

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

BİR DOĞALGAZ BESLEMELİ TÜPSEL
KATI OKSİT YAKIT PİLİ SİSTEMİNDE
ISI VE GÜÇ ENTEGRASYONU

Ersan EYİLER
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2008

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR DOĞALGAZ BESLEMELİ TÜPSEL
KATI OKSİT YAKIT PİLİ SİSTEMİNDE
ISI VE GÜÇ ENTEGRASYONU

Ersan EYİLER
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Alp Er KONUKMAN

GEBZE
2008



**GEBZE YÜKSEK
TEKNOLOJİ
ENSTİTÜSÜ**

**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
JÜRİ ONAY FORMU**

JÜRİ

ÜYE (BAŞKAN) : Yrd.Doç.Dr. M. Hakan HOCAOĞLU

ÜYE : Doç.Dr. Alp Er KONUKMAN

ÜYE : Yrd.Doç.Dr. İlyas KANDEMİR

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 19/07/2008 tarih ve 2008/24 sayılı kararı ile yukarıdaki öğretim elemanlarından oluşmuş jüri tarafından düzenlenen 27./08/2008 tarihli Tez Savunma Tutanağı neticesinde Yüksek Lisans öğrencisi Ersan EYİLER 'in çalışması GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Yönetim Kurulu/...../..... tarih ve/...../..... sayılı kararıyla Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak onaylanmıştır.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI : BİR DOĞALGAZ BESLEMELİ TÜPSEL KATI
OKSİT YAKIT PİLİ SİSTEMİNDE ISI VE
GÜÇ ENTEGRASYONU

YAZAR ADI : Ersan EYİLER

Sabit güç üretimi olarak yakıt piline dayalı güç üretim sistemleri, özellikle küçük ölçekli uygulamalarda ısıya dayalı güç sistemlerine önemli alternatiflerdendir. Katı oksit yakıt pili (KOYP), elektrik üretimi için gelecek vaadeden teknolojilerdendir. Yakıt gazının kimyasal enerjisini direk elektrik enerjisine çevirir ve bu yüzden çok yüksek elektriksel verimlere ulaşılabilir. Ayrıca katı oksit yakıt pilinin yüksek çalışma sıcaklığı kojenerasyon uygulamaları için uygun imkanlar sağlar. Bu tez çalışması, doğalgaz beslemeli, tüpsel, iç reformasyonlu katı oksit yakıt pili teknolojisine dayalı bir CHEMCAD KOYP yığın modelini sunmaktadır. Mevcut CHEMCAD fonksiyonları ve temel işlemler modülleri kullanılarak geliştirilmiştir. Bu KOYP modeli, detaylı bir biçimde KOYP çalışmasının termodinamik ve parametrik analizini yapmayı sağlamaktadır. Yakıt pilinin bir sisteme entegrasyonu üzerine yapılan araştırmaların hedeflerinden birisi hem verim hem de ekonomik bakımından caziptir. Bu tez çalışmasında, bu hedef doğrultusunda darboğaz yöntemi ve gaz türbinleri kullanılarak yapılan farklı tasarımlar anlatılmaktadır. Bütün proses simülasyonları CHEMCAD’de yapılmıştır.

Çalışma basıncı, çalışma sıcaklığı, yakıt kullanım oranı parametrelerinin elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarları ve maliyetlerine etkileri, ısı entegrasyonsuz, ısı entegrasyonlu, tek gaz türbinli ve çift gaz türbinli yeni tasarımlar üzerinde araştırılmaktadır.

SUMMARY

TITLE : HEAT AND POWER INTEGRATION FOR A NATURAL GAS
FEED TUBULAR SOLID OXIDE FUEL CELL SYSTEM

AUTHOR : Ersan EYİLER

In the context of stationary power generation, fuel cell-based systems are being foreseen as a valuable alternative to thermodynamic cycle-based power plants, especially in small scale applications. The Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) is a promising technology for electricity generation. It converts the chemical energy of the fuel gas directly to electricity energy and therefore, very high electrical efficiencies can be achieved. The high operating temperature of the SOFC also provides excellent possibilities for cogeneration applications. This thesis introduces a CHEMCAD SOFC stack model based on the natural gas feed tubular internal reforming SOFC technology. The model was developed utilizing existing CHEMCAD functions and unit operation models. This SOFC model is able to provide detailed thermodynamic and parametric analysis of the SOFC operation. The research on integrating the fuel cell in a system aims to achieve both efficient and economically attractive designs. Various alternative SOFC-based power generation designs were studied in this thesis. All the process simulations were implemented in CHEMCAD.

The effects of parameters such as operating pressure, operating temperature, fuel utilization ratio on utility loads and costs of the electricity production are investigated for the models with and without heat integration, with single gas turbine and double gas turbine.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince ilgi, destek ve yardımlarını esirgemeyen, araştırmanın her aşamasında fikirleri ve yapıcı eleştirileriyle çalışmama yön veren tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Alp Er KONUKMAN'a teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca tezimi değerlendirmek için zaman ayıran jüri üyeleri, Yrd. Doç. Dr. İlyas KANDEMİR ve Yrd. Doç. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU'na da çok teşekkür ederim.

Tez yazım aşamasında yardımcı olan, manevi desteğe ihtiyacım olduğunda yanımda yer alan tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bana her zaman destek olan, her konuda yardımcı olmaktan kaçınmayan, olumlu eleştirileriyle beni teşvik eden anneme, babama, ağabeyime ve halama teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
2. KATI OKSİT YAKIT PİLİNE DAYALI GÜÇ ÜRETİM SİSTEMLERİ	3
2.1. Yakıt Pilleri	3
2.2. Katı Oksit Yakıt Pilleri (KOYP)	5
2.3. Katı Oksit Yakıt Piline Dayalı Güç Üretim Sistemleri	7
3. CHEMCAD İLE BASINÇLI KATI OKSİT YAKIT PİLİNE DAYALI GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİ SİMÜLASYONU	11
3.1. Siemens-Westinghouse Tüpsel Katı Oksit Yakıt Pili Teknolojisi	11
3.2. CHEMCAD İle Bir Tüpsel Katı Oksit Yakıt Piline Dayalı Güç Üretim Sisteminin SİMÜLASYONU	12
3.2.1. Enjektördeki Yakıtın Geri Beslenmesi ve Karıştırılması	13
3.2.2. Karıştırılmış Yakıtın Reformasyonu	15
3.2.3. Anotta İç Reformasyon ve Elektrokimyasal Reaksiyon	15
3.2.4. Oksijen Temini	16
3.2.5. Artyakıcı	16
3.2.6. Hücre Gerilimi ve Sistem Veriminin Hesaplanması	17
3.2.7. Katı Oksit Yakıt Pili Yığınının Enerji Balansı	20
4. KATI OKSİT YAKIT PİLİNE DAYALI GÜÇ ÜRETİM SİSTEMLERİNDE ISI VE GÜÇ ENTEGRASYONU	21
4.1. Katı Oksit Yakıt Piline Dayalı Güç Üretim Sistemi Tasarımları	21
4.1.1. Isı Gerikazanımı Olmayan Katı Oksit Yakıt Piline Dayalı Güç Üretim Sistemi	21
4.1.2. Isı Gerikazanımlı Katı Oksit Yakıt Piline Dayalı Güç Üretim	

Sistemi	22
4.1.3. Isı Gerikazanımlı Sisteme Isı Pompası ve Isı Motoru Entegrasyonu	27
4.2. Ekonomik Değerlendirme	32
4.2.1. Dört Farklı Katı Oksit Yakıt Piline Dayalı Güç Üretim Sisteminin Isı Değiştiricileri ve Gaz Türbinleri Maliyetleri	33
4.4.2. Dört Farklı Katı Oksit Yakıt Piline Dayalı Güç Üretim Sisteminin Ekonomik Karşılaştırması	36
5. DUYARLILIK ANALİZLERİ	37
5.1. Sistem Çalışma Basıncına Göre Dört Tasarımın Duyarlılık Analizi	37
5.2. Katı Oksit Yakıt Pili Çalışma Sıcaklığına Göre Dört Tasarımın Duyarlılık Analizi	53
5.3. Yakıt Kullanım Oranına Göre Dört Tasarımın Duyarlılık Analizi	68
6. SONUÇ	84
KAYNAKLAR	86
ÖZGEÇMİŞ	89

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	Amper
B/K	Buhar/Karbon oranı
FCp	Isı sığası
H	Entalpi
H _f	Faydalı ısı (kW)
HHV	Üst ısı değeri
H _ü	Harcanan toplam ütilite yükü (kW)
I _c	Akım yoğunluğu
K	Kelvin
KOYP	Katı oksit yakıt pili
LHV	Alt ısı değeri
LHV _{yakıt}	Sisteme giren yakıtın alt ısı değeri (kJ/mol)
m	Metre
MWe	Megawatt elektrik
n	Molar debi
n _{C₂H₆,in}	Beslenen taze yakıttaki etanın molar debisi
n _{CH₄,in}	Beslenen taze yakıttaki metanın molar debisi
n _{CO,in}	Beslenen taze yakıttaki karbonmonoksitin molar debisi
n _{H₂,eşdeğer}	Eşdeğer hidrojenin molar debisi
n _{H₂,in}	Beslenen taze yakıttaki hidrojenin molar debisi
n _{O₂,gereken}	Hidrojenin yanması için gereken oksijenin molar debisi
n _{tazeyakıt}	Sisteme giren yakıtın molar debisi (mol/s)
P	Sistem çalışma basıncı
PEYP	Polimer elektrolit yakıt pili
P _{H₂}	Hidrojenin kısmi basıncı
P _{H₂O}	Buhar kısmi basıncı
P _{O₂}	Oksijenin kısmi basıncı
(P _{O₂}) _{Ref}	Referans oksijenin kısmi basıncı
P _{ref}	Referans sistem çalışma basıncı
Q	Isı
Q _e	Elektrokimyasal reaksiyonun reaksiyon ısısı

Q_l	Kayıp ısı
Q_r	Buhar reformasyon reaksiyonunun reaksiyon ısısı
Q_s	Su Gazı dönüşüm reaksiyonunun reaksiyon ısısı
Q_x	Besleme akımlarına verilen ısı
Q_y	Yığının net ısı yükü
T	Sıcaklık
T_φ	Çıkan akımın sıcaklığı
T_g	Giren akımın sıcaklığı
T_{ref}	Referans yakıt pili çalışma sıcaklığı
U_f	Yakıt kullanım oranı
V	Gerilim
V_c	Gerçek gerilim
V_{ref}	Referans gerilim
W	Watt
W_e	Elektrik gücü
W_{gt}	Gaz türbinlerinde üretilen elektrik gücü (kW)
W_k	Kompresörlerde harcanan elektrik gücü (kW)
W_{yp}	Yakıt pilinde üretilen elektrik gücü (kW)
ΔH	Entalpi değişimi
ΔT_{min}	Minumum yaklaşım sıcaklığı
ΔV_{anot}	Yakıt kompozisyonunun değişimi sonucu gerilimdeki değişim
ΔV_{katot}	Oksidan kompozisyonunun değişimi sonucu gerilimdeki değişim
ΔV_p	Sistem çalışma basıncının değişimi sonucu gerilimdeki değişim
ΔV_T	Çalışma sıcaklığı ve akım yoğunluğunun değişimi sonucu gerilimdeki
η_s	Sistem verimi

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Bir yakıt pili çalışma prensibinin şematik gösterimi	4
2.2. Katı oksit yakıt pilinin şematik gösterimi	6
3.1. Bir tüpsel katı oksit yakıt pilinin basit taslağı	12
3.2. CHEMCAD katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemi simülasyonunun akış şeması	13
3.3. Hücre performansı (1000°C sıcaklık ve 1 bar basınçta % 25 hava kullanımı ve % 85 yakıt (% 67 H ₂ , % 22 CO, % 11 H ₂ O) kullanımı)	18
4.1. Basınçlı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminin CHEMCAD’de simülasyonunun akış şeması	23
4.2. Sıcaklık aralıkları	24
4.3. Birikmeli sıcaklık-entalpi grafiğı	25
4.4. Kaydırmadan sonra birikmeli sıcaklık-entalpi grafiğı	26
4.5. Darboğaz dizaynı	26
4.6. Karşılaştırmalar sonrası basınçlı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminin CHEMCAD’de simülasyonunun akış şeması	28
4.7. Bir gaz türbin eklenmiş basınçlı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminin CHEMCAD’de simülasyonunun akış şeması	29
4.8. İki gaz türbin eklenmiş basınçlı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminin CHEMCAD’de simülasyonunun akış şeması	30
5.1. Sistem çalışma basıncının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi	38
5.2. Sistem çalışma basıncının 1 kW elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi	39
5.3. Sistem çalışma basıncının sistem verimi üzerine etkisi	39
5.4. Sistem çalışma basıncının toplam ısı değıştirici alanı ve ısı değıştiricilerin yatırım maliyeti üzerine etkisi	40
5.5. Sistem çalışma basıncının ısı değıştiricilerin yıllık yatırım, işletme ve toplam maliyetleri üzerine etkisi	40
5.6. Sistem çalışma basıncının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi	41

5.7. Sistem çalışma basıncının 1 kW elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi	42
5.8. Sistem çalışma basıncının sistem verimi üzerine etkisi	42
5.9. Sistem çalışma basıncının toplam ısı değiştirici alanı ve ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti üzerine etkisi	43
5.10. Sistem çalışma basıncının ısı değiştiricilerin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi	44
5.11. Sistem çalışma basıncının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi	45
5.12. Sistem çalışma basıncının 1 kW elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi	45
5.13. Sistem çalışma basıncının sistem verimi üzerine etkisi	46
5.14. Sistem çalışma basıncının toplam ısı değiştirici alanı, ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti, gaz türbininin yatırım maliyeti ve toplam yatırım maliyeti üzerine etkisi	46
5.15. Sistem çalışma basıncının ısı değiştiriciler ve gaz türbininin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi	47
5.16. Sistem çalışma basıncının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi	48
5.17. Sistem çalışma basıncının 1 kW elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi	48
5.18. Sistem çalışma basıncının sistem verimi üzerine etkisi	49
5.19. Sistem çalışma basıncının toplam ısı değiştirici alanı, ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti, gaz türbinlerin yatırım maliyeti ve toplam yatırım maliyeti üzerine etkisi	50
5.20. Sistem çalışma basıncının ısı değiştiriciler ve gaz türbinlerinin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi	50
5.21. Sistem çalışma basıncının 1 kW elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkilerinin tasarımlara göre karşılaştırılması	51
5.22. Sistem çalışma basıncının sistem verimi üzerine etkilerinin tasarımlara göre etkisi	52
5.23. Sistem çalışma basıncının 1 kW elektrik üretimi için yıllık toplam maliyetler üzerine etkilerinin tasarımlara göre karşılaştırılması	52
5.24. Yakıt pili çalışma sıcaklığının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan	

ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi	54
5.25. Yakıt pili çalışma sıcaklığının 1 kW elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi	54
5.26. Yakıt pili çalışma sıcaklığının sistem verimi üzerine etkisi	55
5.27. Yakıt pili çalışma sıcaklığının toplam ısı değiştirici alanı ve ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti üzerine etkisi	55
5.28. Yakıt pili çalışma sıcaklığının ısı değiştiricilerin yıllık yatırım, işletme ve toplam maliyetleri üzerine etkisi	56
5.29. Yakıt pili çalışma sıcaklığının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi	57
5.30. Yakıt pili çalışma sıcaklığının 1 kW elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi	57
5.31. Yakıt pili çalışma sıcaklığının sistem verimi üzerine etkisi	58
5.32. Yakıt pili çalışma sıcaklığının toplam ısı değiştirici alanı ve ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti üzerine etkisi	58
5.33. Yakıt pili çalışma sıcaklığının ısı değiştiricilerin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi	59
5.34. Yakıt pili çalışma sıcaklığının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi	60
5.35. Yakıt pili çalışma sıcaklığının 1 kW elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi	60
5.36. Yakıt pili çalışma sıcaklığının sistem verimi üzerine etkisi	61
5.37. Yakıt pili çalışma sıcaklığının toplam ısı değiştirici alanı, ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti, gaz türbininin yatırım maliyeti ve toplam yatırım maliyeti üzerine etkisi	62
5.38. Yakıt pili çalışma sıcaklığının ısı değiştiriciler ve gaz türbininin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi	62
5.39. Yakıt pili çalışma sıcaklığının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi	63
5.40. Yakıt pili çalışma sıcaklığının 1 kW elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi	64
5.41. Yakıt pili çalışma sıcaklığının sistem verimi üzerine etkisi	64
5.42. Yakıt pili çalışma sıcaklığının toplam ısı değiştirici alanı, ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti, gaz türbinlerin yatırım maliyeti ve toplam yatırım maliyeti	

üzerine etkisi	65
5.43. Yakıt pili çalışma sıcaklığının ısı değiştiriciler ve gaz türbinlerinin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi	66
5.44. Yakıt pili çalışma sıcaklığının 1 kW elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkilerinin tasarımlara göre karşılaştırılması	67
5.45. Yakıt pili çalışma sıcaklığının sistem verimi üzerine etkilerinin tasarımlara göre etkisi	67
5.46. Yakıt pili çalışma sıcaklığının 1 kW elektrik üretimi için yıllık toplam maliyetler üzerine etkilerinin tasarımlara göre karşılaştırılması	68
5.47. Yakıt kullanım oranının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi	69
5.48. Yakıt kullanım oranının 1 kW elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi	70
5.49. Yakıt kullanım oranının sistem verimi üzerine etkisi	70
5.50. Yakıt kullanım oranının toplam ısı değiştirici alanı ve ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti üzerine etkisi	71
5.51. Yakıt kullanım oranının ısı değiştiricilerin yıllık yatırım, işletme ve toplam maliyetleri üzerine etkisi	71
5.52. Yakıt kullanım oranının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi	72
5.53. Yakıt kullanım oranının 1 kW elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi	73
5.54. Yakıt kullanım oranının sistem verimi üzerine etkisi	73
5.55. Yakıt kullanım oranının toplam ısı değiştirici alanı ve ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti üzerine etkisi	74
5.56. Yakıt kullanım oranının ısı değiştiricilerin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi	75
5.57. Yakıt kullanım oranının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi	76
5.58. Yakıt kullanım oranının 1 kW elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi	76
5.59. Yakıt kullanım oranının sistem verimi üzerine etkisi	77
5.60. Yakıt kullanım oranının toplam ısı değiştirici alanı, ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti, gaz türbininin yatırım maliyeti ve toplam yatırım maliyeti	

üzerine etkisi	77
5.61. Yakıt kullanım oranının ısı değıştirciler ve gaz türbininin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi	78
5.62. Yakıt kullanım oranının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi	79
5.63. Yakıt kullanım oranının 1 kW elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi	79
5.64. Yakıt kullanım oranının sistem verimi üzerine etkisi	80
5.65. Yakıt kullanım oranının toplam ısı değıştirici alanı, ısı değıştircilerin yatırım maliyeti, gaz türbinlerin yatırım maliyeti ve toplam yatırım maliyeti üzerine etkisi	81
5.66. Yakıt kullanım oranının ısı değıştirciler ve gaz türbinlerinin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi	81
5.67. Yakıt kullanım oranının 1 kW elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkilerinin tasarımlara göre karşılaştırılması	82
5.68. Yakıt kullanım oranının sistem verimi üzerine etkilerinin tasarımlara göre etkisi	82
5.69. Yakıt kullanım oranının 1 kW elektrik üretimi için yıllık toplam maliyetler üzerine etkilerinin tasarımlara göre karşılaştırılması	83

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Yakıt pili türleri ve özellikleri	5
3.1. Katı oksit yakıt pili simülasyonu için temel kabuller	14
4.1. Akım bilgileri	22
4.2. Cascade diyagramı	24
4.3. Sıcaklık-Entalpi	25
4.4. Ekipmanların güç değerleri	31
4.5. Sistemlerin hücre gerilimi, akım yoğunluğu, kW net üretilen elektrik başına harcanan ütilite miktarı ve sistem verimi değerleri	32
4.6. Maliyet hesaplarında kullanılan değerler	33
4.7. Isı entegrasyonsuz sistemdeki ısı değiştiricilerin maliyetleri	34
4.8. Isı entegrasyonlu sistemdeki ısı değiştiricilerin maliyetleri	34
4.9. Tek gaz türbinli sistemdeki ısı değiştiriciler ve gaz türbininin maliyetleri	35
4.10. Çift gaz türbinli sistemdeki ısı değiştiriciler ve gaz türbinlerinin maliyetleri	35

1. GİRİŞ

Isı ve gücün verimli kullanımı, kimyasal proses tasarımı en çok ilgilenilen konulardandır. Kimya fabrikaları, ısı gerikazanımının gerektiği reaktörler, separatörler, kompresörler gibi ekipmanların bütünüdür. Isı gerikazanımını yani ısı entegrasyonunu sağlamak için ısı değiştirici ağının oluşturulması gerekir. Isı entegrasyonu güç ihtiyaçlarını içerirse, bu ısı ve güç entegrasyonu olarak tanımlanabilir. Bu entegrasyon, ısı değiştiriciler ve entegrasyon için kullanılan diğer ekipmanların toplam maliyetleri optimum olacak şekilde yapılır [Swaney, 1989].

1839'da Sir William Grove tarafından keşfedilen yakıt pilleri, bilinen en eski elektrik dönüşüm teknolojilerinden ve günümüzde gelecek için en umut verici güç üretim teknolojilerinden biridir. Veriminin yüksekliği ve çevre kirliliğine etkisinin düşüklüğü en önemli özelliklerindendir. Günümüzde, kullanımda ve gelişmekte olan birçok yakıt pili türü vardır. Bunların arasında katı oksit yakıt pilleri, yüksek sıcaklıkta çalışabilen yakıt pili teknolojisi olarak gelişmektedir. Katı oksit yakıt pillerini diğer yakıt pillerinden ayıran en ilgi çekici özelliği, geniş yakıt seçeneğinin olmasıdır. Ayrıca egzost gazları kojenerasyon uygulamaları için yüksek kalitededir [EG&G, 2004].

Bu tez çalışmasında, katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminde ısı entegrasyonu ile birlikte hem ısı hem de güç entegrasyonunun aynı anda yapıldığı simülasyon modeli oluşturulmuştur. Bu model ticari bir simülatör olan CHEMCAD ile yapılmaktadır. Önce ısı gerikazanımı olmayan tasarıma darboğaz yöntemi ile ısı entegrasyonu uygulanmaktadır. Sonra bu tasarıma bir ve iki gaz türbini ayrı ayrı eklenip ısı ve güç entegrasyonu uygulanarak yeni tasarımlar oluşturulmaktadır. Bu dört tasarım, entegrasyon için kullanılan ekipmanların toplam maliyetleri bakımından karşılaştırılmaktadır.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde; yakıt pilleri, katı oksit yakıt pilleri ve katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemleri anlatılmaktadır.

Üçüncü bölümde; katı oksit yakıt piline dayalı bir güç üretim sisteminin CHEMCAD modülleri kullanılarak yapılan simülasyonu ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

Dördüncü bölümde; ısı gerikazanımı olmayan katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminin tasarımı anlatılmaktadır. Bu sistemdeki soğuk ve sıcak akımların özellikleri tespit edilmektedir. Daha sonra sisteme darboğaz yöntemi uygulanarak sistemin minimum ısıtma ve soğutma ihtiyacı hesaplanmaktadır. Gerekli ısı değiştiriciler eklenerek uygun karşılaşmalar yapılmaktadır. Daha sonra ısı gerikazanımlı bu sisteme bir ve iki ısı motoru ayrı ayrı eklenerek sıcak akımdan elektrik elde edilmektedir. Aynı zamanda bu sıcak akımın soğutulması için harcanacak soğuk ütilite miktarı azaltılmış olmaktadır. Ayrıca simülasyonu anlatılan bu sistemlerin ısı değiştiriciler, varsa gaz türbinleri maliyetleri bakımından ekonomik değerlendirmeleri yapılarak karşılaştırılmaktadır.

Beşinci bölümde; sistem çalışma basıncı, yakıt pili çalışma sıcaklığı ve yakıt kullanım oranı gibi parametrelerin ısı entegrasyonsuz, ısı entegrasyonlu, tek gaz türbinli ve çift gaz türbinli katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemlerinde elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarları ve maliyetleri üzerine etkileri araştırılmaktadır.

Son bölümde; bu çalışmanın sonuçları hakkında bilgi verilmektedir.

2. KATI OKSİT YAKIT PİLİNE DAYALI GÜÇ ÜRETİM SİSTEMLERİ

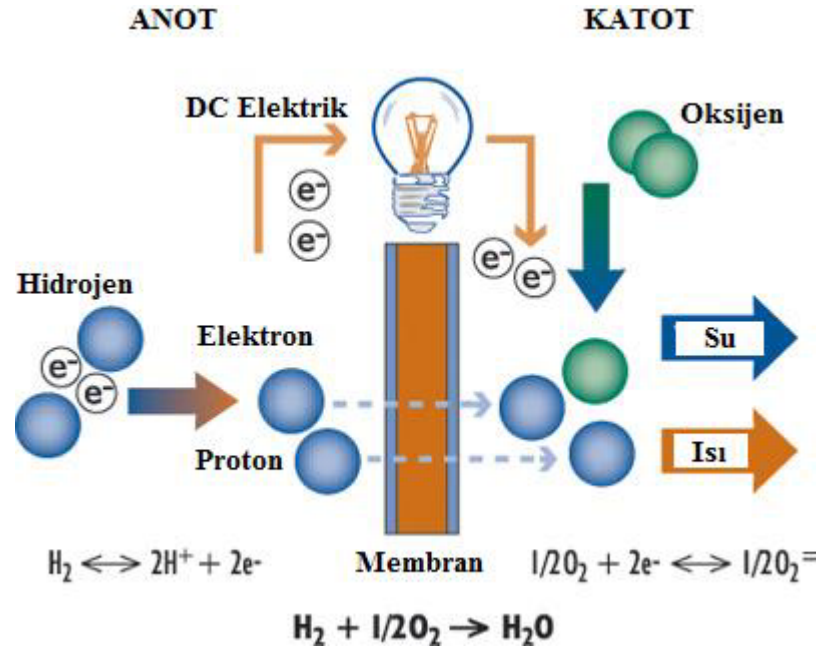
Bu bölümde, yakıt pilleri, katı oksit yakıt pilleri ve katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemleri anlatılmaktadır.

2.1. Yakıt Pilleri

Yakıt pili, elektrolit ve bu elektroliti sandviç şeklinde saran iki elektrottan oluşmaktadır. Oksijen bir elektrottan, hidrojen de diğer elektrottan geçerek elektrik, su ve ısı üretir. Prensip olarak, yakıt pilleri bir pil gibi çalışır. Pilden farklı olarak, yakıt pilleri bitmez ya da şarj edilmesine gerek yoktur. Yakıtle beslendiği sürece elektrik ve ısı formunda enerji üretir. Hidrojen, yakıt pillerinin anoduna beslenir. Oksijen (veya hava) yakıt pillerine katottan girer. Bir katalizör yardımıyla, hidrojen atomu, katoda farklı yollar izleyerek gidecek olan bir proton ve bir elektrona ayrılır. Proton elektrolit içerisinden geçerken elektronlar, katoda dönüp hidrojen ve oksijen ile birleşerek su molekülü oluşturmada önce bir elektrik akımı oluştururlar. Şekil 2.1'de bir yakıt pilinin çalışma şekli görülmektedir. "Yakıt dönüştürücü" içeren bir yakıt pili sistemi hidrojeni herhangi bir hidrokarbondan-doğalgazdan, metanolden ve hatta benzinden elde edebilir. Yakıt pilleri, verimli, ekonomik, sessiz ve çevre ile uyumlu enerji üretiminde kullanılan, gelecek kuşaklarda çok daha yaygın olarak kullanılacağı tahmin edilen önemli yaklaşımlardan biridir. Yakıt gazlarındaki kimyasal enerji, hava kirliliğine sebep olmayan elektrokimyasal bir proseste elektrik enerjisine dönüştürülür [<http://corrosion-doctors.org>].

Yakıt pili tarihi, 1839'da suyun elektrolizi üzerine deney yapan Sir William Grove ile başlamıştır. 1889'dan yirminci yüzyıla kadar, birçok kişi kömür veya karbonu direk elektriğe dönüştürebilen bir yakıt pili üretmeyi denemiştir. 1932'de, Francis Bacon ilk yakıt pilini geliştirmiştir. Hidrojen, oksijen, bir alkali elektrolit ve nikel elektrot kullanmıştır. 1952'de, Bacon ve yardımcısı 5 kW'lık bir yakıt pili sistemi üretmişlerdir. Yakıt pili teknolojisine en büyük destek NASA'dan gelmiştir.

1950'lerin sonunda, NASA uzay çalışmalarında elektrik üretmenin kısa bir yoluna ihtiyaç duymuştur. Nükleer çok tehlikeli, piller çok ağır ve güneş gücü çok kullanışsızdı. Yanıt, yakıt pilleriydi. NASA yakıt pili teknolojisi için 200 araştırmaya fon sağlamıştır. Hem alkali hem de polimer elektrolit yakıt pilleri, kapasitelerini uzay aracı programları olan Apollo ve Gemini'de göstermişlerdir. Günümüzde yapılan çalışmalar, sabit güç üniteleri ve ulaşım uygulamalarındaki güç sistemlerinin geliştirilmesi üzerinedir [<http://corrosion-doctors.org>].



Şekil 2.1. Bir yakıt pili çalışma prensibinin şematik gösterimi
[rpifuelcell.eventurestudio.com/index.cfm].

Pratik nedenlerden dolayı yakıt pilleri temelde kullandıkları elektrolit tipine göre sınıflandırılmaktadır. Buna göre yakıt pilleri;

- Polimer elektrolit yakıt pili (PEYP)
- Fosforik asit yakıt pili (FAYP)
- Alkali yakıt pili (AYP)
- Ergimiş karbonat yakıt pili (EKYP)
- Katı oksit yakıt pili (KOYP)

şeklinde sıralanabilir.

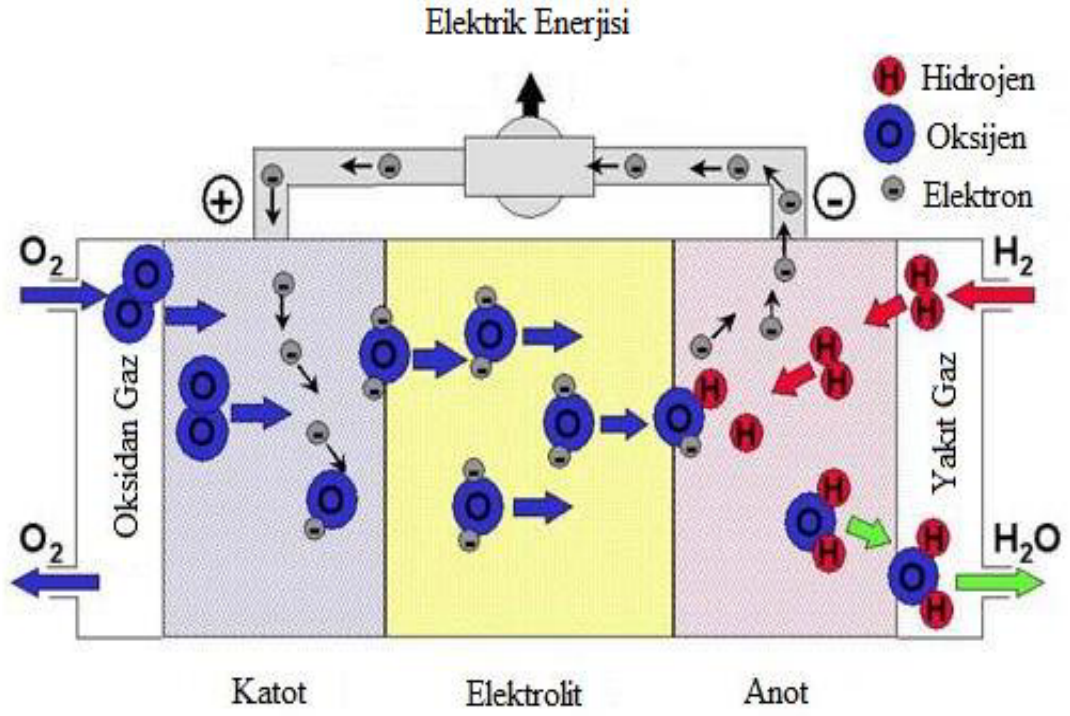
Tablo 2.1’de yakıt pili türleri ve özellikleri görülmektedir.

Tablo 2.1. Yakıt pili türleri ve özellikleri [www.eie.gov.tr].

	Fosforik Asit Yakıt Pili	Katı Oksit Yakıt Pili	Erimiş Karbonat Yakıt Pili	Polimer Elektrolit Yakıt Pili	Alkali Yakıt Pili
Elektrolit	Fosforik Asit	Çinko üzerine tutturulmuş Yittria (YSZ)	Karbonat	Polimer iyon değişim filmi	Potasyum hidroksit
Elektrolitteki Taşıyıcı	H ⁺	O ²⁻	CO ₃ ²⁻	H ⁺	OH ⁻
Hücre Materyali	Karbon	Seramik vb.	Ni, Paslanmaz Çelik, vb.	Karbon	Karbon
Güç Yoğunluğu (W/kg)	120-180	15-20	30-40	350-1500	35-105
Yakıt Türü	H ₂ , Hidrokarbonlar, Fosil yakıtlar	H ₂ , Hidrokarbonlar	H ₂ , Hidrokarbonlar	H ₂ , Hidrokarbonlar	H ₂
Sıcaklık	200 °C	1 000 °C	600-700 °C	80 °C	80 °C
Güç Üretim Verimi	% 37-42	% 60-70	% 45-60	% 60	% 42-73
Uygulama Alanları	Ticari Uyg. (Oteller, Hastaneler vs)	Ticari Uyg., Sanayi Uyg., Elektrik Santralleri	Elektrik Santralleri	Ulaşım Araçları, Askeri Sistemler	Uzay Çalışmaları

2.2. Katı Oksit Yakıt Pilleri (KOYP)

Katı oksit yakıt pilleri yaklaşık 1000 °C sıcaklıkta çalışırlar ve sıvı elektrolit yerine sert, seramik bir elektrolit kullanırlar. Katı elektrolitin her iki tarafı geçirgen özel elektrot maddeyle kaplanmıştır. Yüksek çalışma sıcaklığında, negatif yüklü oksijen iyonları kristal madde içerisinde hareket eder. Hidrojen içeren bir yakıt gazı anottan geçirildiğinde negatif yüklü oksijen iyonları yakıtı oksitlemek için elektrolitten geçer. Oksijen genellikle katot tarafında havadan elde edilir. Anotta oluşan elektronlar harici bir yol kat ederek elektrik devresini tamamlar ve elektrik enerjisi üretilmiş olur. Katı oksit yakıt pillerinde verim % 60 seviyesindedir. Şekil 2.2’de bir katı oksit yakıt pilinin çalışma şekli görülmektedir [http://americanhistory.si.edu/fuelcells].



Şekil 2.2. Katı oksit yakıt pilinin şematik gösterimi [www.iwe.uni-karlsruhe.de].

Katı oksit ve erimiş karbonat yakıt pillerinin tarihsel gelişimi beraber devam etmiştir. 1930'ların sonunda İsviçreli bilim adamı Emil Baur ve arkadaşı H. Preis zirkonyum, itriyum, seryum, lantan ve tungsten gibi katı oksit elektrolitler kullanarak deneyler yapmışlardır. Bu çalışmalardaki tasarımları elektriksel açıdan yeterince iletken olmamış ve elektrolitlerle, aralarında karbonmonoksitin de bulunduğu çeşitli gazlar arasında istenmeyen reaksiyonlar meydana gelmiştir. 1940'ta Rus bilim adamı O. K. Davtyan, iletkenliği artırıcı çalışmalar yapmış ancak istenmeyen kimyasal reaksiyonları engelleyememiştir. 1950'lerin sonlarında katı oksit yakıt pilleri çalışmasına Lahey'deki Central Technical Institute'de, Pensilvanya'daki Consolidation Coal Company'de ve New York'taki General Electric tesislerinde hız verilmiştir. 1959'da katı elektrolitlerin yüksek elektriksel iç direnç, erime ve yarı iletkenlikten kaynaklanan kısa devre olayları gibi problemler yarattığı belirlenmiştir. Bu yüzden erimiş karbonat yakıt pillerinin (EKYP) daha avantajlı olduğu kabul edilmiştir. Ancak katı oksit yakıt pillerinden herkes ümidini kesmemiştir. Örneğin 1962 yılında Westinghouse araştırmacıları zirkonyum oksit ve kalsiyum oksit kullanan bir pili test etmişlerdir. Son olarak da dünyada artan enerji ihtiyacı ve

tırmanan enerji fiyatları üzerine birçok şirket yeniden katı oksit yakıt pilleri konusundaki çalışmalarına hız vermiştir [<http://americanhistory.si.edu/fuelcells>].

2.3. Katı Oksit Yakıt Piline Dayalı Güç Üretim Sistemleri

Katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemleri; katı oksit yakıt pili, yakıt reformasyon bölümü ve artıyıcıdan oluşan sistemlerdir. Bu sistemler ile ilgili birçok modelleme ve simülasyon çalışması yapılmıştır. Bu çalışmalarda genel hedefler, farklı tasarımlar yaparak, farklı yakıtlar kullanarak sistem performansını geliştirmek ve cazip maliyetlere ulaşmaktır.

Palsson ve ark. (2000), katı oksit yakıt pili (KOYP) ve gaz türbini kombine çevrimleri üzerine teorik çalışmalar yapmışlardır. Amaçları, bu tür sistemlerin performans ve çalışma davranışını değerlendirmektir. Yakıt pili modelini, direnç kaybı, reformasyondaki reaksiyon kinetiği ve ısı iletimi gibi detaylarla geliştirmiş ve ticari bir simülatör olan ASPEN PLUSTM'a entegre etmişlerdir. İncelenen sistem, 500 kW'lık, dış önreformasyon ve anot gazı geribeslemesi içeren bir sistemdir. Duyarlılık çalışmalarından basınç oranının performans üzerinde önemli bir etkisi olduğu sonucuna varmışlardır.

KOYP ve gaz türbininden oluşan bir kombine sistem, Kuchonthara ve ark. (2003) tarafından simüle edilerek buhar ve ısı gerikazanımı değerlendirilmiştir. Bu gerikazanımlara göre sistemin toplam verimi incelenmiştir. Ayrıca türbin giriş sıcaklığının yüksek veya düşük olması ile oluşan değişimler gözlenmiştir. Sonuçta, buhar gerikazanımının toplam verim ve spesifik güce pozitif etki yaptığı bulunmuştur.

Van Herle ve ark. (2003), bir yenilenebilir enerji kaynağı olan biyogazın KOYP'ne beslenmesine dayalı bir kojenerasyon sistemi üzerine çalışma yapmışlardır. Proses akış diyagramını çeşitli çalışma parametreleri ile bir yazılım paketinde tanımlamışlardır. Biyogazdaki CO₂ oranı, biyogaz akımına hava ekleme miktarı, giren yakıt buhar ekleme miktarı, hava fazlası ve yığın çalışma sıcaklığının sistem verimine etkisini incelemişlerdir.

Kivisaari ve ark. (2004), yaptıkları çalışma ile ısı ve güç dağıtımı için kömür gazlaştırma gelen gazla beslenen 50 MW'lık katı oksit yakıt pili sisteminin uygulanabilirliğini öğrenmeyi amaçlamışlardır. % 47 civarında elektriksel verim (yakıtın LHV'si başına üretilen elektrik) ve % 85'e yakın sistem verimine (yakıtın LHV'si başına üretilen elektrik ve gerikazanılan ısı toplamı) ulaşmışlardır.

Kuchonthara ve ark. (2005), kömür gazlaştırma, KOYP ve ısı gerikazanımından oluşan kombine güç üretim sisteminde ısı gerikazanımı üzerine çalışma yapmışlardır. Proses simülasyonu için ASPEN PLUSTM proses simülasyon programını kullanmışlardır. Sonuçta KOYP olmadan % 39,5 (HHV) olan ısı verimin, KOYP ile % 45 (HHV)'a çıktığını bulmuşlardır.

Yi ve ark. (2005), simülasyonunu yaptıkları 25 kW'lık katı oksit yakıt piline entegre edilmiş reformasyon birimine farklı yakıtlar (doğalgaz, biyogaz, kömür gazlaştırma ile elde edilmiş gaz gibi) besleyerek farklarını incelemişlerdir. Katı oksit yakıt pilinin geniş bir yakıt seçeneğine izin verse de bu seçeneğin reformasyon biriminin çalışma şartlarını ve dizaynını önemli bir biçimde etkileyebileceği sonucuna varmışlardır.

Zhang ve ark. (2005), hem yakıt pili yığını optimizasyonu hem de verim ve ekonomi yönünden ilişkili tesis dengesini içeren bir yakıt pili sistemi dizaynı yapmışlardır. Sistemin parçalarını ticari bir simülatör olan ASPEN PLUSTM ile modelleyerek simüle etmişlerdir. Daha önceki çalışmalarda KOYP yığını modeli için Fortran, Visual Basic veya C++ gibi programlama dilleri kullanılmıştı. Ama Zhang ve ark., sadece ASPEN PLUSTM'nin fonksiyonları ve mevcut temel işlem modüllerini kullanarak bunu gerçekleştirmişlerdir. Sistemleri için 100 kW'lık Siemens-Westinghouse tarafından geliştirilen tüpsel KOYP yığını örnek almışlardır. Yakıt kullanım oranı, akım yoğunluğu ve buhar/karbon oranı gibi parametrelerin sistemin performansına etkilerini incelemişlerdir.

Calise ve ark. (2006), bir katı oksit yakıt pili-gaz türbini hibrit güç sisteminin simülasyon ve ekserji analizini yapmışlardır. Simülasyonlar, değişik çalışma basıncı, yakıt kullanım oranı, yakıt/hava oranı, buhar/karbon oranı ve akım yoğunluğu için uygulanmıştır. 1.5 MW'lık sistem için % 60'a yakın elektriksel verime ulaşmışlardır.

Buna atık ısı gerikazanımı da eklenince genel verim (LHV başına üretilen elektrik ve gerikazanılan ısı toplamı) % 70 olmuştur.

Panopoulos ve ark. (2006), biyokütlenin buharla gazlaştırılması prosesi ile KOYP'nin entegrasyonundan oluşan kombine bir ısı ve güç sistemini incelemişlerdir. Sistem, detayları ile birlikte ASPEN PLUSTM'de modellenmiştir. Yakıt kullanım oranı 0.7 ve akım yoğunluğu 2500 Am^{-2} ile KOYP çalışırsa ısı verimin % 14, elektriksel verimin % 36 olduğunu bulmuşlardır.

KOYP ve gaz türbini hibrit sisteminin dinamik modeli Zhang ve ark. (2006) tarafından incelenmiştir. Zamana karşı KOYP hava giriş sıcaklığı, KOYP çıkış sıcaklığı, türbin giriş sıcaklığı, çıkış gerilimi ve KOYP'nin çıkışındaki gaz fraksiyonlarının değişimleri sunulmuştur.

Zhang ve ark. (2007), bir diğer çalışmalarında hava önısıtması için proste iki farklı çevrim tasarlamışlardır. Biri, KOYP/GT hibrit sisteminde ısı değiştirici ile ısı kazanımına, diğeri ise egzost gazı geribeslemesine dayanmaktadır. Yakıt kullanım oranı, hava kullanım oranı, çalışma sıcaklığı ve gaz türbini veriminin her iki tasarımdaki sistem performansına etkileri karşılaştırılıp tartışılmıştır.

Lisbona ve ark. (2007), elektrik üretimi amaçlı KOYP sistemi için bir model geliştirmiş ve üzerine çalışma yapmışlardır. Sistemin elektriksel ve ısı verimi değerlendirilmiştir. Yakıt kullanım oranı, yığın sıcaklığı, anot çıkış gazının geribeslenme oranı, hava giriş sıcaklığı ve dış önreformasyon oranının etkileri analiz edilmiştir.

Palazzi ve ark. (2007), KOYP'li bir entegre sistemin en cazip konfigürasyonlarını oluşturmak için bir termoeekonomik optimizasyon metodu sunmuşlardır. Geliştirilen metodda enerji akışları proses simülasyon yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Sistem entegrasyonu darboğaz metodu ile optimize edilerek sağlanmıştır. Böylece minimum enerji ihtiyacı bulunmuş ve ideal ısı değiştirici ağı dizaynı için temel oluşturulmuştur. Sistemin optimizasyonunun iki hedefi vardı. Biri minimum spesifik maliyet ($\$/\text{cm}^2$), diğeri ise maksimum verimdir.

50 kW'lık düzlemsel KOYP sistemi modellenmiş ve optimize edilerek % 34 ile % 44 arasında değişen verimli dizaynlar elde edilmiştir.

Arsalis (2008), 1.5-10 MWe arasında değişen kapasitede katı oksit yakıt pili, gaz türbini ve buhar türbininden oluşan sistemleri dizayn etmiş ve üzerine sistem performans analizi yapmıştır. Sistemin termodinamik, kinetik, geometrik ve maliyet modellerini MATLAB'da geliştirmiş ve uygulamıştır. Toplam sistem veriminin maksimum veya toplam sistem maliyetinin minimum olduğu sistem dizaynına ulaşmayı hedeflemiştir.

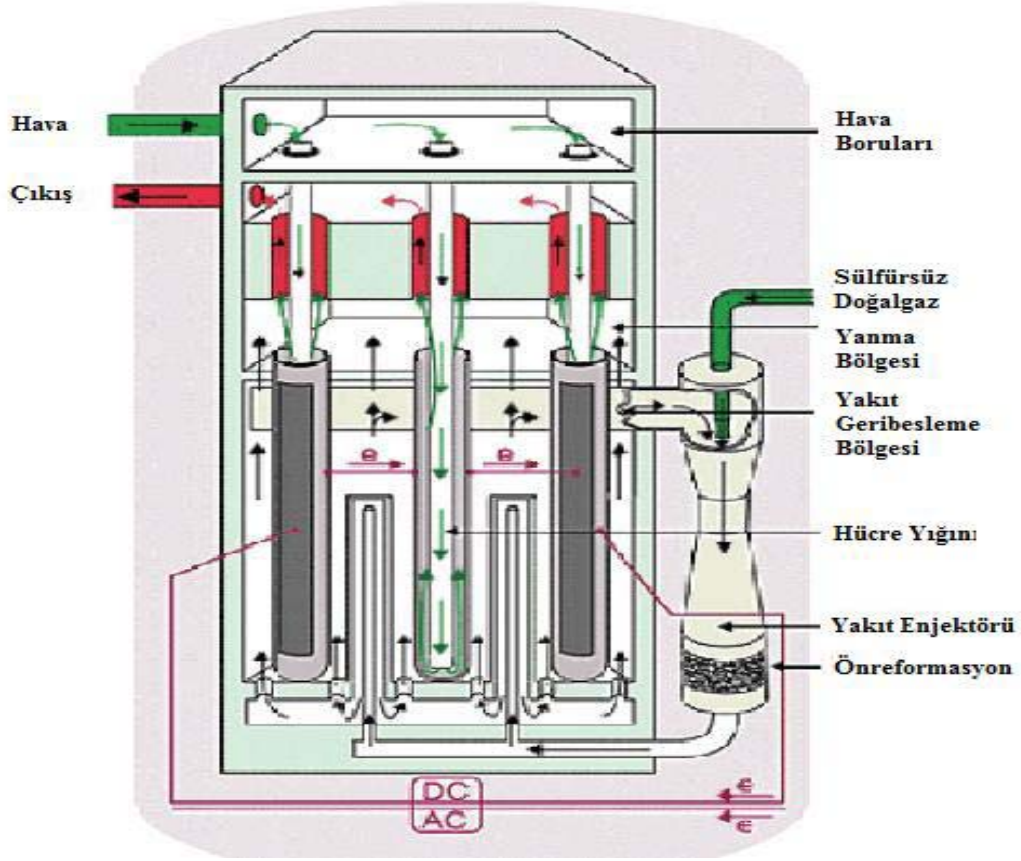
Franzoni ve ark. (2008), 1.5 MWe'lık dağıtılmış güç üretim tesislerinin termodinamik ve ekonomik analizlerini yapmış ve karşılaştırmışlardır. Hibrit basınçlı katı oksit yakıt pili sistemi ile CO₂ ayırma teknolojisi entegrasyonu için farklı CO₂ ayırma teknolojileri kullanarak düşük CO₂ emisyonlu tesisi amaçlamışlardır.

3. CHEMCAD İLE KATI OKSİT YAKIT PİLİNE DAYALI BİR GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN SİMÜLASYONU

Bu tez çalışmasında, proses tasarımı için, ticari bir proses simülatörü olan CHEMCAD kullanılmıştır. CHEMCAD, büyük termodinamik ve fiziksel özellik veritabanına sahiptir. Ayrıca, sistem modelleme, entegrasyonu ve optimizasyonu içeren kimyasal proses çalışmaları için hesaplama kolaylığı ve çabukluğu sağlar. Literatürde, proses simülatörlerini kullanarak yapılan en yaygın katı oksit yakıt pili modelleme yaklaşımı, Fortran, Visual Basic gibi bir programlama dilinde katı oksit yakıt pili yığını modeli geliştirip simülatöre altprogram gibi bağlantı yapmaktır [Riensch et al., 1998; Fuller and Chaney, 2000; Mozaffarian, 1994; Palsson et al., 2000]. Ama bu tezdeki yaklaşım, mevcut CHEMCAD fonksiyonları ve birim operasyon modelleri ile Microsoft Excel de kullanarak bir katı oksit yakıt pili yığını modeli geliştirmektir. Katı oksit yakıt pili yığını modeli, Siemens-Westinghouse tarafından geliştirilen tüpsel iç reformasyonlu katı oksit yakıt pili teknolojisine dayanmaktadır.

3.1. Siemens-Westinghouse Tüpsel Katı Oksit Yakıt Pili Teknolojisi

Şekil 3.1’de görülen doğalgaz beslemeli tüpsel katı oksit yakıt pilinin bir hücresi, 1500 mm uzunluk, 22 mm çap, 2 mm duvar kalınlığı ve 834 cm² aktif alana sahiptir. Atmosferik basınç, 1000 °C sıcaklık, % 85 yakıt kullanımı ve % 25 hava kullanımı şartlarında çalışırken, hücre başına 210 W’lık güç üretimine çıkmak mümkün olabilir. Oksidasyon için hava, ortadaki enjektör boruyla hücrelerin iç kısmına, doğalgaz ise dış kısmına gönderilmektedir. Tamamıyla izole olan sistem sayesinde yakıt, havadaki azotla hiçbir şekilde reaksiyona girmemektedir [http://www.powergeneration.siemens.com].



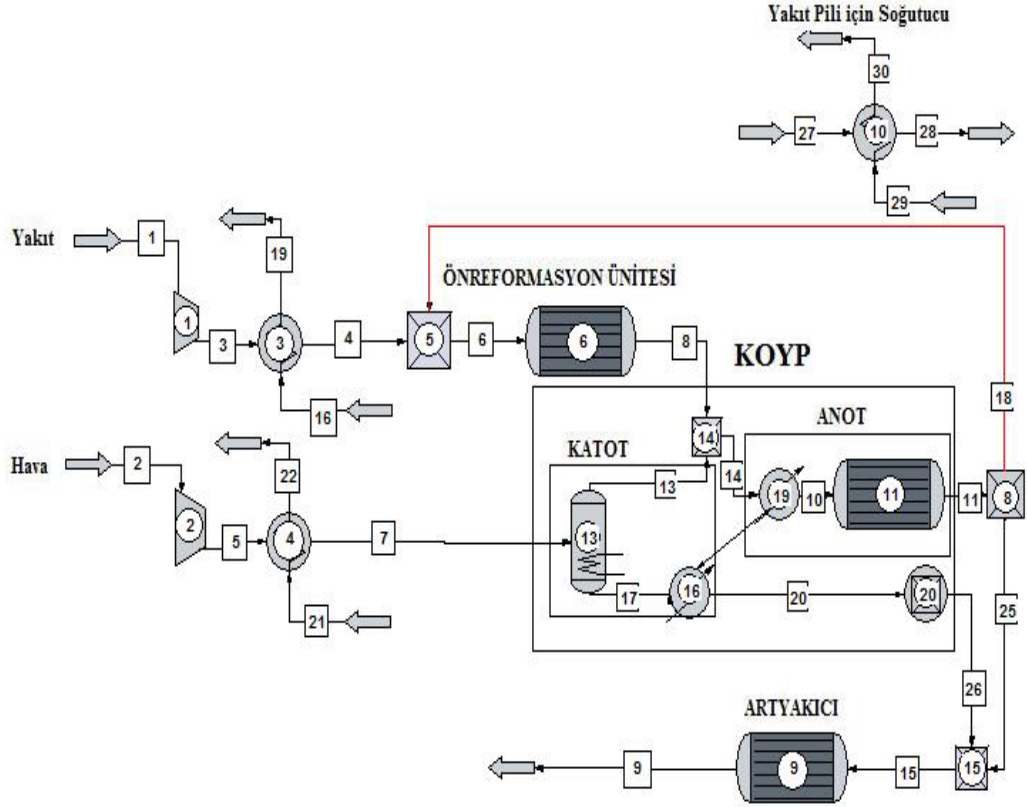
Şekil 3.1. Bir tüpsel katı oksit yakıt pilinin basit taslağı
[<http://www.powergeneration.siemens.com>].

Hücreler, ticari amaç için demetler halinde birbirine bağlanarak elektrik üretimine hazır hale getirilmiştir. Doğalgaz gibi hidrokarbon yakıtların reformasyonu için önreformasyon bölümü sisteme eklenmiştir. Yakıt pilinde kullanılmayan yakıtın bir kısmı tekrar önreformasyon bölümüne geri beslenmekte, diğer kısmı ise kullanılmayan havayla yanma bölgesinde yakılmaktadır [Veyo and Forbes, 1998; Riensche et al., 2000].

3.2. CHEMCAD İle Tüpsel Katı Oksit Yakıt Piline Dayalı Bir Güç Üretim Sisteminin Simülasyonu

Önceki kısımda bahsedilen doğalgaz beslemeli, tüpsel katı oksit yakıt pili yığınının özellikleri, standart, yerleşik birim operasyon modülleri ve fonksiyonları kullanan CHEMCAD’de uygulanmıştır. Şekil 3.2, katı oksit yakıt piline dayalı güç

üretim sisteminde bulunan, enjektör, önreformasyon, yakıt pili yığını ve yanma birimi gibi birimler ve fonksiyonların hepsini içermektedir. Her bir birimin simülasyon yaklaşımı sonraki kısımlarda anlatılmaktadır.



Şekil 3.2. CHEMCAD katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemi simülasyonunun akış şeması.

3.2.1. Enjektördeki Yakıtın Geri Beslenmesi ve Karıştırılması

Katı oksit yakıt pili yığına beslenen taze doğalgaz, elektrokimyasal reaksiyon ürününün bir kısmıyla karıştırılarak enjektör sayesinde önreformasyon birimine beslenir. Geri besleme oranı, önreformasyon için belirlenen buhar/karbon oranına göre hesaplanır. Bu işlemlerin simülasyonu için CHEMCAD Mixer ve Splitter kullanılmıştır.

Besleme akımı, katı oksit yakıt piline beslenen taze doğalgaz yakıtıdır. Geri besleme akımı ise, Splitter blok kullanılarak anot çıkış gazının bölünmesinden

oluşur. Bölünme oranı, istenen buhar/karbon oranı, taze yakıtın karbon eşdeğer miktarı ve anot çıkışındaki su miktarı kullanılarak Microsoft Excel’de hesaplanmaktadır. Sonra, hesaplanan oran CHEMCAD’e aktarılmaktadır. Ayrıca geri beslemenin olabilmesi için taze yakıtın basıncı ayarlanmaktadır.

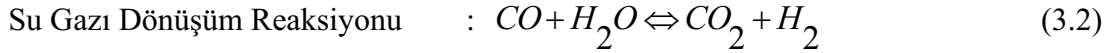
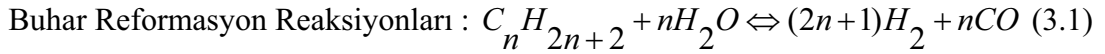
Burada kullanılan ve modelle ilgili tüm kabuller Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Katı oksit yakıt pili simülasyonu için temel kabuller [Campanari, 2001; Veyo and Forbes, 1998].

Giren Yakıt Kompozisyonu	CH ₄ % 81.3, C ₂ H ₆ % 2.9, C ₃ H ₈ % 0.4, C ₄ H ₁₀ % 0.2, N ₂ % 14.3, CO % 0.9
Hücre Çalışma Sıcaklığı	910 °C
Hücre Çalışma Basıncı	2.76 atm
Aktif Alan	96.1 m ² (1152 Hücre)
Giren Hava Sıcaklığı	15 °C
Giren Yakıt Sıcaklığı	15 °C
Artyakıcı Verimi	% 100
Yakıt Kullanım Oranı	% 85
Buhar/Karbon Oranı	2.5
Taze Yakıt/Geri Besleme Basıncı Oranı	3
KOYP’deki Basıncı Kaybı	0
KOYP Isı Kaybı	% 2
Egzost Çıkış Sıcaklığı,	70 °C
Gaz Türbini Verimi	% 74
Yakıt/Hava Kompresör Verimi	% 65

3.2.2. Karıştırılmış Yakıtın Reformasyonu

Tamamen iç reformasyonun yani anotta hidrokarbonların buhar reformasyon reaksiyonu ve karbonmonoksitin su gazı dönüşüm reaksiyonunun olması, hem karbon oluşumuna hem de endotermik reaksiyonlardan dolayı büyük sıcaklık değişimlerine neden olabilir. Bu nedenle yakıt pilinden önce bir önreformasyonun olması gerekmektedir. Bu kısımda adyabatik buhar reformasyon reaksiyonları olmaktadır ve bir CHEMCAD Gibbs denge reaktör modülü kullanılmaktadır. Önreformasyonda meydana gelen kimyasal reaksiyonlar:

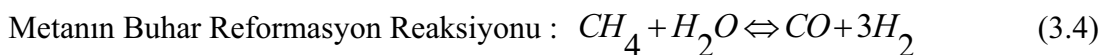
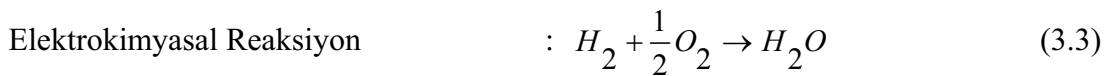


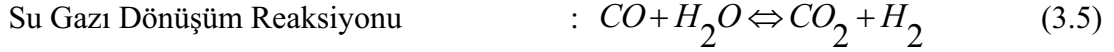
Buradan çıkan akımın sıcaklığı reaksiyon denge sıcaklığına eşittir.

3.2.3. Anotta İç Reformasyon ve Elektrokimyasal Reaksiyon

910 °C’de, katı oksit yakıt piline beslenen yakıtta bulunan CO’ten su gazı dönüşüm reaksiyonu ile H₂ ve CH₄’dan buhar reformasyon reaksiyonu ile H₂ elde edilmesi, bunların direk oksidasyonundan daha avantajlıdır. Sadece H₂’nin oksidasyonu olursa yakıt pilinin elektrokimyasal davranışı önceden kestirilebilir. Böylece analiz kolaylaştırılmış olur [EG&G, 2004].

Hücredeki reaksiyonların simülasyonu için, bir denge reaktör modülü olan CHEMCAD Gibbs reaktör modülü kullanılmıştır. Elektrokimyasal reaksiyonun stokiyometrisi, hidrojen ile oksijenin reaksiyonuna dayanmaktadır. Reaksiyonlar aşağıda verilmiştir:





Yukarıdaki reaksiyonlardan elektrokimyasal reaksiyon, tersinir bir reaksiyon olmamasına rağmen, çok yüksek sıcaklıktan dolayı denge reaksiyonu olarak kabul edilmekte ve bu duruma göre simülasyonu yapılmaktadır. Tersinir kabul edilerek yapılan reaksiyonun simülasyonu, elektrokimyasal reaksiyon simülasyonuna yakın sonuçlar vermektedir. Denge ve çıkış sıcaklığı, 910°C olarak ayarlanmıştır. Buhar reformasyon reaksiyonu, bu sıcaklık civarında tamamlanır. Elektrokimyasal reaksiyona girecek hidrojen, önreformasyondan gelen ve anottaki diğer reaksiyonlardan üretilen hidrojenden oluşur.

3.2.4. Oksijen Temini

Katı oksit yakıt piline giren hava akımı, elektrokimyasal reaksiyona girecek oksijeni sağlamak için hücre katotuna girer. Katotun simülasyonu için seperatör modülü kullanılmıştır. Böylelikle anottaki reaksiyonlar için yeterli miktarda oksijen havadan alınarak anota verilmektedir. Reaksiyonlar için gereken oksijen miktarı, yakıtın eşdeğer hidrojen miktarı ve yakıt kullanım oranı (U_f) kullanılarak Microsoft Excel'de hesaplanır.

$$n_{O_2, \text{gereken}} = 0.5 (U_f) (n_{H_2, \text{eşdeğer}}) \quad (3.6)$$

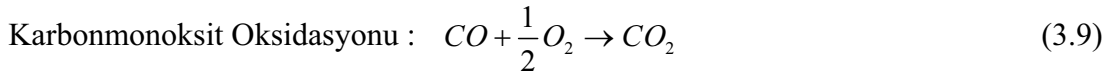
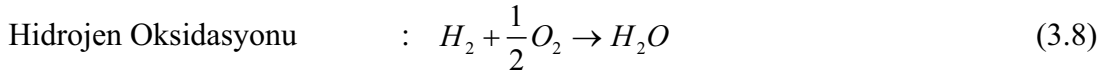
$n_{H_2, \text{eşdeğer}}$ ifadesi, taze yakıttaki eşdeğer hidrojen miktarıdır. Aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir:

$$n_{H_2, \text{eşdeğer}} = n_{H_2, \text{in}} + 1 \cdot n_{CO, \text{in}} + 4 \cdot n_{CH_4, \text{in}} + 7 \cdot n_{C_2H_6, \text{in}} + \dots \quad (3.7)$$

3.2.5. Artyakıcı

Anot çıkışından alınan kullanılmamış yakıt ve reaksiyon ürünlerinden oluşan akımın bir kısmı daha önce belirtildiği gibi taze yakıt ile karıştırılmak üzere geri beslenir. Geriye kalan kısmı ise yanma bölümüne (artyakıcı) gönderilir. Bölünme oranı, istenen buhar/karbon oranı, taze yakıtın karbon eşdeğer miktarı ve anot

çıkışındaki su miktarı kullanılarak Microsoft Excel’de hesaplanarak CHEMCAD’e gönderilmektedir. Katot çıkışından alınan atık hava içerisindeki oksijen, yanma reaksiyonu için kullanılır. Reaksiyonun stokiyometrisi ve dönüşümü bilindiğinden dolayı yanmanın simülasyonu için bir CHEMCAD reaktör modülü olan Rstoic kullanılmıştır. Aşağıda artyakıcıda gerçekleşen reaksiyonlar belirtilmiştir:



3.2.6. Hücre Gerilimi ve Sistem Veriminin Hesaplanması

Hücre gerilimi hesabı, simülasyonun en önemli kısmıdır. Modelde hücre geriliminin hesabı için kullanılan metod birçok kaynağa [EG&G, 2004; Campanari, 2001] dayalıdır. Metod, standart koşullardaki deneysel verilerin interpolasyonu ile oluşturulan performans grafiğini kullanarak akım yoğunluğuna karşılık gelen referans gerilime ve yarı deneysel bağıntılarla gerçek gerilime ulaşır. Referans gerilimi bulmak için kullanılan deneysel grafik Fuel Cell Handbook’ta yayınlanmıştır [EG&G, 2004]. Üstelik CHEMCAD, Microsoft Excel’i kullanarak hücre performansını kolay bir şekilde hesaplayabilmektedir. Bahsedilen deneysel grafik Şekil 3.3’de verilmiştir.

Elde edilen referans gerilime, çalışma basıncı, sıcaklığı, akım yoğunluğu ve yakıt/hava oranı etkilerini dahil ederek, gerçek gerilime ulaşmak için aşağıdaki dört yarı deneysel bağıntıdan faydalanılmaktadır [Campanari, 2001; EG&G, 2004].

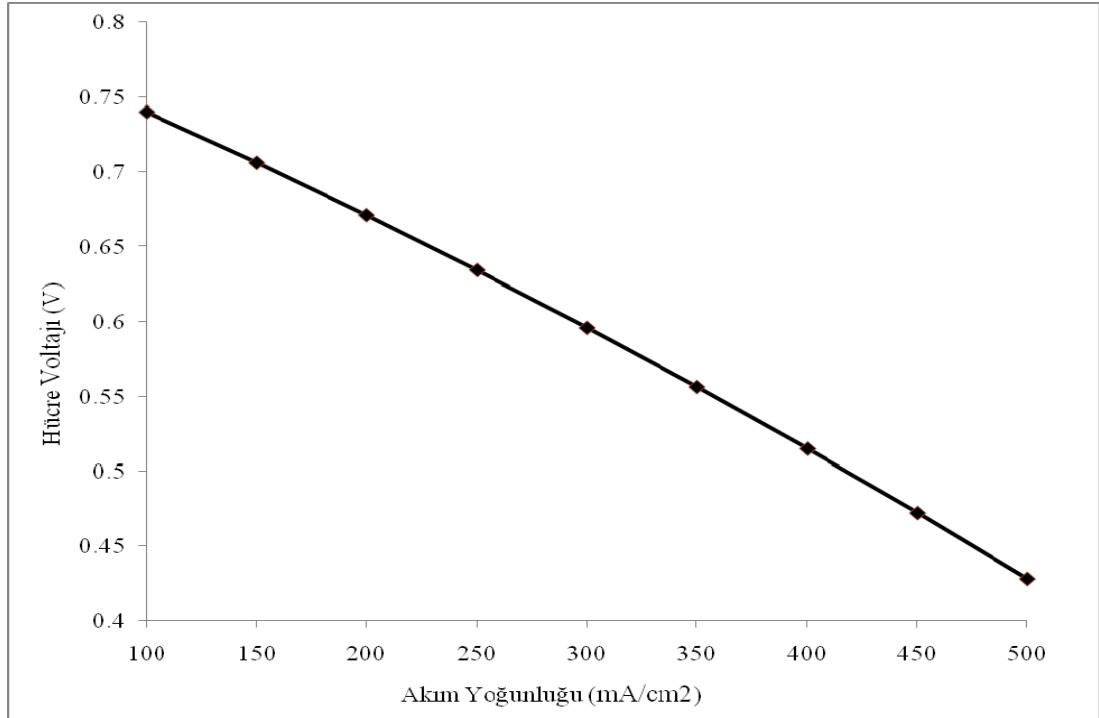
➤ Çalışma Basıncı

$$\Delta V_p (mV) = 76 \log \frac{P}{P_{ref}} \quad (3.10)$$

ΔV_p : Çalışma basıncının değişimi sonucu gerilimdeki değişim

P : Çalışma basıncı (1-10 bar)

P_{ref} : Referans çalışma basıncı (1 bar)



Şekil 3.3. Hücre performansı (1000°C sıcaklık ve 1 bar basınçta % 25 hava kullanımı ve % 85 yakıt (% 67 H₂, % 22 CO, % 11 H₂O) kullanımı) [EG&G, 2004].

➤ Çalışma Sıcaklığı ve Akım Yoğunluğu

$$\Delta V_T (mV) = 0.008(T - T_{ref})I_c \quad (3.11)$$

ΔV_T : Çalışma sıcaklığı ve akım yoğunluğunun değişimi sonucu gerilimdeki değişim

T : Çalışma sıcaklığı

T_{ref} : Referans çalışma sıcaklığı (1000 °C)

I_c : Akım yoğunluğu (mA/cm²)

➤ Yakıt Kompozisyonu

$$\Delta V_{anot} (mV) = 172 \log \frac{P_{H_2}/P_{H_2O}}{(P_{H_2}/P_{H_2O})_{ref}} \quad (3.12)$$

ΔV_{anot} : Yakıt kompozisyonunun değişimi sonucu gerilimdeki değişim

P_{H_2}/P_{H_2O} : Hidrojen ile buharın kısmi basınç oranı

$(P_{H_2}/P_{H_2O})_{ref}$: Referans hidrojen ile buharın kısmi basınç oranı (0.15)

➤ Oksidan Kompozisyonu

$$\Delta V_{katot}(mV) = 92 \log \frac{(P_{O_2})}{(P_{O_2})_{ref}} \quad (3.13)$$

ΔV_{katot} : Oksidan kompozisyonunun değişimi sonucu gerilimdeki değişim

P_{O_2} : Oksijenin kısmi basıncı

$(P_{O_2})_{ref}$: Referans oksijenin kısmi basıncı(0.164)

Gerçek gerilim, referans gerilim ile bu dört değişimin toplanmasıyla bulunmaktadır.

$$V_c(mV) = V_{ref} + \Delta V_P + \Delta V_T + \Delta V_{anot} + \Delta V_{katot} \quad (3.14)$$

Sistem verimi, eşitlik 3.15 kullanılarak bulunabilmektedir.

$$\eta_s = \frac{W_{yp} + W_{gt} + H_f}{n_{tazeyakıt} LHV_{yakıt} + W_k + H_{\bar{u}}} \quad (3.15)$$

η_s : Sistem verimi

W_{yp} : Yakıt pilinde üretilen elektrik gücü (kW)

W_{gt} : Gaz türbinlerinde üretilen elektrik gücü (kW)

H_f : Faydalı ısı (kW)

$n_{tazeyakıt}$: Sisteme giren yakıtın molar debisi (mol/s)

$LHV_{yakıt}$: Sisteme giren yakıtın alt ısı değeri (kJ/mol)

W_k : Kompresörlerde harcanan elektrik gücü (kW)

$H_{\bar{u}}$: Harcanan toplam ütilite yükü (kW)

3.2.7. Katı Oksit Yakıt Pili Yığınının Enerji Balansı

Katı oksit yakıt pili, yakıtın kimyasal enerjisinin bir kısmını elektrik enerjisine çevirir. Diğer kısmı ise kayıp ısı enerjisi olmaktadır. Çalışma sıcaklığının sabit tutulması için sisteme soğutma amaçlı hava verilmektedir. Eşitlik (3.16)'da yığının enerji balansı verilmiştir.

$$Q_y = Q_e + Q_s + Q_r - Q_x = Q_l + W_e \quad (3.16)$$

Q_y : Yığının net ısı yükü

Q_e : Elektrokimyasal reaksiyonun reaksiyon ısısı

Q_s : Su gazı dönüşüm reaksiyonunun reaksiyon ısısı

Q_r : Buhar reformasyon reaksiyonunun reaksiyon ısısı

Q_x : Besleme akımlarına verilen ısı

Q_l : Kayıp ısı

W_e : Elektrik enerjisi

4. KATI OKSİT YAKIT PİLİNE DAYALI GÜÇ ÜRETİM SİSTEMLERİNDE ISI VE GÜÇ ENTEGRASYONU

Önceki bölümde, Siemens-Westinghouse'un tüpsel iç reformasyonlu katı oksit yakıt pili (KOYP) teknolojisinin CHEMCAD'de simülasyonunun yapılışından bahsedilmişti. Bu bölümde ise, önce ısı gerikazanımı olmayan bir katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminin CHEMCAD'de simülasyonu anlatılmaktadır. Sonra bu sisteme darboğaz yöntemi ile ısı entegrasyonu uygulanarak yeniden tasarlanmış sistem ve buna ek olarak bir ve iki gaz türbini eklenerek ısı ve güç entegrasyonu uygulanmış sistemlerden söz edilmektedir. Ayrıca bu dört farklı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemi, ısı değiştiriciler ve varsa gaz türbinleri maliyetleri bakımından ekonomik değerlendirilmeleri yapılarak karşılaştırılmaktadır.

Bu bölümdeki simülasyonlarda kullanılan KOYP'ne ait temel kabuller üçüncü bölümde verilmiştir.

4.1. Katı Oksit Yakıt Piline Dayalı Güç Üretim Sistemi Tasarımları

Bu kısımda, ısı gerikazanımı olmayan, darboğaz yöntemi ile ısı gerikazanımı sağlanan, tek gaz türbinli ve çift gaz türbinli katı oksit yakıt pili güç üretim sistemlerinin CHEMCAD'de yapılan simülasyonlarından bahsedilmektedir.

4.1.1. Isı Gerikazanımı Olmayan Katı Oksit Yakıt Piline Dayalı Güç Üretim Sistemi

Sistem, basınçlı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemidir. Sisteme ısı verilmesi ve sistemden ısı alınması, üniteler ile sağlanmaktadır.

Sistemin CHEMCAD’de simülasyonunun akış şeması Şekil 4.1’de görülmektedir. 1 nolu akım olan taze yakıt kompresörde sıkıştırılıp ısıtıldıktan sonra geribeslenen akımla karışmaktadır. 6 nolu önreformasyon biriminde, metan ve diğer hidrokarbon gazlarının buharla reaksiyonu meydana gelmekte ve yakıt pili için asıl yakıt olan hidrojen açığa çıkmaktadır. Bu birimden çıkan 8 nolu akım anota beslenirken sıkıştırılıp ısıtılan taze hava katota beslenmektedir. 13 nolu akım katı oksit membranı geçen oksijen iyonlarını temsil etmektedir. Reaksiyona girmeyen havanın yakıt pili çıkış sıcaklığına ulaşması için 19 nolu ısı değiştirici ile ısı aktarılmaktadır. 10 nolu ısı değiştirici, katı oksit yakıt pilinin çalışma sıcaklığını sabit tutmak için ısı alınmasını temsil etmektedir. Soğutma için yakıt pilinde hava dolaştırılmaktadır. Yakıt pili çıkış akımı olan 15 nolu akım, 9 nolu artyakıcıda yakılmaktadır. 7 nolu ısı değiştirici ise egzost çıkış sıcaklığını 70 °C’ye düşürmek için kullanılmaktadır.

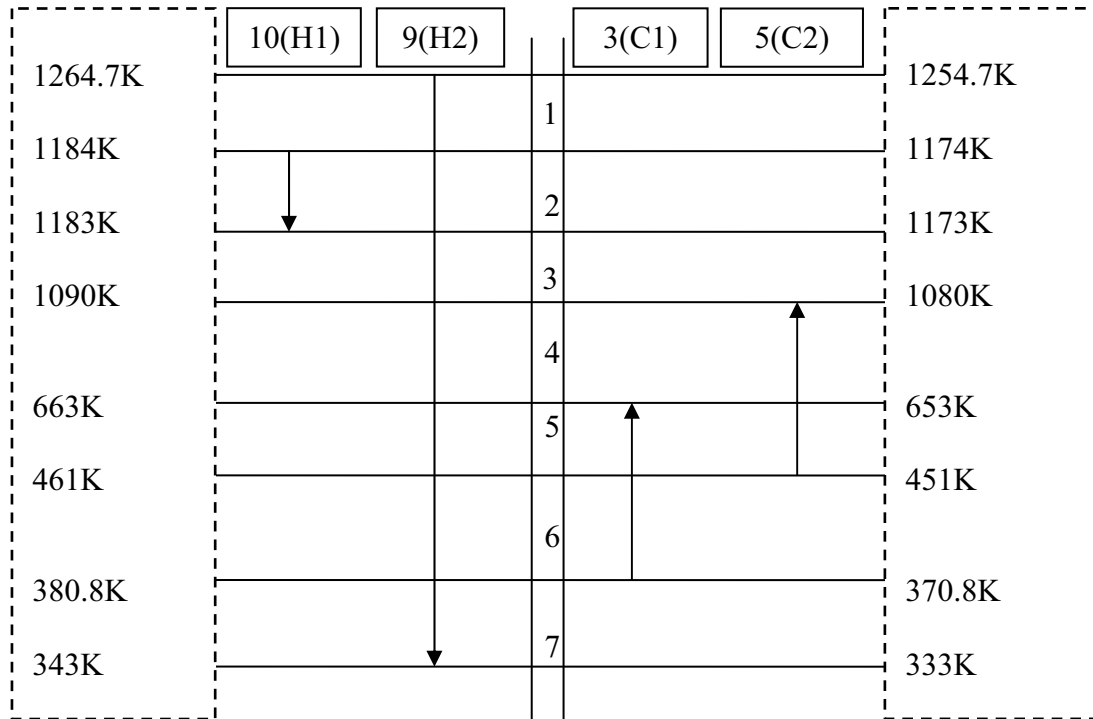
4.1.2. Isı Gerikazanımlı Katı Oksit Yakıt Piline Dayalı Güç Üretim Sistemi

Burada ısı gerikazanımı olmayan katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemindeki sıcak ve soğuk akımlar, ısı değiştirici maliyetlerini düşürmek için darboğaz yöntemine göre karşılaştırılmakta ve tekrar tasarlanmaktadır. Minumum yaklaşım sıcaklığı 10 K seçilmiştir. Akım bilgileri Tablo 4.1’de verilmiştir. Isı sığaları (FCp) CHEMCAD’den ortalama olarak alınmıştır ve akımlarda yoğuşma veya buharlaşma olmamaktadır.

Tablo 4.1. Akım bilgileri.

Akım No	T_g (K)	T_c (K)	FC_p (W/K)	Isı Yüğü (kW)
10(H1)	1184	1183	3409.9	-3.4
9(H2)	1264.7	343	558.1	-516.9
3(C1)	370.8	653	20	5.6
5(C2)	451	1080	531.5	334.8

Minumum yaklaşım sıcaklığı belirlendikten sonra bir grafikte iki sıcaklık skalası oluşturulur. Bunlardan biri sıcak akımlar, diğeri ise soğuk akımlar içindir. Tablo 4.1’de verilen sıcak ve soğuk akımların giriş ve çıkış sıcaklıklarına göre okların baş ve uç kısımları Şekil 4.2’deki gibi yerleştirilir.



Şekil 4.2. Sıcaklık aralıkları.

Darboğaz noktası olup oluşmadığını anlamak için Cascade diyagramı ve sıcaklık-entalpi grafiği oluşturulur.

Tablo 4.2. Cascade diyagramı.

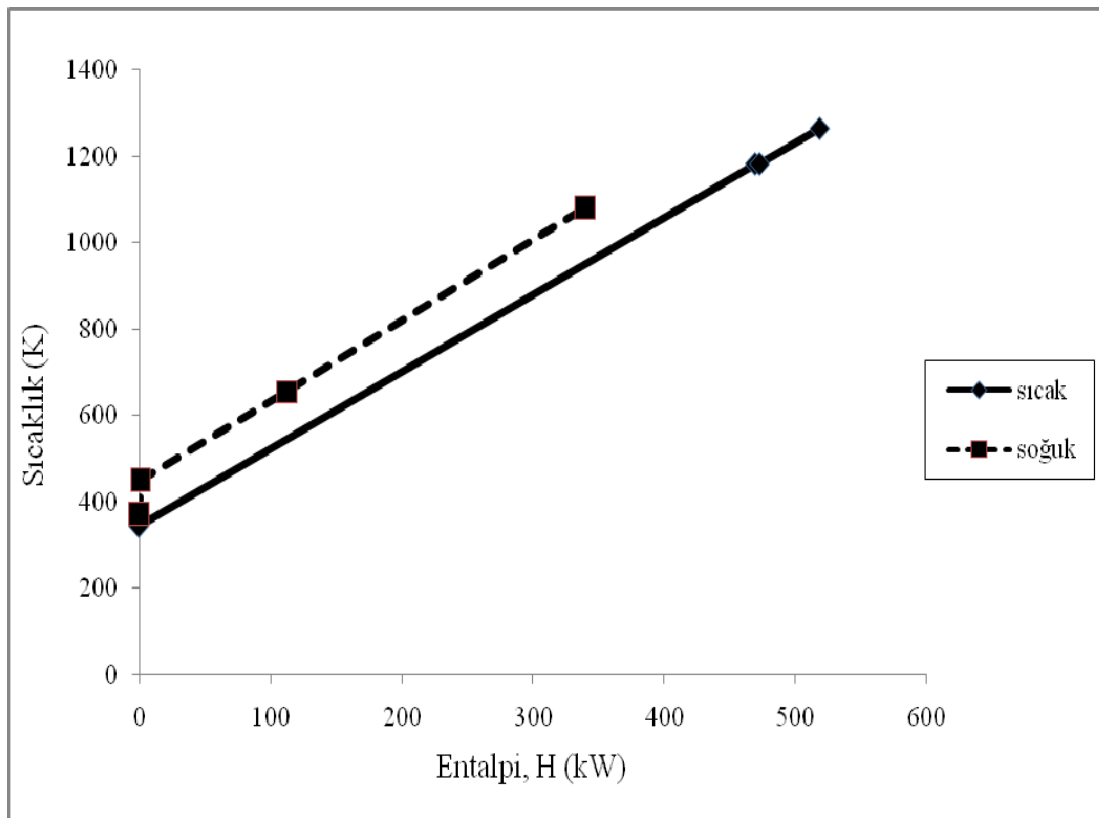
Aralık No.	$\Delta H(kW)$	Kalan	
		Giriş	Çıkış
1	45.6	0	45.6
2	3.4	45.6	49.0
3	51.9	49.0	100.9
4	11.3	100.9	112.3
5	1.3	112.3	113.6
6	43.1	113.6	156.8
7	21.1	156.8	177.9

Sıcaklık-entalpi grafiği için gerekli değerlerin tablosu oluşturulur.

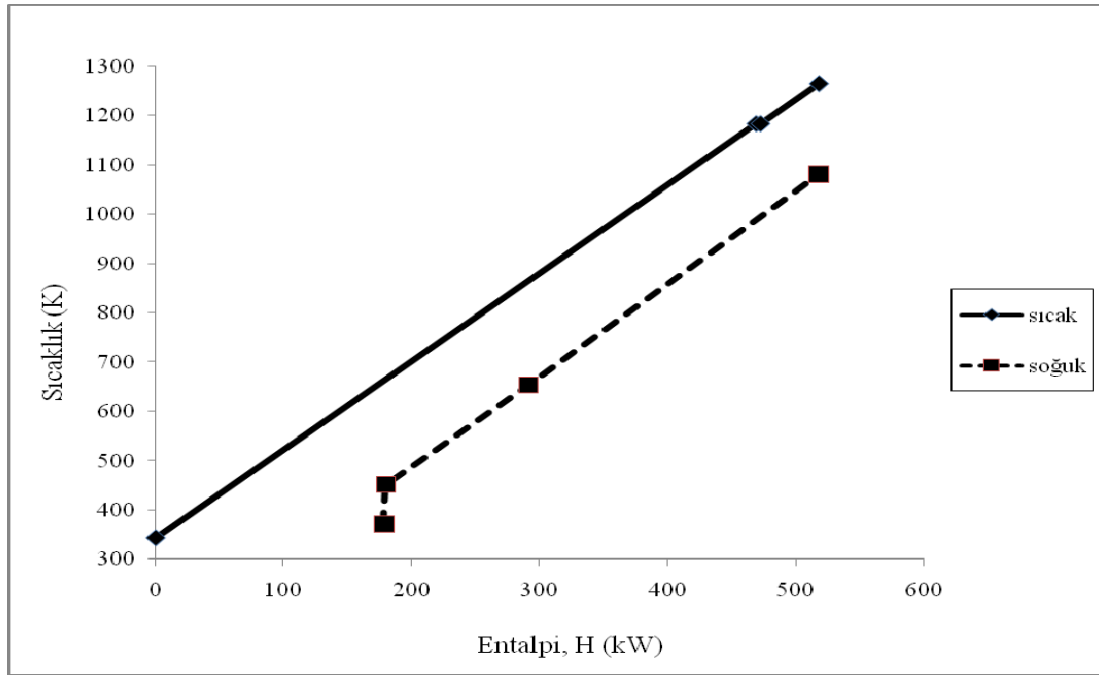
Tablo 4.3. Sıcaklık-Entalpi.

Sıcak Akımlar	T(K)	Birikmeli H(kW)	Soğuk Akımlar	T(K)	Birikmeli H(kW)
	343	0		370.8	177.9
	1183	468.8		451	179.5
	1183	472.2		653	290.9
	1264.7	517.8		1080	517.8

Tablo 4.3'teki değerler kullanılarak sıcak ve soğuk akımların sıcaklık-entalpi grafiği çizilir.



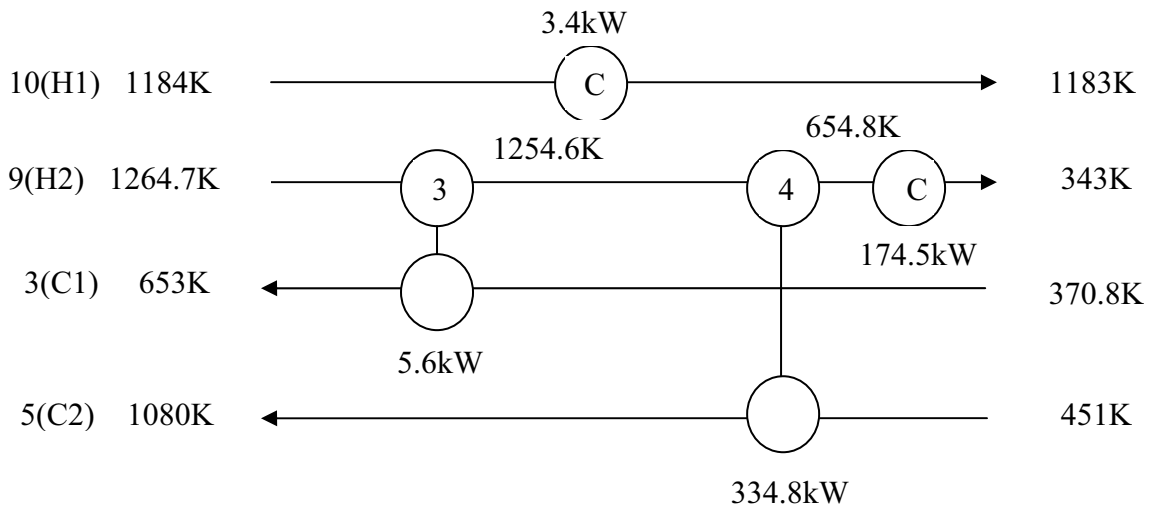
Şekil 4.3. Birikmeli sıcaklık-entalpi grafiği.



Şekil 4.4. Kaydırmadan sonra birikmeli sıcaklık-entalpi grafiği.

Sonuçta darboğaz noktası oluşmamıştır. Ama Cascade diyagramında son aralık çıkışındaki ısı değeri pozitif olduğundan yani Şekil 4.4'ten de anlaşılabileceği gibi dışarıya ısı verilmesi gerektiğinden darboğaz altı dizaynı yapılır.

Şekil 4.5'de darboğaz dizaynına göre karşılaştırılmış akımlar görülmektedir. İki ütilite ısı değiştiricisi dahil dört ısı değiştirici mevcuttur. Sistemden alınması gereken ısı miktarı 177.9 kW'tır.



Şekil 4.5. Darboğaz dizaynı.

Karşılaştırmalar sonrası sistemin simülasyonunun akış şeması Şekil 4.6'daki gibidir. 3 ve 4 nolu ısı değiştiricileri proses yani karşılaşma ısı değiştiricileridir.

4.1.3. Isı Gerikazanımlı Sisteme Isı Pompası ve Isı Motoru

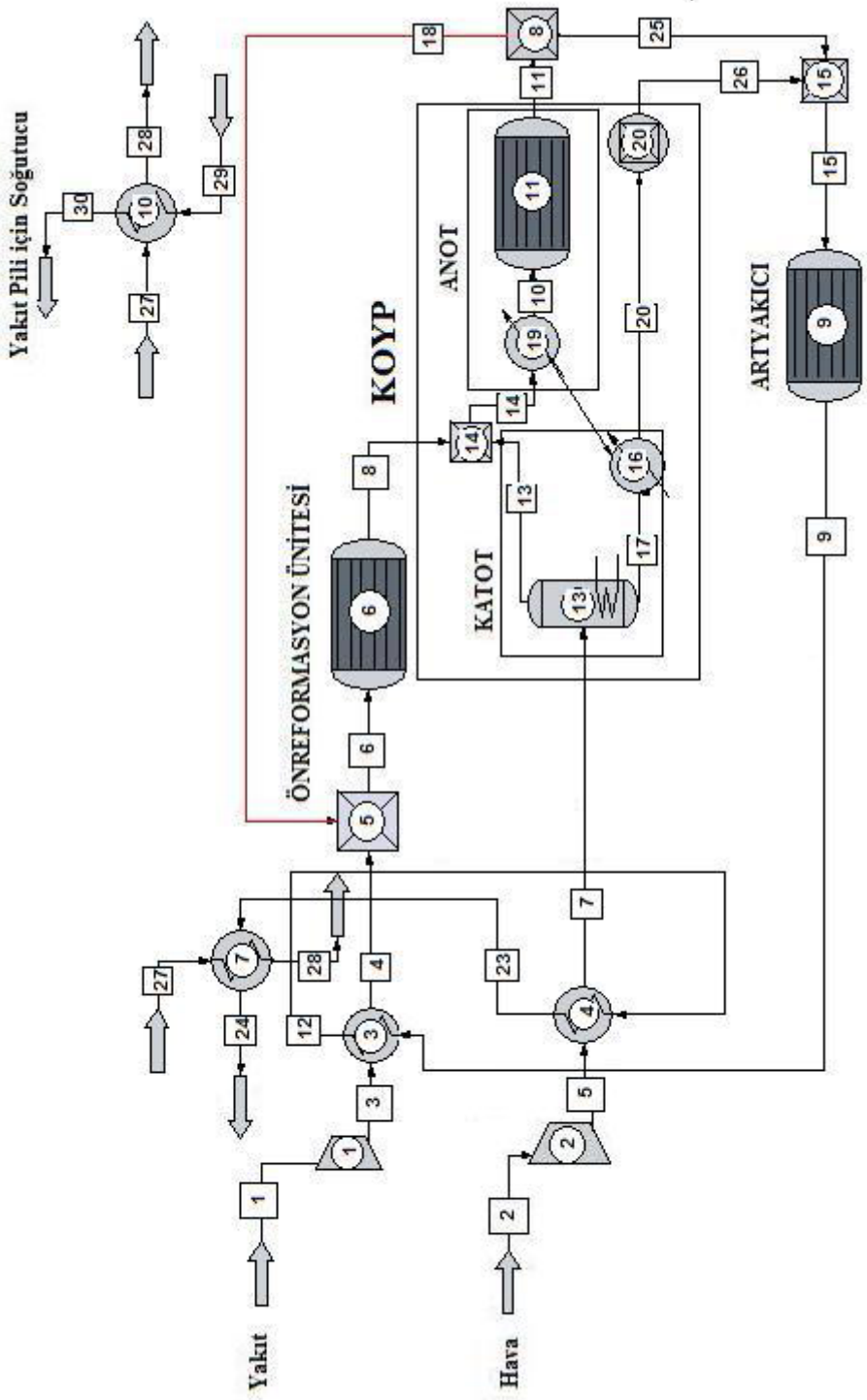
Entegrasyonu

Bu bölümde, daha önce darboğaz dizaynı yapılarak kurulmuş ısı değiştiricilerden sonra ısı pompası ve ısı motoru eklenmesi amaçlanmaktadır. Böylece hem ütilite maliyeti düşürülerek hem de elektrik üretilerek toplam yatırım maliyeti azaltılmış olmaktadır. Bu sistemde artyakıcıdan çıkan akımın içeriği yüksek sıcaklıkta gazlardan oluşmasından dolayı sadece gaz türbini kullanılmıştır.

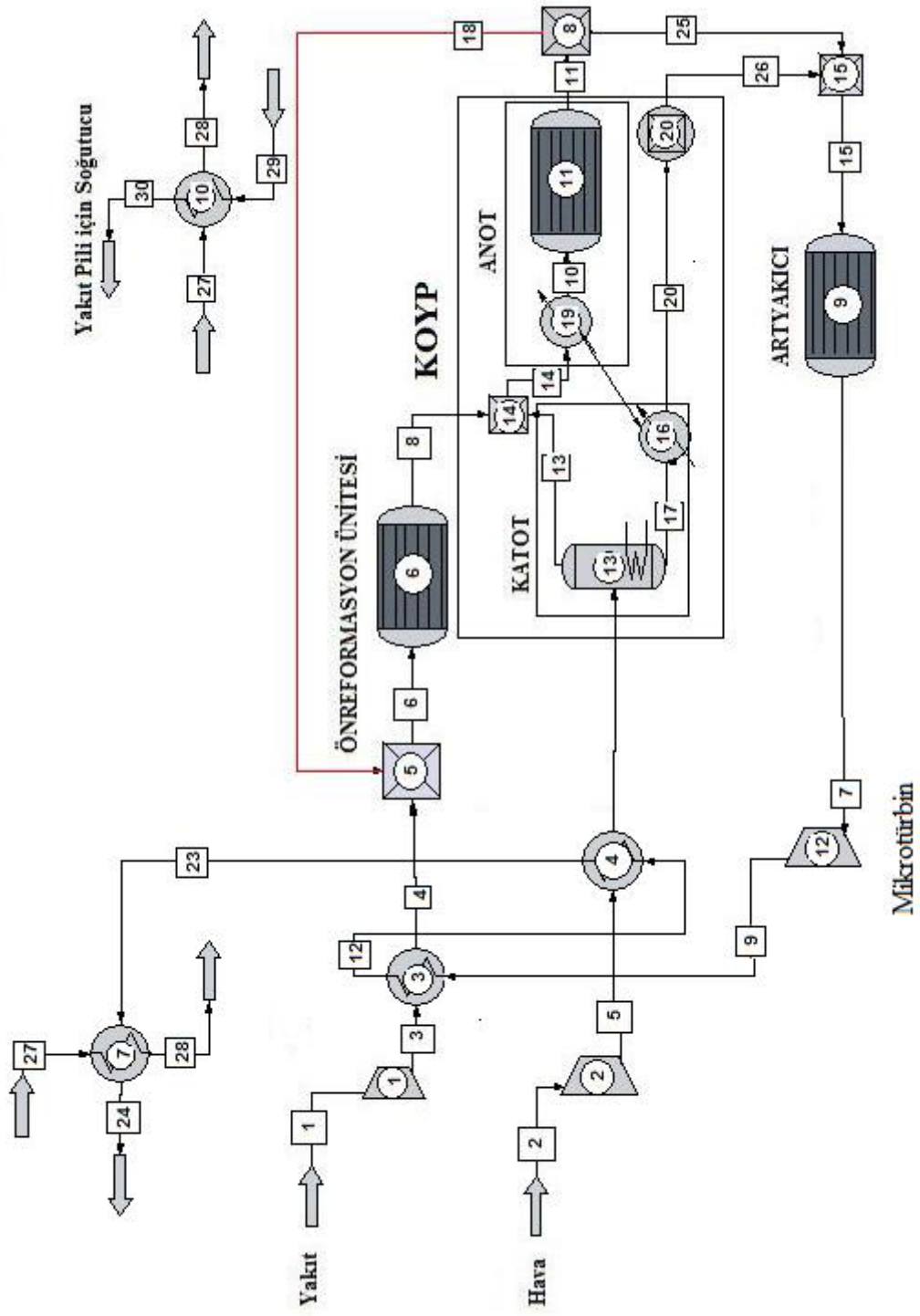
Şekil 4.7'de bir gaz türbin eklenmiş sistemin CHEMCAD'de simülasyonunun akış şeması gösterilmektedir. Buradaki gaz türbini bir mikrotürbindir. Gaz türbininin simülasyonu için bir CHEMCAD Expander modülü kullanılmıştır.

Bir gaz türbini yerine iki gaz türbini eklenerek sistem tekrar tasarlanmış ve ekonomik analizi yapılmıştır. Buradaki gaz türbinlerinden birisi hava kompresörüne direk bağlı olup kompresöre gereken elektriği tasarruf ettirmektedir. Diğer gaz türbini ise optimum elektrik üretecek şekilde çalışma şartları ayarlanmış ve sisteme eklenmiştir. İki gaz türbini de mikrotürbindir. Şekil 4.8'de iki gaz türbini eklenmiş sistemin CHEMCAD'de simülasyonunun akış şeması gösterilmektedir.

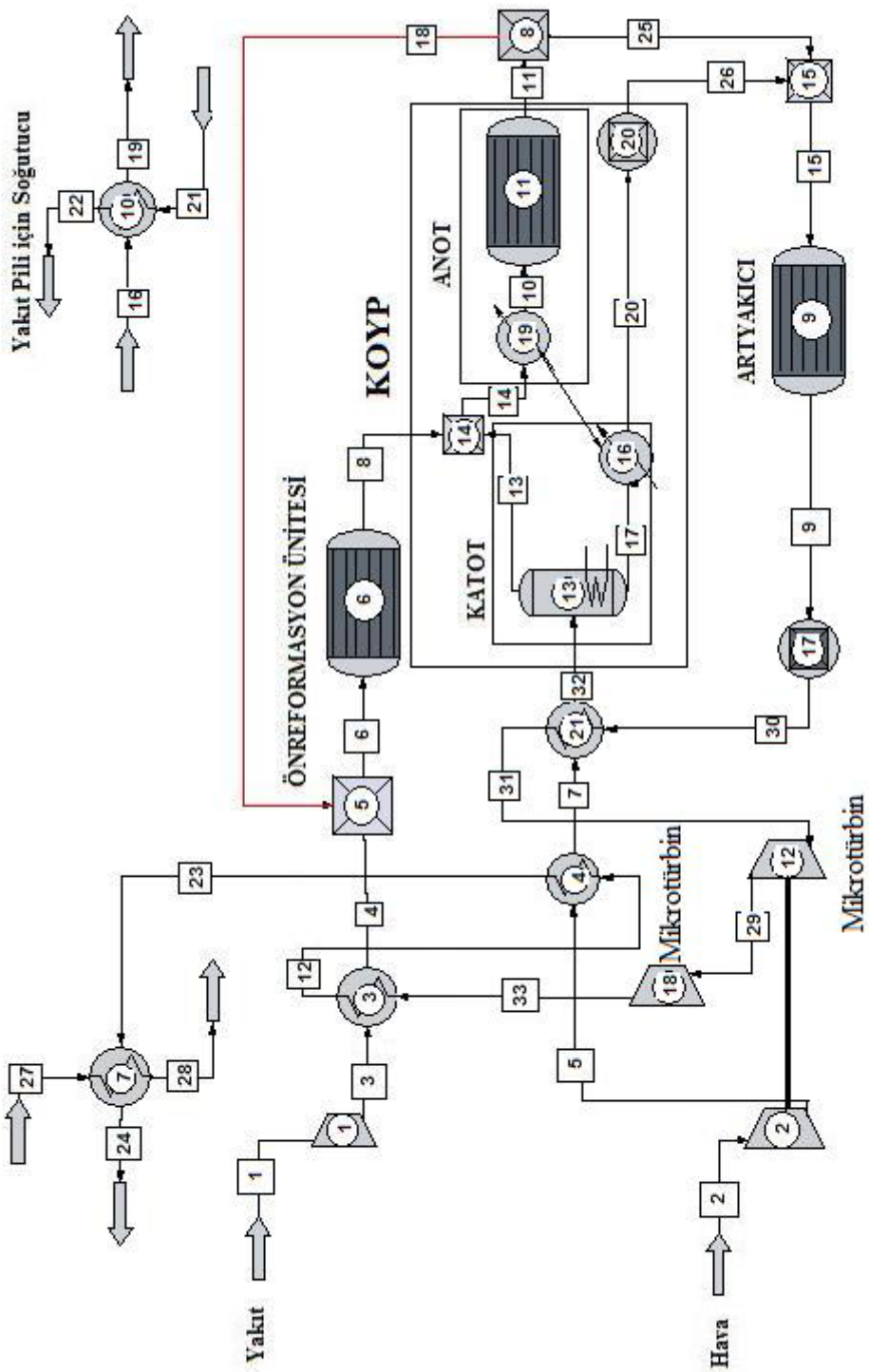
Sistemlere göre ekipmanların enerji değerleri Tablo 4.4'te verilmektedir.



Şekil 4.6. Karşılaştırmalar sonrası basınçlı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminin CHEMCAD’de simülasyonunun akış şeması.



Şekil 4.7. Bir gaz türbini eklenmiş basınçlı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminin CHEMCAD’de simülasyonunun akış şeması.



Şekil 4.8. İki gaz türbini eklenmiş basınçlı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminin CHEMCAD’de simülasyonunun akış şeması.

Tablo 4.4. Ekipmanların güç değerleri.

Ekipman / Sistem No.	3 (kW)	4 (kW)	7 (kW)	10 (kW)	1 (kW)	2 (kW)	11 (kW)	12 (Türbin) (kW)	18 (Türbin) (kW)
1	1.9	335.5	515.9	3.4	5.0	80.2	168.4		
2	1.9	335.5	178.5	3.4	5.0	80.2	168.4		
3	1.9	335.5	76.6	3.4	5.0	80.2	168.4	101.6	
4	1.9	220.9	81.8	3.4	5.0	80.2	168.4	80.2	16.3

Akış şemaları verilen dört farklı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminin hücre gerilimi, akım yoğunluğu, kW net üretilen elektrik başına harcanan ütilite miktarı ve sistem verimi değerleri Tablo 4.5'te verilmektedir. Sistem verimi hesabında 3.15 nolu bağıntıdan faydalanılmaktadır. Ütilite miktarı ve verim bakımından en karlı sistemin tek gaz türbinli katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemi olduğu sonucuna varılmaktadır.

Tablo 4.5. Sistemlerin hücre gerilimi, akım yoğunluğu, kW net üretilen elektrik başına harcanan ütilite miktarı ve sistem verimi değerleri.

Sistem No.	Hücre Gerilimi (V)	Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	1 kW Net Elektrik Üretimi için Harcanan Ütilite Miktarı (kW/kW Elektrik)	Sistem Verimi
1	0.7	259	10.9	0.14
2	0.7	259	2.1	0.29
3	0.7	259	0.4	0.57
4	0.7	259	0.4	0.56

4.2. Ekonomik Değerlendirme

Bu kısımda, simülasyonları anlatılan, dört farklı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminin sadece ısı değiştiricileri, ve varsa gaz türbinlerinin maliyetleri verilmektedir. Bunun nedeni diğer ekipmanların maliyetlerinde önemli bir değişiklik olmadığı varsayılmasıdır. Sonra maliyet karşılaştırması yapılarak ısı değiştiriciler ve gaz türbinleri bakımından en ekonomik olan sistemin tespit edilmesi amaçlanmaktadır.

Hesaplarda satın alınıp kurulan ekipmanın maliyeti, ekipman ömrü ve yıllık faiz oranı dikkate alınarak o ekipmanın yıllık maliyeti elde edilmektedir. Hesaplarda baz alınan değerler Tablo 4.6’da verilmiştir. Yatırım maliyetleri, ısı değiştiriciler ile varsa gaz türbin maliyetlerini kapsar. İşletme maliyetleri, ütilite maliyetlerinden oluşmaktadır. Toplam yıllık maliyet ise yatırım ve işletme maliyetlerinin toplamıdır.

Tablo 4.6. Maliyet hesaplarında kullanılan değerler [Smith, 2005; Yee and Grossmann, 1991].

Isı Değiştirici / Türbin Ömrü	6 yıl
Yıllık Faiz Oranı	10 %
Sıcak Ütilite (Buhar) Birim Maliyeti	104 \$/ kW.yıl
Soğuk Ütilite (Su) Birim Maliyeti	6 \$/ kW.yıl
Elektrik Birim Maliyeti	440 \$/ kW.yıl

4.2.1. Dört Farklı Katı Oksit Yakıt Piline Dayalı Güç Üretim Sisteminin Isı Değiştiricileri ve Gaz Türbinleri Maliyetleri

Isı entegrasyonu olmayan ve ısı entegrasyonlu katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemindeki ısı değiştiricilerin CHEMCAD yardımı ile hesaplanan yıllık maliyetleri sırasıyla Tablo 4.7 ve Tablo 4.8’de verilmektedir.

Tek gaz türbinli ve çift gaz türbinli katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemindeki ısı değiştiriciler, gaz türbinlerinin CHEMCAD yardımı ile hesaplanan yıllık maliyetleri ve gaz türbininin ürettiği elektrik sayesinde maliyetlerde yapılan tasarruf miktarları sırasıyla Tablo 4.9 ve Tablo 4.10’da verilmektedir.

Tablo 4.7. Isı entegrasyonsuz sistemdeki ısı değıştiricilerin maliyetleri.

Isı Değ. No.	Q (kW)	Ekipman Maliyeti (\$)	Yıllık Ekipman Maliyeti (\$/yıl)	Yıllık İşletme Maliyeti (\$/yıl)	Yıllık Toplam Maliyet (\$/yıl)
3	1.9	7300	1700	200	1900
4	334.8	29100	6700	34800	41500
7	515.8	13900	3200	3100	6300
10	3.4	3700	800	-	800
				Yıllık Toplam Maliyet Toplamı (\$/yıl)	50500

Tablo 4.8. Isı entegrasyonlu sistemdeki ısı değıştiricilerin maliyetleri.

Isı Değ. No.	Q (kW)	Ekipman Maliyeti (\$)	Yıllık Ekipman Maliyeti (\$/yıl)	Yıllık İşletme Maliyeti (\$/yıl)	Yıllık Toplam Maliyet (\$/yıl)
3	1.9	3200	700	-	700
4	334.8	13400	3100	-	3100
7	180.2	11700	2700	1100	3800
10	3.4	3700	800	-	800
				Yıllık Toplam Maliyet Toplamı (\$/yıl)	8400

Tablo 4.9. Tek gaz türbinli sistemdeki ısı değıştirciler ve gaz türbininin maliyetleri.

Isı Değ. / Türbin No.	Q / W _e (kW)	Ekipman Maliyeti (\$)	Yıllık Ekipman Maliyeti (\$/yıl)	Yıllık İşletme Maliyeti (\$/yıl)	Yıllık Toplam Maliyet (\$/yıl)
3	1.9	3700	800	-	800
4	334.8	47800	11000	-	11000
7	78.3	10100	2300	500	2800
10	3.4	3700	800	-	800
12	-101.8	45000	10300	-44800	-34500
				Yıllık Toplam Maliyet Toplamı (\$/yıl)	-19100

Tablo 4.10. Çift gaz türbinli sistemdeki ısı değıştirciler ve gaz türbinlerinin maliyetleri.

Isı Değ. / Türbin No.	Q / W _e (kW)	Ekipman Maliyeti (\$)	Yıllık Ekipman Maliyeti (\$/yıl)	Yıllık İşletme Maliyeti (\$/yıl)	Yıllık Toplam Maliyet (\$/yıl)
3	1.9	4100	1000	-	1000
4	220.2	25300	5800	-	5800
7	83.4	10200	2300	500	2800
10	3.4	3700	800	-	800
21	114.6	8900	2100	-	2100
12	-80.9	37400	8600	-35600	-27000
18	-15.7	9900	2300	-6900	-4600
				Yıllık Toplam Maliyet Toplamı (\$/yıl)	-19100

4.2.2. Dört Farklı Katı Oksit Yakıt Piline Dayalı Güç Üretim Sisteminin Ekonomik Karşılaştırması

Isı gerikazanımı olmayan katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminde ısı alma veya verme, sıcak ve soğuk ütiliteler tarafından sağlanırsa ısı değiştiricilerin yıllık toplam maliyeti 50500 \$ olmaktadır.

Isı gerikazanımı olmayan katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemine darboğaz dizaynı uygulanarak minumum ütilite kullanımı hedefi ile akımların ısı değiştiricilerde karşılaşmaları gerçekleştirilmektedir. Isı gerikazanımı sağlanan bu ısı değiştirici ağının yıllık toplam maliyeti 8400 \$ olmaktadır. Önceki tasarıma göre önemli ekonomik kazanç sağlanmaktadır.

Darboğaz altı dizaynı için ısı motoru eklemek uygundur. Bu sistemde artıyakıcı çıkış akımına sadece gaz türbini eklenmesinin mümkün olması yatırım maliyetini düşüren önemli bir etkindir. Bir gaz türbini eklenmesi ile tekrar tasarlanan sistemde gaz türbini, kendini 1.64 yıl gibi bir sürede amorti etmektedir. Isı değiştirici ağı ve gaz türbininin yıllık toplam maliyeti -19100 \$ olmaktadır. Değerin eksi olması yapılan elektrik enerjisi tasarrufunu ifade eder.

Biri hava kompresörü ile aynı shafta bağlı olan iki gaz türbini eklenerek tasarlanan sistemde ise gaz türbinleri 1.72 yılda kendilerini amorti etmektedirler. Isı değiştirici ağı ve gaz türbinlerinin yıllık toplam maliyeti -19100 \$ olarak hesaplanmaktadır.

Maliyetlerden anlaşılacağı gibi ısı değiştiriciler ve gaz türbinleri maliyetleri bakımından en ekonomik katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemi, yıllık toplam maliyetin en düşük olduğu gaz türbinli katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemleridir.

5. DUYARLILIK ANALİZLERİ

Chemcad kullanımı ile çalışma parametrelerindeki değişimlerin, farklı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemleri üzerine etkilerini kolay ve hızlı bir şekilde analiz etmek mümkündür. Bu bölümde Chemcad’de modellenen; ısı gerikazanımı olmayan, darboğaz yöntemi ile ısı geri kazanımı sağlanan, tek gaz türbinli ve çift gaz türbinli katı oksit yakıt pili güç üretim sistemlerinde, sistem çalışma basıncı, yakıt pili çalışma sıcaklığı ve yakıt kullanım oranı gibi üç önemli parametredeki değişimin etkileri araştırılmaktadır. Başlıca gözlemlenen etkiler, harcanan ve üretilen elektrik miktarları ile maliyetlerdeki değişimlerdir. Ayrıca bu etkiler, farklı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemlerine göre karşılaştırılmaktadır. Modellenen ve incelenen sistemlerin sıralaması yukarıda yazıldığı gibi olmaktadır.

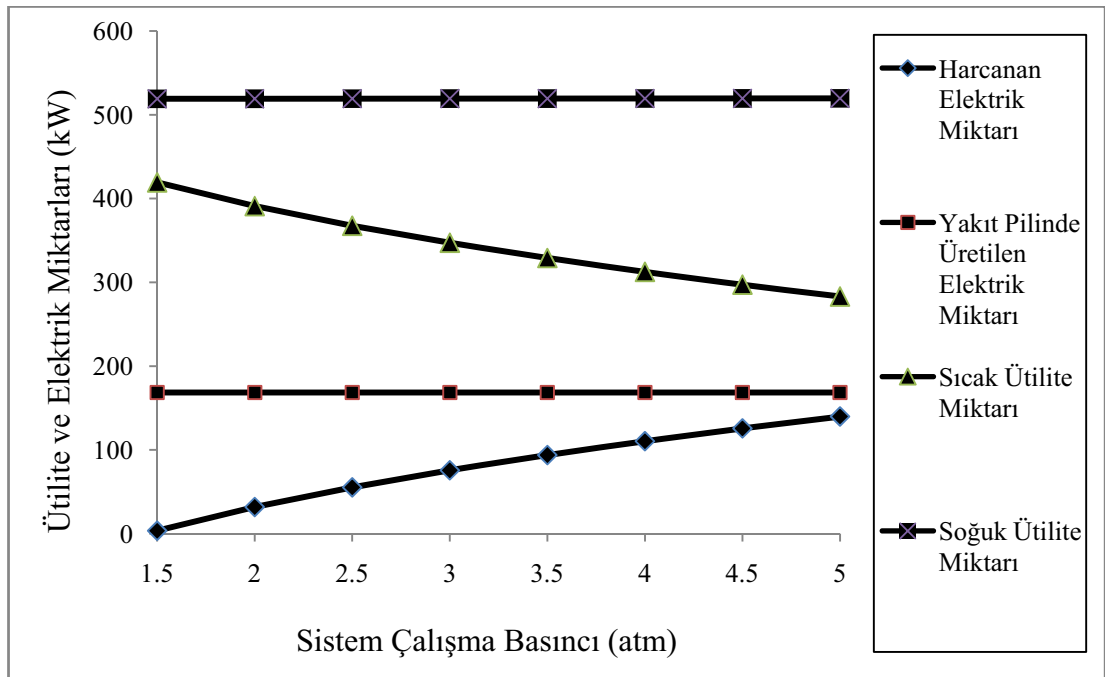
Maliyet hesaplarında satın alınıp kurulan ekipmanın maliyeti, ekipman ömrü ve yıllık faiz oranı dikkate alınarak o ekipmanın yıllık maliyeti elde edilmektedir. Hesaplamalar için gerekli parametreler Tablo 4.6’da verilmiştir. Bu çalışmada bahsedilen dört tasarımda bulunan sadece ısı değiştiriciler, varsa sadece gaz türbinlerinin yatırım, işletme ve toplam maliyetleri hesaplanmakta ve buna göre maliyet karşılaştırması yapılmaktadır. Bunun nedeni diğer ekipmanların maliyetlerinde önemli bir değişiklik olmadığı varsayılmasıdır. Hesaplamalarda kastedilen toplam maliyet, yatırım ve işletme maliyetlerinin toplamıdır.

5.1. Sistem Çalışma Basıncına Göre Dört Tasarımın

Duyarlılık Analizi

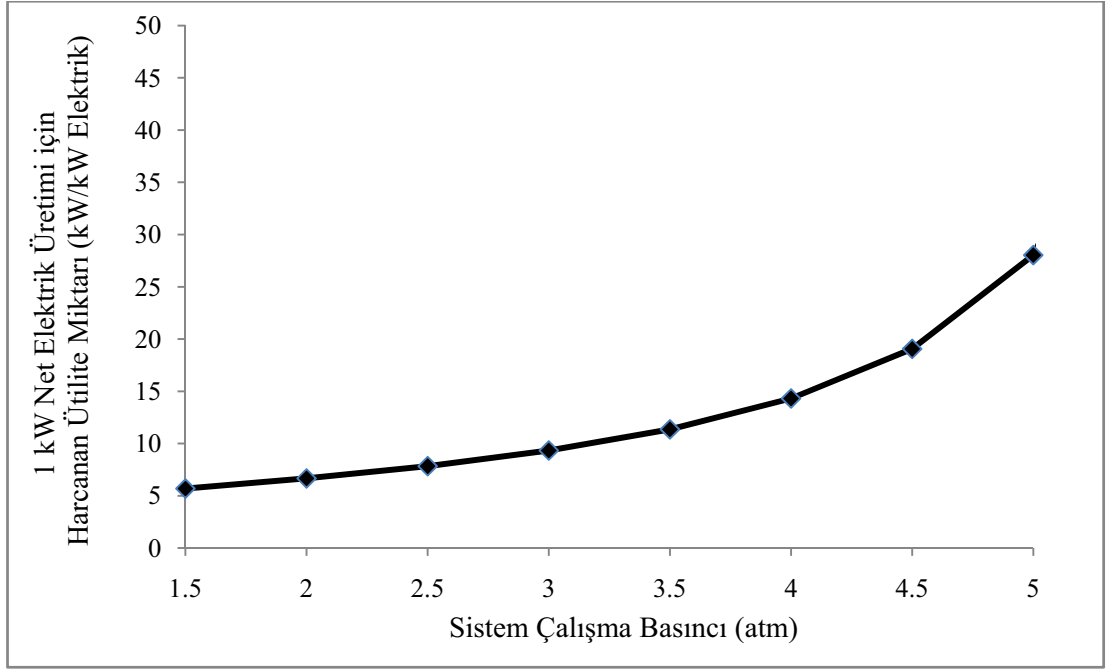
Katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemi çalışma basıncının artırılması ile harcanan elektrik, üretilen elektrik miktarlarındaki değişimler ve maliyetlerdeki değişimler araştırılmıştır. Bu çalışma, daha önce bahsedilen dört farklı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemi için yapılmıştır. Basınç değişimi sırasında yakıt pili çalışma sıcaklığı 910 °C’de, yakıt kullanım oranı % 85’te ve buhar/karbon oranı ise 2.5’te sabitlenmektedir.

Isı gerikazanımı olmayan katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminde, kompresörlerde harcanan elektrik, yakıt pilinde üretilen elektrik ve harcanan ütilite miktarlarındaki değişimler Şekil 5.1’de, 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (sıcak+soğuk) miktarındaki değişim Şekil 5.2’de sunulmaktadır. Basıncın artması ile daha yüksek basınçta hava beslemek için hava kompresörünün harcadığı elektrik miktarı artmakta ama yakıt pilinde üretilen elektrik miktarında herhangi bir değişiklik olmamaktadır. 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (sıcak+soğuk) miktarı, yüksek basınçlarda artış göstermektedir. Sistem verimi, eşitlik 3.15’e göre hesaplanarak Şekil 5.3’te basınçla değişimi verilmektedir.

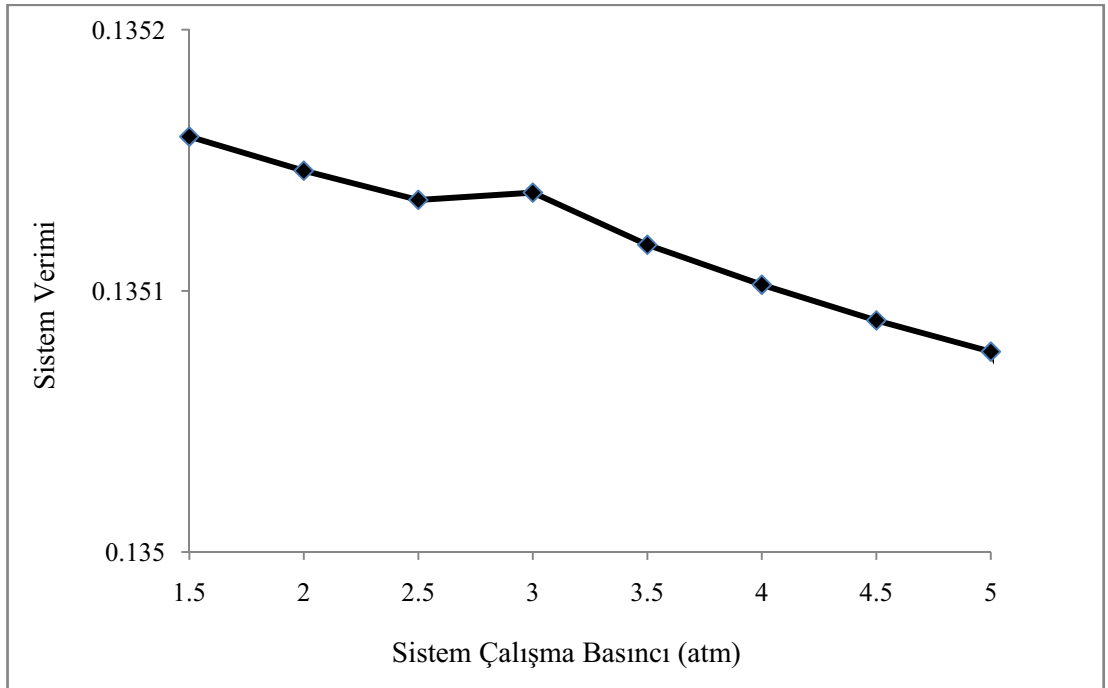


Şekil 5.1. Sistem çalışma basıncının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi.

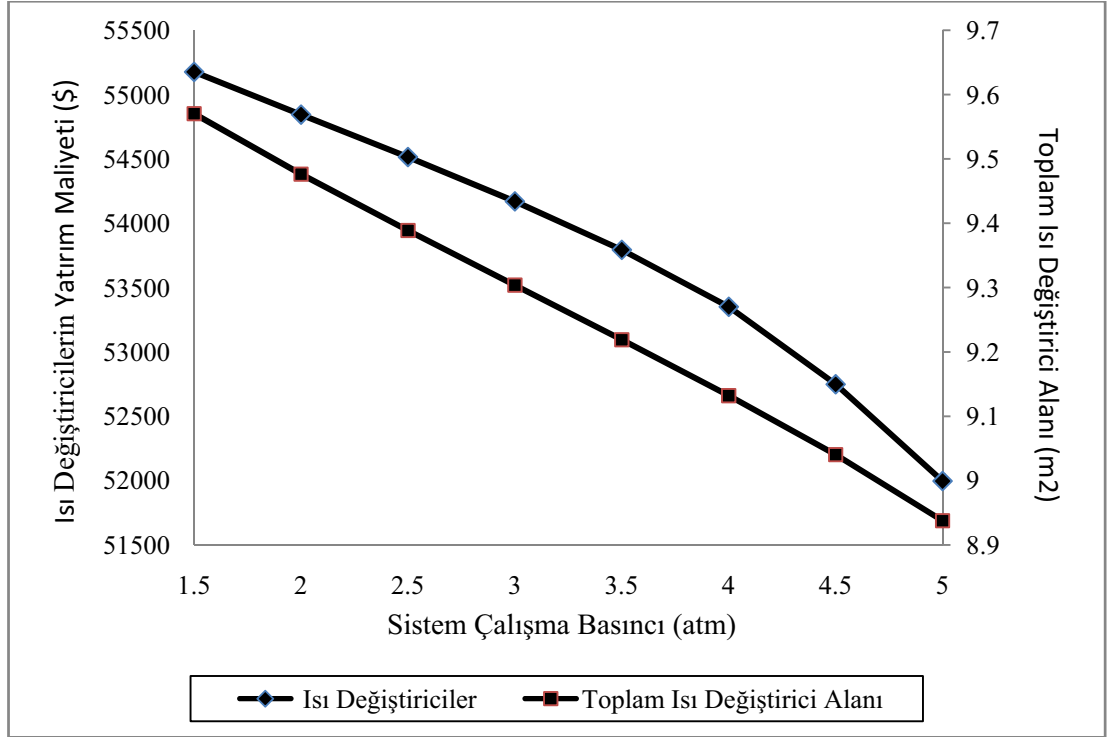
Sistem çalışma basıncının toplam ısı değiştirici alanı ve ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti üzerine etkisi Şekil 5.4’teki, ısı değiştiricilerin yıllık yatırım, işletme ve toplam maliyetleri üzerine etkisi Şekil 5.5’teki gibi gözlemlenmektedir. Yıllık toplam maliyet, basıncın artması ile azalmaktadır. Bunun nedeni, daha yüksek basınçlarda sıkıştırılan besleme hava ve yakıtının ısıtılması için harcanan sıcak ütilite miktarındaki azalmadır.



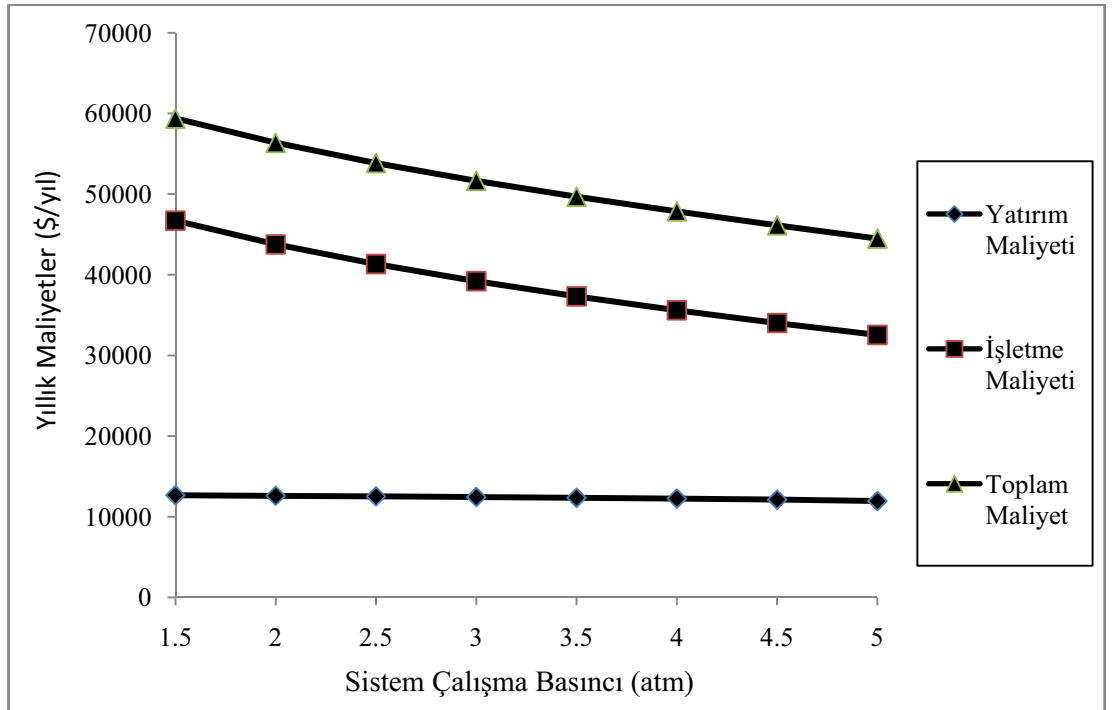
Şekil 5.2. Sistem çalışma basıncının 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi.



Şekil 5.3. Sistem çalışma basıncının sistem verimi üzerine etkisi.



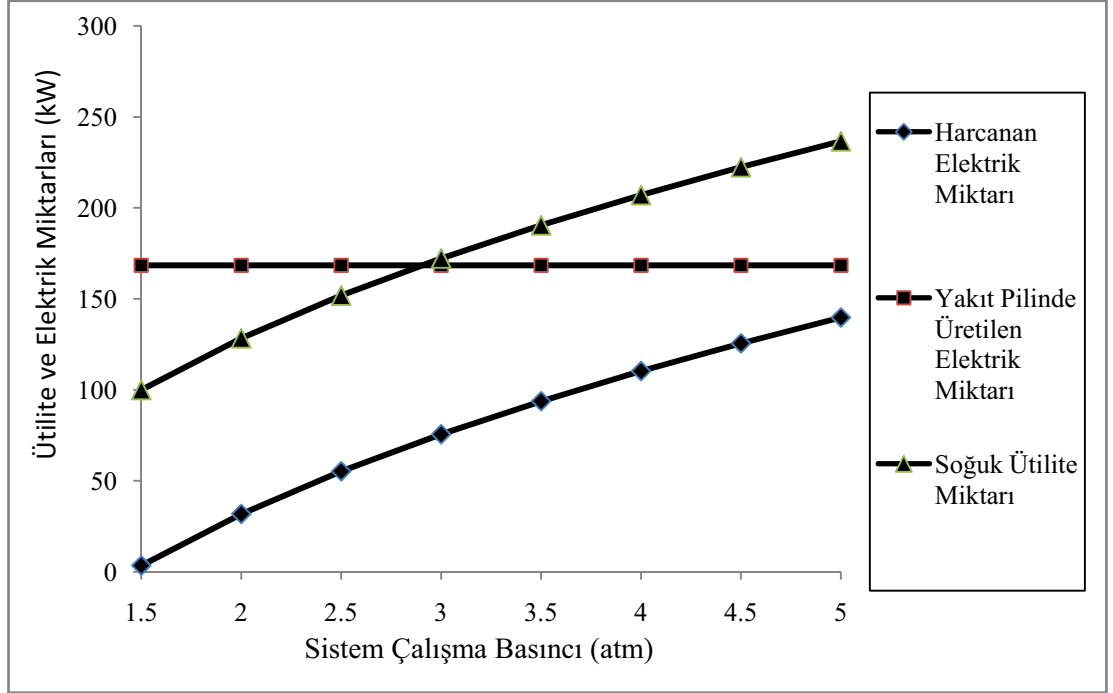
Şekil 5.4. Sistem çalışma basıncının toplam ısı değiştirici alanı ve ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti üzerine etkisi.



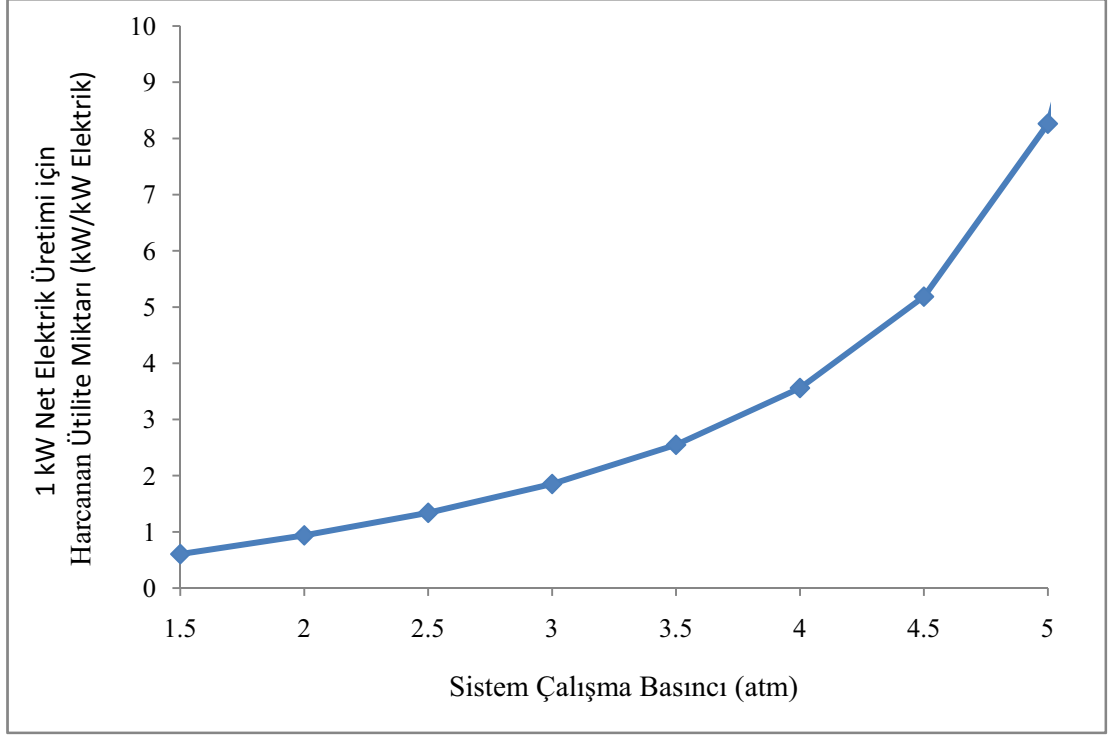
Şekil 5.5. Sistem çalışma basıncının ısı değiştiricilerin yıllık yatırım, işletme ve toplam maliyetleri üzerine etkisi.

Verim bakımından düşük çalışma basınçları, yıllık toplam maliyet bakımından ise yüksek çalışma basınçlarının ısı gerikazanımı olmayan katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemi için daha uygun çalışma basınçları olduğu sonucuna varılmaktadır.

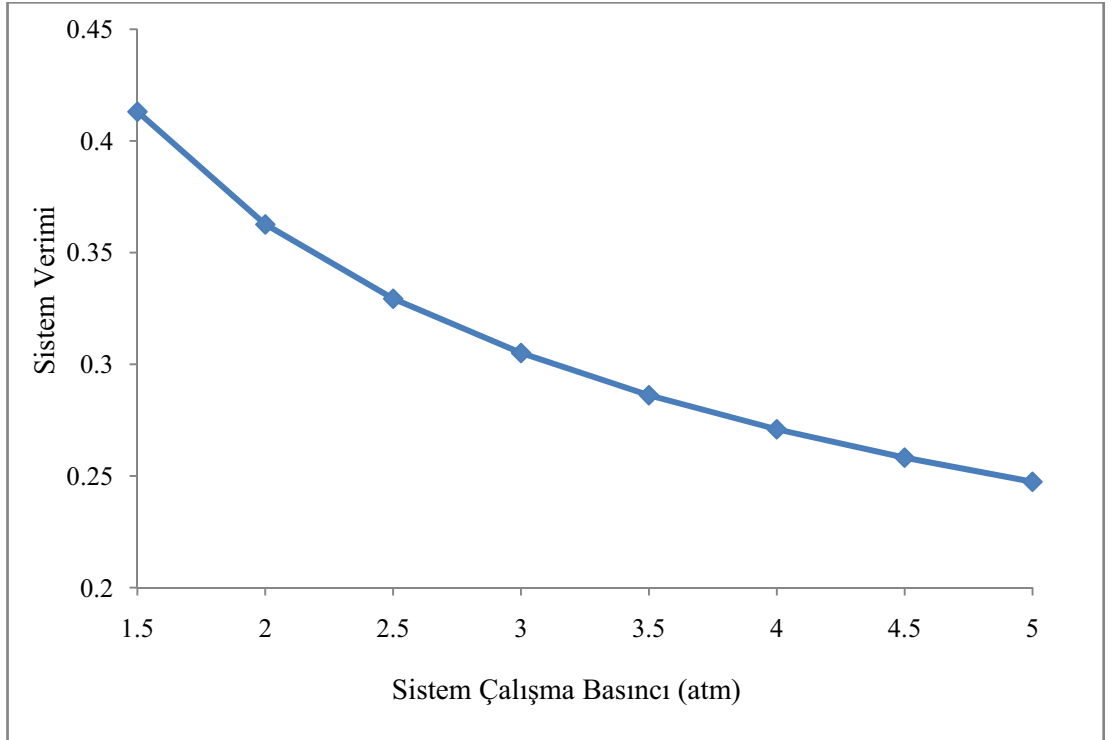
Darboğaz yöntemi ile ısı gerikazanımı sağlanmış katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminde kompresörlerde harcanan elektrik, yakıt pilinde üretilen elektrik ve harcanan ütilite miktarlarındaki değişimler Şekil 5.6'da, 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (soğuk) miktarındaki değişim Şekil 5.7'de sunulmaktadır. Basıncın artması ile daha yüksek basınçta hava beslemek için hava kompresörünün harcadığı enerji artmakta ama yakıt pilinde üretilen elektrik miktarında herhangi bir değişiklik olmamaktadır. 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (soğuk) miktarı, yüksek basınçlarda artış göstermektedir. Sistem verimi ise Şekil 5.8'de görüldüğü gibi sürekli azalmaktadır. Sistem verimi, eşitlik 3.15'e göre hesaplanmaktadır.



Şekil 5.6. Sistem çalışma basıncının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi.



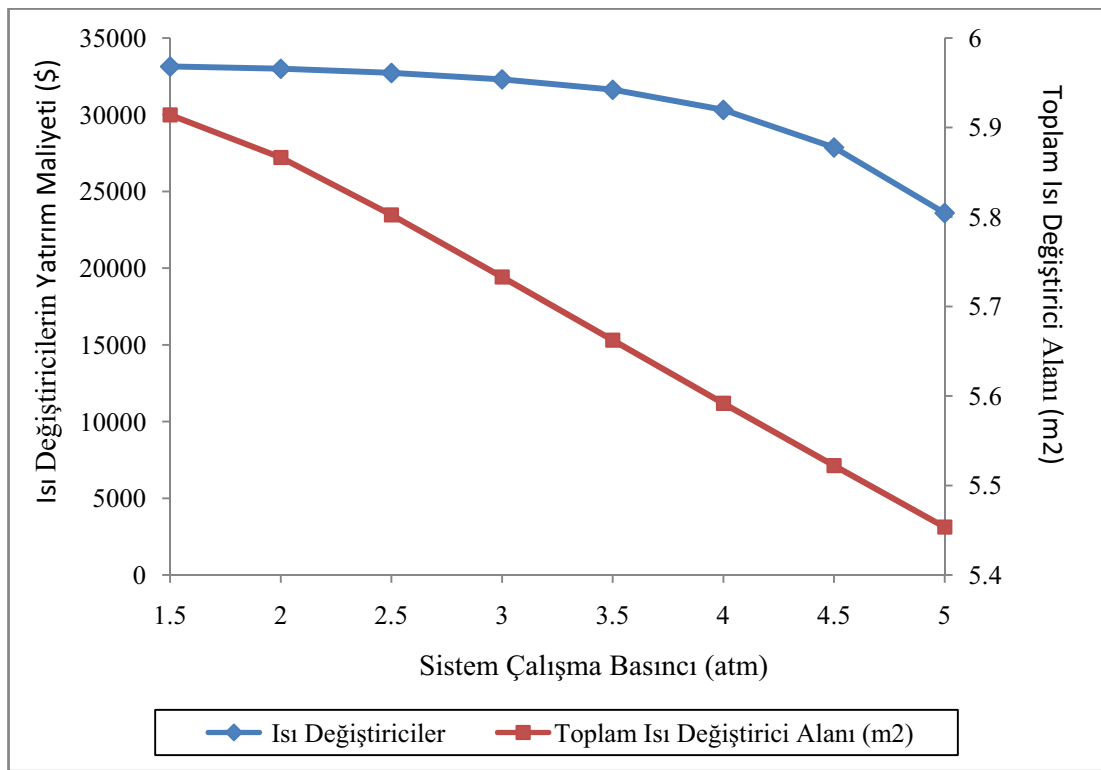
Şekil 5.7. Sistem çalışma basıncının 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi.



Şekil 5.8. Sistem çalışma basıncının sistem verimi üzerine etkisi.

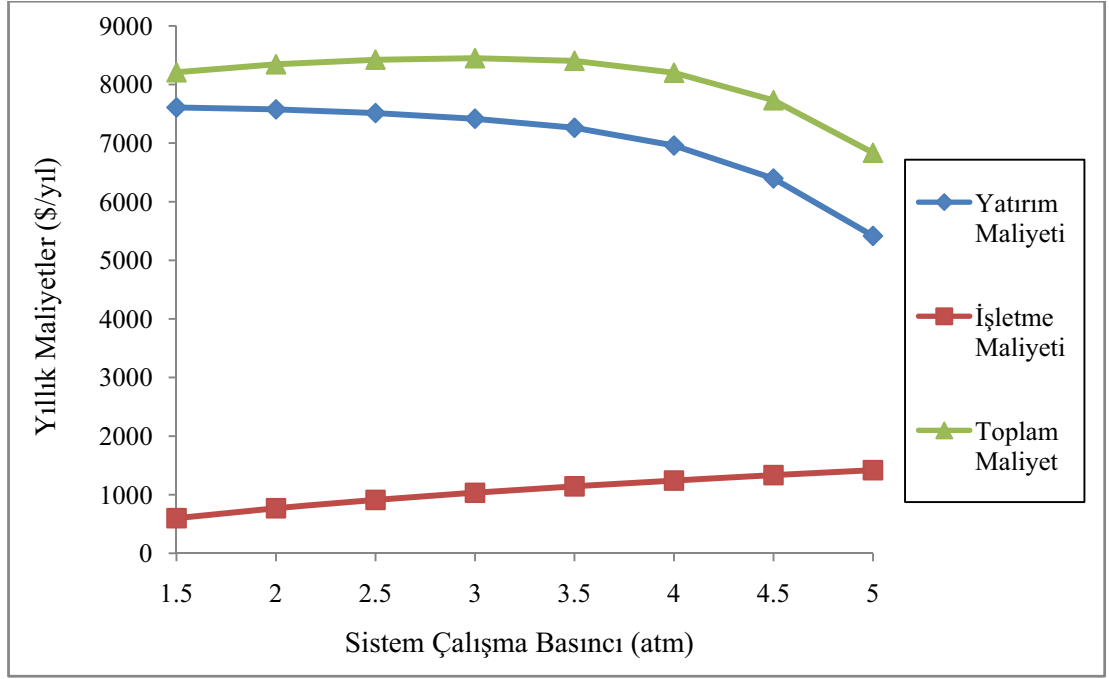
Sistem çalışma basıncının toplam ısı değiştirici alanı ve ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti üzerine etkisi Şekil 5.9'daki, ısı değiştiricilerin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi Şekil 5.10'daki gibi olmaktadır. Basıncın artması ile ısı değiştiricilerin yıllık toplam maliyeti fazla bir değişime uğramamaktadır.

Isı gerikazanımlı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemi için verim bakımından düşük çalışma basınçları uygun iken yıllık toplam maliyeti bakımından yüksek çalışma basınçlarının uygun olduğu sonucuna varılmaktadır.



Şekil 5.9. Sistem çalışma basıncının toplam ısı değiştirici alanı ve ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti üzerine etkisi.

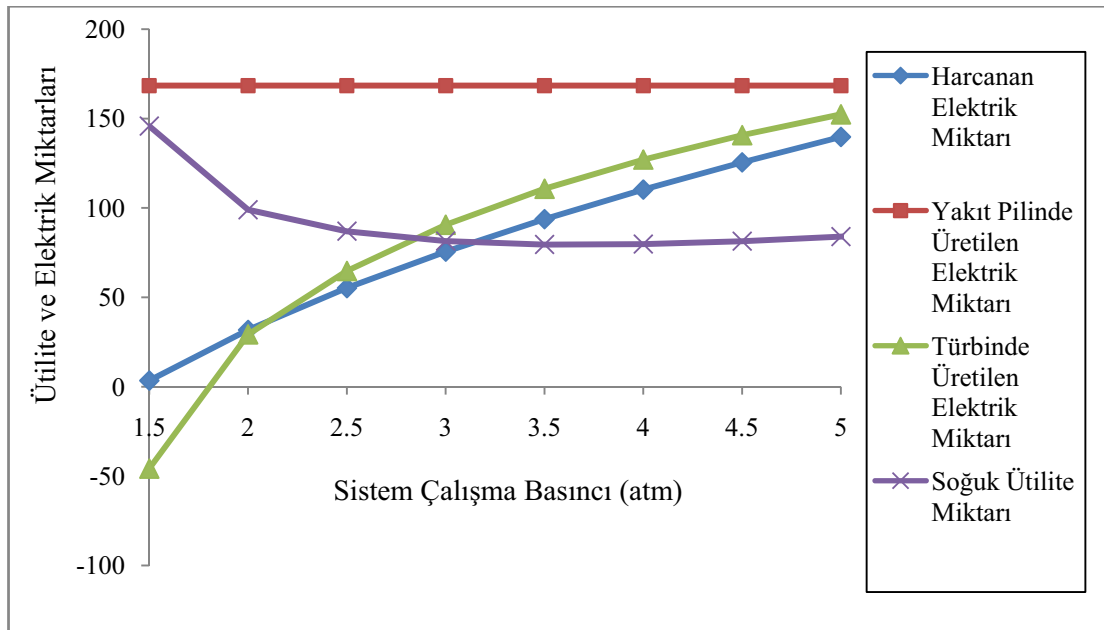
Tek gaz türbinli katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminde kompresörlerde harcanan elektrik, yakıt pili ve gaz türbininde üretilen elektrik ve harcanan ütilite miktarlarındaki değişimler Şekil 5.11'de, 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (soğuk) miktarındaki değişim Şekil 5.12'de sunulmaktadır. Sistem çalışma basıncındaki değişim özellikle gaz türbinli katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemlerinde daha fazla elektrik üretmeyi sağlamaktadır. Basınc



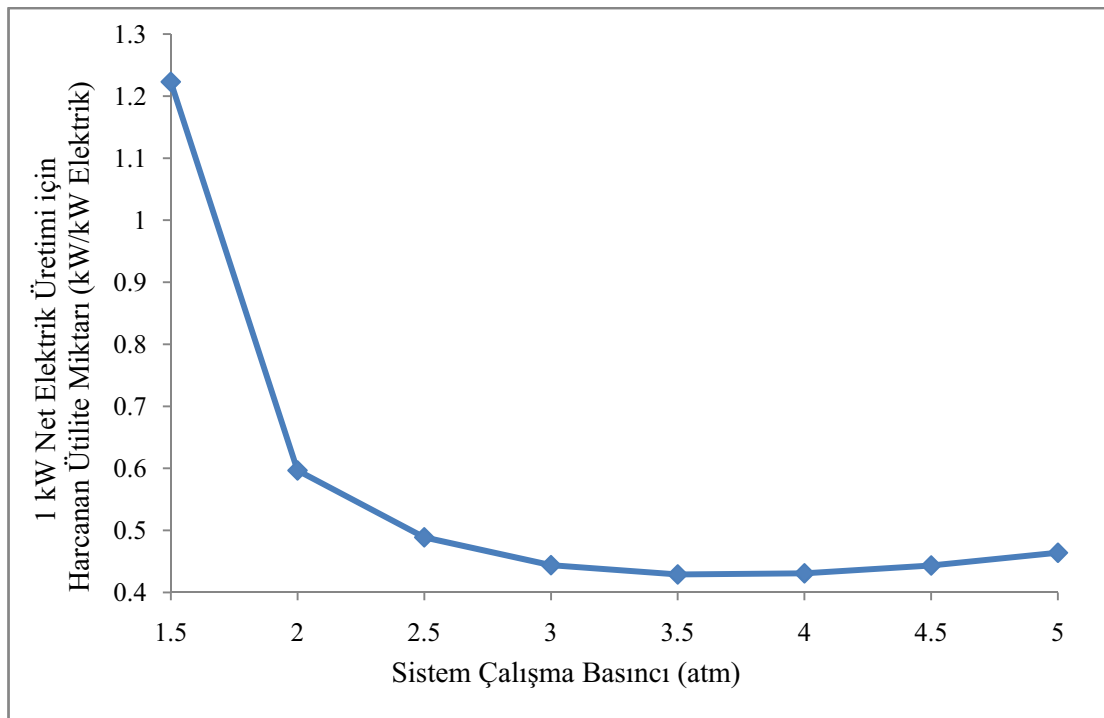
Şekil 5.10. Sistem çalışma basıncının ısı değiştiricilerin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi.

ile gaz türbininde üretilen elektrik miktarı arasında doğrusal bir ilişki vardır. 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (soğuk) miktarı, önce azalmakta, basınç 3.5 atm değerinde iken artmaya başlamaktadır. Sistem verimi ise Şekil 5.13’de görüldüğü gibi 5 atm’de % 61 değerine ulaşmaktadır. Sistem verimi, eşitlik 3.15’e göre hesaplanmaktadır.

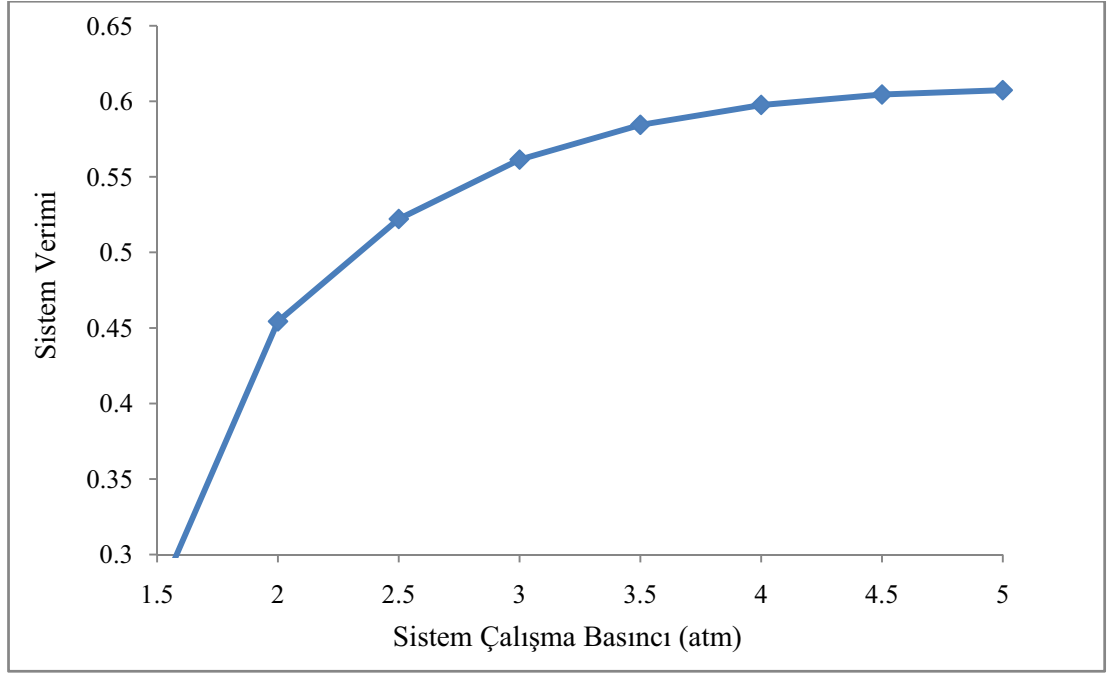
Sistem çalışma basıncının toplam ısı değiştirici alanı, ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti, gaz türbininin yatırım maliyeti ve toplam yatırım maliyeti üzerine etkisi Şekil 5.14’teki, ısı değiştiriciler ve gaz türbininin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi Şekil 5.15’teki gibi olmaktadır. Yıllık toplam maliyet, basınç 3.5 atm’de iken minimum değerine (-19300 \$/yıl) ulaşmaktadır.



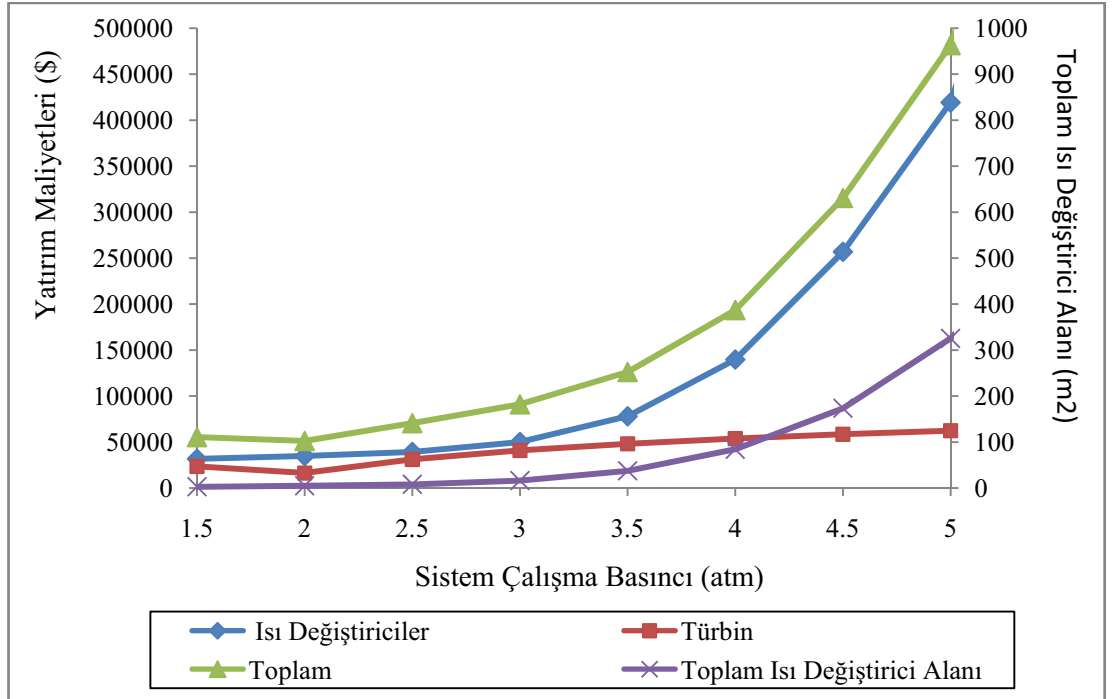
Şekil 5.11. Sistem çalışma basıncının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi.



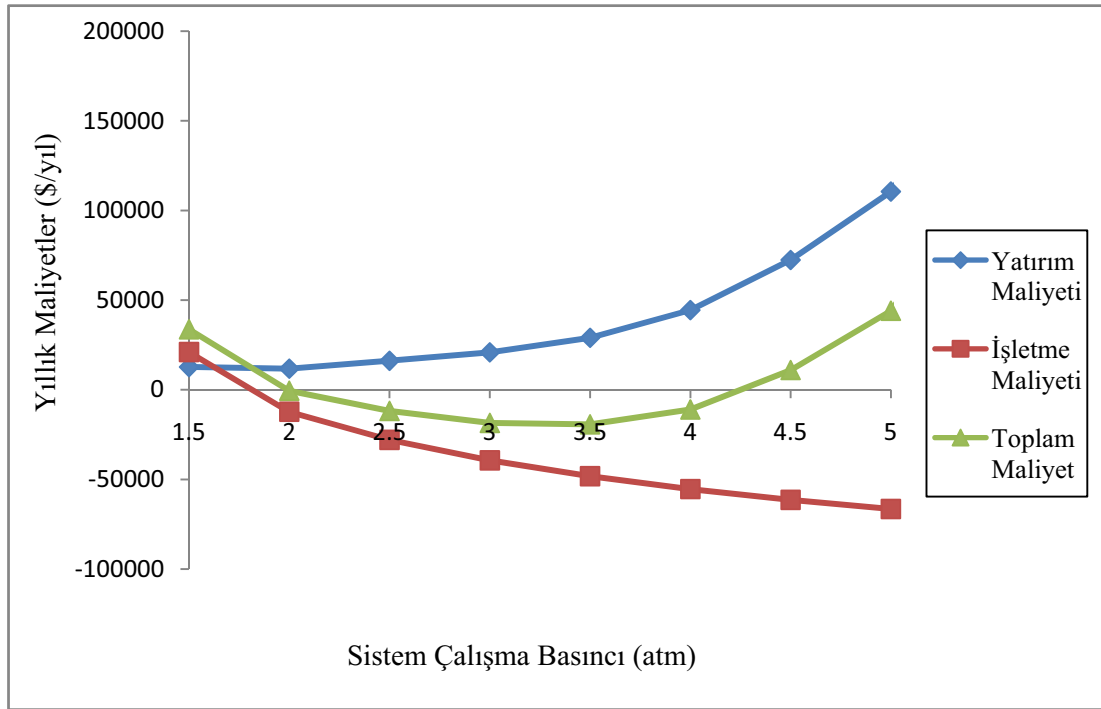
Şekil 5.12. Sistem çalışma basıncının 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi.



Şekil 5.13. Sistem çalışma basıncının sistem verimi üzerine etkisi.



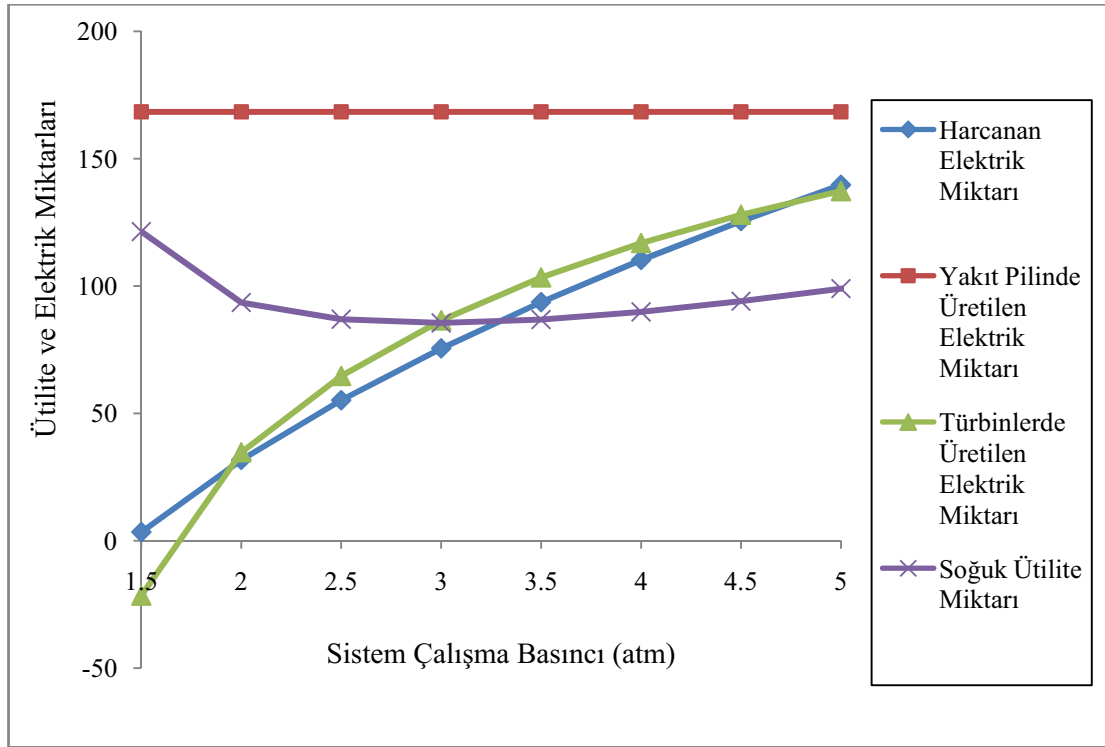
Şekil 5.14. Sistem çalışma basıncının toplam ısı değiştirici alanı, ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti, gaz türbininin yatırım maliyeti ve toplam yatırım maliyeti üzerine etkisi.



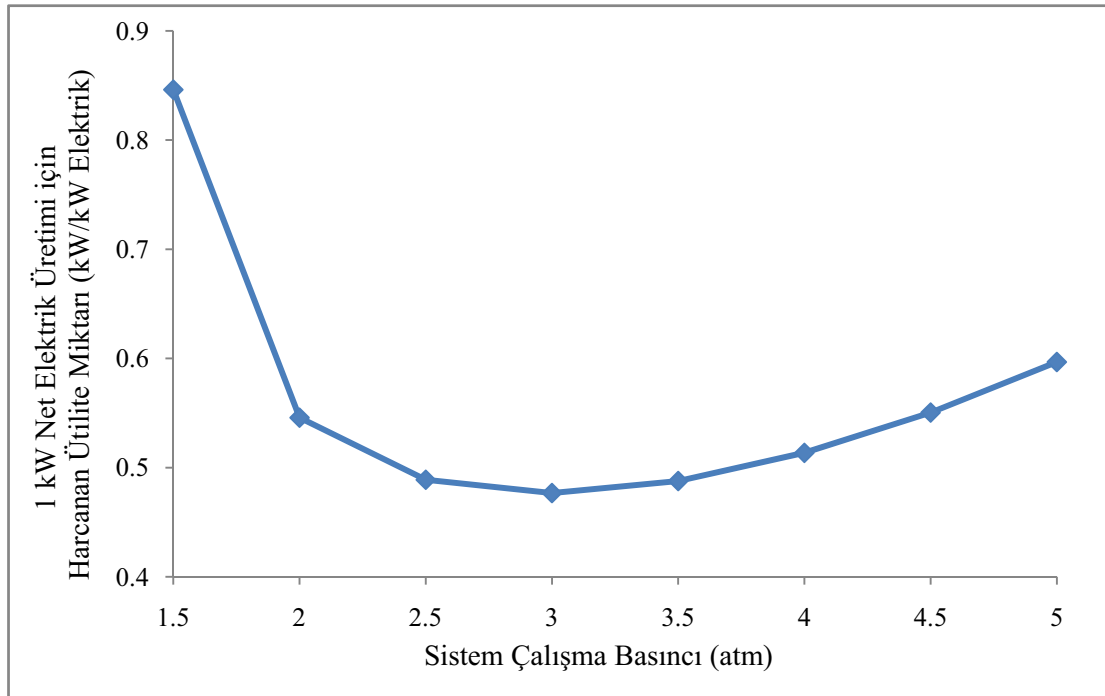
Şekil 5.15. Sistem çalışma basıncının ısı değiştiriciler ve gaz türbininin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi.

Tek gaz türbinli katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemi için en uygun çalışma basınçlarının verim bakımından yüksek çalışma basınçları iken yıllık toplam maliyet bakımından 3.5 atm civarı olduğu sonucuna varılmaktadır.

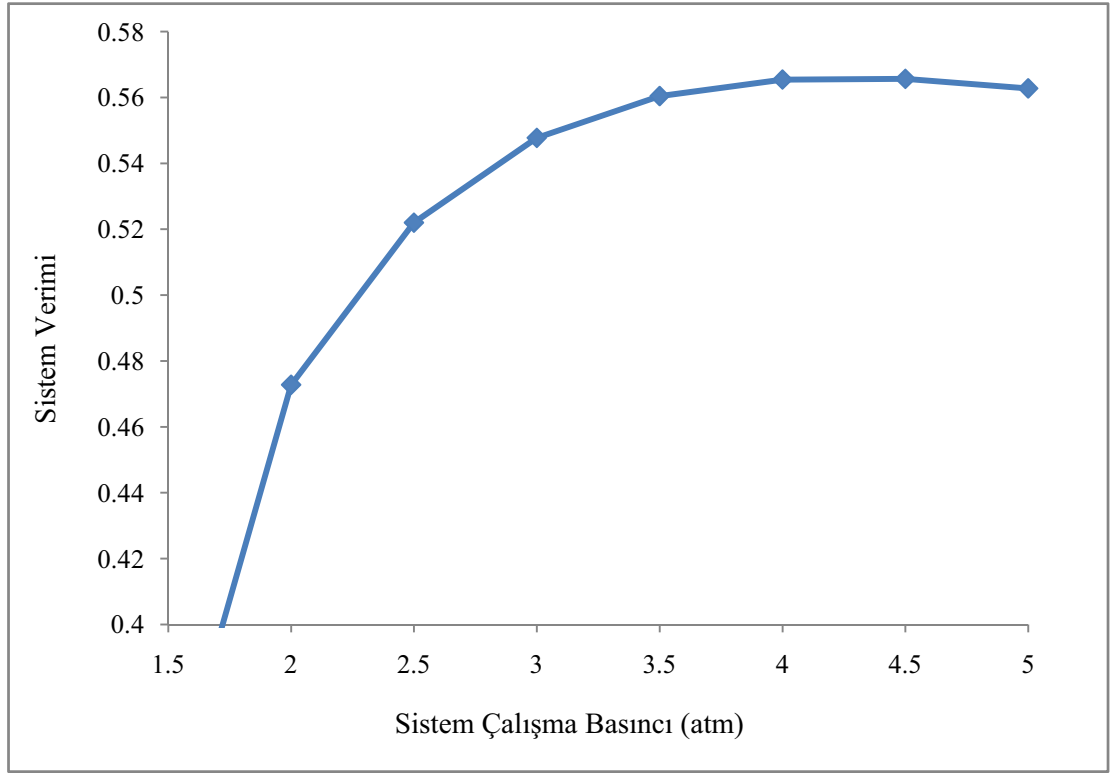
Çift gaz türbinli katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminde kompresörlerde harcanan elektrik, yakıt pili ve gaz türbinlerinde üretilen elektrik ve harcanan ütilite miktarlarındaki değişimler Şekil 5.16’da, 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (soğuk) miktarındaki değişim Şekil 5.17’de sunulmaktadır. Sistem çalışma basıncındaki değişim özellikle gaz türbinli katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemlerinde daha fazla elektrik üretmeyi sağlamaktadır. Basınç ile gaz türbinde üretilen elektrik miktarı arasında doğrusal bir ilişki vardır. 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (soğuk) miktarı, önce azalmakta, basınç 3 atm civarında iken artmaya başlamaktadır. Sistem verimi ise Şekil 5.18’de görüldüğü gibi basınç 4.5 atm olduğunda maksimum değerine (% 57) ulaşmaktadır. Sistem verimi, eşitlik 3.15’e göre hesaplanmaktadır.



Şekil 5.16. Sistem çalışma basıncının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi.



Şekil 5.17. Sistem çalışma basıncının 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi.

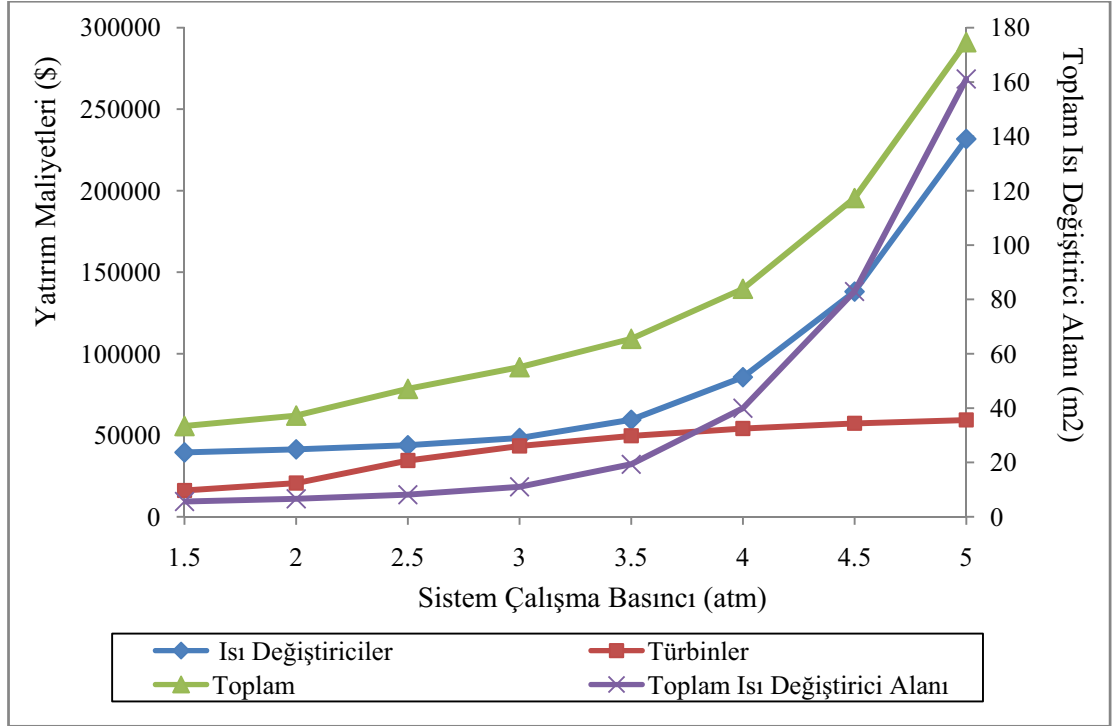


Şekil 5.18. Sistem çalışma basıncının sistem verimi üzerine etkisi.

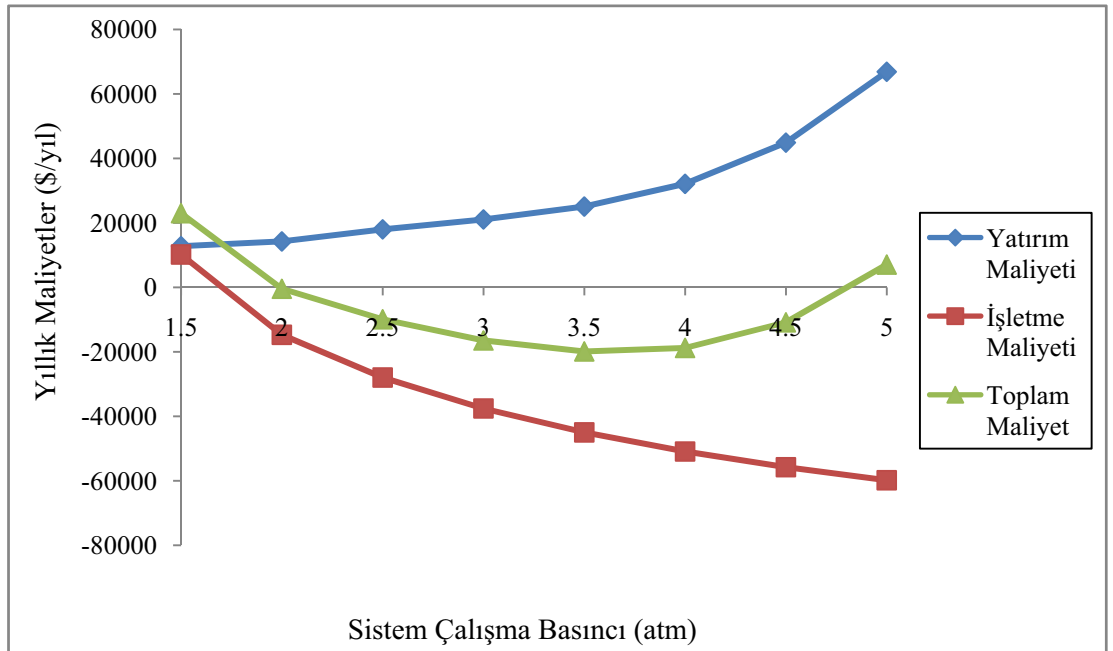
Sistem çalışma basıncının toplam ısı değiştirici alanı, ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti, gaz türbinlerin yatırım maliyeti ve toplam yatırım maliyeti üzerine etkisi Şekil 5.19'daki, ısı değiştiriciler ve gaz türbinlerinin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi Şekil 5.20'deki gibi olmaktadır. Yıllık toplam maliyet, çalışma basıncı 3.5 atm civarında minimum değerine (-19900 \$/yıl) ulaşmaktadır.

Çift gaz türbinli katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemi için en uygun çalışma basınçlarının verim bakımından 4.5 atm iken yıllık toplam maliyet bakımından 3.5 atm olduğu sonucuna varılmaktadır.

Daha önce bahsedilen dört farklı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminin, sistem çalışma basıncının 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarındaki etkilerine göre karşılaştırılması Şekil 5.21'te verilmektedir. Gaz türbinli katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemlerinin ütilite harcamada daha ekonomik olduğu anlaşılmaktadır. Diğer sistemlerde değişim sürekli artma yönünde iken gaz türbinli sistemlerde önce azalma sonra artma yönünde gözlenmektedir.

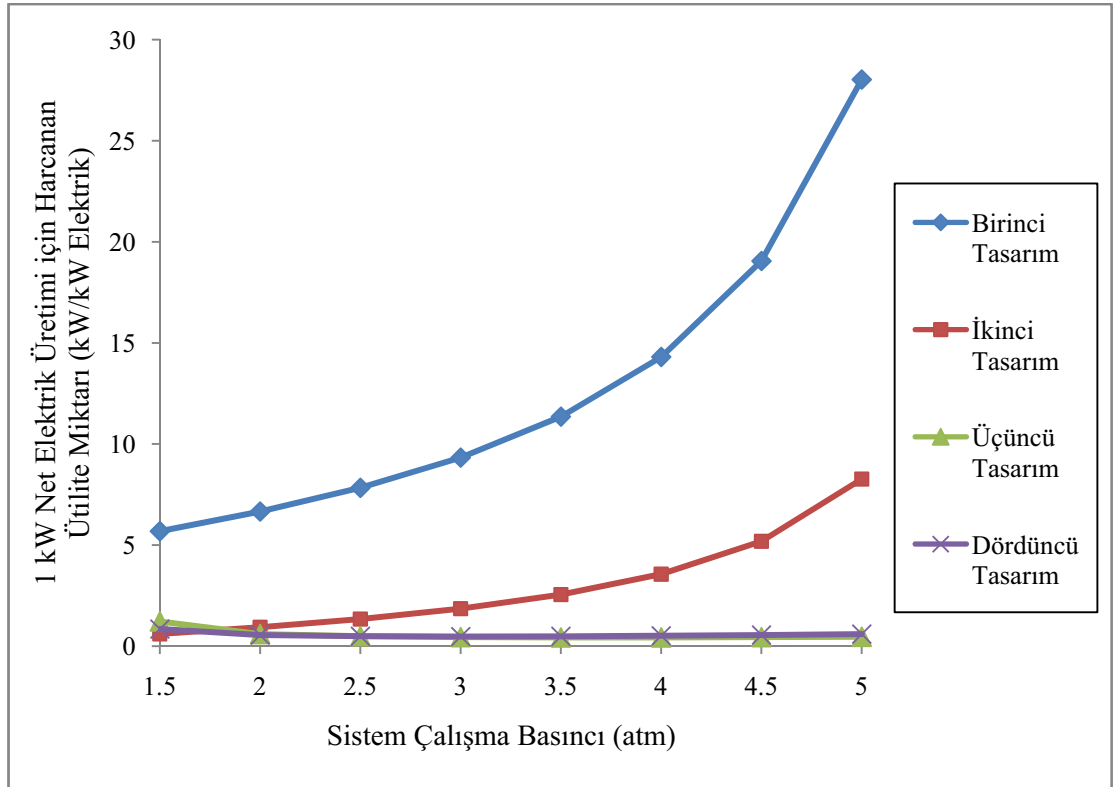


Şekil 5.19. Sistem çalışma basıncının toplam ısı değiştirici alanı, ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti, gaz türbinlerin yatırım maliyeti ve toplam yatırım maliyeti üzerine etkisi.

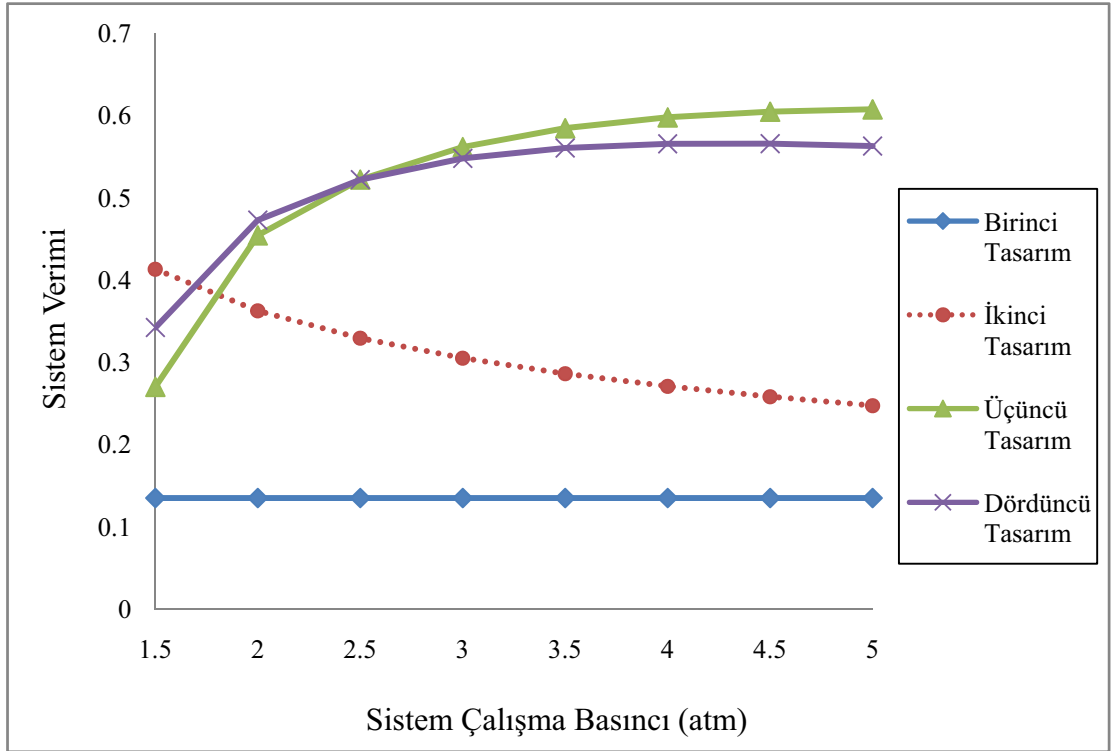


Şekil 5.20. Sistem çalışma basıncının ısı değiştiriciler ve gaz türbinlerinin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi.

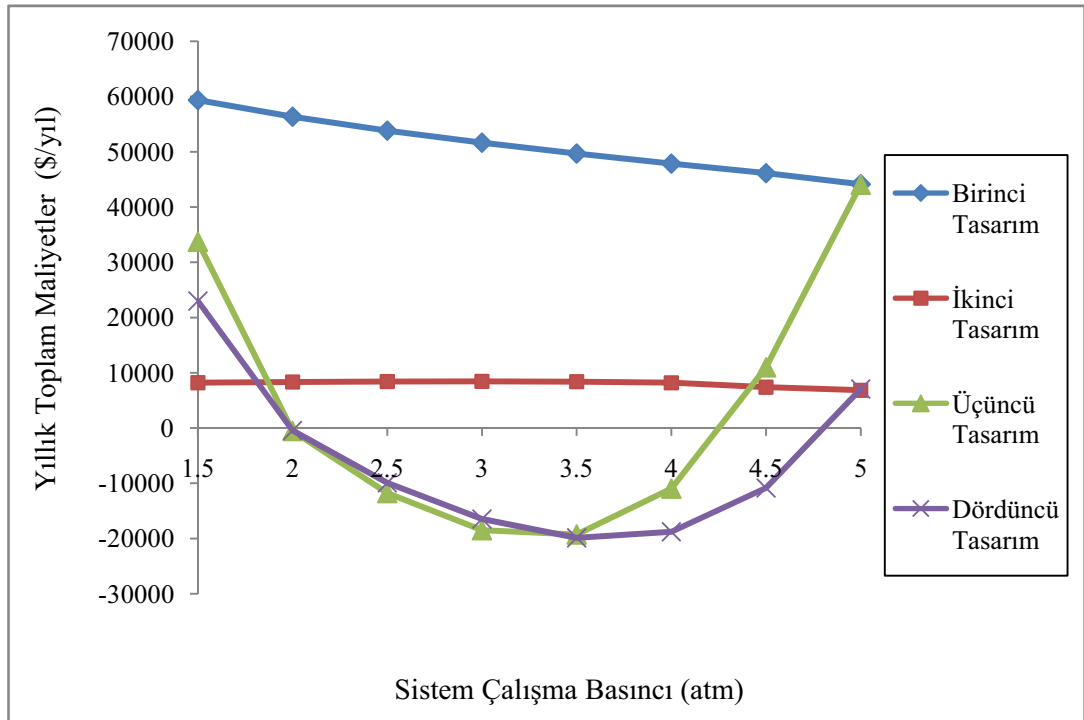
Bunun sebebi, basınca bağılı olarak gaz türbinlerde üretilen elektrik miktarında artışın olmasıdır. Gaz türbinli sistemlerde bu 3 atm civarında minimuma ulaşmaktadır. Şekil 5.22’de görüldüğü gibi özellikle gaz türbinli katı oksit yakıt pillerinde basınç artışı, verimi pozitif olarak etkilemektedir. Dört farklı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminin, sistem çalışma basıncının yıllık toplam maliyetlerindeki etkilerine göre karşılaştırılması Şekil 5.23’te verilmektedir. Gaz türbinli sistemler için yıllık toplam maliyet minimum değerlerine ulaşmaktadır.



Şekil 5.21. Sistem çalışma basıncının 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkilerinin tasarımlara göre karşılaştırılması.



Şekil 5.22. Sistem çalışma basıncının sistem verimi üzerine etkilerinin tasarımlara göre karşılaştırılması.



Şekil 5.23. Sistem çalışma basıncının yıllık toplam maliyetler üzerine etkilerinin tasarımlara göre karşılaştırılması.

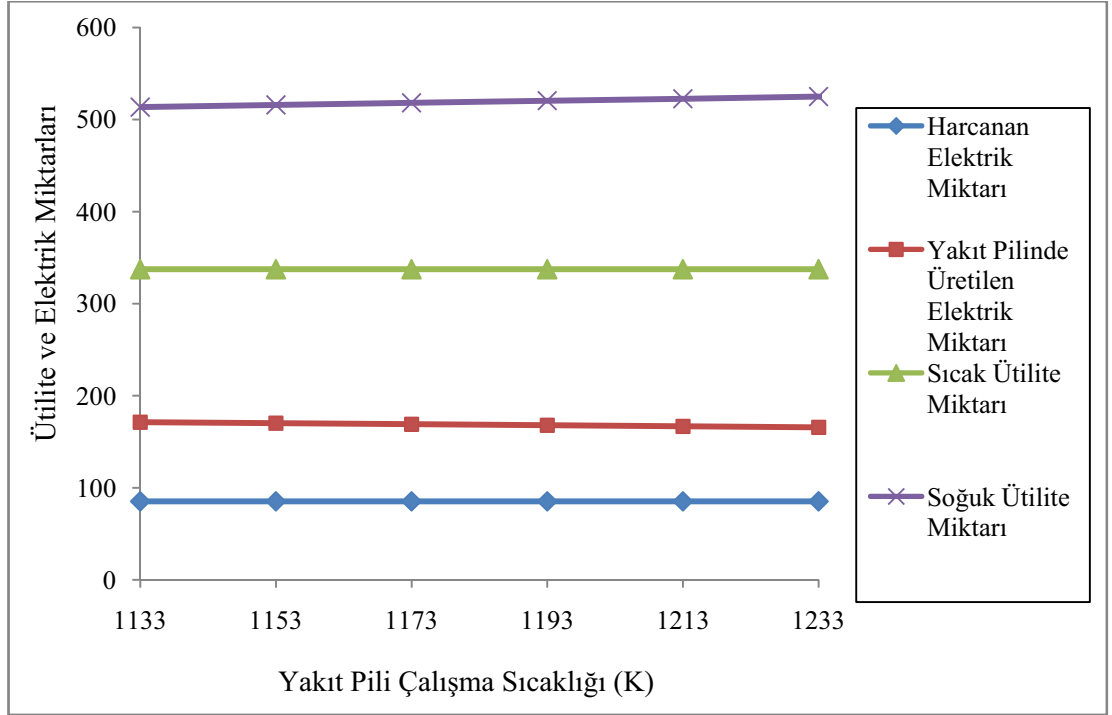
5.2. Katı Oksit Yakıt Pili Çalışma Sıcaklığına Göre Dört Tasarımın Duyarlılık Analizi

Katı oksit yakıt pili çalışma sıcaklığının artması ile harcanan elektrik, üretilen elektrik miktarlarındaki değişimler ve maliyetlerdeki değişimler araştırılmıştır. Bu çalışma daha önce bahsedilen dört farklı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemi için yapılmıştır. Sıcaklık değişimi sırasında sistem çalışma basıncı 2.76 atm'de, yakıt kullanım oranı %85'te ve buhar/karbon oranı ise 2.5'te sabitlenmektedir.

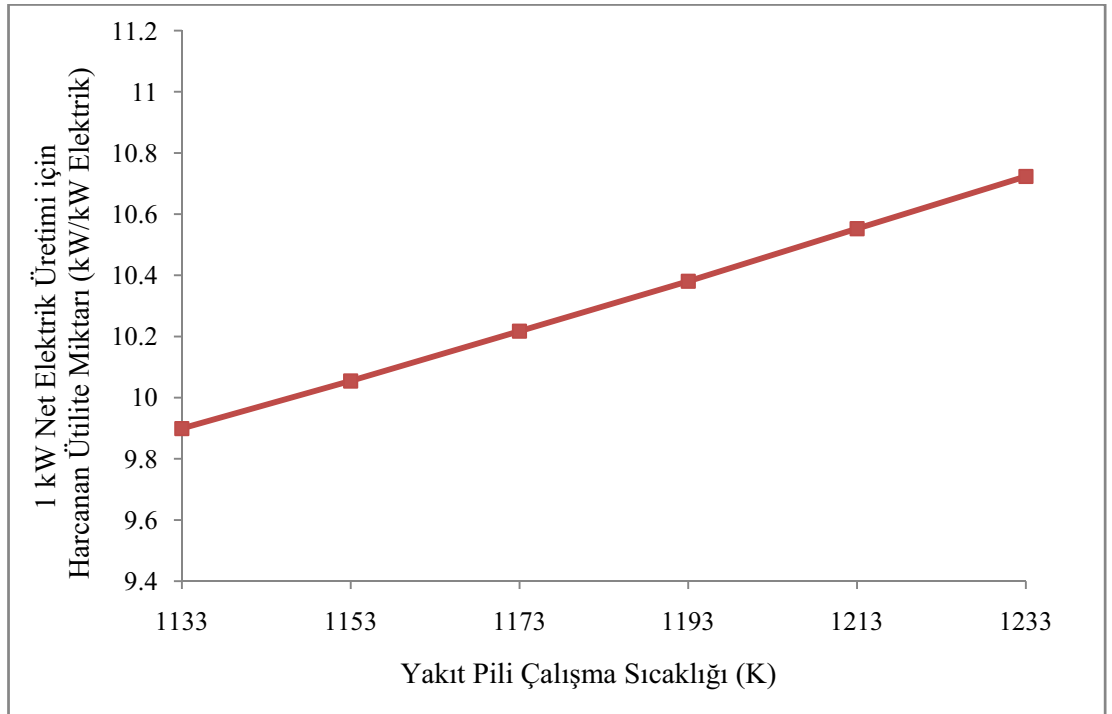
Isı geri kazanımı olmayan katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminde kompresörlerde harcanan elektrik, yakıt pilinde üretilen elektrik ve harcanan ütilite miktarlarındaki değişimler Şekil 5.24'te, 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (sıcak+soğuk) miktarındaki değişim Şekil 5.25'te sunulmaktadır. Yakıt pili çalışma sıcaklığının artması ile artıyıcıdan çıkan gazların sıcaklığı daha yüksek derecelere ulaşmakta ve bu nedenle harcanan soğuk ütilite miktarı artmaktadır. Üretilen elektrik miktarındaki azalmadan dolayı 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (sıcak+soğuk) miktarı devamlı artmaktadır. Sistem verimi ise Şekil 5.26'da görüldüğü gibi sürekli azalmaktadır. Sistem verimi, eşitlik 3.15'e göre hesaplanmaktadır.

Yakıt pili çalışma sıcaklığının toplam ısı değiştirici alanı ve ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti üzerine etkisi Şekil 5.27'deki, ısı değiştiricilerin yatırım, işletme ve toplam maliyetleri üzerine etkisi Şekil 5.28'deki gibi olmaktadır. Yakıt pili çalışma sıcaklığındaki değişimin yıllık maliyetlerde fazla bir değişime neden olmadığı görülmektedir.

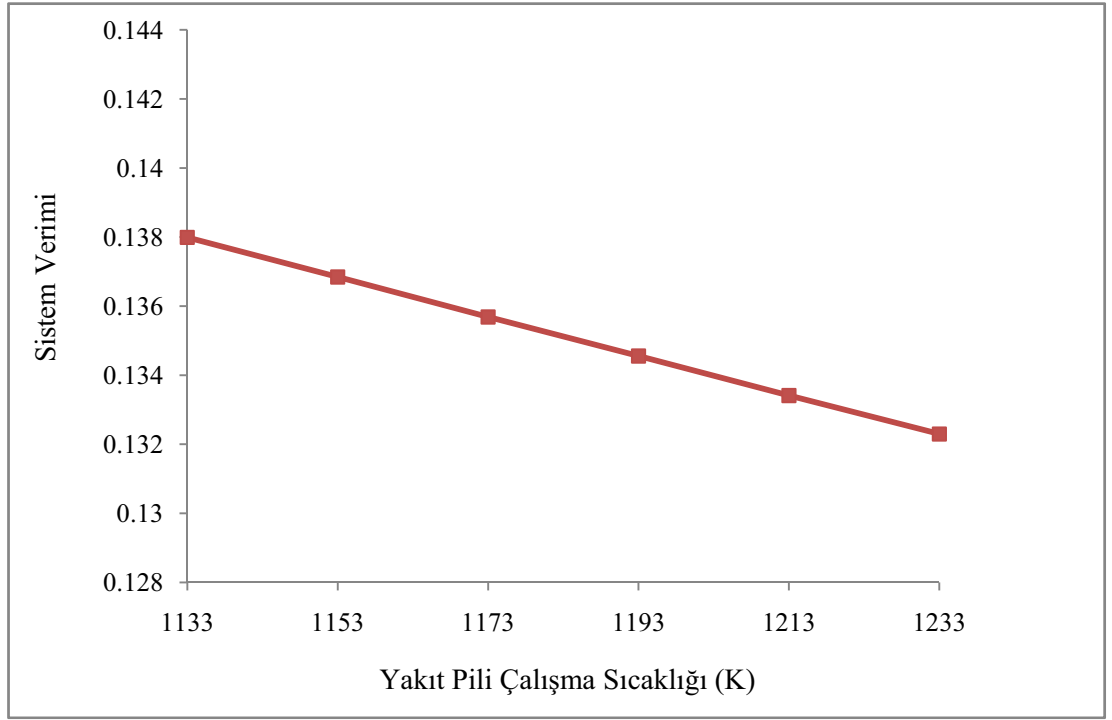
Gerek yüksek verim gerekse düşük ısı değiştiricilerin yıllık maliyetleri bakımından ısı geri kazanımı olmayan katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemi için en uygun çalışma sıcaklıkları düşük çalışma sıcaklıklarıdır.



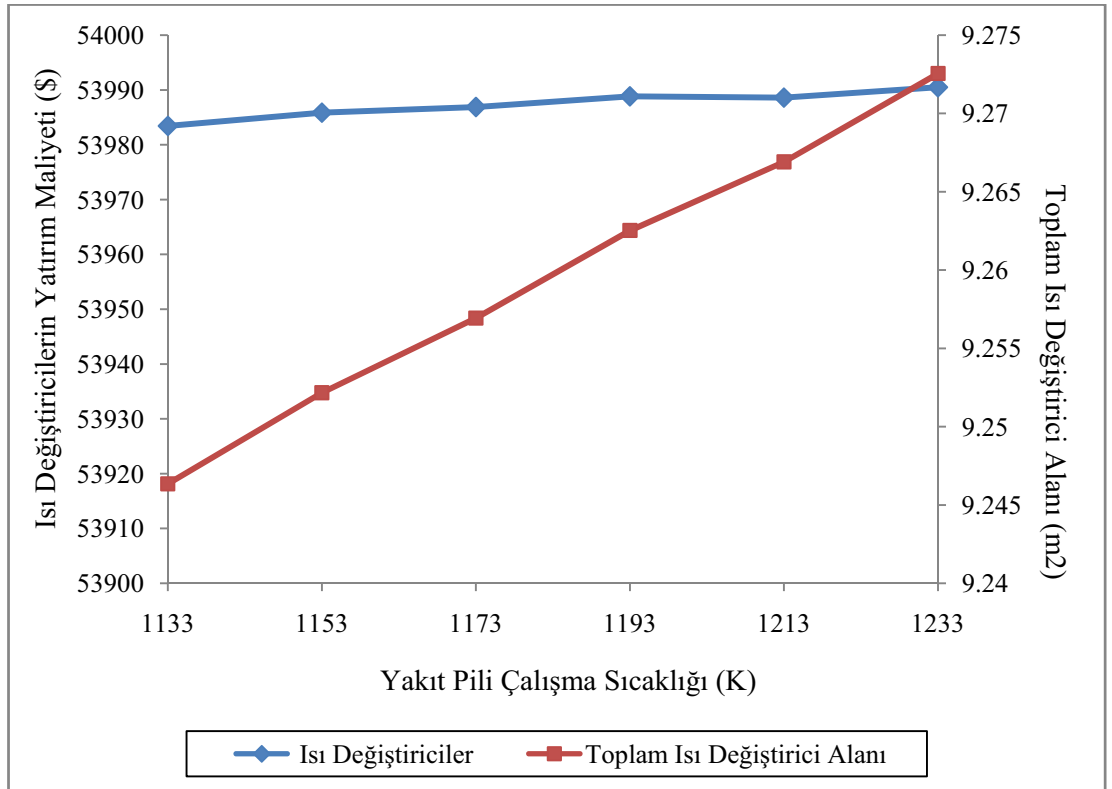
Şekil 5.24. Yakıt pili çalışma sıcaklığının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi.



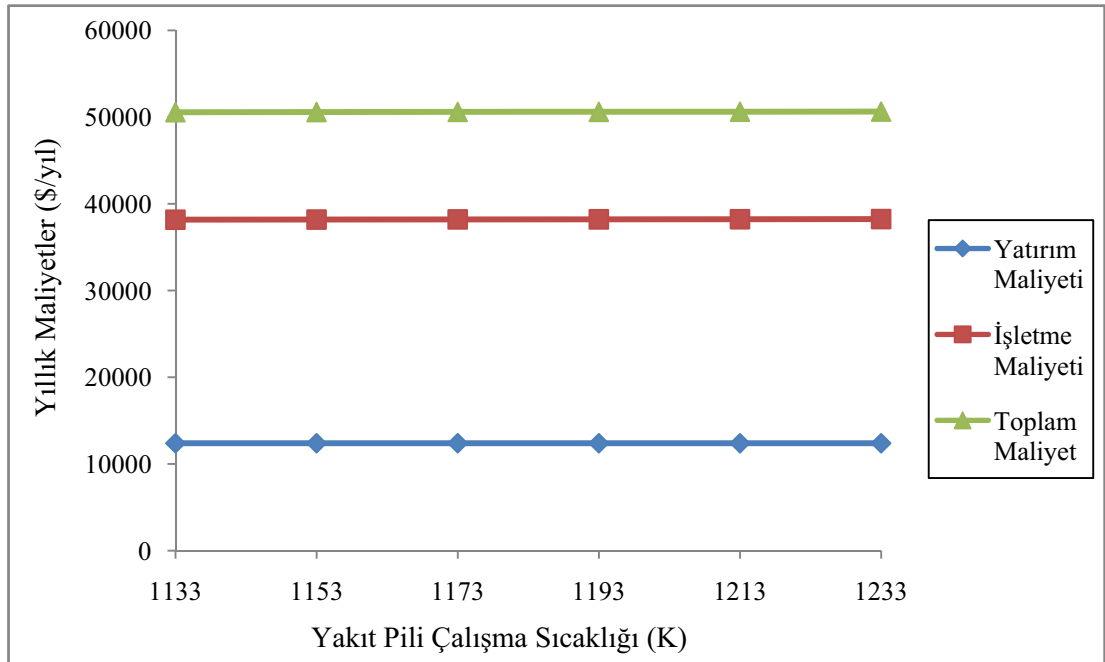
Şekil 5.25. Yakıt pili çalışma sıcaklığının 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi.



Şekil 5.26. Yakıt pili çalışma sıcaklığının sistem verimi üzerine etkisi.



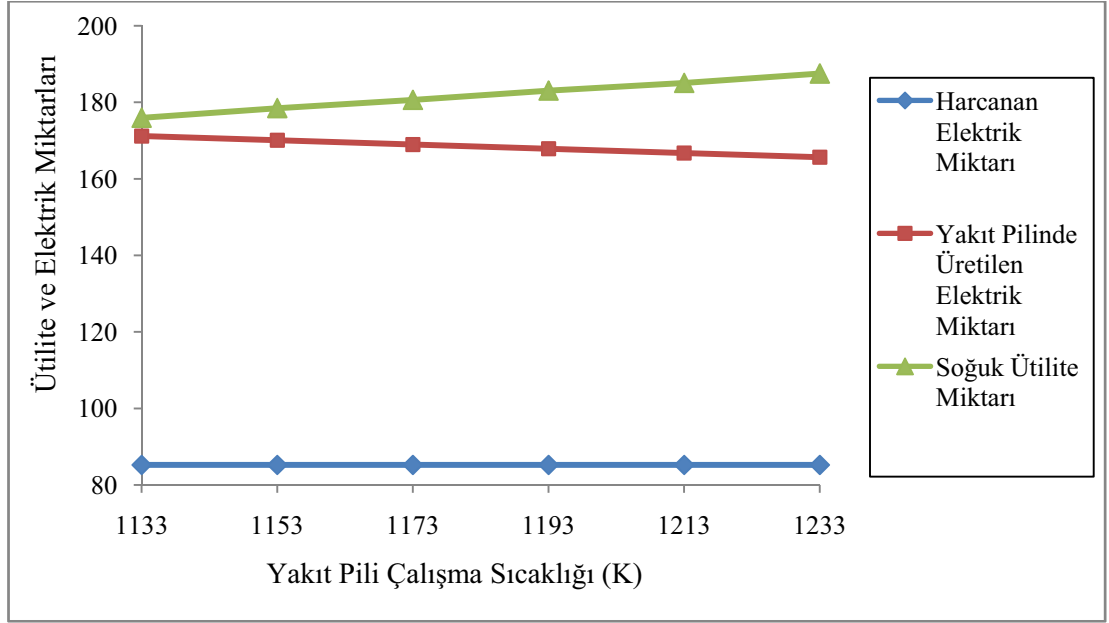
Şekil 5.27. Yakıt pili çalışma sıcaklığının toplam ısı değiştirici alanı ve ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti üzerine etkisi.



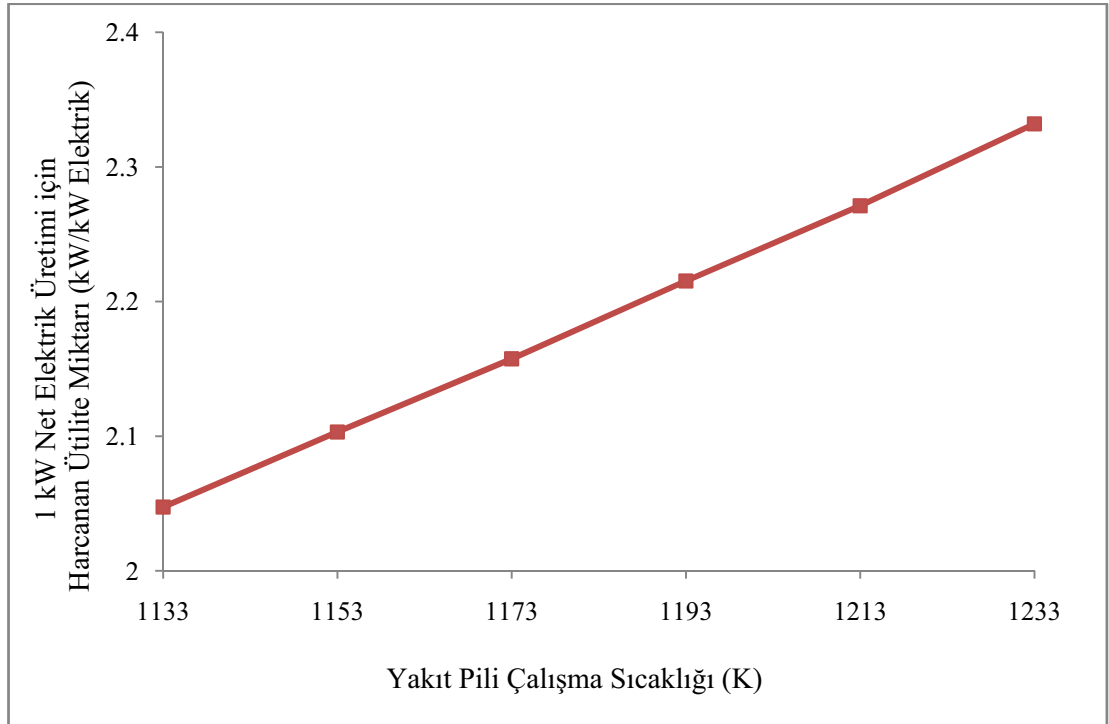
Şekil 5.28. Yakıt pili çalışma sıcaklığının ısı değiştiricilerin yıllık yatırım, işletme ve toplam maliyetleri üzerine etkisi.

Darboğaz yöntemi ile ısı gerikazanımı sağlanmış katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminde kompresörlerde harcanan elektrik, yakıt pilinde üretilen elektrik ve harcanan ütilite miktarlarındaki değişimler Şekil 5.29’da, 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (soğuk) miktarındaki değişim Şekil 5.30’da sunulmaktadır. Yakıt pili çalışma sıcaklığının artması ile artıyakıcıdan çıkan gazların sıcaklığı daha yüksek derecelere ulaşmakta ve bu nedenle harcanan soğuk ütilite miktarı artmaktadır. Üretilen elektrik miktarındaki azalmadan dolayı 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (soğuk) miktarı devamlı artmaktadır. Sistem verimi ise Şekil 5.31’de görüldüğü gibi sürekli azalmaktadır. Sistem verimi, eşitlik 3.15’e göre hesaplanmaktadır.

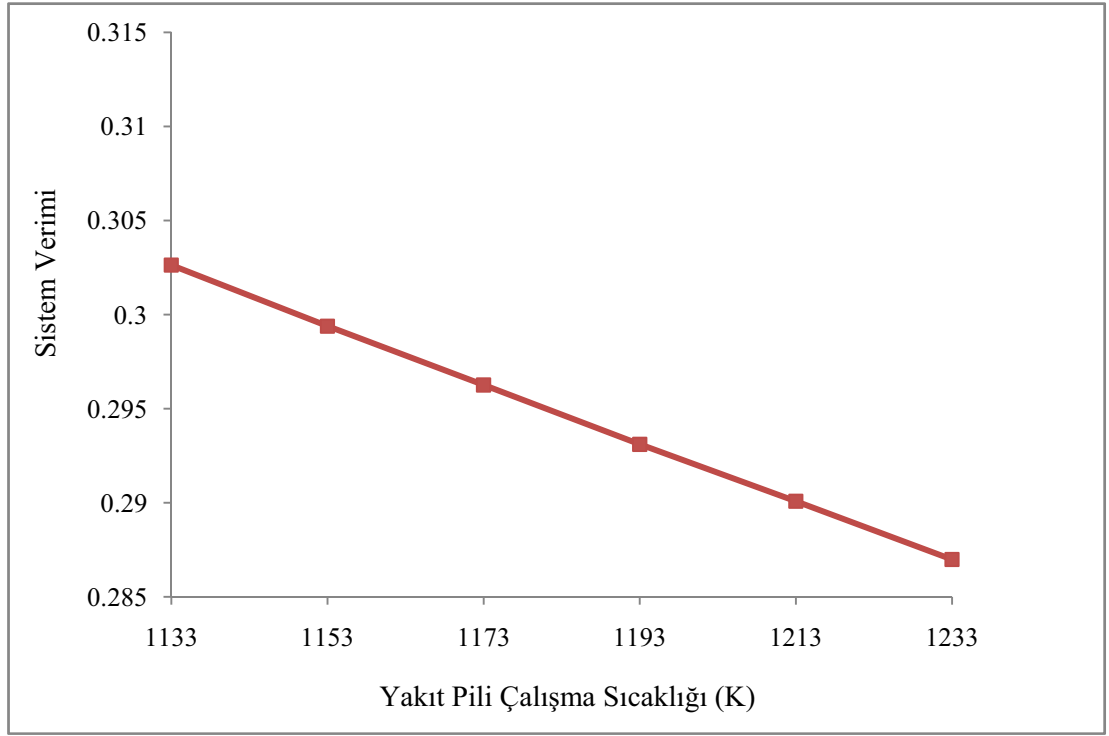
Yakıt pili çalışma sıcaklığının toplam ısı değiştirici alanı ve ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti üzerine etkisi Şekil 5.32’deki, ısı değiştiricilerin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi Şekil 5.33’teki gibi olmaktadır. Yakıt pili çalışma sıcaklığındaki değişimin yıllık maliyetlerde fazla bir değişime neden olmadığı görülmektedir.



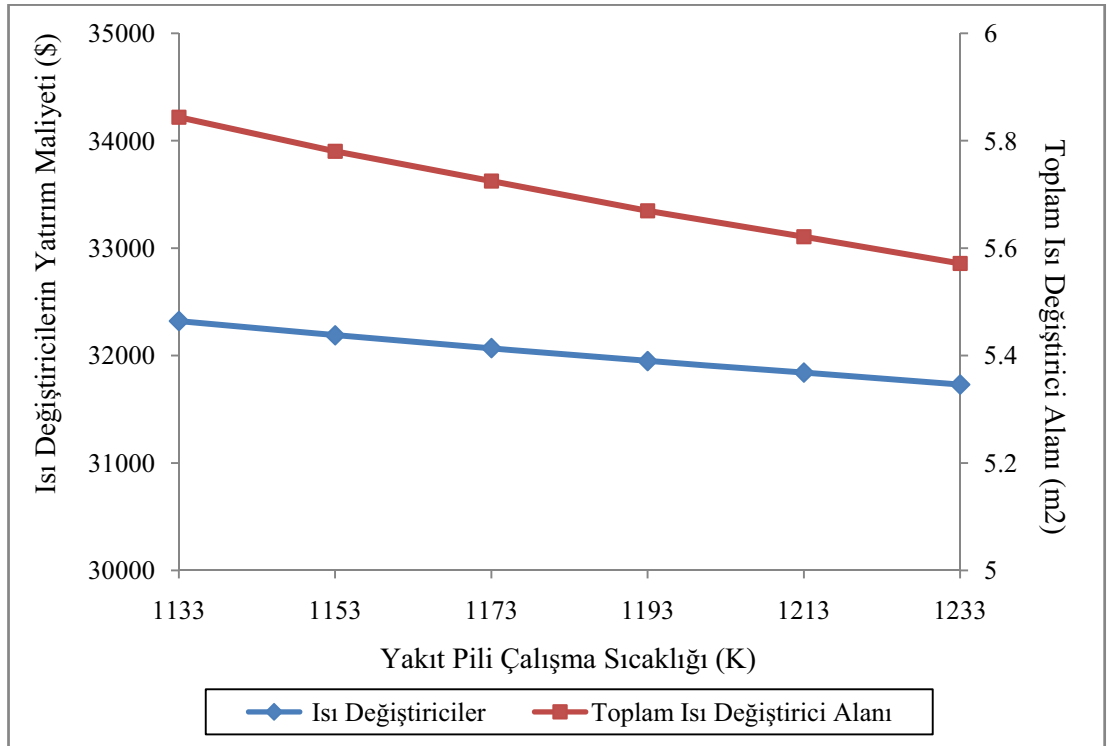
Şekil 5.29. Yakıt pili çalışma sıcaklığının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi.



Şekil 5.30. Yakıt pili çalışma sıcaklığının 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi.

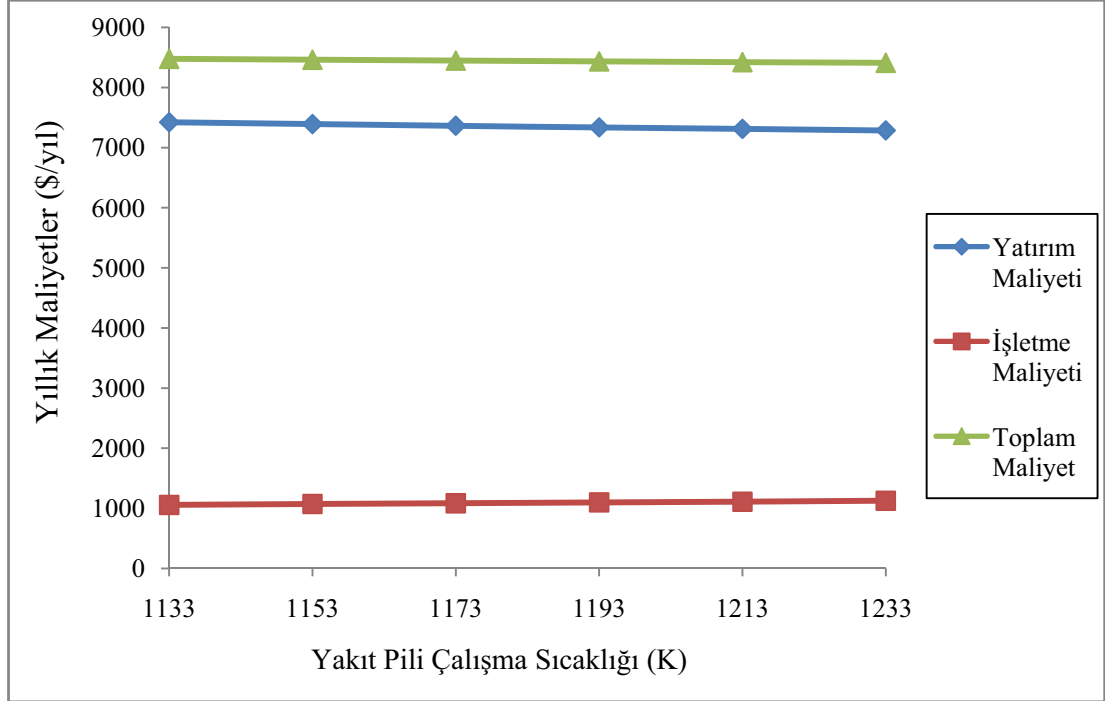


Şekil 5.31. Yakıt pili çalışma sıcaklığının sistem verimi üzerine etkisi.



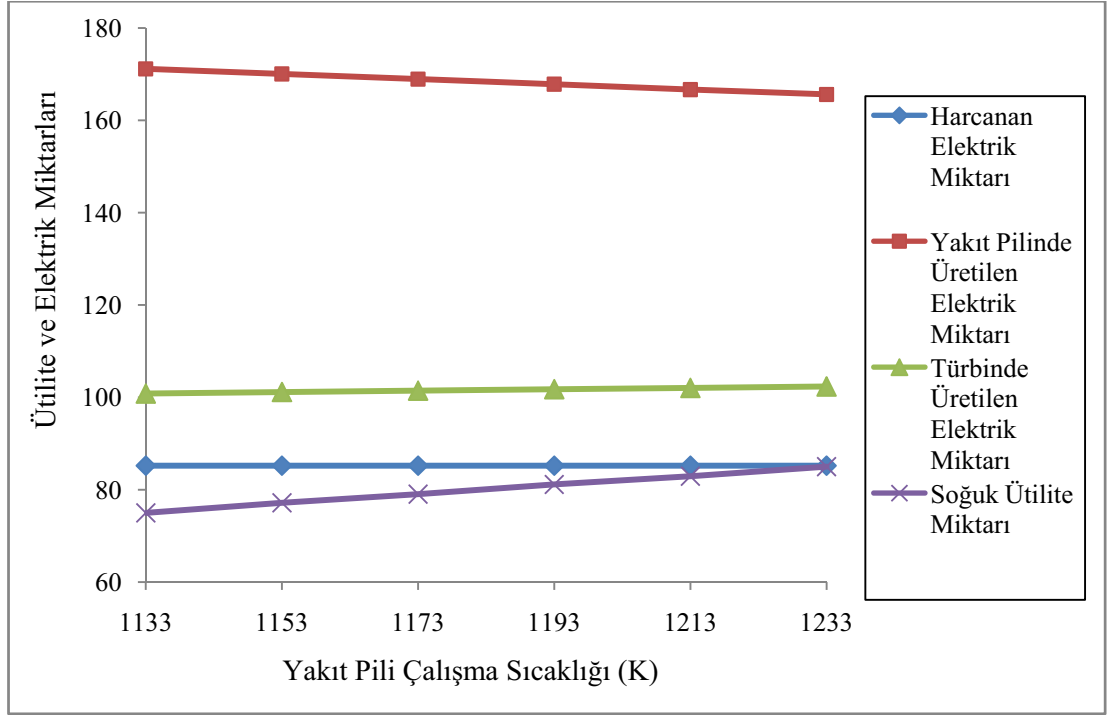
Şekil 5.32. Yakıt pili çalışma sıcaklığının toplam ısı değiştirici alanı ve ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti üzerine etkisi.

Isı gerikazanımlı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemi için hem yüksek verim hem de düşük yıllık toplam maliyet bakımından daha uygun çalışma sıcaklıkları, düşük çalışma sıcaklıklarıdır.

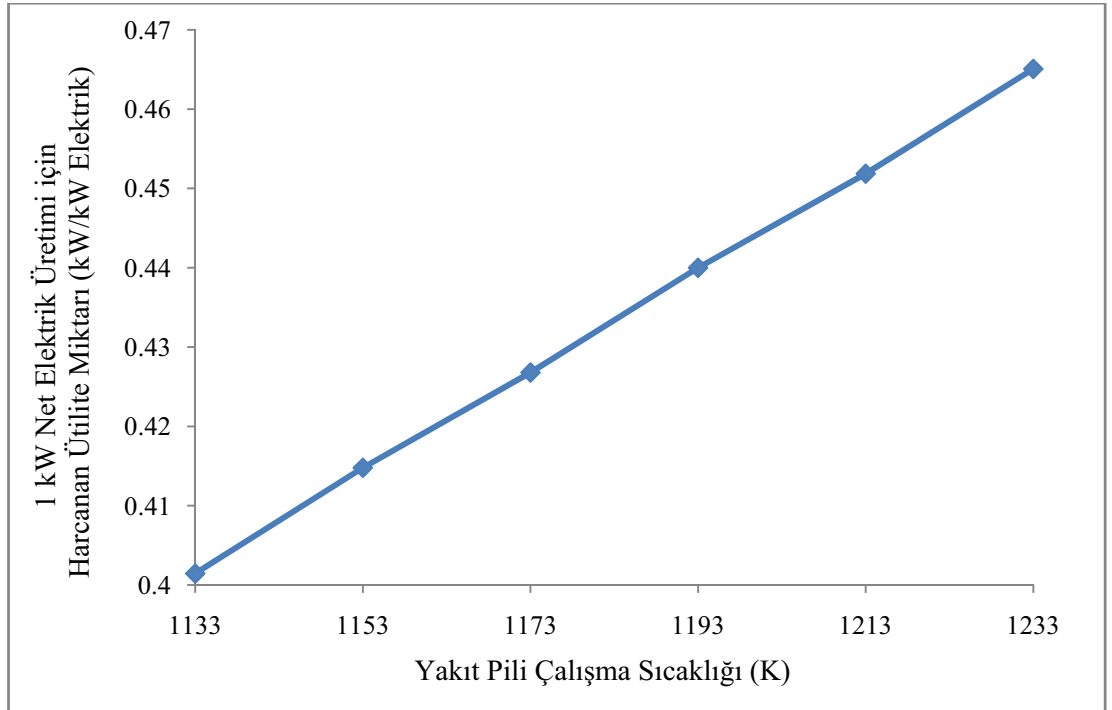


Şekil 5.33. Yakıt pili çalışma sıcaklığının ısı değiştiricilerin yıllık yatırım, işletme ve toplam maliyetleri üzerine etkisi.

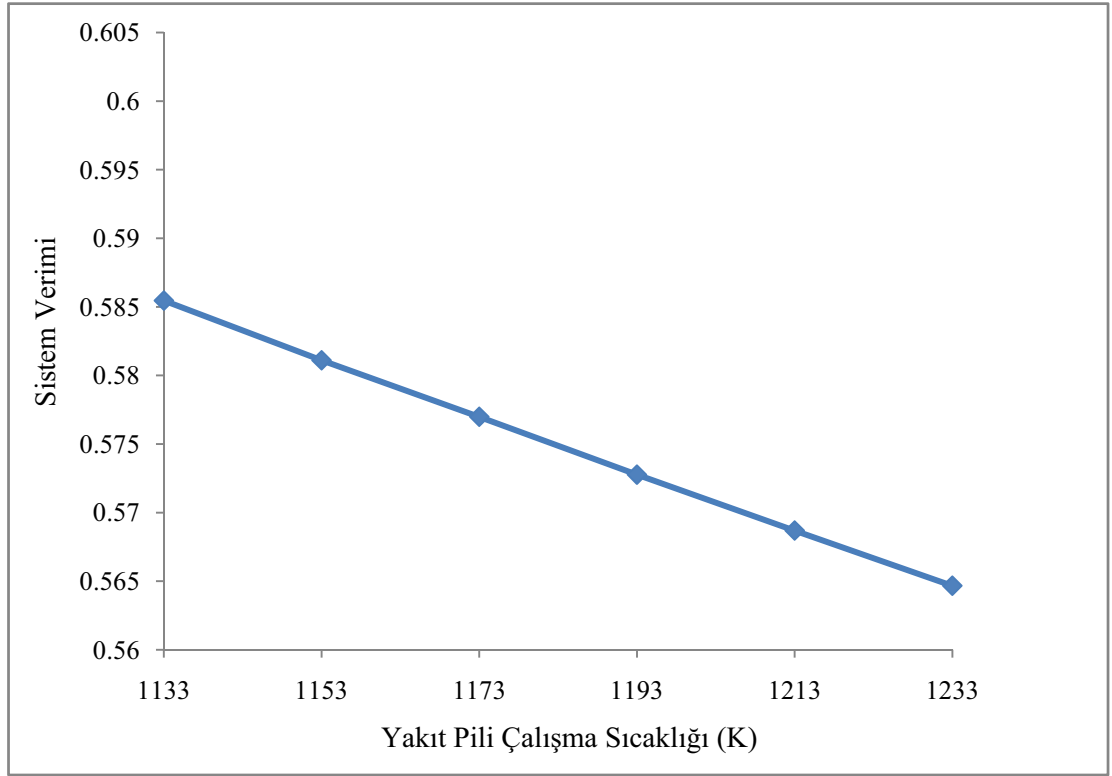
Tek gaz türbinli ısı gerikazanımı sağlanmış katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminde kompresörlerde harcanan elektrik, yakıt pili ve gaz türbininde üretilen elektrik ve harcanan ütilite miktarlarındaki değişimler Şekil 5.34'te, 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (soğuk) miktarındaki değişim Şekil 5.35'te sunulmaktadır. Yakıt pili çalışma sıcaklığının artması ile artyakıcıdan çıkan gazların sıcaklığı daha yüksek derecelere ulaşmakta ve bu nedenle harcanan soğuk ütilite miktarı artmaktadır. Gaz türbininde değişim olmamasından dolayı da 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (soğuk) miktarı devamlı artmaktadır. Sistem verimi ise Şekil 5.36'da görüldüğü gibi sürekli azalmaktadır. Sistem verimi, eşitlik 3.15'e göre hesaplanmaktadır.



Şekil 5.34. Yakıt pili çalışma sıcaklığının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi.



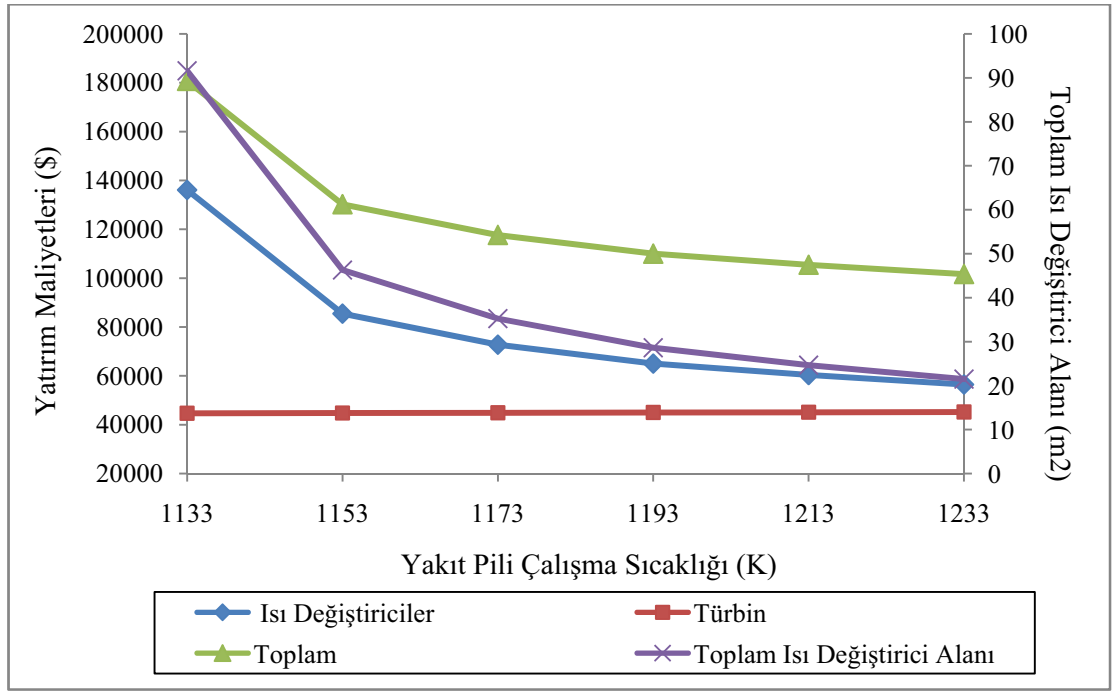
Şekil 5.35. Yakıt pili çalışma sıcaklığının 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi.



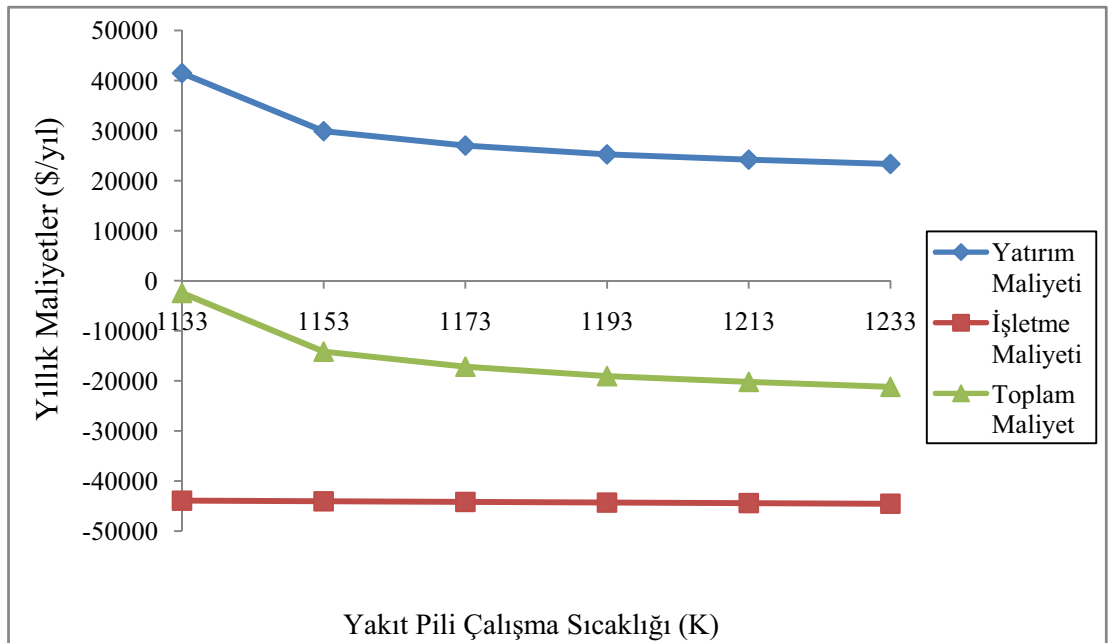
Şekil 5.36. Yakıt pili çalışma sıcaklığının sistem verimi üzerine etkisi.

Yakıt pili çalışma sıcaklığının toplam ısı değiştirici alanı, ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti, gaz türbininin yatırım maliyeti ve toplam yatırım maliyeti üzerine etkisi Şekil 5.37’teki, ısı değiştiriciler ve gaz türbininin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi Şekil 5.38’deki gibi olmaktadır. Yakıt pili çalışma sıcaklığının artması ile yıllık işletme maliyetinin artmasına rağmen ısı değiştiricilerinin yıllık yatırım maliyetlerinde meydana gelen azalma, yıllık toplam maliyetlerini azaltmaktadır.

Tek gaz türbinli katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemi için daha uygun çalışma sıcaklıklarının, verim bakımından düşük çalışma sıcaklıkları iken, üretilen net elektrik başına ısı değiştiriciler ve gaz türbinin yıllık toplam maliyeti bakımından yüksek çalışma sıcaklıkları olduğu sonucuna varılmaktadır.

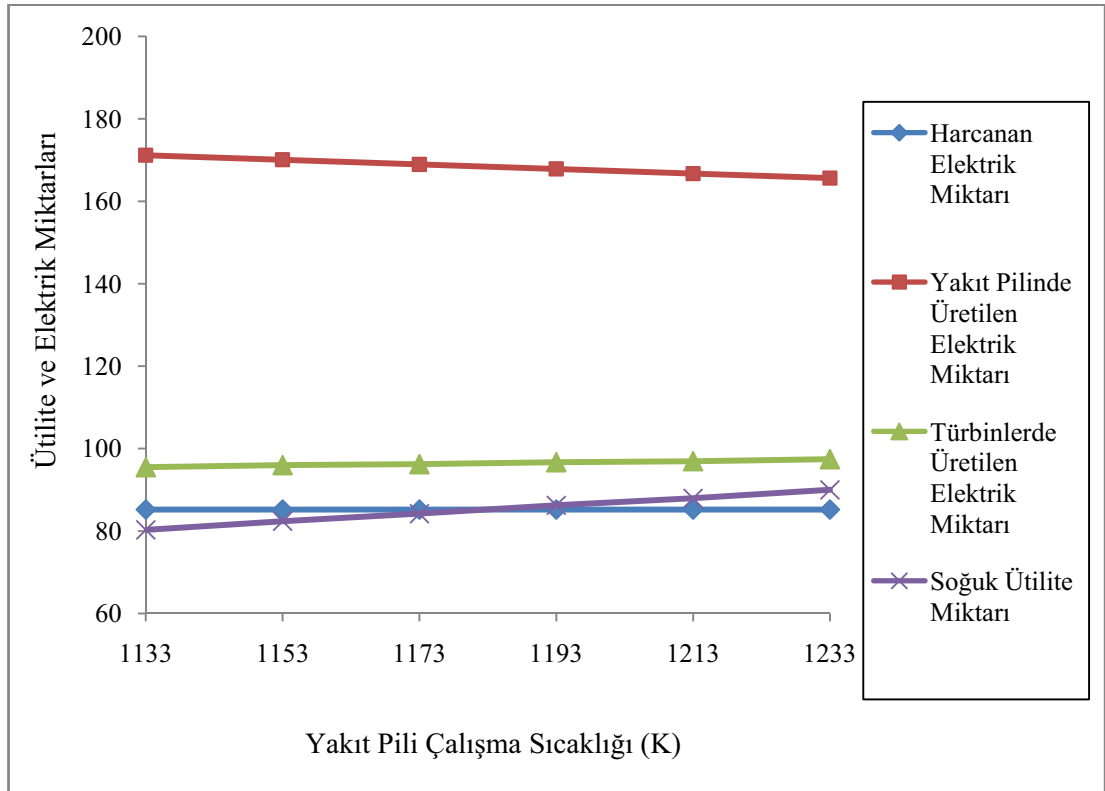


Şekil 5.37. Yakıt pili çalışma sıcaklığının toplam ısı değiştirici alanı, ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti, gaz türbininin yatırım maliyeti ve toplam yatırım maliyeti üzerine etkisi.

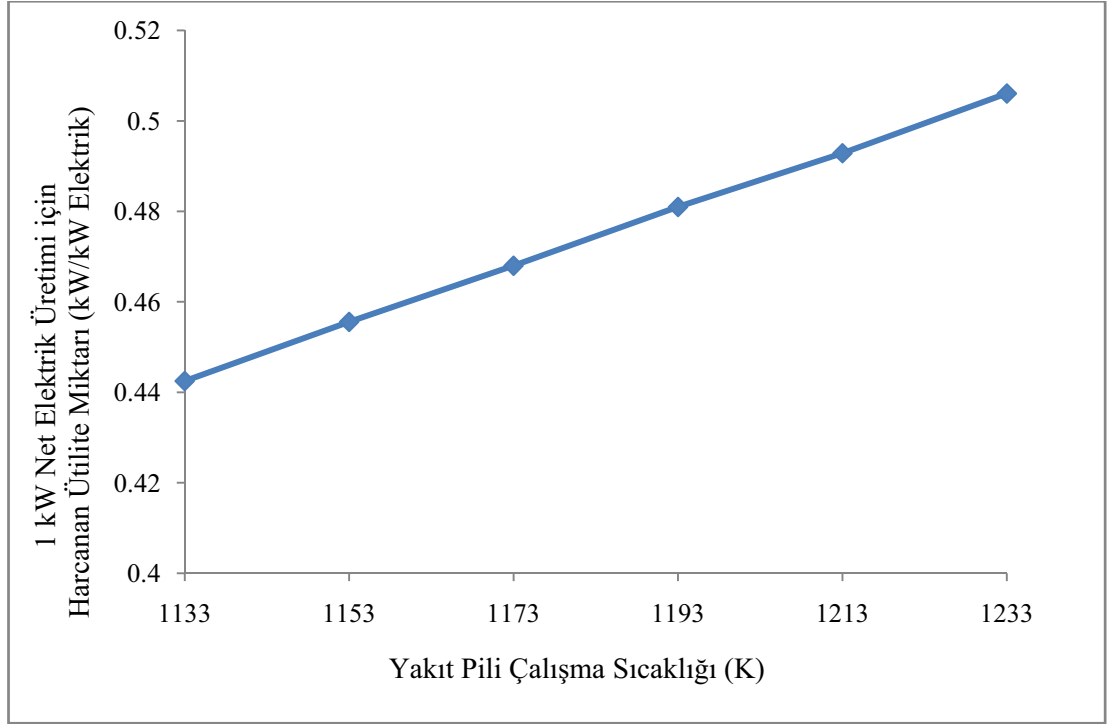


Şekil 5.38. Yakıt pili çalışma sıcaklığının ısı değiştiriciler ve gaz türbininin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi.

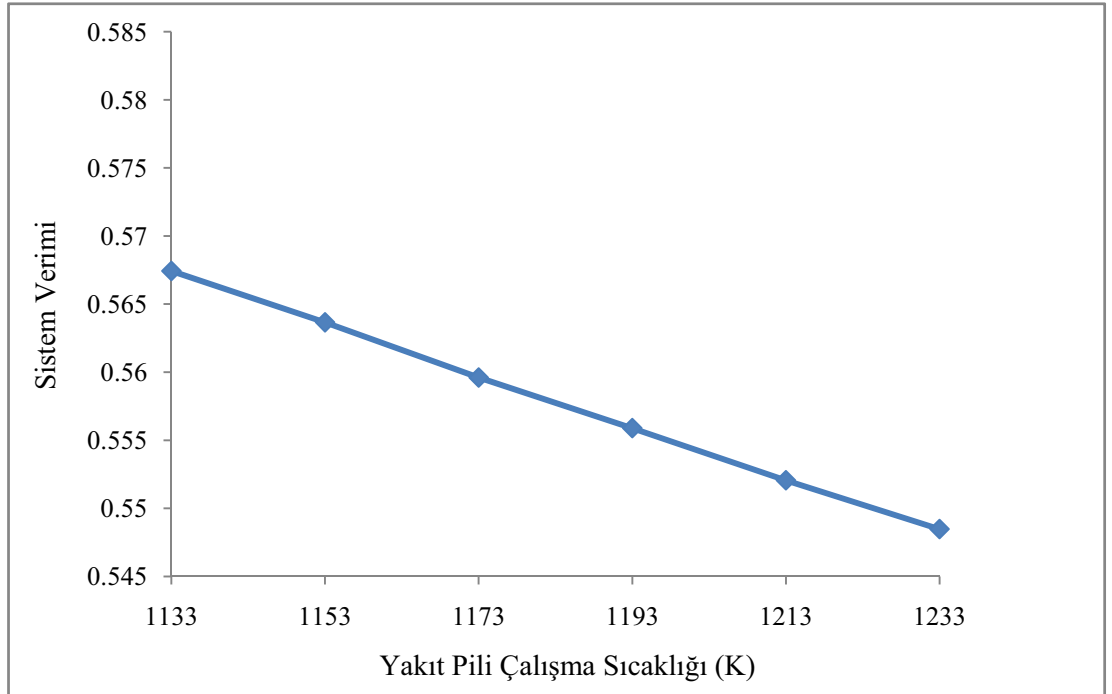
Çift gaz türbinli ısı gerikazanımı sağlanmış katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminde kompresörlerde harcanan elektrik, yakıt pili ve gaz türbinlerinde üretilen elektrik ve harcanan ütilite miktarlarındaki değişimler Şekil 5.39'da, 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (soğuk) miktarındaki değişim Şekil 5.40'da sunulmaktadır. Yakıt pili çalışma sıcaklığının artması ile artıyakıcıdan çıkan gazların sıcaklığı daha yüksek derecelere ulaşmakta ve bu nedenle harcanan soğuk ütilite miktarı artmaktadır. Gaz türbinleri tarafından üretilen elektrik miktarında değişim olmamasından dolayı da 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (soğuk) miktarı devamlı artmaktadır. Sistem verimi ise Şekil 5.41'de görüldüğü gibi sürekli azalmaktadır. Sistem verimi, eşitlik 3.15'e göre hesaplanmaktadır.



Şekil 5.39. Yakıt pili çalışma sıcaklığının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi.

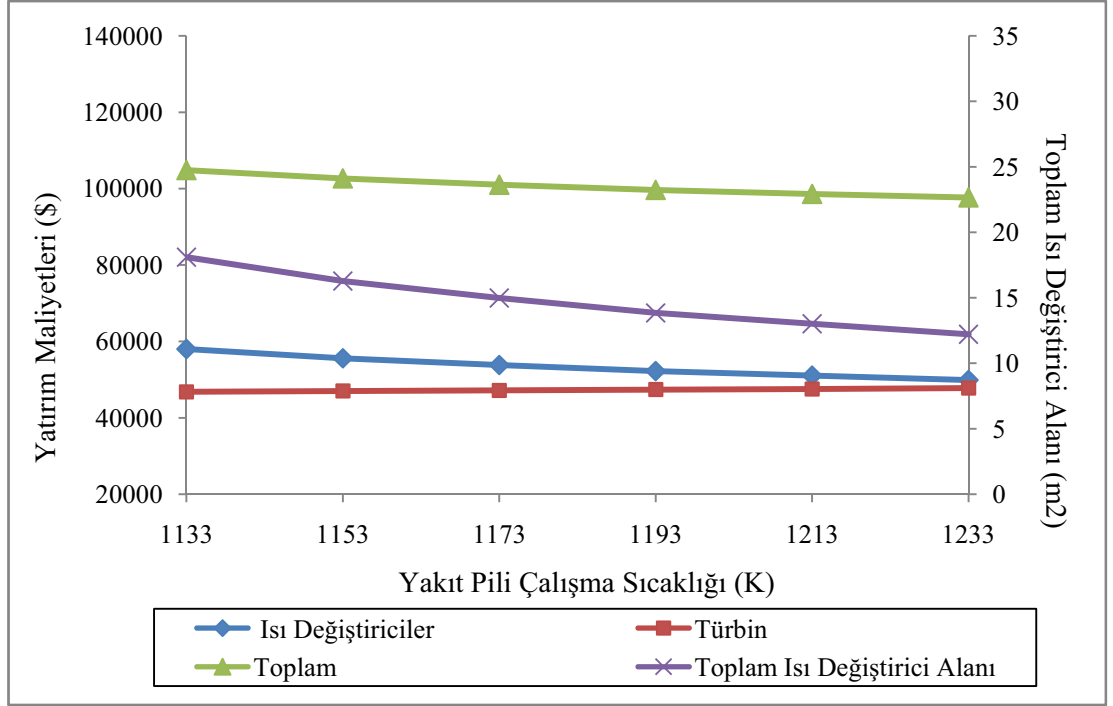


Şekil 5.40. Yakıt pili çalışma sıcaklığının 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi.



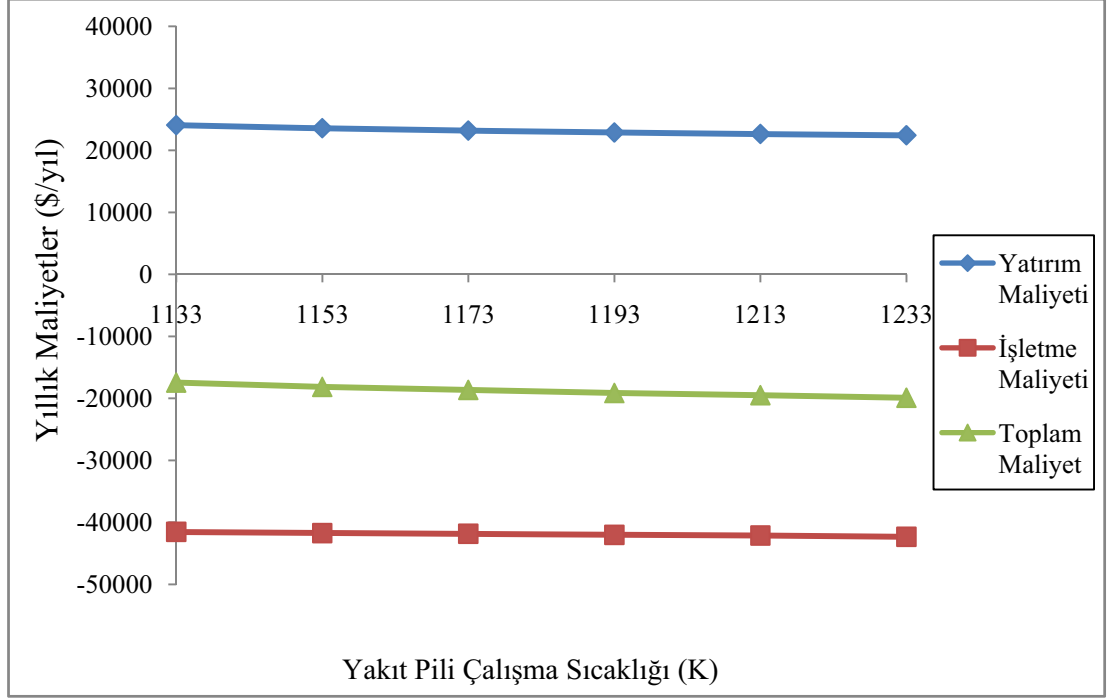
Şekil 5.41. Yakıt pili çalışma sıcaklığının sistem verimi üzerine etkisi.

Yakıt pili çalışma sıcaklığının toplam ısı değiştirici alanı, ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti, gaz türbinlerin yatırım maliyeti ve toplam yatırım maliyeti üzerine etkisi Şekil 5.42'deki, ısı değiştiriciler ve gaz türbinlerinin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi Şekil 5.43'teki gibi olmaktadır. Yakıt pili çalışma sıcaklığının artması ile yıllık işletme maliyetinin artmasına rağmen ısı değiştiricilerinin yıllık yatırım maliyetlerinde meydana gelen azalma, yıllık toplam maliyetlerini azaltmaktadır.



Şekil 5.42. Yakıt pili çalışma sıcaklığının toplam ısı değiştirici alanı, ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti, gaz türbinlerin yatırım maliyeti ve toplam yatırım maliyeti üzerine etkisi.

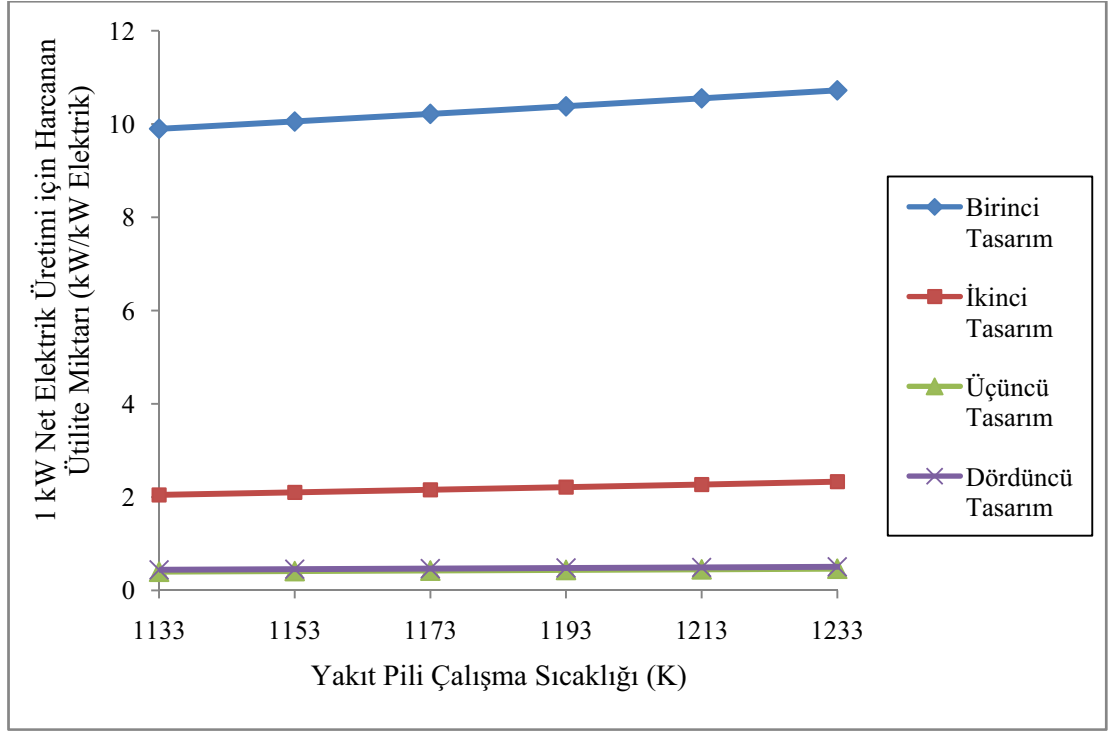
Çift gaz türbinli katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemi için daha uygun çalışma sıcaklıklarının, verim bakımından düşük çalışma sıcaklıkları iken, ısı değiştiriciler ve gaz türbinlerinin yıllık toplam maliyeti bakımından yüksek çalışma sıcaklıkları olduğu sonucuna varılmaktadır.



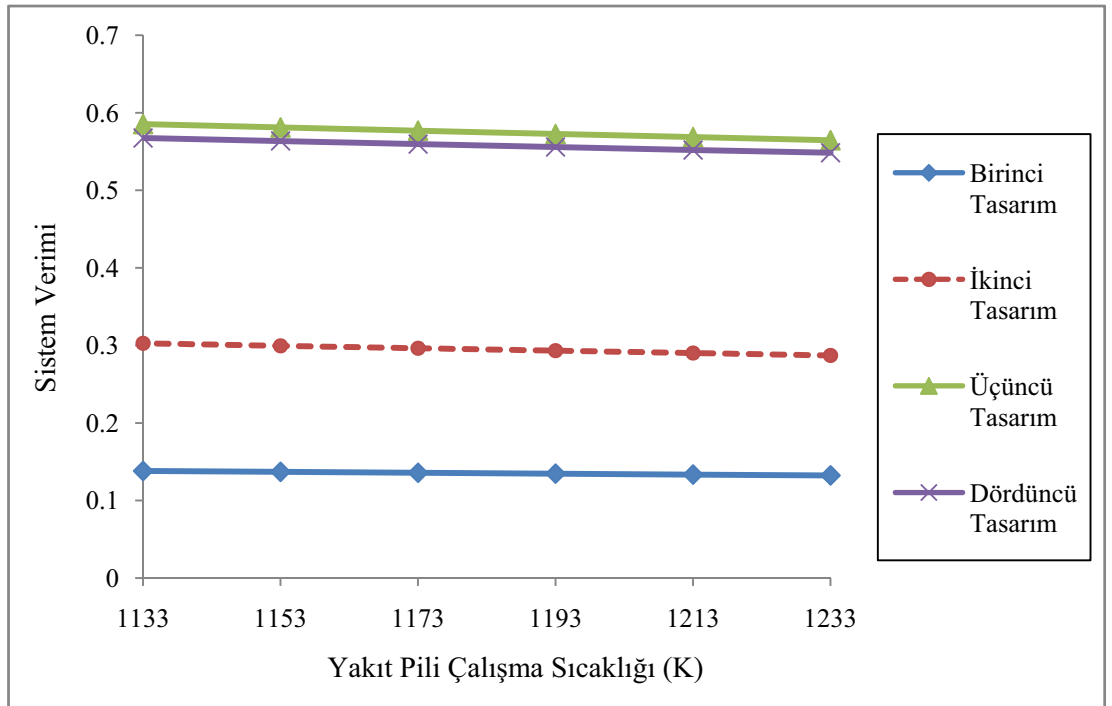
Şekil 5.43. Yakıt pili çalışma sıcaklığının ısı değiştiriciler ve gaz türbinlerinin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi.

Daha önce bahsedilen dört farklı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemlerinin yakıt pili çalışma sıcaklığının 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarındaki etkilerine göre karşılaştırılması Şekil 5.44'te verilmektedir. Çalışma sıcaklığının artması ile ısı geri kazanımı olmayan sistemde ütilite miktarında artma olurken, diğer sistemlerde önemli bir değişim olmamaktadır. Sistem verimi ise Şekil 5.45'te görüldüğü gibi bütün sistemlerde sürekli azalmaktadır.

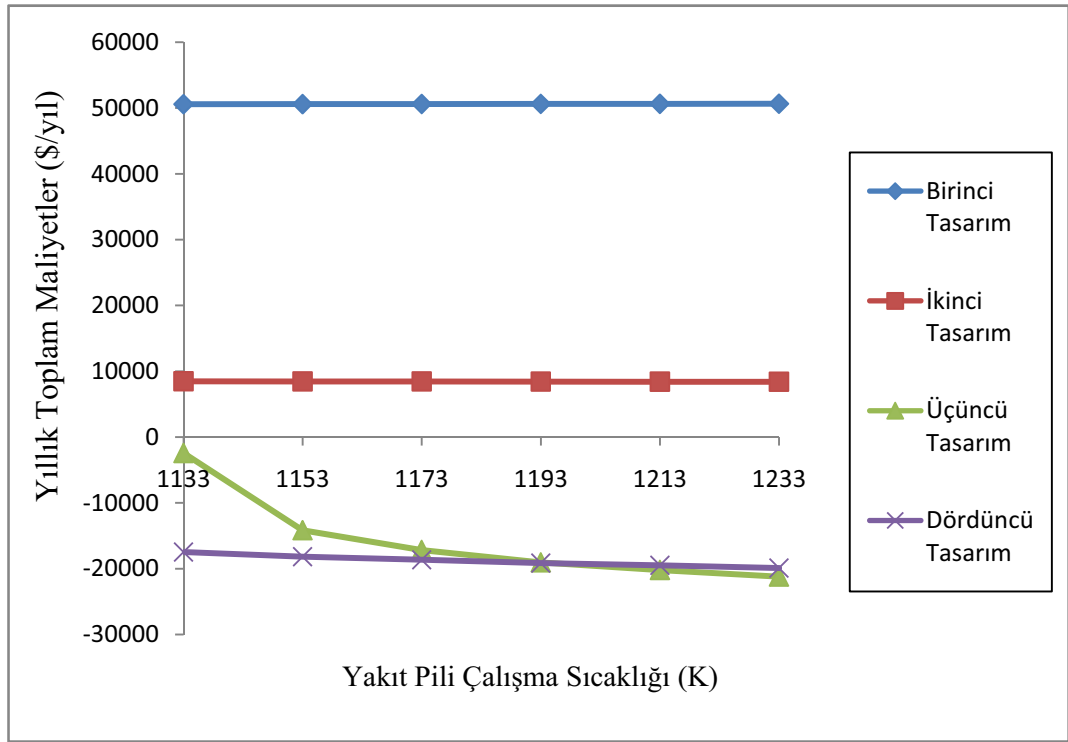
Dört farklı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminin, yakıt pili çalışma sıcaklığının yıllık toplam maliyetlerindeki etkilerine göre karşılaştırılması Şekil 5.46'da verilmektedir. Sadece tek gaz türbinli sistemde yıllık toplam maliyet azalmaktadır. Diğer sistemlerde önemli bir değişim olmamaktadır.



Şekil 5.44. Yakıt pili çalışma sıcaklığının 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkilerinin tasarımlara göre karşılaştırılması.



Şekil 5.45. Yakıt pili çalışma sıcaklığının sistem verimi üzerine etkilerinin tasarımlara göre karşılaştırılması.



Şekil 5.46. Yakıt pili çalışma sıcaklığının yıllık toplam maliyetler üzerine etkilerinin tasarımlara göre karşılaştırılması.

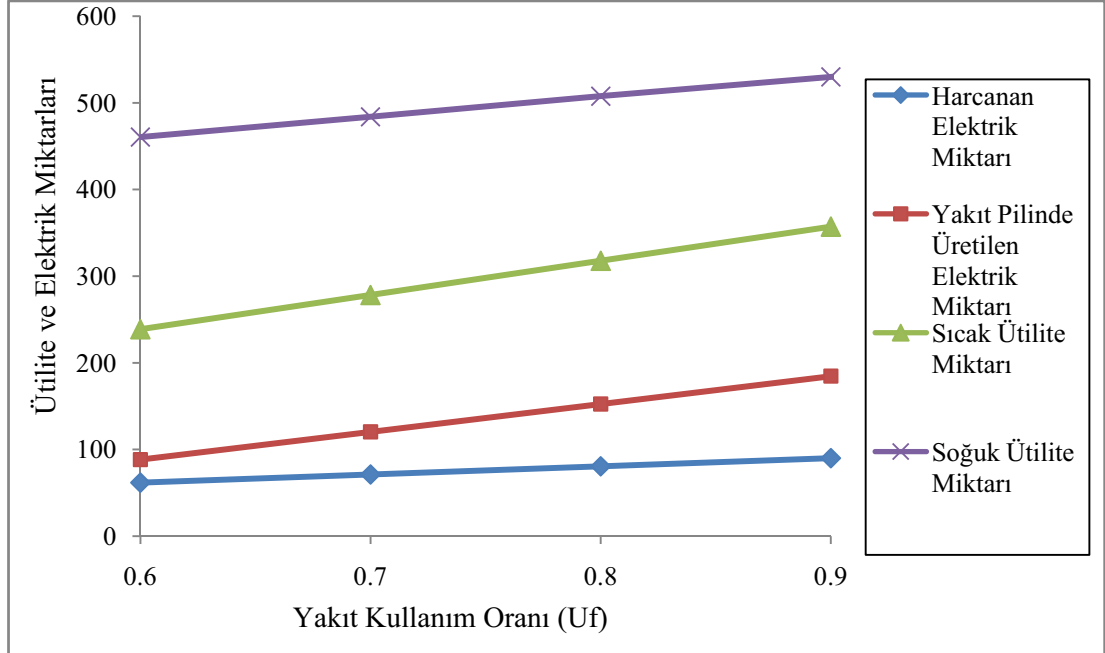
5.3. Yakıt Kullanım Oranına Göre Dört Tasarımın Duyarlılık Analizi

Yakıt kullanım oranı, katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminde beslenen havadaki oksijenin molar miktarının iki katının, beslenen taze yakıtın molar hidrojen eşdeğer miktarına oranını ifade eder. Yakıt kullanım oranının (Uf) artırılması ile harcanan elektrik, üretilen elektrik miktarlarındaki değişimler ve maliyetlerdeki değişimler araştırılmıştır. Bu çalışma daha önce bahsedilen dört farklı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemi için yapılmıştır. Oran değişimi sırasında yakıt pili çalışma sıcaklığı 910 °C’de, sistem çalışma basıncı 2.76 atm’de ve buhar/karbon oranı ise 2.5’te sabitlenmektedir.

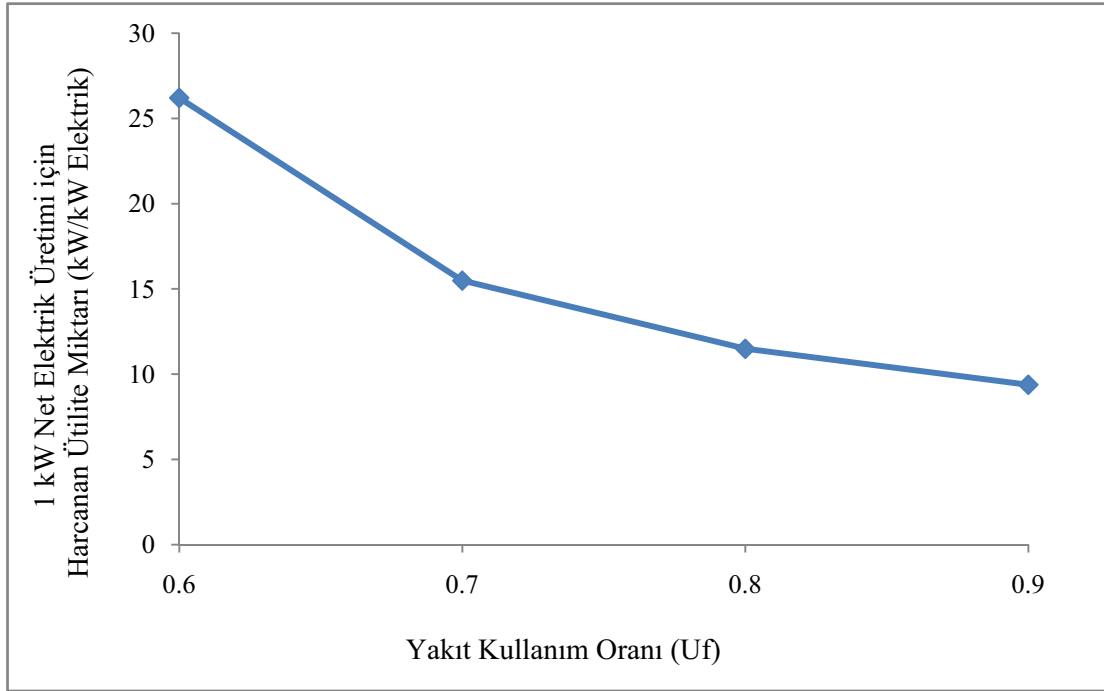
Isı gerikazanımı olmayan katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminde kompresörlerde harcanan elektrik, yakıt pilinde üretilen elektrik ve harcanan ütilite miktarlarındaki değişimler Şekil 5.47’de, 1 kW net elektrik üretimi için harcanan

ütilite (sıcak+soğuk) miktarındaki değişim Şekil 5.48’de sunulmaktadır. Yakıt kullanım oranının artması ile beslenen hava miktarı artmakta ve bu nedenle hava kompresörünün harcadığı elektrik miktarı ile hava ısıtmak için harcanan sıcak ütilite miktarı artmaktadır. Ayrıca yakıt pilinde üretilen elektrik miktarı, reaksiyona giren hidrojen miktarı arttığından dolayı artmaktadır. Anottan çıkan gazın sıcaklığı aynı kalmasına rağmen içeriğinde meydana gelen değişimden dolayı entalpisi azalmaktadır. Bundan dolayı harcanan soğuk ütilite miktarı azalmakta ve 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (sıcak+soğuk) miktarı devamlı azalmaktadır. Sistem verimi ise Şekil 5.49’da görüldüğü gibi sürekli artmaktadır. Sistem verimi, eşitlik 3.15’e göre hesaplanmaktadır.

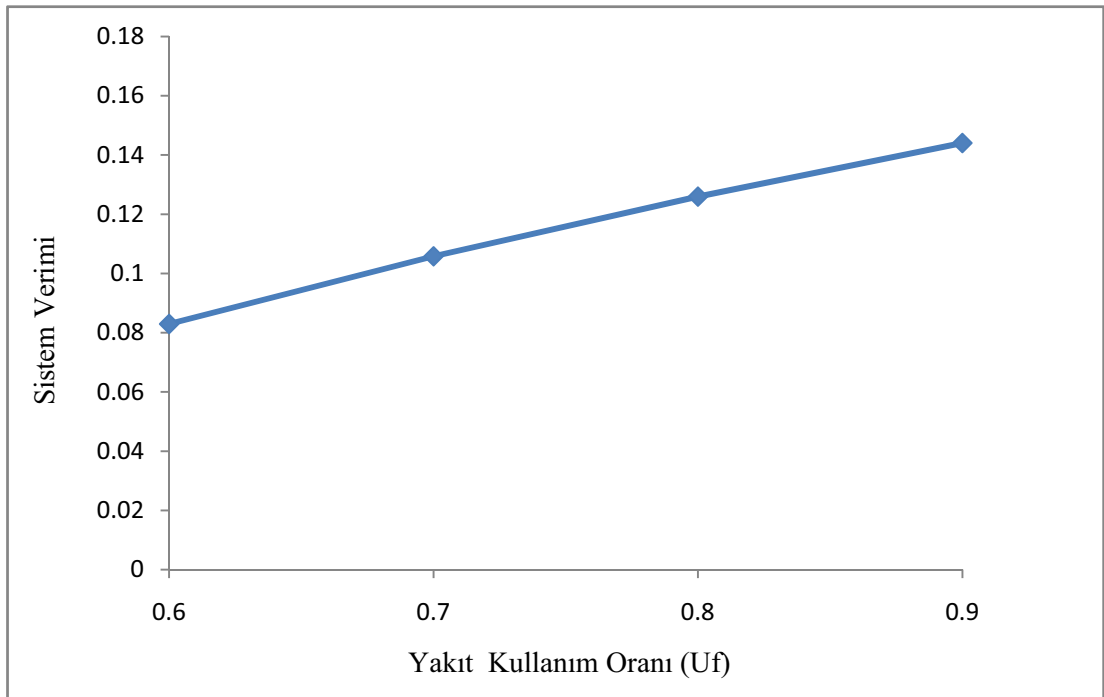
Yakıt kullanım oranının toplam ısı değiştirici alanı ve ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti üzerine etkisi Şekil 5.50’deki, ısı değiştiricilerin yatırım, işletme ve toplam maliyetleri üzerine etkisi Şekil 5.51’deki gibi olmaktadır. Yakıt kullanım oranının artması ile yıllık toplam maliyetler artmaktadır. Bunun nedeni ısı değiştiricilerinin yıllık işletme maliyetlerindeki artıştır.



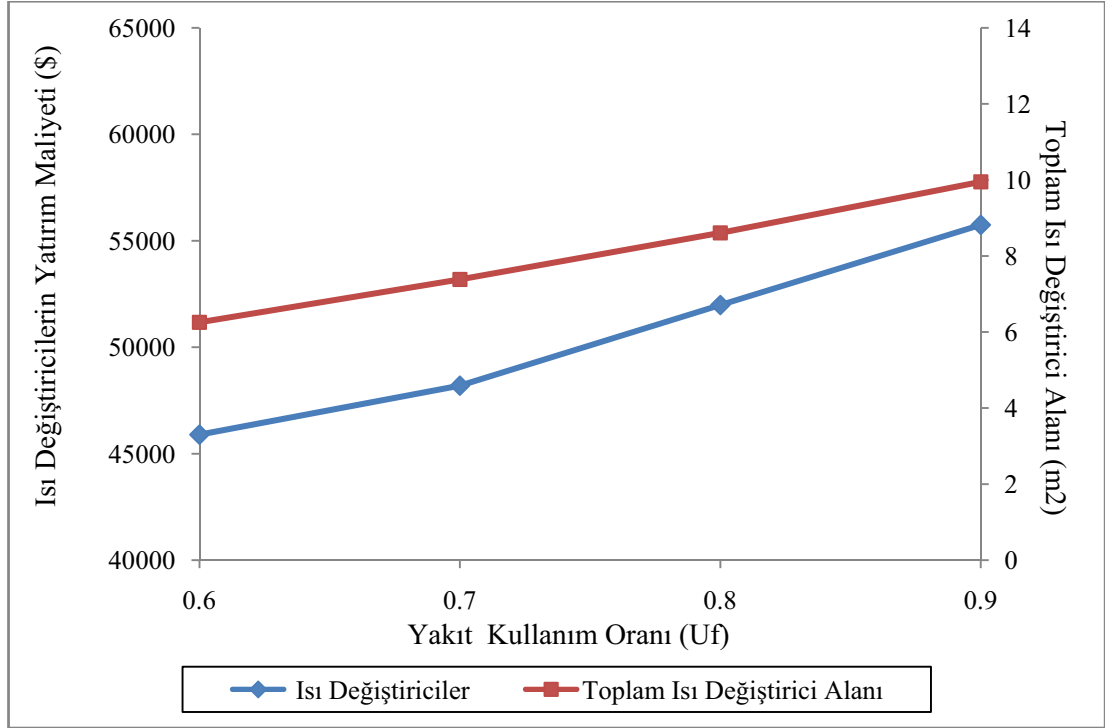
Şekil 5.47. Yakıt kullanım oranının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi.



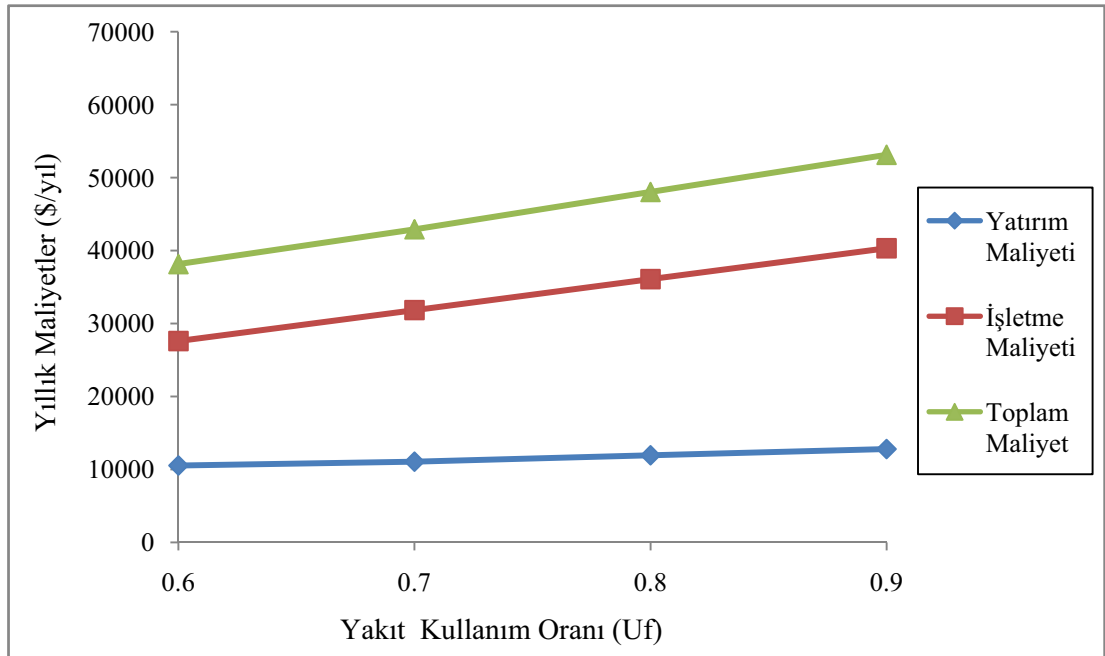
Şekil 5.48. Yakıt kullanım oranının 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi.



Şekil 5.49. Yakıt kullanım oranının sistem verimi üzerine etkisi.



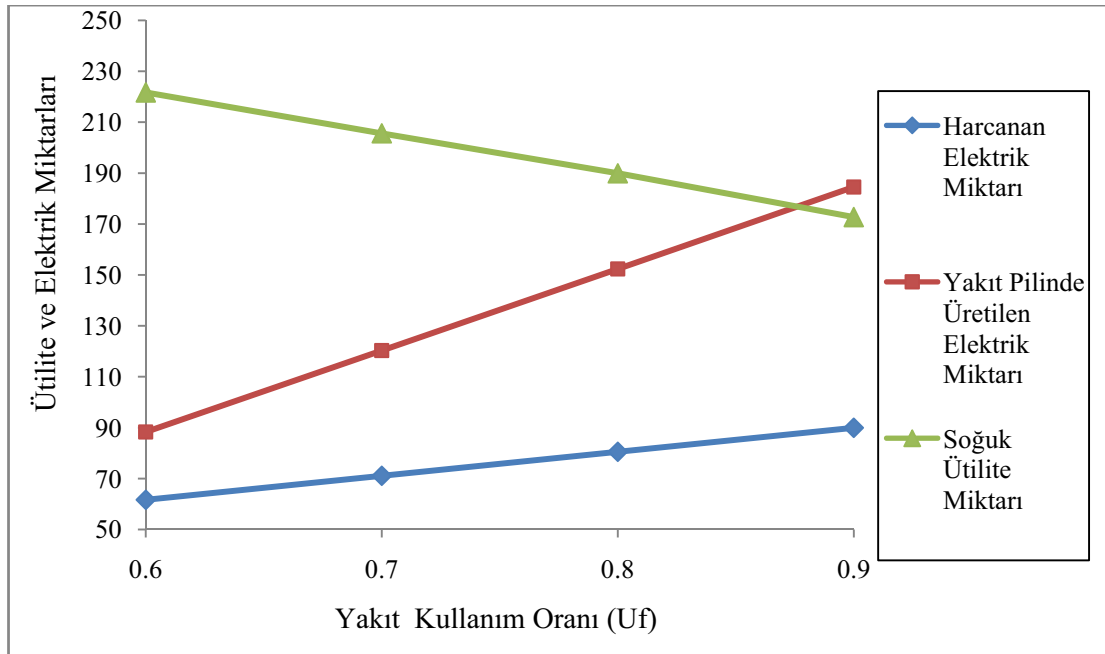
Şekil 5.50. Yakıt kullanım oranının toplam ısı değiştirici alanı ve ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti üzerine etkisi.



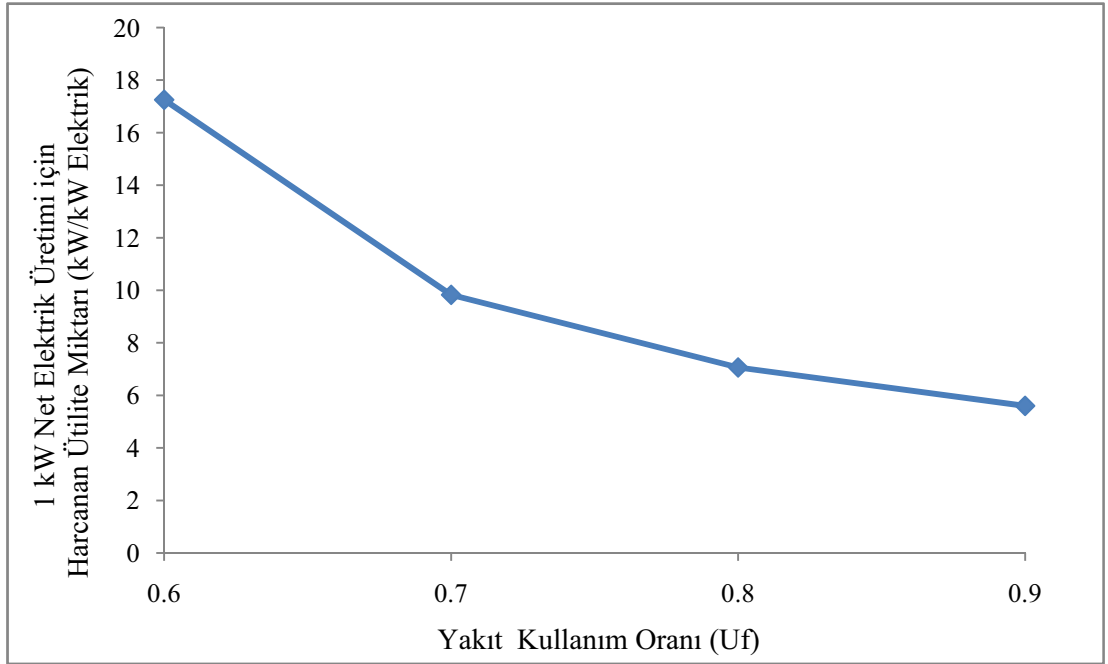
Şekil 5.51. Yakıt kullanım oranının ısı değiştiricilerin yıllık yatırım, işletme ve toplam maliyetleri üzerine etkisi.

Verim bakımından yüksek yakıt kullanım oranları, yıllık toplam maliyet bakımından düşük yakıt kullanım oranları ısı gerikazanımı olmayan katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemi için en uygun yakıt kullanım oranlarıdır.

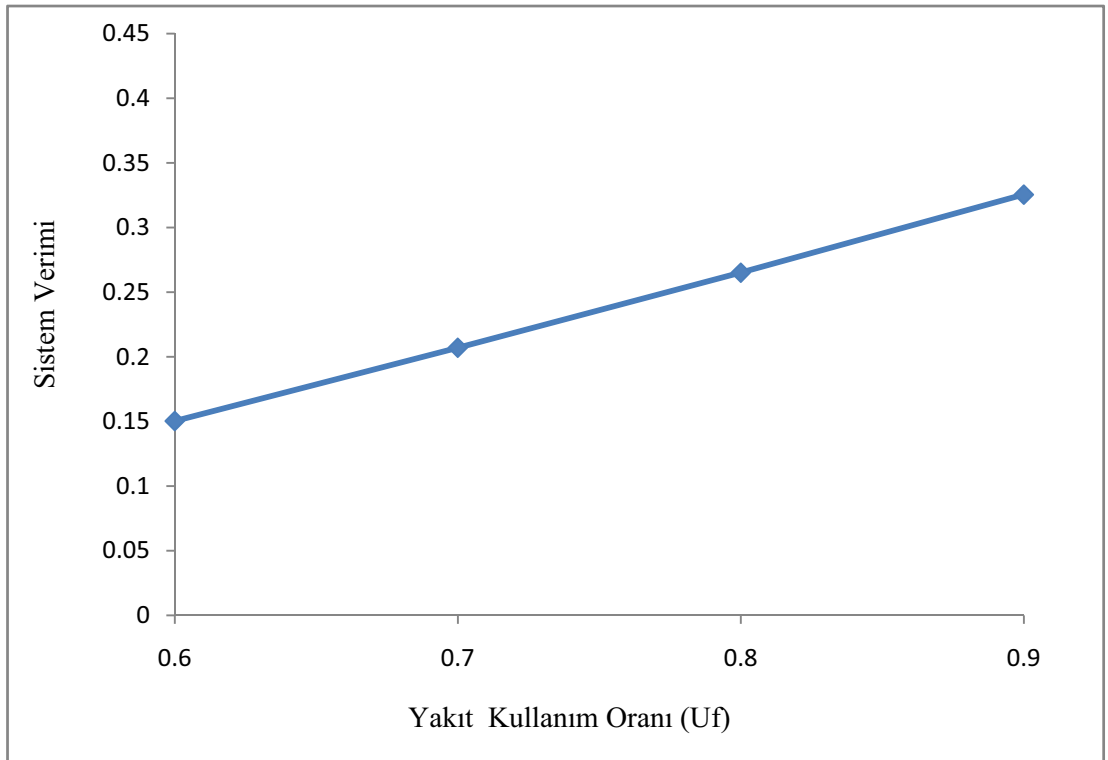
Darboğaz yöntemi ile ısı gerikazanımı sağlanmış katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminde kompresörlerde harcanan elektrik, yakıt pilinde üretilen elektrik ve harcanan ütilite miktarlarındaki değişimler Şekil 5.52’de, 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (soğuk) miktarındaki değişim Şekil 5.53’te sunulmaktadır. Yakıt kullanım oranının artması ile beslenen hava miktarı artmakta ve bu nedenle hava kompresörünün harcadığı elektrik miktarı ile hava ısıtmak için harcanan sıcak ütilite miktarı artmaktadır. Ayrıca yakıt pilinde üretilen elektrik miktarı, reaksiyonlarda reaksiyona giren hidrojen miktarı arttığından dolayı artmaktadır. Anottan çıkan gazın sıcaklığı aynı kalmasına rağmen içeriğinde meydana gelen değişimden dolayı entalpisi azalmaktadır. Bundan dolayı harcanan soğuk ütilite miktarı azalmakta ve 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (soğuk) miktarı devamlı azalmaktadır. Sistem verimi ise Şekil 5.54’te görüldüğü gibi sürekli artmaktadır. Sistem verimi, eşitlik 3.15’e göre hesaplanmaktadır.



Şekil 5.52. Yakıt kullanım oranının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi.

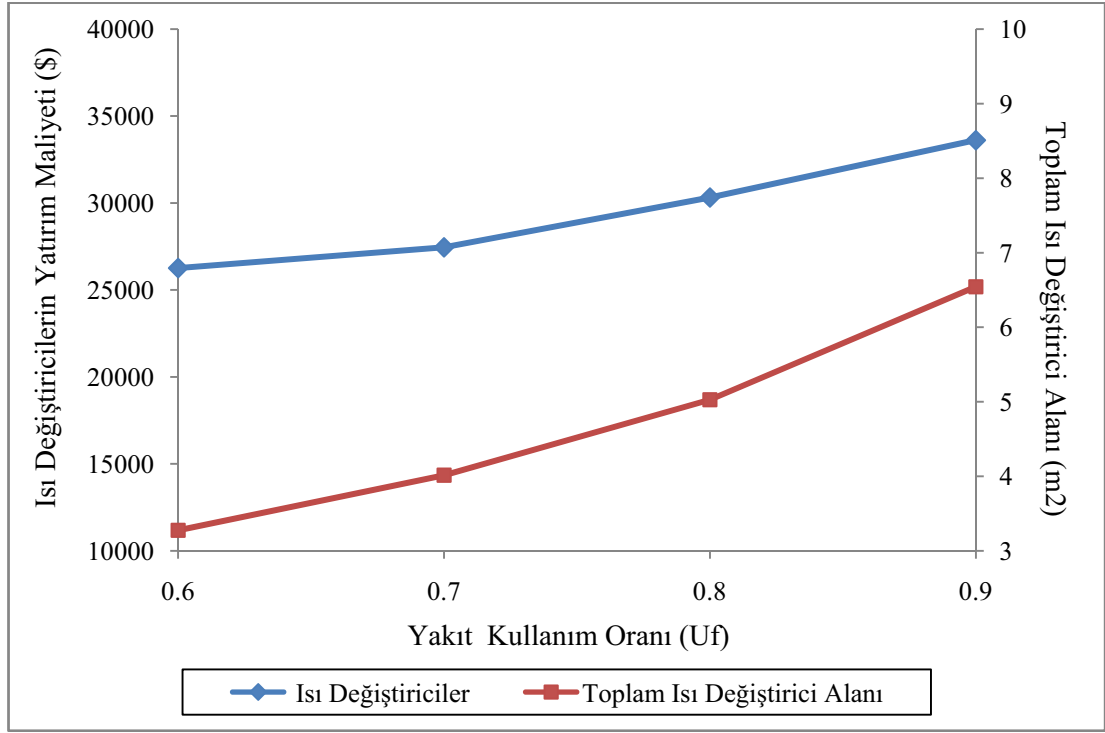


Şekil 5.53. Yakıt kullanım oranının 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi.



Şekil 5.54. Yakıt kullanım oranının sistem verimi üzerine etkisi.

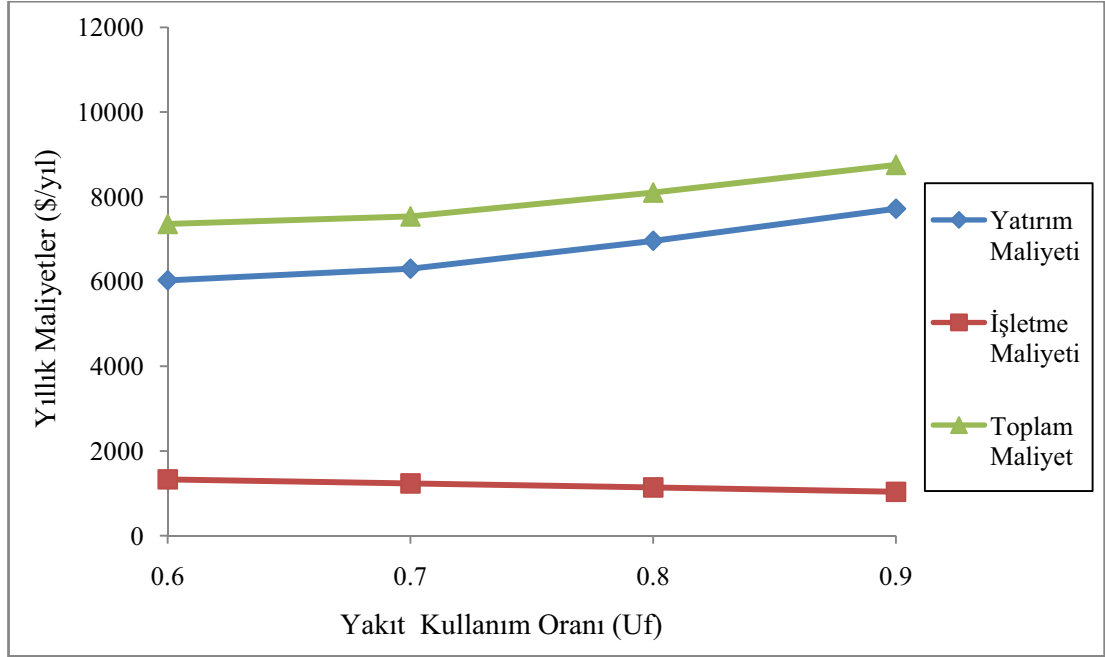
Yakıt kullanım oranının toplam ısı değıştirci alanı ve ısı değıştircilerin yatırım maliyeti üzerine etkisi Şekil 5.55'te, ısı değıştircilerin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi Şekil 5.56'daki gibi olmaktadır. Yakıt kullanım oranının artması ile yıllık toplam maliyetleri artmaktadır. Bunun nedeni ısı değıştircilerinin yıllık yatırım maliyetlerindeki artıştır.



Şekil 5.55. Yakıt kullanım oranının toplam ısı değıştirci alanı ve ısı değıştircilerin yatırım maliyeti üzerine etkisi.

Isı gerikazanımlı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemi için en uygun yakıt kullanım oranları, verim bakımından yüksek yakıt kullanım oranları iken yıllık toplam maliyet bakımından düşük yakıt kullanım oranlarıdır.

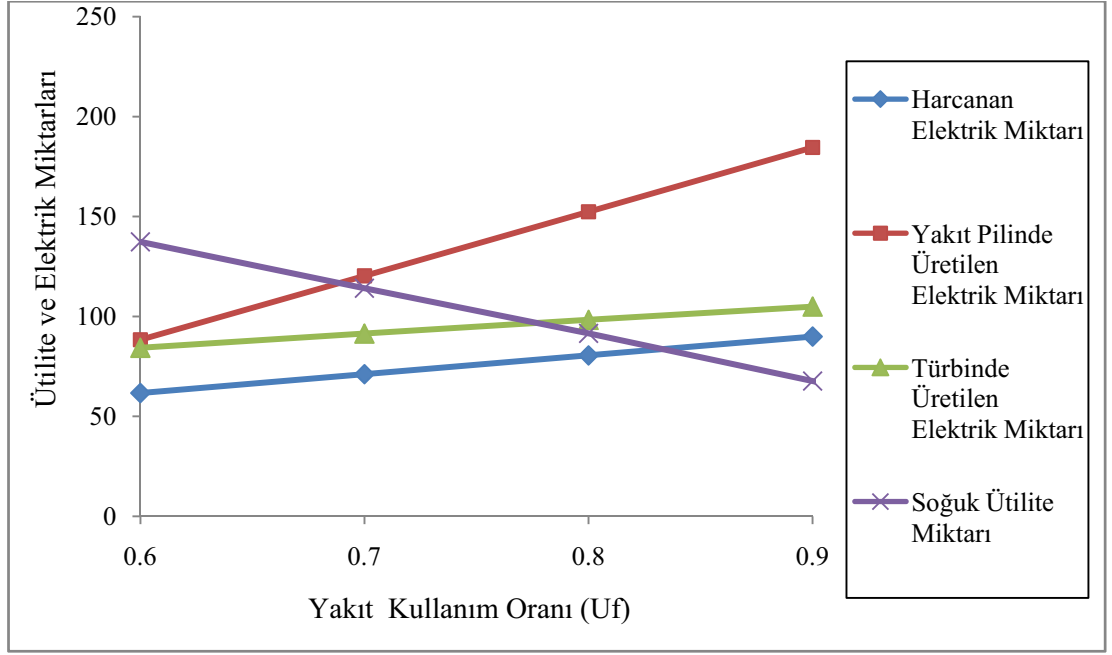
Tek gaz türbinli ısı gerikazanımı sağlanmış katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminde kompresörlerde harcanan elektrik, yakıt pili ve gaz türbininde üretilen elektrik ve harcanan ütilite miktarlarındaki değışimler Şekil 5.57'de, 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (soğuk) miktarındaki değışim Şekil 5.58'de sunulmaktadır. Yakıt kullanım oranının artması ile beslenen hava miktarı artmakta ve bu nedenle hava kompresörünün harcadığı elektrik miktarı ile hava ısıtmak için



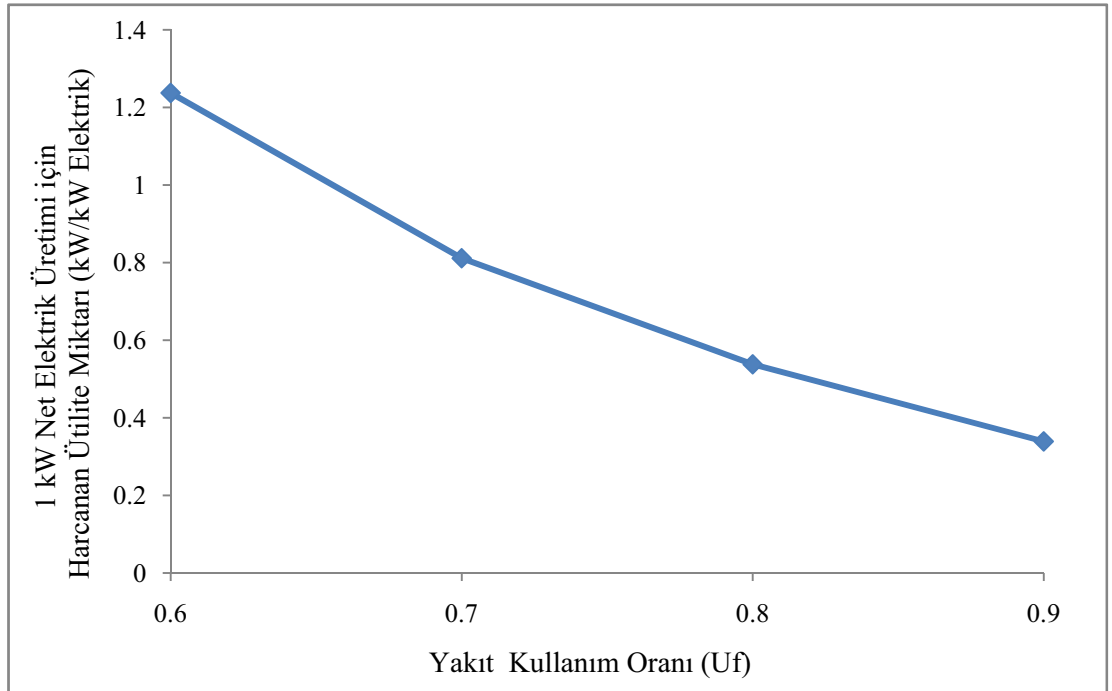
Şekil 5.56. Yakıt kullanım oranının ısı değiştiricilerin yıllık yatırım, işletme ve toplam maliyetleri üzerine etkisi.

harcanan sıcak ütilite miktarı artmaktadır. Ayrıca yakıt pilinde üretilen elektrik miktarı, reaksiyonlarda reaksiyona giren hidrojen miktarı arttığından dolayı artmaktadır. Anottan çıkan gazın sıcaklığı aynı kalmasına rağmen içeriğinde meydana gelen değişimden dolayı entalpisi azalmaktadır. Bundan dolayı harcanan soğuk ütilite miktarı azalmakta ve 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (soğuk) miktarı devamlı azalmaktadır. Sistem verimi ise Şekil 5.59’da görüldüğü gibi doğrusal bir biçimde artarak % 63 değerine ulaşmaktadır. Sistem verimi, eşitlik 3.15’e göre hesaplanmaktadır.

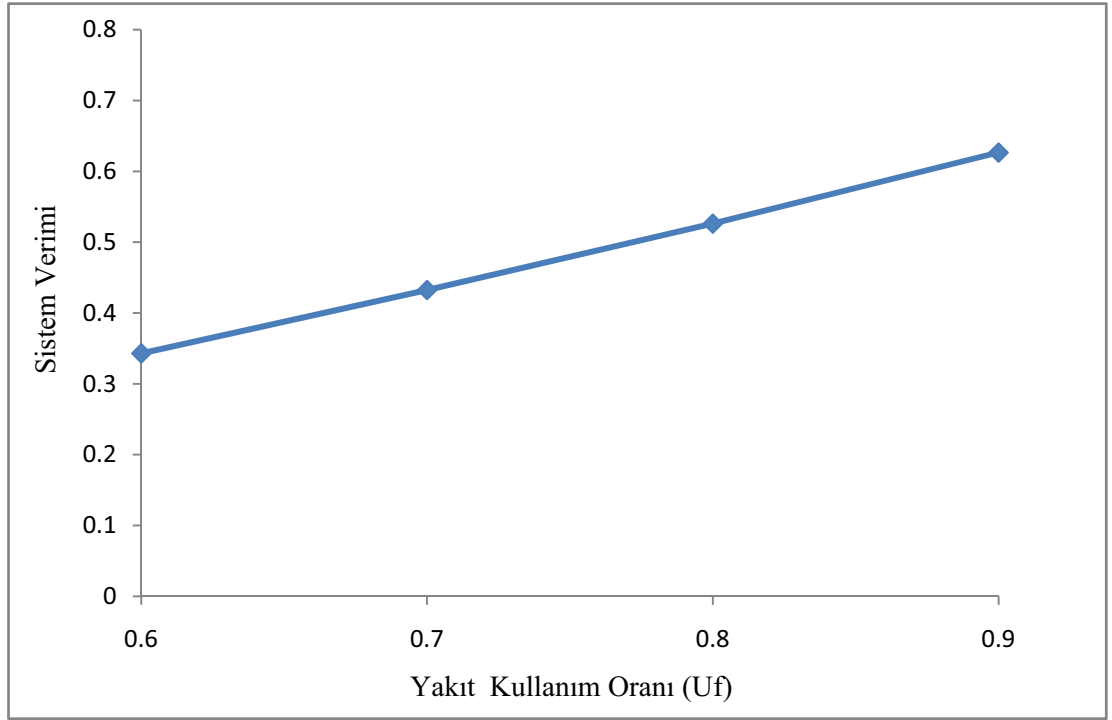
Yakıt kullanım oranının toplam ısı değiştirici alanı, ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti, gaz türbininin yatırım maliyeti ve toplam yatırım maliyeti üzerine etkisi Şekil 5.60’da, ısı değiştiriciler ve gaz türbininin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi Şekil 5.61’deki gibi olmaktadır. Yakıt kullanım oranının artması ile yıllık toplam maliyet azalmaktadır. Bunun nedeni gaz türbininde üretilen elektrik miktarındaki artıştır.



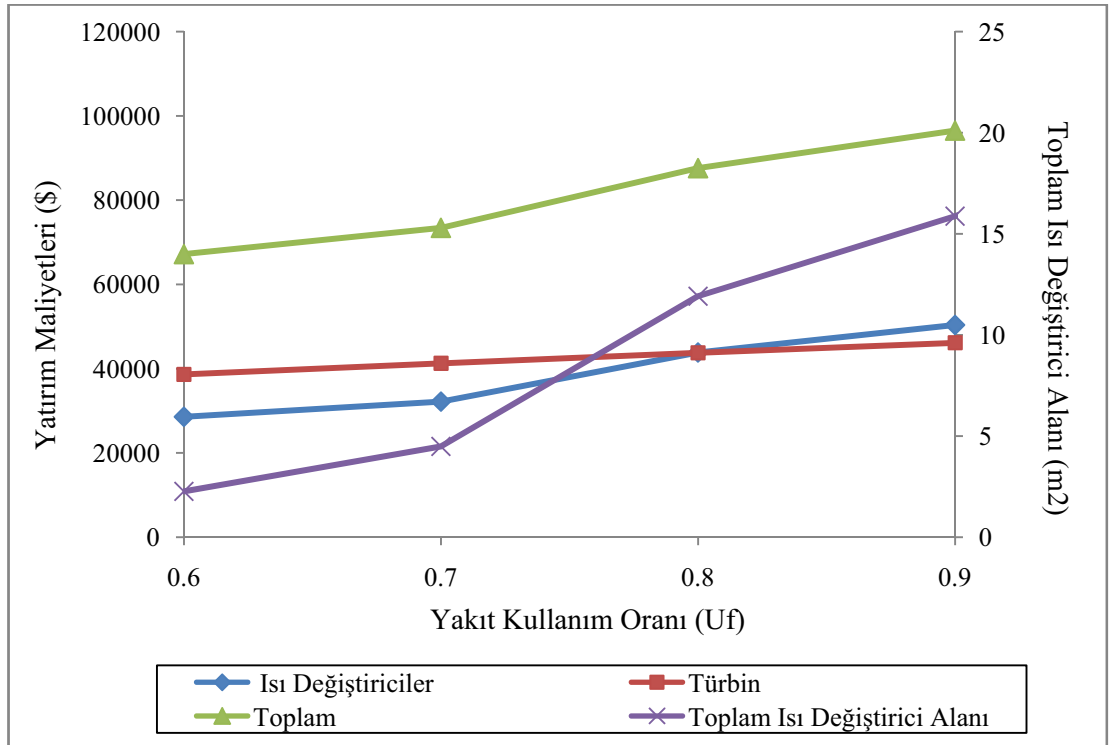
Şekil 5.57. Yakıt kullanım oranının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi.



Şekil 5.58. Yakıt kullanım oranının 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi.

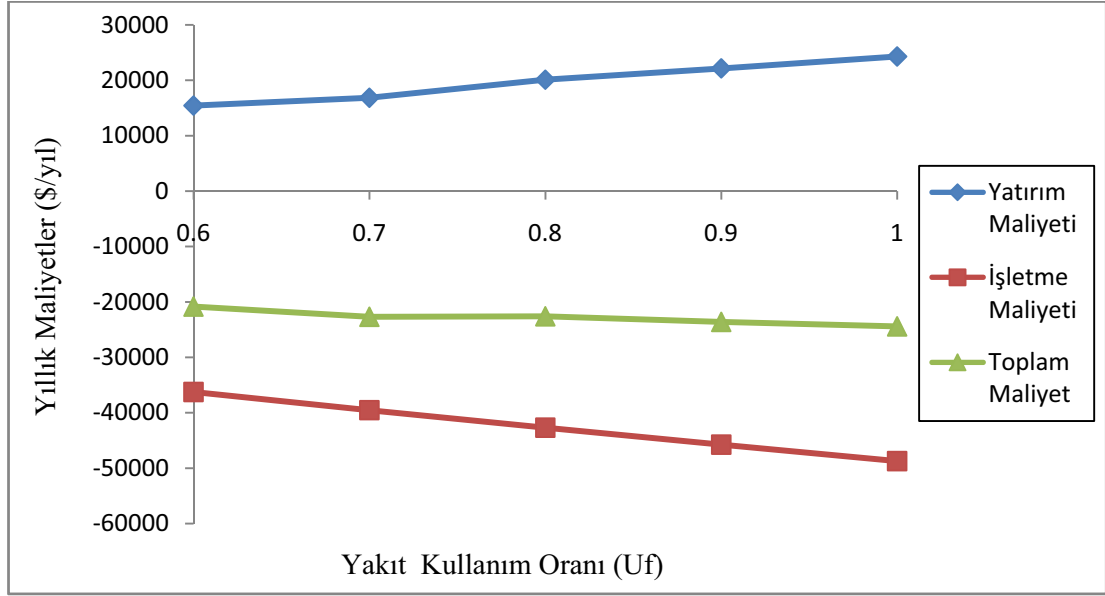


Şekil 5.59. Yakıt kullanım oranının sistem verimi üzerine etkisi.



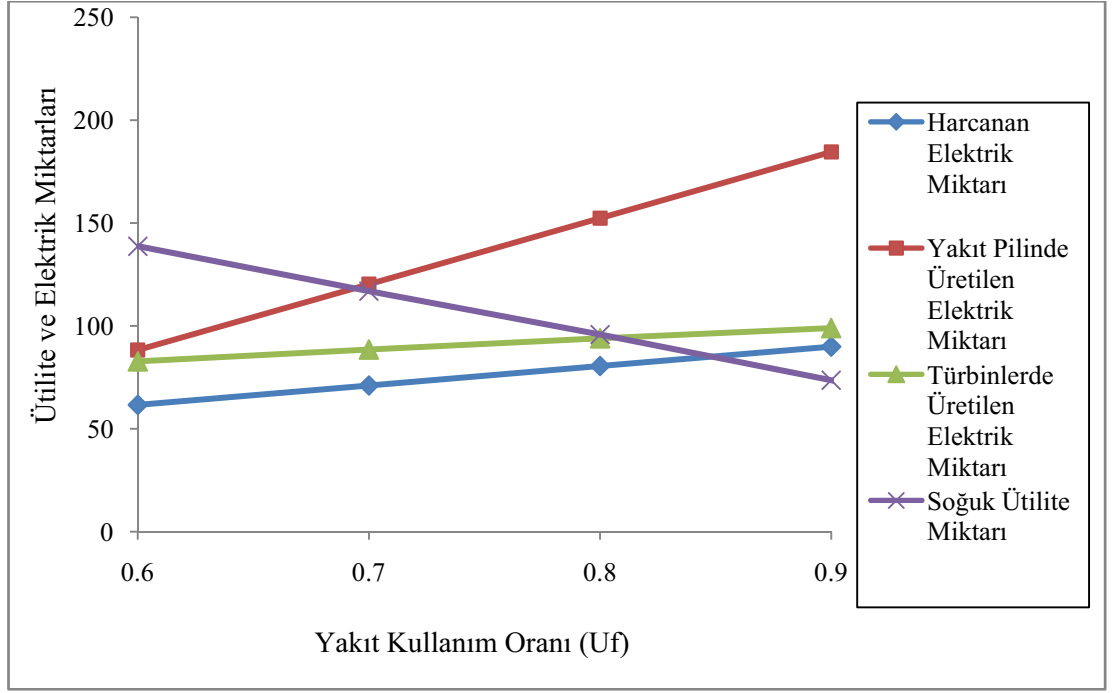
Şekil 5.60. Yakıt kullanım oranının toplam ısı değiştirici alanı, ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti, gaz türbininin yatırım maliyeti ve toplam yatırım maliyeti üzerine etkisi.

Tek gaz türbinli katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemi için, gerek verim gerekse üretilen net elektrik başına ısı değıştirciler ve gaz türbinin yıllık maliyetleri bakımından daha uygun yakıt kullanım oranları, yüksek yakıt kullanım oranlarıdır.

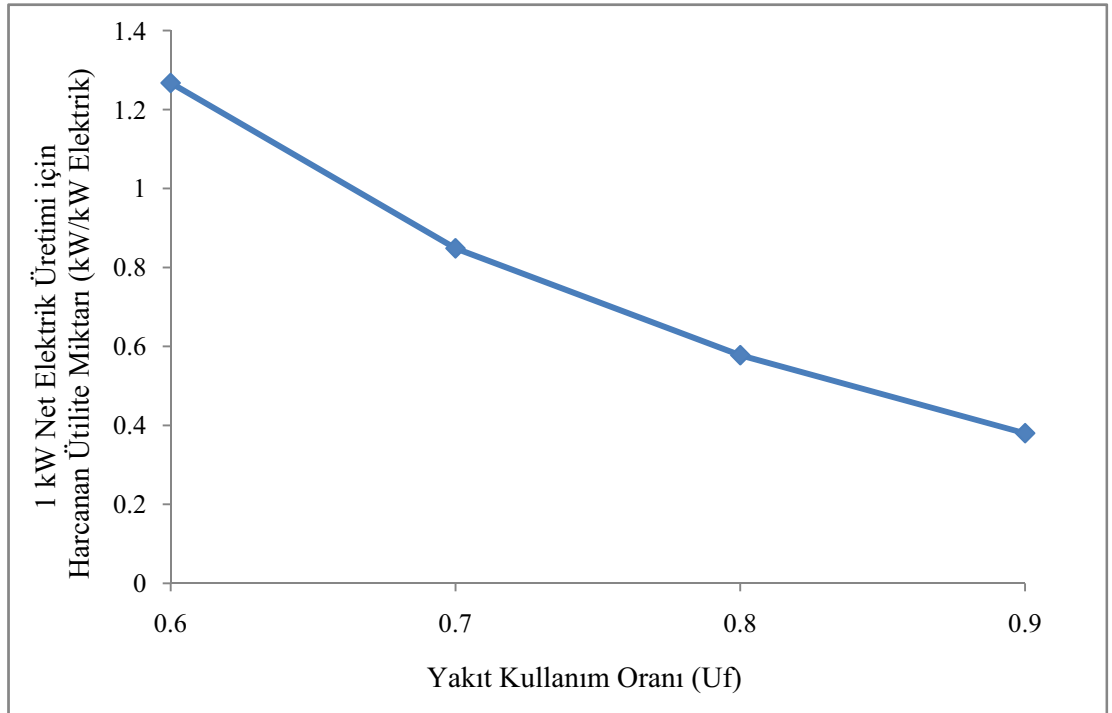


Şekil 5.61. Yakıt kullanım oranının ısı değıştirciler ve gaz türbininin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi.

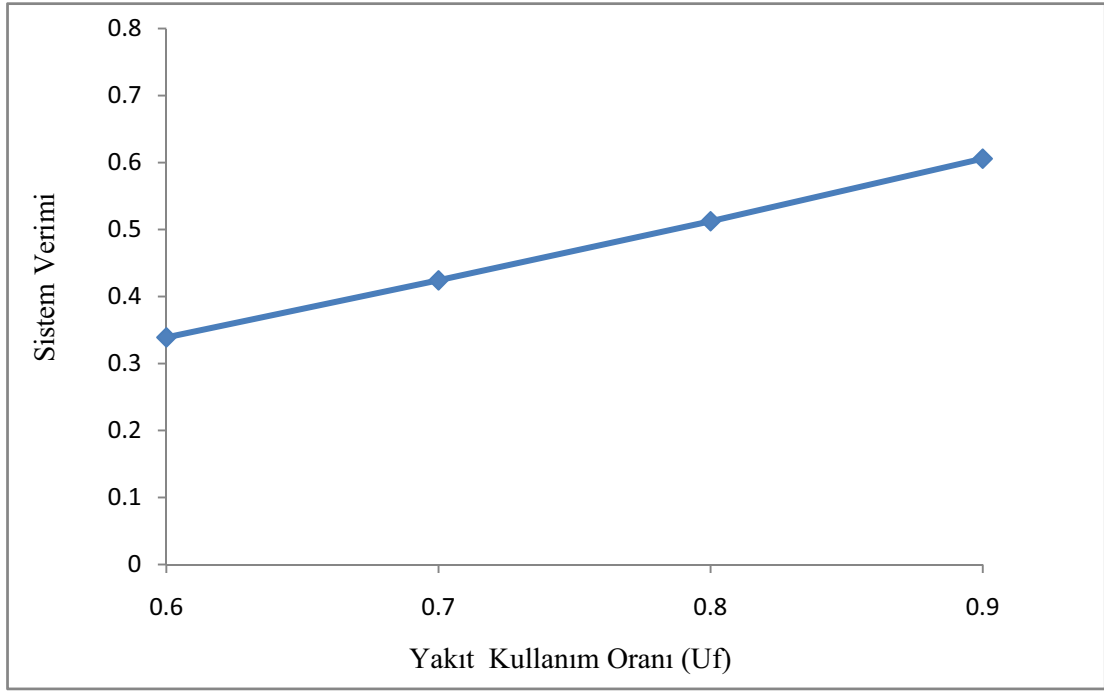
Çift gaz türbinli ısı gerikazanımı sağlanmış katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminde kompresörlerde harcanan elektrik, yakıt pili ve gaz türbinlerinde üretilen elektrik ve harcanan ütilite miktarlarındaki değışimler Şekil 5.62’de, 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (soğuk) miktarındaki değışim Şekil 5.63’te sunulmaktadır. Yakıt kullanım oranının artması ile beslenen hava miktarı artmakta ve bu nedenle hava kompresörünün harcadığı elektrik miktarı ile hava ısıtmak için harcanan sıcak ütilite miktarı artmaktadır. Ayrıca yakıt pilinde üretilen elektrik miktarı, reaksiyonlarda reaksiyona giren hidrojen miktarı arttığından dolayı artmaktadır. Anottan çıkan gazın sıcaklığı aynı kalmasına rağmen içeriğinde meydana gelen değışimden dolayı entalpisi azalmaktadır. Bundan dolayı harcanan soğuk ütilite miktarı azalmakta ve 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite (soğuk) miktarı devamlı azalmaktadır. Sistem verimi ise Şekil 5.64’te görüldüğü gibi doğrusal bir biçimde artmakta ve % 61 değerine ulaşmaktadır. Sistem verimi, eşitlik 3.15’e göre hesaplanmaktadır.



Şekil 5.62. Yakıt kullanım oranının sıcak ve soğuk ütilite miktarları ile harcanan ve üretilen elektrik miktarları üzerine etkisi.



Şekil 5.63. Yakıt kullanım oranının 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkisi.

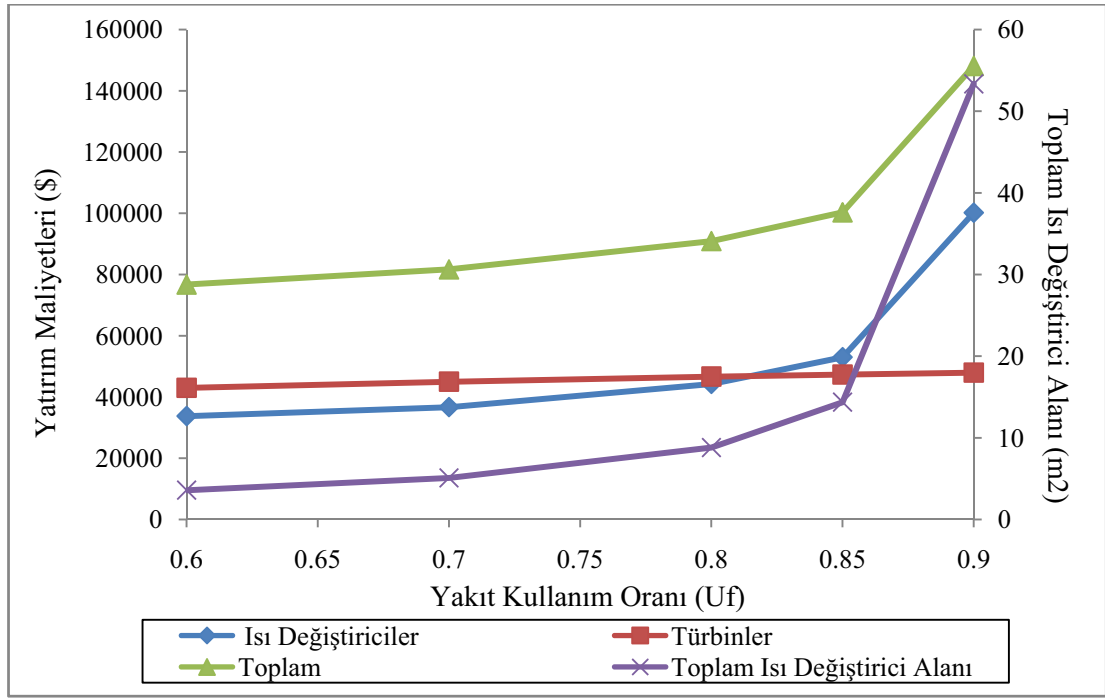


Şekil 5.64. Yakıt kullanım oranının sistem verimi üzerine etkisi.

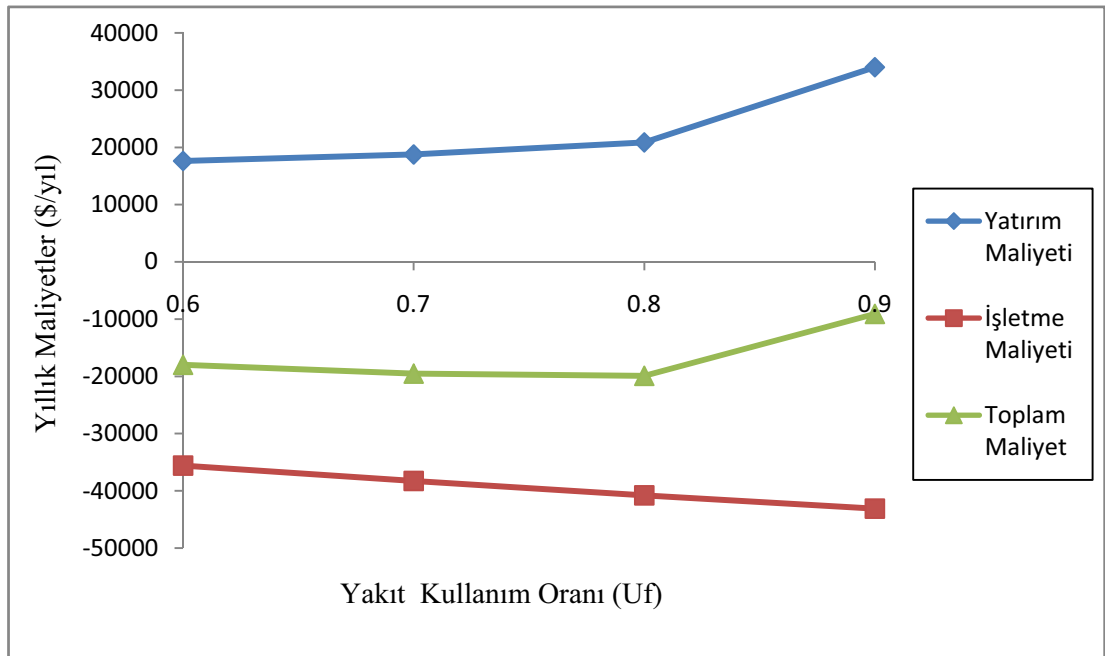
Yakıt kullanım oranının toplam ısı değiştirici alanı, ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti, gaz türbinlerin yatırım maliyeti ve toplam yatırım maliyeti üzerine etkisi Şekil 5.65'te, ısı değiştiriciler ve gaz türbinlerinin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi Şekil 5.66'daki gibi olmaktadır. Yakıt kullanım oranının artması ile yıllık toplam maliyet azalarak yakıt kullanım oranı 0.8 olduğunda minimum değerine (-19900 \$/yıl) ulaşmaktadır.

Çift gaz türbinli katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemi için en uygun yakıt kullanım oranlarının verim bakımından yüksek yakıt kullanım oranları, ısı değiştiriciler ve gaz türbinlerinin yıllık toplam maliyeti bakımından ise 0.8 civarında olduğu sonucuna varılmaktadır.

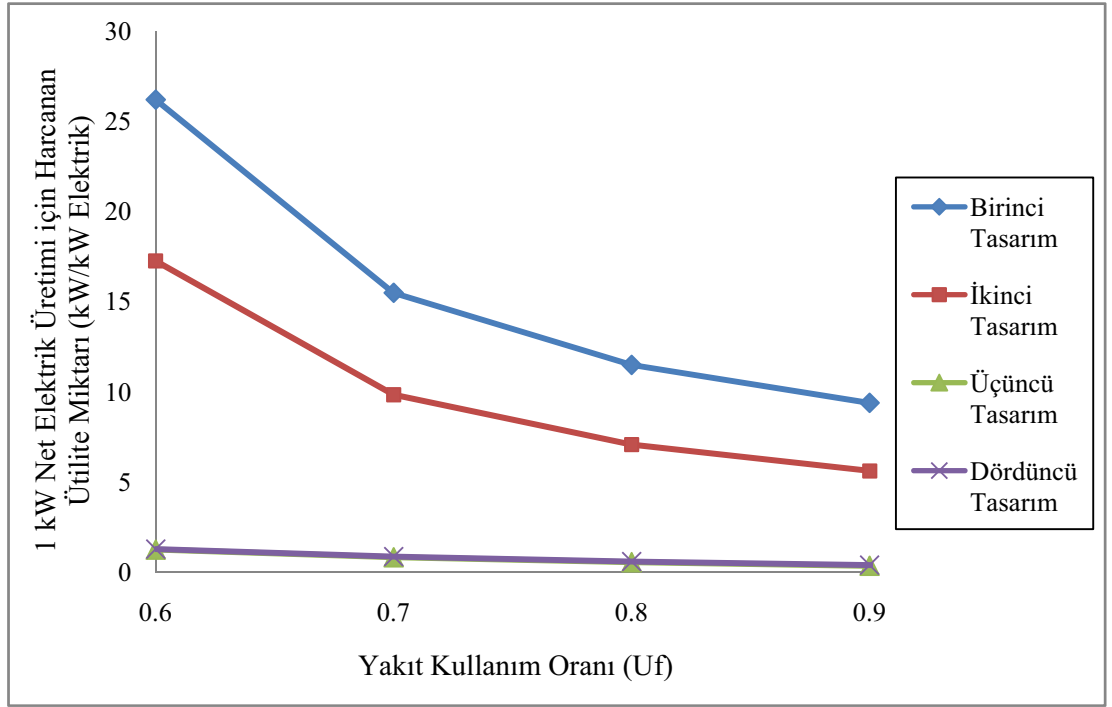
Daha önce bahsedilen dört farklı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemlerinin, yakıt kullanım oranının 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarındaki etkilerine göre karşılaştırılması Şekil 5.67'de verilmektedir. Bütün sistemlerde maliyetler azalmaktadır. Sistem verimi ise Şekil 5.68'de görüldüğü gibi bütün sistemlerde sürekli artmakta ve en yüksek değere tek gaz türbinli katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminde ulaşmaktadır.



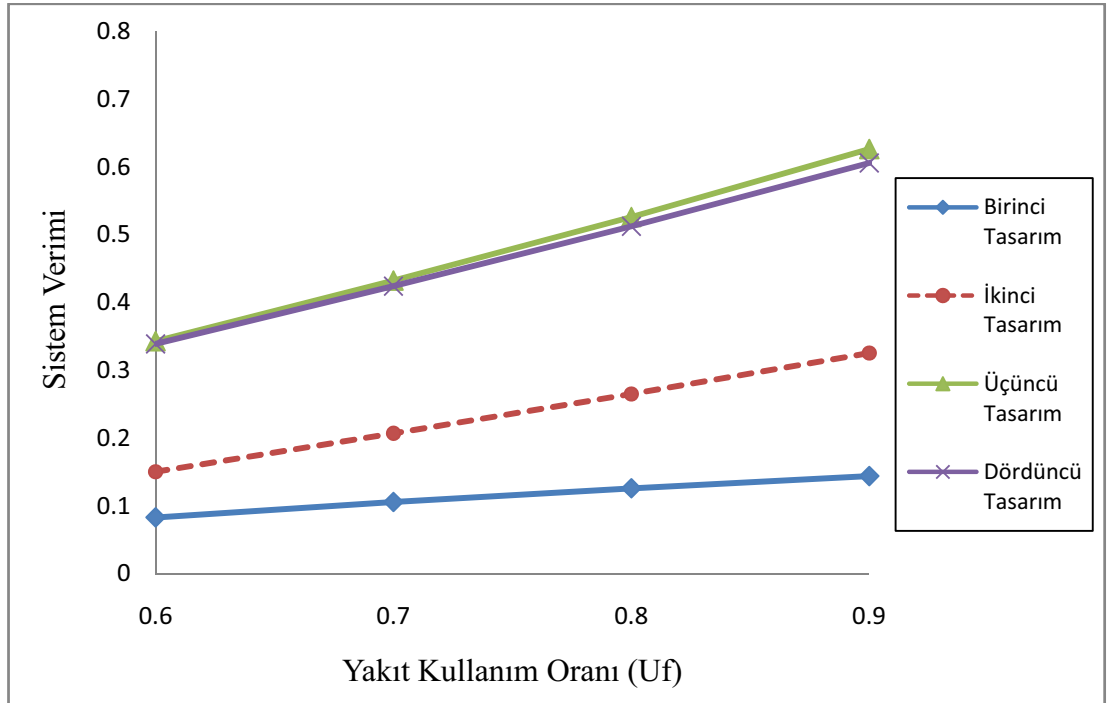
Şekil 5.65. Yakıt kullanım oranının toplam ısı değiştirici alanı, ısı değiştiricilerin yatırım maliyeti, gaz türbinlerin yatırım maliyeti ve toplam yatırım maliyeti üzerine etkisi.



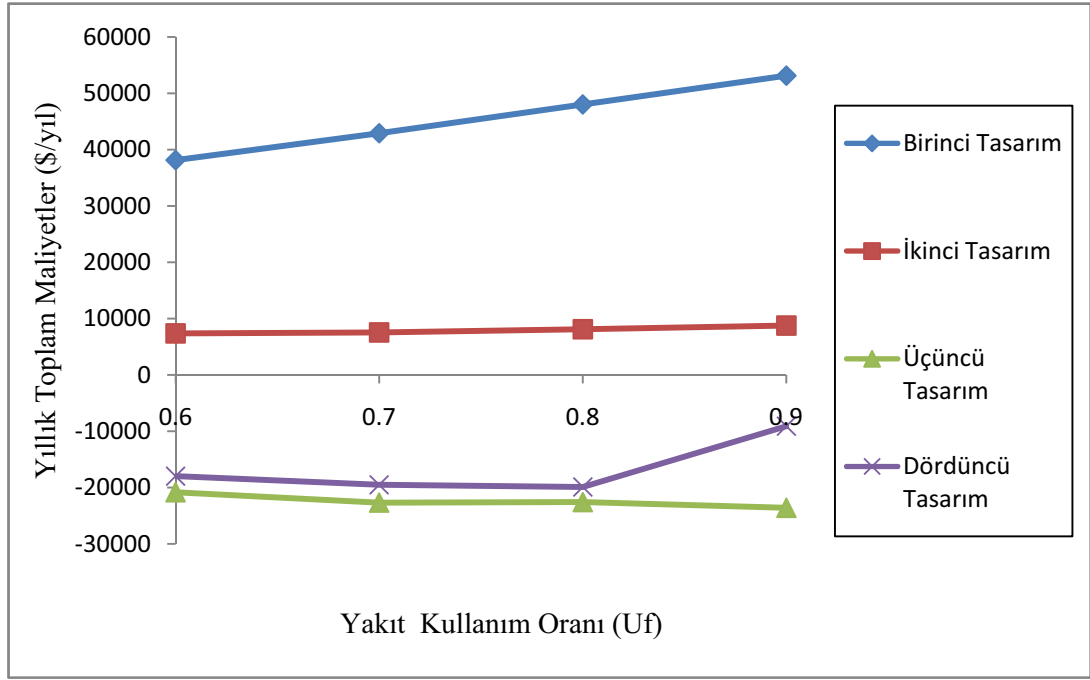
Şekil 5.66. Yakıt kullanım oranının ısı değiştiriciler ve gaz türbinlerinin yıllık yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve toplam maliyeti üzerine etkisi.



Şekil 5.67. Yakıt kullanım oranının 1 kW net elektrik üretimi için harcanan ütilite miktarı üzerine etkilerinin tasarımlara göre karşılaştırılması.



Şekil 5.68. Yakıt kullanım oranının sistem verimi üzerine etkilerinin tasarımlara göre karşılaştırılması.



Şekil 5.69. Yakıt kullanım oranının yıllık toplam maliyetler üzerine etkilerinin tasarımlara göre karşılaştırılması.

Dört farklı katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminin yakıt kullanım oranının yıllık toplam maliyetlerindeki etkilerine göre karşılaştırılması Şekil 5.69'da verilmektedir. Çift gaz türbinli sistemde yıllık toplam maliyetler önce azalıp yakıt kullanım oranı 0.8 olduğunda minimuma ulaşmaktadır. Sonra devamlı artmaktadır.

6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, doğalgaz beslemeli tüpsel katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminin değişik tasarımlarının CHEMCAD’de gerçekleştirilen simülasyonları anlatılmıştır. Sadece ısı değiştiriciler, varsa sadece gaz türbinlerinin maliyetleri bakımından karşılaştırmalar yapılarak en düşük maliyetli tasarıma ulaşılmaya çalışılmıştır.

Isı gerikazanımı olmayan katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sisteminde darboğaz yöntemi uygulanarak ısı değiştirici ağı oluşturulmuştur. Ardından gaz türbinlerinin eklenmesiyle ısı ve güç entegrasyonu yapılarak ısı değiştiricilerin tekrar tasarımı yapılmıştır.

Çalışmanın sonucunda; yakıt pilinde 168 kW elektrik üreten, ısı gerikazanımı olmayan sistemin ısı alması veya vermesi, sıcak ve soğuk ütiliteler tarafından sağlanırsa, ısı değiştiricilerin yıllık toplam maliyeti, temel alınan ekonomik parametrelere göre 50500 \$/yıl olarak hesaplanmaktadır. Isı gerikazanımı olmayan sisteme darboğaz dizaynı uygulanarak minimum ütilite kullanımı hedefi ile akımların ısı değiştiricilerde karşılaşmaları gerçekleştirilmiştir. Yakıt pilinde 168 kW elektrik üreten, ısı gerikazanımlı sistemde ısı değiştirici ağının yıllık toplam maliyeti 8400 \$/yıl olarak hesaplanmaktadır. Önceki tasarıma göre önemli ekonomik kazanç sağlanmıştır. Darboğaz altı dizaynı için ısı motoru eklemenin uygun olduğu görülmüştür. Bu sistemde, artıyakıcı çıkış akımına gaz türbini eklenmesinin mümkün olması, yatırım maliyetini düşüren önemli bir etkidir. Bir gaz türbini eklenmesi ile tekrar tasarlanan sistemde gaz türbini, kendini 1.64 yıl gibi bir sürede amorti etmektedir. Diğer bir ifadeyle gaz türbinin kendi maliyeti, yeni tasarım ile ikinci tasarımın yıllık toplam maliyetleri arasındaki farkın 1.64 yıllık karşılığına denk gelmektedir. Yakıt pili ve gaz türbininde toplam 270 kW elektrik üreten, tek gaz türbinli sistemin ısı değiştirici ağı ve gaz türbininin yıllık toplam maliyeti -19000 \$/yıl olmaktadır. Gaz türbininde üretilen elektrik, sistemin elektrik ihtiyacını karşılamada kullanıldığı varsayımından ötürü, sonuç negatif değer olarak alınmaktadır. Biri hava kompresörü ile aynı shafta bağlı olan iki gaz türbin eklenerek

tasarlanan sistemde ise gaz türbinler 1.72 yılda kendilerini amorti etmektedirler. Yakıt pili ve gaz türbinlerinde toplam 265 kW elektrik üreten, çift gaz türbinli sistemin ısı değiştirici ağı ve gaz türbinlerinin yıllık toplam maliyeti -19100 \$/yıl olarak hesaplanmaktadır. Gaz türbinlerinde üretilen elektrik, sistemin elektrik ihtiyacını karşılamada kullanıldığından, maliyet değeri negatif verilmektedir. Maliyetlerden anlaşılacağı gibi en ekonomik katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemi, yıllık toplam maliyetin en düşük olduğu gaz türbinli katı oksit yakıt piline dayalı güç üretim sistemleri olduğu görülmektedir. Üçüncü bir gaz türbini eklemek, uygun basınç koşulları olmadığı için mümkün olmamaktadır.

Yapılan duyarlılık çalışmaların sonucu olarak, sistem çalışma basıncının değişmesinin özellikle gaz türbinli sistemler için çok önemli olduğu görülmektedir. Temel alınan ekonomik parametrelere göre, 3.5 atm çalışma basıncı civarında gaz türbinli sistemlerin yıllık toplam maliyetlerinin minimum değerlerine ulaştıkları tespit edilmiştir. Yakıt pili çalışma sıcaklığının artması, sadece tek gaz türbinli sistemde ısı değiştiriciler ve gaz türbinlerinin maliyetlerini düşürmektedir. Çift gaz türbinli sistemde ısı değiştiriciler ve gaz türbinlerinin yıllık toplam maliyetinin minimum olduğu yakıt kullanım oranı 0.8 civarındadır.

Son söz olarak, katı oksit yakıt pili sistemi uygulamalarının, ek elektrik üretimi ve kojenerasyon uygulamalarında kullanılabilecek kalitede atık ısı verdiği, gaz türbinli hibrit sistemlerde bunun değerlendirilmesinin iyi bir seçenek olduğu söylenebilir. Daha küçük sistemler için, Rankine çevrimlerinin entegrasyonu da uygulanabilir bir seçenektir.

KAYNAKLAR

Arsalis A. (2008). “Thermoeconomic modeling and parametric study of hybrid SOFC–gas turbine–steam turbine power plants ranging from 1.5 to 10MWe”, *Journal of Power Sources*, **181**, 313–326.

Calise F., M.D. d’Accadia, A. Palombo, L. Vanoli (2006). “Simulation and exergy analysis of a hybrid Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)–Gas Turbine System”, *Energy*, **31**, 3278–3299.

Campanari S. (2001). “Thermodynamic model and parametric analysis of a tubular SOFC module”, *Journal of Power Sources*, **92**, 26-34.

EG&G Technical Services, Inc. (2004). “Fuel Cell Handbook (Seventh Edition)”, U.S. Department of Energy.

Franzoni A., L. Magistri, A. Traverso, A.F. Massardo (2008). “Thermoeconomic analysis of pressurized hybrid SOFC systems with CO₂ separation”, *Energy*, **33**, 311–320.

Kivisaari T., P. Björnbom, C. Sylwan, B. Jacquinet, D. Jansen, G. de Groot (2004). “The feasibility of a coal gasifier combined with a high-temperature fuel cell”, *Chemical Engineering Journal*, **100**, 167–180.

Kuchonthara P., S. Bhattacharya, A. Tsutsumi (2003). “Energy recuperation in solid oxide fuel cell (SOFC) and gas turbine (GT) combined system”, *Journal of Power Sources*, **117**, 7-13.

Kuchonthara P., S. Bhattacharya, A. Tsutsumi (2005). “Combination of thermochemical recuperative coal gasification cycle and fuel cell for power generation”, *Fuel*, **84**, 1019-1021.

Lisbona P., A. Corradetti, R. Bove, P. Lunghi (2007). “Analysis of a solid oxide fuel cell system for combined heat and power applications under non-nominal conditions”, *Electrochimica Acta*, **53**, 1920-1930.

Palazzi F., N. Autissier, F.M.A. Marechal, D. Favrat (2007). “A methodology for thermo-economic modeling and optimization of solid oxide fuel cell systems”, *Applied Thermal Engineering*, **27**, 2703-2712.

Palsson J., A. Selimovic, L. Sjunnesson (2000). “Combined solid oxide fuel cell and gas turbine systems for efficient power and heat generation”, *Journal of Power Sources*, **86**, 442-448.

Panopoulos K.D., L.E. Fryda, J. Karl, S. Poulou, E. Kakaras (2006). “High temperature solid oxide fuel cell integrated with novel allothermal biomass gasification Part I: Modelling and feasibility study”, *Journal of Power Sources*, **159**, 570-585.

Riensch E., E. Achenbach, D. Froning, M. Haines, W. Heidug, A. Lokurlu (2000). “Clean Combined-cycle SOFC power plant – cell modeling and process analysis”, *Journal of Power Sources*, **86**, 404-410.

Swaney R. (1989), “Thermal integration of processes with heat engines and heat pumps”, *AIChE J.*, **35**, 1003-1016.

Van Herle J., F. Marechal, S. Leuenberger, D. Favrat (2003). “Energy balance model of a SOFC cogenerator operated with biogas”, *Journal of Power Sources*, **118**, 375-383.

Veyo S.E., C. Forbes (1998). “Demonstrations based on Westinghouse’s prototype Commercial AES design”, Westinghouse Science & Technology Center.

Yi Y., A.D. Rao, J. Brouwer, G.S. Samuelsen (2005). “Fuel flexibility study of an integrated 25kW SOFC reformer system”, *Journal of Power Sources*, **144**, 67–76.

Zhang W., E. Croiset, P.L. Douglas, M.W. Fowler, E. Entchev (2005). "Simulation of a tubular solid oxide fuel cell stack using AspenPlusTM unit operation models", *Energy Conversion & Management*, **46**, 181–196.

Zhang X., J. Li, G. Li, Z. Feng (2006). "Dynamic modeling of a hybrid system of the solid oxide fuel cell and recuperative gas turbine", *Journal of Power Sources*, **163**, 523-531.

Zhang X., J. Li, G. Li, Z. Feng (2007). "Cycle analysis of an integrated solid oxide fuel cell and recuperative gas turbine with an air reheating system", *Journal of Power Sources*, **164**, 752-760.

<http://americanhistory.si.edu/fuelcells>, 11.08.2008.

<http://corrosion-doctors.org/FuelCell/History.htm>, 11.08.2008.

rpifuelcell.eventurestudio.com/index.cfm, 11.08.2008.

http://www.eie.gov.tr/hidrojen/yakit_pilleri.html, 11.08.2008.

<http://www.iwe.uni-karlsruhe.de/english/sofc.php>, 11.08.2008.

www.powergeneration.siemens.com, 11.08.2008.

ÖZGEÇMİŞ

Ersan EYİLER, 1982 yılında Osmaniye’de doğdu. İlk öğrenimini Osmaniye, orta ve lise öğrenimini İstanbul’da tamamladı. 2004 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2004 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Enerji Sistemleri Anabilim dalında yüksek lisansa ve 2006 yılında aynı kurumda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı.