*, available online at www.sciencedirect.com
- Costamagna P., Magistri L., Massardo A.F., (2001), "Design and part-load performance of a

hybrid system based on a solid oxide fuel cell reactor and a micro gas turbine”, *Journal of Power Sources*, 96: 352-368.

Costamagna P., Selimovic A., Borghi M.D., Agnew G., (2004), “Electrochemical model of the integrated planar solid oxide fuel cell (IP-SOFC)”, *Chemical Engineering Journal*, 102(1): 61-69.

Cunneil C., Pangalis M.G., Martinez-Botas R.F., (2002), “Integration of solid oxide fuel cell into gas turbine power generation cycles. Part 2: hybrid model for various integration schemes”, *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part A Journal of Power and Energy*, 216(2): 145-154.

Dicks A.L., (1998), “Advances in catalysts for internal reforming in high temperature fuel cells”, *Journal of Power Sources*, 71: 111-122.

Dincer I., (2002), “Technical, environmental and exergetic aspects of hydrogen energy systems”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 27: 265–285.

Douvartzides S.L., Coutelieris F.A., Demin A.K, Tsiakaras P.E., (2003), “Fuel options solid oxide fuel cells: a thermodynamic analysis”, *AIChE Journal*, 49(1), 248-257.

Douvartzides S.L., Coutelieris F.A., Tsiakaras P.E., (2004), “Exergy analysis of a solid oxide fuel cell power plant fed by either ethanol or methane”, *Journal of Power Sources*, 131: 224-230.

Douvartzides S.L., Coutelieris F.A., Tsiakaras P.E., (2003), “On the optimization of ethanol fed SOFC-based electricity generating systems in terms of energy and exergy”, *Journal of Power Sources*, 114: 203–212.

EG&G Services Parsons Inc., (2004), “Fuel Cell Handbook (7th edn)”, Science Applications Int. Corp. US Department of Energy, National Energy Technology Laboratory: West Virginia.

EIA, (2001), *World Consumption of Primary Energy by Selected Country Groups* (BTU), EIA.

Ferguson J.R., Fiard J.M., Herbin R., (1996), “Three dimensional numerical simulation for various geometries of solid oxide fuel cells”, *Journal of Power Sources*, 58: 109-122.

Freeh J.E., Pratt J.W., Brouwer J., (2004), “Development of a solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid system model for a aerospace applications”, *Preceedings of ASME Turbo Expo*, June 14-17, Vienna.

Fontell E., Kivisaari T., Christiansen N., Hansen J.B., Palsson. J., (2004), “Conceptual design of a 250 kw planar SOFC system for CHP applications”, *Journal of Power Sources*, 131: 49-56.

George R.A., Bessette N.F., (1998), “Reducing the manufacturing cost of tubular SOFC technology”, *Journal of Power Sources*, 49: 131-137.

George R.A., (2000), “Status of tubular SOFC field unit demonstrations”, *Journal of Power Sources*, 186: 134–139.

Ghosh S., De S., (2003), “Thermodynamic performance study of an integrated gasification fuel cell combined cycle-an energy analysis”, *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part A Journal of Power and Energy*, 217: 137-147.

- Ghosh S., De S., (2006), "Energy analysis of a cogeneration plant using coal gasification and solid oxide fuel cell", *Energy*, 31: 345-363.
- Gopalan S., DiGiuseppe G., (2004), "Fuel sensitivity tests in tubular solid oxide fuel cells", *Journal of Power Sources*, 125: 183-188.
- Granovskii M., Dincer I. Rosen M.A., (2007), "Performance comparison of two combined SOFC-gas turbine system", *Journal of Power Sources*, 165: 307-314.
- Hall D.J., Colclaser R.G., (1999), "Transient modeling and simulation of a tubular solid oxide fuel cell", *IEEE Transsection on Energy Conversion*, 14: 749-753.
- Hart D., Hormandinger G., (1998), "Environmental benefits of transport and stationary fuel cells", *Journal of Power Sources*, 71: 348-353.
- Harvey S.P., Richter H.J., (1994), "Gas turbine cycles with solid oxide fuel cells.Part I: Improved gas turbine power plant efficiency by use of recycled exhaust gases and fuel cell technology", *Transsection ASME, Journal of Energy Resource Technology*, 116: 305-311.
- Hawkes A.D., Aguiar P., Aramburo C.A., Leach M.A., Brandon N.P., Gren T.C., "Adjiman C.S., (2006), Techno-economic modelling of a solid oxide fuel cell stack for micro combined heat and power", *Journal of Power Sources*, 156: 321-333.
- Hawkes A.D., Aguiar P., Croxford B., Leach M.A., Adjiman C.S., Brandon N.P., (2007), "Solid oxide fuel cell micro combined heat and power system operating strategy: Options for provision of residential space and water heating", *Journal of Power Sources*, 164: 260-271.
- Haynes C., Wepfer W. J., (2001), "Characterizing heat transfer within a commercial-grade tubular solid oxide fuel cell for enhanced thermal management", *International Journal of Hydrogen Energy*, 26:369-379.
- Haynes C., Wepfer W.J., (2000), "Design for power' of a commercial grade tubular solid oxide fuel cell", *Energy Conversion and Management*, 41: 1123-1139.
- Hernández-Pacheco E., Singh D., Hutton P.N., Patel N., Mann M.D., (2004), "A macro-level model for determining the performance characteristics of solid oxide fuel cells", *Journal of Power Sources*, 138(1-2): 174-186.
- Hernández-Pacheco E., Mann M.D., Hutton P.N., Singh D., Martin K.E., (2005), "A cell-level model for a solid oxide fuel cell operated with syngas from a gasification process", *International Journal of Hydrogen Energy*, 30: 1221-1233.
- Hoogers G., (2002), *Fuel cell technology handbook*, CRC pres, SAE International, Hardbound.
- Inui Y., Yanagisawa S., Ispida T., (2003), "Proposal of high performance SOFC combined power generation system with carbon dioxide recovery", *Energy Conversion and Management*, 44: 597- 609.
- Iwata M., Hikosaka T., Morita M., Iwanari T., Ito K., Onda K., Esaki Y., Sakaki Y., Nagata S., (2000), "Performance analysis of planar-type unit SOFC considering current and temperature distributions", *Solid State Ionics*, 132: 297-308.
- Ivanov P., (2007), "Thermodynamic modeling of the power plant based on the SOFC with internal steam reforming of methane", *Electrochimica Acta*, 52(12): 3921-3928.

- Ji Y., Liu J., He T., Wang J., Su W., (2005), "The effect of Pr co-dopant on the performance of solid oxide fuel cells with Sm-doped ceria electrolyte", *Journal of Alloys and Compounds*, 389(1-2): 317-322.
- Jiang W., Fang R., Khan J.A., Dougal R.A., (2006), "Parameter setting and analysis of a dynamic tubular KOYH model", *Journal of Power Sources*, 162(1): 316-326
- Kharton V.V., Naumovich E.N., Tikhonovich V.N., Bashmakov I.A., Boginsky L.S., Kovalevsky A.V., (2002), "Testing tubular solid oxide fuel cells in nonsteady-state conditions", *Journal of Power Sources*, 79: 242-272.
- Kim J.W., Virkar A.V., Funk K.Z., Mehta K., Singhal S.C., (1999), "Polarization effects in intermediate temperature, anode-supported solid oxide fuel cells", *Journal of The Electrochemical Society*, 146(1): 69-78.
- Kimijima S., Kasagi N., (2002), "Performance evaluation of gas turbine-fuel cell hybrid micro generation system", *Proceedings of ASME Turbo Expo*, June 3-6, Amsterdam, The Netherlands.
- Koh J.H., Yoo Y.S., Park J.W., Lim H.C., (2002), "Carbon deposition and cell performance of Ni-YSZ anode support KOYH with methane fuel", *Solid State Ionics*, 149(3-4): 157-166.
- Kotas T.J., (1995), *The exergy method of thermal plant analysis*, Krieger Publishing Company, Malabar, USA.
- Kuchonthara P., Bhattacharya S., Tsutsumi A., (2003), "Energy recuperation in solid oxide fuel cell (SOFC) and gas turbine (GT) combined system", *Journal of Power Source*, 117:7-13.
- Kuchonthara, P., Bhattacharya, S., Tsutsumi, A., (2003), "Combinations of solid oxide fuel cell and several enhanced gas turbine cycles", *Journal of Power Sources*, 124: 65-75.
- Larminie J., Dicks A., (2004), *Fuel cell system explained*, Wiley& Sons Ltd, New York.
- Laurencin J. Morel B., Bultel Y., Joud F.L., (2006), "Thermo-mechanical model of solid oxide fuel cell fed with methane", *Fuel Cells*, 1: 64-70.
- Lazzaretto A., Toffolo A., Zanon F., (2004), "Parameter setting for a tubular SOFC simulation model", *Transaction of ASME, Journal of Energy Resources Technology*, 126: 40-46.
- Lee G.T., Sudhoff F.A., (1996), "Fuel cell/gas turbine system performance studies", *Fuel-Cells Review Meeting, FETC Publication*, Department of Energy, U.S.A.
- Lee J., Lark T. (1998), "Modeling fuel cell stack systems", *Journal of Power Source*, 73: 229-241.
- Lemanski M., Badur J., (2004), "Parametrical analysis of a tubular pressurized SOFC", *Archives of Thermodynamics*, 25: 53-72.
- Li P.W., Chyu M.K., (2003), "Simulation of the chemical/electrochemical reactions and heat/mass transfer for a tubular SOFC in a stack", *Journal of Power Sources*, 124(2): 487-498.
- Li P.W., Suzuki K., (2004), "Numerical Modelling and performance study of a tubular SOFC", *Journal of electrochemical Society*, 151(4A): 548-557.
- Lin C., Chen T., Chyou Y., Chşang L., (2007), "Thermal stres analysis of a planar SOFC

stack”, *Journal of Power Sources*, 164: 238-251.

Lu Y., Schaefer L., (2004), “A solid oxide fuel cell system fed with hydrogen sulfide and naturel gas”, *Journal of Power Sources*, 135: 184-191.

Lundberg W.L., Veyo S.E., Moeckel M.D. (2003). “A high-efficiency solid oxide fuel cell hybrid power system using the Mercury 50 advanced turbine systems”, *Transaction of ASME, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 125: 51-58

Magistri L., Bozzo R., (2004), “Simplified versus detailed solid oxide fuel cell reactor models and influence on the simulation of the point performance of hybrid system”, *Transaction of ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 126: 516-523.

Marsano F., Magistri L., Massardo A.F., (2004), “Ejector performance influence on a solid oxide fuel cell anodic recirculation system”, *Journal of Power Sources*, 129: 216-228.

Massardo A.F., Lubelli F., (2000), “Internal reforming solid oxide fuel cell-gas turbine combined cycles: Part A: Cell model and cycle thermodynamic analysis”, *Transaction of ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 122: 27-35.

Matelli J.A., Bazzo E., (2005), “A methodology for thermodynamic simulation of high temperature, internal reforming fuel cell systems”, *Journal of Power Source*, 142: 160-168.

Meusinger J., Riensche E., Stimming U., (1998), “Reforming of natural gas in solid oxide fuel cell systems”, *Journal of Power Sources*, 71: 315-320.

Moller B., Arriagada J., Assadi M., Potts I., (2004), “Optimization of an SOFC/GT system with CO₂ capture”, *Journal of Power Source*, 131: 320-326

Nagata S., Momma A., Kato T., Kasuga Y., (2001), “Numerical analysis of output characteristics of tubular SOFC with internal reformer”, *Journal of Power Sources*, 101: 60-71.

Ni M., Leung M.K.H., Leung D.Y.C., (2006), “An electrochemical model of a solid oxide steam electrolyzer for hidrogen production”, *Chemical Engineering Technology*, 29(5): 636-642.

Noren D.A., Hoffman M.A., (2005), “Clarifying the Butler–Volmer equation and related approximations for calculating activation losses in solid oxide fuel cell models”, *Journal of Power Sources*, 152: 175-181.

Omosun A.O., Bauen A., Brandon N.P., Adjiman C.S., Hart D., (2004), “Modelling system efficiencies and costs of two biomass-fuelled SOFC systems”, *Journal of Power Sources*, 131: 96-106.

Ota T., Koyama M., Wen C., Yamada K., Takahashi H., (2003), “Object-based modeling of SOFC system: dynamic behavior of micro-tube SOFC”, *Journal of Power Sources*, 118: 430-439.

Padulles J., Ault G.W., McDonald J.R., (2000), “An integrated SOFC plant dynamic model for power system simulation”, *Journal of Power Sources*, 86: 495-500.

Palsson J., Selimovic A., Sjunnesson L., (2000), “Combined solid oxide fuel cell and gas turbine systems for efficient power and heat generation”, *Journal of Power Sources*, 86: 442-448.

- Pangalis M.G., Martinez-Botas R.F., Brandon N.P., (2002), "Integration of solid oxide fuel cell into gas turbine power generation cycles. Part 1: fuel cell thermodynamic modelling", *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part A Journal of Power and Energy*, 216(2): 129-144.
- Peters R., Riensche E., Cremer P., (2000), "Pre-reforming of natural gas in solid oxide fuel cell systems", *Journal of Power Source*, 86: 432-441.
- Petruzzi L., Cocchi S., Fineschi F., (2003), "A global thermo-electrochemical model for SOFC systems design and engineering", *Journal of Power Sources*, 118: 96-107.
- Rao A.D., Samuelsen G.S., (2002), "Analysis strategies for tubular solid oxide fuel cell based hybrid systems" *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 124: 503-509.
- Rao A.D., Samuelsen G.S., (2003), "A thermodynamic analysis of tubular solid oxide fuel cell hybrid systems", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 125: 59-66.
- Rao A.D., Maclay J., Samuelsen S., (2004), "Efficiency of electrochemical systems", 134: 181-184.
- Recknagle K.P., Williford R.E., Chick L.A., Rector D.R. and Khaleel M.A., (2003), "Three-dimensional thermo-fluid electrochemical modeling of planar SOFC stacks", *Journal of Power Sources*, 113: 109-114.
- Riensche E., Achenbach E., Froning D., Haines M., Heidug W., Lokurlu A., (2000), "Clean Combined-cycle SOFC power plant – cell modeling and process analysis", *Journal of Power Source*, 86: 404-410.
- Riensche E., Stimming U., Unverzagt G., (1998a), "Optimization of a 200 kW SOFC cogeneration power plant Part I: Variation of process parameters", *Journal of Power Source*, 73: 251-256.
- Riensche E., Meusinger J., Stimming U., Unverzagt G., (1998b), "Optimization of a 200 kW SOFC cogeneration power plant Part II: Variation of the flowsheet", *Journal of Power Source*, 71: 306-314.
- Roos M., Batawi E., Harnisch U., Hocker Th., (2003), "Efficient simulation of fuel cell stacks with the volume averaging method", *Journal of Power Sources*, 118: 86-95.
- Santangelo P.E., Tartarini P., (2007), "Fuel cell systems and traditional technologies. Part I: Experimental CHP approach", *Applied Thermal Engineering*, 27: 1278-1284.
- Sedghisigarchi K., Feliachi A., (2004), "Dynamic transient analysis of power distribution systems with fuel cells-part I: fuel cell dynamic model", *IEEE Transsection on Energy Conversion*, 19(2): 423-428.
- Selimovic A., Palsson J., (2002), "Networked solid oxide fuel cell stacks combined with a gas turbine cycle", *Journal of Power Sources*, 106: 76-82.
- Singhal S.C., (1997), "Progress in tubular solid oxide fuel cell technology", *Electrochemical Society*, 99(19): 39-51.
- Singhal S.C., (2000), "Advances in solid oxide fuel cell technology", *Solid State Ionics*, 135: 305–313.
- Singhal S.C., Kendal K., (2004), *High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamental*,

Design and Applications, Elsevier, UK.

Song T.W., Sohn J.L., Kim J.H., Kim T.S., Ro S.T., Suzuki K., (2005), "Performance analysis of a tubular solid oxide fuel cell/micro gas turbine hybrid power system based on a quasi-two dimensional model", *Journal of Power Sources*, 142: 30-42.

Song T.W., Sohn J.L., Kim T.S., Ro S.T., (2006), "Performance characteristics of a MW-class SOFC/GT hybrid system based on a commercially available gas turbine", *Journal of Power Sources*, 158: 361-367.

Steele B.C.H., (2001), "Material science and engineering: The enabling technology for the commercialisation of fuel cell systems", 36: 1053-1068.

Stiller C., Thorud B., Seljebø S., Mathisen Ø., Karoliussen H., Bolland O, (2005), "Finite-volume modelling and hybrid-cycle performance of planar and tubular solid oxide fuel cells", *Journal of Power Sources*, 141: 227-240.

Suwanwarangkul R., Croiset E., Fowler M.W., Douglas P.L., Entchev E., Douglas M.A., (2003), "Performance comparison of Fick's, dusty-gas and Stefan–Maxwell models to predict the concentration overpotential of a SOFC anode", *Journal of Power Sources*, 122: 9-18.

Suwanwarangkul R., Croiset E., Pritzker M.D., Fowler M.W., Douglas P.L., Entchev E., (2006), "Mechanistic modelling of a cathode-supported tubular solid oxide fuel cell", *Journal of Power Sources*, 1554: 74-85.

Tanaka K., Wen C., Yamada Y., (2000), "Design and evaluation of combined cycle system with solid oxide fuel cell and gas turbine", *Fuel*, 79: 1493-1507.

Thorstensen B., (2001), "A parametric study of fuel cell system efficiency under full and part-load operation", *Journal of Power Sources*, 92: 9-16.

Todd B., Young J.B., (2002), "Thermodynamic and transport properties for solid oxide fuel cell modelling", *Journal of Power Sources*, 110: 186-200.

Uechi H., Kimijima S., Kasagi N., (2004), "Cycle analysis of gas turbine- fuel cell cycle hybrid micro generation system", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 126: 755-762.

Üst Y., (2005), *Enerji üretim sistemlerinin ekolojik performans analizi ve optimizasyonu*, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.T.Ü., İstanbul.

Üst Y., Sahin B., Sogut O.S., (2005), "Performance analysis and optimization of an irreversible dual cycle based on ecological coefficient of performance criterion", *Applied Energy*, 82: 23-39.

Üst Y., Sahin B., Kodal A., Akcay I.H., (2006), "Ecological coefficient of performance analysis and optimization of an irreversible regenerative-Brayton heat engine", *Applied Energy*, 83(6): 558-572.

Üst Y., Sahin B., Kodal A., (2006), "Performance analysis of an irreversible Brayton heat engine based on ecological coefficient of performance criterion", *Int. J. Thermal Sciences*, 45 (1) 94-101.

Veyo S.E., Litzinger K.P., vd., (2002), "Status of pressurized SOFC/Gas Turbine Power system development at Siemens Westinghouse" ASME Turbo Expo, Amsterdam, The Netherlands.

- Veyo S.E., Lundberg W.L., Vora S.D., Litzinger K.P., (2003), "Tubular SOFC Hybrid Power System Status", Proceedings of ASME Turbo Expo GT2003-38943.
- Veyo S.E., Lundberg W.L., (1999), "Solid oxide fuel cell power system cycles", International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, ASME paper 99-GT-356, Indianapolis.
- Veyo S.E., Shockling L.A., Dederer J.T., Gillett J.E., Lunberg W.L., (2002), "Tubular solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid cycle power systems :status", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 124: 845-849.
- Weber A., Saurer B., Muller A.C., Herbstritt D., Ivers-Tiffée E., (2003), "Oxidation of H₂, CO and methane in SOFCs with Ni/YSZ-cermet anodes", Solid State Ionics, 152-153: 543-550.
- Weber A., Tiffée E.I., (2004), "Metarials and concepts for solid oxide fuel cells (SOFCs) in stationary and mobile applications", Journal of Power Sources, 135: 273-283.
- Williams M.C., Strakey J.P., Singhal S.C., (2004), "U.S. distributed generation fuel cell program", Journal of Power Sources, 131: 79-85.
- Williams M.C., Strakey P.J., Surdoval A.W., (2005), "The U.S. Department of energy, office of fossil energy stationary fuel cell program", Journal of Power Sources, 143: 191-196.
- Winkler W., Hagen L., (2001), "The design of stationary and mobile solid oxide fuel cell-gas turbine systems", Journal of Power Sources, 105(2): 2002-227.
- Yakabe H., Hishinuma M., Uratani M., Matsuzaki Y., Yasuda I., (2000), "Evaluation and modeling of performance of anode-supported solid oxide fuel cell", Journal of Power Sources, 86: 423-431.
- Yakabe H., Ogiwara T., Hishinuka M., Yasuda I., (2001), "3-D Model Calculation for Planar SOFC", Journal of Power Sources, 102: 144-154.
- Yang J.S., Sohn J.L., Ro S.T., (2007), "Performans characteristics of a solid oxide fuel cell/ gas turbine hybrid system with various part load control modes", Journal of Power Sources, 166(1): 155-164.
- Yang W.J., Park S.K., Kim T.S., Kim J.H., Sohn J.L., Ro S.T., (2006), "Design performance analysis of pressurized solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid systems considering temperature constraints", Journal of Power Sources, 160: 462-473.
- Yi Y., Rao A.D., Brouwer J., Samuelsen G.S., (2004), "Analysis and optimization of a solid oxide fuel cell and intercooled gas turbine (SOFC-ICGT) hybrid cycle", Journal of Power Sources, 132: 77-85.
- Yi Y., Rao A.D., Brouwer J., Samuelsen G.S., (2005), "Fuel flexibility study of an integrated 25 kW SOFC reformer system", Journal of Power Sources, 144: 67-76.
- Yokoo M., Take T., (2004), "Simulation analysis of a system combining solid oxide and polymer electrolyte fuel cells", Journal of Power Sources, 137: 206-215.
- Yokoo M., Watanabe K., Arakawa M., Yamazaki Y., (2006), "The effect of fuel feeding method on performance of SOFC-PEFC system", Journal of Power Sources, 159: 836-845.
- Yokoo M., Watanabe K., Arakawa M., Yamazaki Y., (2007), "Influence of current densities

in SOFC and PEFC stacks on a SOFC-PEFC combined system”, *Journal of Power Sources*, 163(2): 892-899.

Zang W., Croiset E., Douglas P.L., Fowler M.W., Entchev E., (2005), “Simulation of a tubular solid oxide fuel cell stack using AspenPlus™ unit operation models”, *Energy Conversion and Management*, 46: 181-196.

Zhang X., Li J., Li G., Feng Z., (2007), “Cycle analysis of an integrated solid oxide fuel cell and recuperative gas turbine with an air reheating system”, *Journal of Power Sources*, 164(2): 752-760.

Zhu Q., Fan B., (2005), “Low temperature sintering of 8YSZ electrolyte film for intermediate temperature solid oxide fuel cells”, *Solid State Ionics*, 176(9-10): 889-894.

Zhu H., Kee R.J., (2003), “A general mathematical model for analyzing the performance of fuel-cell membrane-electrode assemblies”, *Journal of Power Sources*, 117(1-2): 61-74.

Zhu H., Kee R.J., (2006), “Thermodynamics of KOYH efficiency and fuel utilization as function of fuel mixtures and operating conditions”, *Journal of Power Sources*, 161: 957-964.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	28.04.1977	
Doğum yeri	Çivril/Denizli	
Lise	1991-1994	Çivril Lisesi
Lisans	1994-1999	Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Gemi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1999-2001	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Müh. Anabilim Dalı Enerji Makinaları Programı
Doktora	2002-2007	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Müh. Anabilim Dalı Enerji Makinaları Programı
Çalıştığı kurum(lar)		
	1999-....	YTÜ Makina Fak. Araştırma Görevlisi