

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK BASINÇLI HİDROJEN GAZI ÜRETEN BİR SİSTEMİN
TERMODİNAMİK MODELLENMESİ VE EKSERJETİK
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ANALİZİ

SELÇUK İNAÇ

Ağustos 2009

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK BASINÇLI HİDROJEN GAZI ÜRETEN BİR SİSTEMİN
TERMODİNAMİK MODELLENMESİ VE EKSERJETİK SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK
ANALİZİ

SELÇUK İNAÇ

Yüksek Lisans Tezi

Danışman
Doç. Dr. Adnan MİDİLLİ

Ağustos 2009

Doç. Dr. Adnan MİDİLLİ danışmanlığında Selçuk İNAÇ tarafından hazırlanan “Yüksek Basıncılı Hidrojen Gazı Üreten Bir Sistemin Termodinamik Modellenmesi ve Ekserjetik Sürdürülebilirlik Analizi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

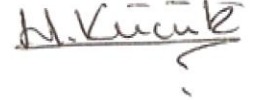
Başkan : Prof. Dr. Mahmut D. MAT (Niğde Üniversitesi)



Üye : Doç. Dr. Adnan MİDİLLİ (Niğde Üniversitesi)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Haydar KÜÇÜK (Gümüşhane Üniversitesi)



ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından 25/07/2009 tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun 14..108/2009 tarih ve ..2009..1.2.1.11... sayılı kararıyla kabul edilmiştir.



18/08/2009

Doç. Dr. Nurettin ACIR
Enstitü Müdür V.

ÖZET

YÜKSEK BASINÇLI HİDROJEN GAZI ÜRETEN BİR SİSTEMİN TERMODİNAMİK MODELLENMESİ VE EKSERJETİK SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ANALİZİ

İNAC, Selçuk

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Adnan MİDİLLİ

Ağustos 2009, 75 sayfa

Bu çalışma, hidrolik enerji destekli hidrojen gaz istasyonunda bulunan ve PEM elektrolizör içeren yüksek basınçlı hidrojen üretim alt ünitesinin termodinamik modellemesini ve ekserjetik sürdürülebilirlik analizini sunar. Bu çalışmada ele alınan alt ünite yüksek basınçlı bir PEM elektrolizör, iki adet plakalı ısı eşanjörü, bir pompa-motor sistemi, bir sirkülasyon pompası, bir sıcak su tankı ve bir ayırıştırıcıdan oluşur. Çalışmanın temel amacını gerçekleştirmek için aşağıdaki önemli parametreler dikkat alınmıştır. i) Çalışma basıncı (1-200 bar aralığında seçildi), ii) Çalışma sıcaklığı (70-80 °C aralığında seçildi), iii) Çevre sıcaklığı (25 °C olarak kabul edildi), iv) PEM elektrolizörün enerji verimi (0.5-1 aralığında seçildi), v) Motor-pompa sistemini verimi (0.8 olarak kabul edildi), vi) Sirkülasyon pompasının verimi (0.8 kabul edildi), vii) PEM elektrolizörden çıkan hidrojenin kütleli debisi (saatte 3 kg H₂ olarak seçildi), viii) Elektrolizöre tabi tutulan suyun (saf suyun) kütleli debisi (saatte 27 kg olarak seçildi). Tüm bu parametreler dikkate alınarak bu alt birimin ve bu alt birimdeki her bir bileşenin enerji ve ekserji analizleri termodinamiğin I. ve II. kanunu kapsamında yapıldı. Bununla birlikte, ekserji analizini dikkate alarak bu alt sistemin sürdürülebilirlik analizi gerçekleştirildi. Bu çerçevede; enerji ve ekserji verimleri, toplam tersinmezlikler ve kayıplar, atık ekserji oranı, ekserji yıkım faktörü, çevresel yıkım katsayısı, çevresel yıkım indeksi, çevresel uyum indeksi, ekserjetik kararlılık faktörü ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi gibi önemli parametreler ve indikatörler hesaplandı.

Sonuç olarak hidrolik enerji destekli hidrojen gaz yakıt istasyonunun oldukça önemli bir alt birimi olan yüksek basınçlı hidrojen üretim sisteminin enerji ve ekserji verimleri ile sürdürülebilirlik indeksi sistemin çalışma basıncının ve sıcaklığının artmasıyla bir azalma gösterdiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Hidrojen, PEM elektrolizör, Termodinamik analiz, Enerji, Ekserji, Sürdürülebilirlik, Çevresel yıkım indeksi, Çevresel uyum indeksi, Eksejetik sürdürülebilirlik indeksi.

SUMMARY

THERMODYNAMIC MODELLING AND EXERGETIC SUSTAINABILITY ANALYSIS OF A SYSTEM PRODUCING HIGH-PRESSURISED-HYDROGEN GAS

INAC, Selcuk

Nigde University

Graduate Scholl of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Adnan MIDILLI

August 2009, 75 pages

This study presents thermodynamic modeling and energy sustainability analysis of the high-pressurised-hydrogen production subsystem including a proton exchange membrane electrolyser in the hydropower-based-hydrogen gas fueling station. The subsystem considered for this study includes a high-pressure-PEM electrolyser, 2 heat exchangers, a motor-pump system, a circulation pump, a hot water tank, and a separator. In order to perform the main objective of this study, the following important parameters are taken into consideration. i) The operating pressure (ranging from 1 to 200 bars), ii) The operating temperature (ranging from 70 to 80 °C), iii) Dead state temperature (assumed to be 25 °C), iv) The energy efficiency of the PEM electrolyser (0,5-1), v) the efficiency of the motor-pump coupling (assumed to be 0.8), vi) the efficiency of circulation pump (aasumed to be 0.8), vii) Mass folw rate of hydrogen form the PEM electrolyser (3 kg per hour), viii) Mass flow rate of eletrolysis water (pure water) (assumed to be 27 kg per hour). Considering all these parameters, energy and exergy analyses of the each component in the subsystem have been performed in terms of the First and Second Laws of Thermodynamics while, taking into consideration the exergy analysis, the sustainability analysis of the subsystem has been accomplished. In this regard, the following important parameters and indicators have been estimated, which are energy and exergy efficiencies, total irreversibilities and losses, waste exergy ratio, exergy destruction factor, environmental destruction coefficient, environmental

destruction index, environmental benign index, exergetic stability factor, and exergetic sustainability index of the subsystem. Consequently, it is determined that the energy efficiency, exergetic efficiency and sustainability index of the high pressurised hydrogen production system that is a quite important subunit of the hydropower based-hydrogen gas fueling station decrease with the increase of the operating pressure and temperature.

Keywords: Hydrogen, PEM electrolyser, Thermodynamic analysis, Energy, Exergy, Sustainability, Environmental destruction index, Environmental benign index, Exergetic sustainability index.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans kapsamındaki çalışmalarımın tüm aşamalarında her türlü maddi, manevi ve bilimsel desteği sağlayan ve bana bilimselliği aşıl原因, bilgi ve tecrübeleriyle bana bilimsel ve teknik anlamda yardımcı olan ve beni bilimselliğin temel esasları doğrultusunda yönlendiren tez danışmanım Doç. Dr. Adnan MİDİLLİ'ye teşekkür eder, saygı ve hürmetlerimi sunarım.

Değerli vaktini ayırarak çalışmalarımda beni yönlendiren, bilimsel destek veren, öneri ve kıymetli yorumlarını esirgemeyen saygı değer hocam Prof. Dr. İbrahim DİNÇER'e (UOIT/Kanada) hürmet ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması süresince, önerilerini ve yorumlarını aldığım kıymetli hocam Prof. Dr. Yunus A. ÇENGEL'e (Nevada Univ. USA) hürmet ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca,

Tez çalışmam süresince teknik desteklerini aldığım çalışma arkadaşlarım Mak. Müh. Osman KAÇAR'a ve Mak. Müh. Mert ÖZSABAN'a,

Tez çalışmam süresince teknik ve bilimsel desteklerini aldığım "Working Group on Exergy for Betterment" üyelerine,

Tez çalışmalarım sırasında bana teknik imkânlarını kullandıran Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nın tüm akademisyenlerine ve çalışanlarına,

teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince bana büyük sabır gösteren ve her türlü yardımlarını ve katkılarını esirgemeyen biricik anneme ve babama ve tüm aileme minnettarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET.....	iii
SUMMARY.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
BÖLÜM I. GİRİŞ.....	1
1.1 Tez Çalışmasının Amacı ve Önemi.....	3
1.2 Literatür Araştırması.....	4
1.2.1 Hidrojen gazının özellikleri.....	4
1.2.2 Hidrojen üretim yöntemleri.....	4
1.2.3 Elektroliz yöntemiyle hidrojen üretim teknikleri.....	5
1.2.4 PEM elektrolizörün yardımıyla hidrojen üretimi.....	5
1.2.5 SOEC yardımıyla hidrojen üretimi.....	6
1.2.6 Alkalin elektrolizör yardımıyla hidrojen üretimi.....	6
1.2.7 Yüksek basınçta hidrojen gazı üreten PEM elektrolizör üzerine yapılan çalışmalar.....	7
1.2.8 Enerji, ekserji ve sürdürülebilirlik analizinin gereksinimi.....	9
BÖLÜM II.YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	11
2.1 Giriş.....	11
2.2 Teorik Çalışmalar.....	11
2.2.1 Genel kabuller.....	11
2.2.2 Sistemdeki etkili büyüklükler.....	12
2.2.2.1 Sabit büyüklükler.....	13
2.2.2.2 Ölçülebilen büyüklükler.....	13
2.2.2.3 Hesaplanabilen büyüklükler.....	14
2.2.3 Yüksek basınçlı hidrojen gazı üretim sisteminin akış şeması ve çalışma prensibi.....	17
2.3 Termodinamik çalışmalar.....	18

2.3.1	Yüksek basınçlı hidrojen gazı üretim sisteminin enerji analizi.....	18
2.3.1.1	I. plakalı ısı eşanjörünün enerji analizi.....	18
2.3.1.2	Pompa-Motor sisteminin enerji analizi.....	20
2.3.1.3	PEM elektrolizörün enerji analizi.....	21
2.3.1.4	II. plakalı ısı eşanjörünün enerji analizi.....	24
2.3.1.5	Sirkülasyon pompasının enerji analizi.....	25
2.3.1.6	Tüm sistemin enerji analizi.....	27
2.3.2	Yüksek basınçlı hidrojen gazı üretim sisteminin ekserji analizi.....	27
2.3.2.1	I.plakalı ısı eşanjörünün ekserji analizi.....	28
2.3.2.2	Pompa-Motor sisteminin ekserji analizi.....	30
2.3.2.3	PEM elektrolizörün ekserji analizi.....	31
2.3.2.4	II. Plakalı ısı eşanjörünün ekserji analizi.....	34
2.3.2.5	Sirkülasyon pompasının ekserji analizi.....	36
2.3.3	Yüksek basınçlı hidrojen gazı üretim sisteminin sürdürülebilirlik analizi.....	38
2.3.3.1	Ekserjetik verim.....	38
2.3.3.2	Atık ekserji oranı.....	39
2.3.3.2.1	Yeniden kullanılabilir atık ekserji oranı.....	39
2.3.3.2.2	Yeniden kullanılmayan atık ekserji oranı.....	40
2.3.3.3	Ekserjetik yıkım faktörü.....	40
2.3.3.4	Çevresel yıkım katsayısı.....	41
2.3.3.5	Çevresel yıkım indeksi.....	41
2.3.3.6	Çevresel uyum indeksi.....	42
2.3.3.7	Ekserjetik kararlılık faktörü.....	42
2.3.3.8	Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi.....	42
BÖLÜM III.	BULGULAR VE TARTIŞMALAR.....	44
BÖLÜM IV.	SUNUÇLAR VE ÖNERİLER.....	70
KAYNAKLAR	73

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Sistemdeki sabit büyüklükler	13
Çizelge 2.2 Sistemdeki ölçülebilen büyüklükler	14
Çizelge 2.3 Sistemdeki hesaplanabilen büyüklükler	15

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1	Yenilenebilir ve sürdürülebilir bir sistem olan yüksek basınçlı hidrojen üretim sisteminin çevresel uyumluluğu	10
Şekil 2.1	Yüksek basınçlı hidrojen üretim sisteminin şematik gösterimi.....	17
Şekil 2.2	I. Plakalı ısı eşanjörün enerji etkileşim diyagramı	18
Şekil 2.3	Pompa-Motor sisteminin enerji etkileşim diyagramı	20
Şekil 2.4	PEM elektrolizörün enerji etkileşim diyagramı.....	22
Şekil 2.5	II. Plakalı ısı eşanjörün enerji etkileşim diyagramı.....	24
Şekil 2.6	Sirkülasyon pompasının enerji etkileşim diyagramı.....	25
Şekil 2.7	I. Plakalı ısı eşanjörün ekserji etkileşim diyagramı	28
Şekil 2.8	Pompa-Motor sisteminin ekserji etkileşim diyagramı.....	30
Şekil 2.9	PEM elektrolizörün ekserji etkileşim diyagramı.....	31
Şekil 2.10	II. Plakalı ısı eşanjörün ekserji etkileşim diyagramı.....	34
Şekil 2.11	Sirkülasyon pompasının ekserji etkileşim diyagramı.....	36
Şekil 3.1	Sistem çalışma basıncına bağlı olarak PEM elektrolizör elektrik enerjisi ihtiyacının ve termal enerji ihtiyacının sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi.....	45
Şekil 3.2	PEM elektrolizör verimine bağlı olarak PEM elektrolizör için gerekli olan iş ve ısı miktarlarının sistem çalışma basıncına göre değişimi.....	46
Şekil 3.3	PEM elektrolizör verimine bağlı olarak PEM elektrolizör için gerekli olan entalpi voltajı miktarının sistem çalışma basıncına göre değişimi.....	47
Şekil 3.4	Sistem çalışma basıncına bağlı olarak PEM elektrolizör için gerekli olan entalpi voltajı miktarının sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi.....	48
Şekil 3.5	Sistem çalışma basıncına bağlı olarak tüm sistemin enerji veriminin sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi.....	50
Şekil 3.6	Sistem çalışma basıncına bağlı olarak sistem enerji veriminin PEM elektrolizör enerji verimine göre değişimi.....	51
Şekil 3.7	Sistem çalışma basıncına bağlı olarak PEM elektrolizör ekserji veriminin ve PEM elektrolizörün toplam tersinmezliklerinin sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi.....	52

Şekil 3.8	PEM elektrolizörün enerji verimine bağlı olarak PEM elektrolizörün ekserji verimi ve toplam tersinmezliklerinin sistem çalışma basıncına göre değişimi.....	54
Şekil 3.9	Sistem çalışma basıncına bağlı olarak sistemin ekserji veriminin ve sistemin toplam tersinmezliklerinin sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi.....	55
Şekil 3.10	Sistem çalışma basıncına bağlı olarak istem ekserji veriminin ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi.....	56
Şekil 3.11	Sistem çalışma basıncına bağlı olarak sistem atık ekserji oranının sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi.....	57
Şekil 3.12	Sistem çalışma basıncına bağlı olarak ekserjetik yıkım faktörünün sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi.....	58
Şekil 3.13	Sistem çalışma basıncına bağlı olarak çevresel yıkım katsayısının sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi.....	59
Şekil 3.14	Sistem çalışma basıncına bağlı olarak çevresel yıkım indeksinin sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi.....	60
Şekil 3.15	Sistem çalışma basıncına bağlı olarak çevresel uyum indeksinin sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi.....	61
Şekil 3.16	Sistem çalışma basıncına bağlı olarak ekserjetik kararlılık faktörünün sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi.....	62
Şekil 3.17	Sistem çalışma basıncına bağlı olarak ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi.....	63
Şekil 3.18	Sistem çalışma basıncına bağlı olarak ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin ve çevresel yıkım indeksinin sistemin çalışma sıcaklığına göre değişimi.....	65
Şekil 3.19	PEM elektrolizör verimi 0.8 iken sistem çalışma basıncına bağlı olarak ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi ve çevresel yıkım indeksinin sistemin çalışma sıcaklığına göre değişimi.....	66
Şekil 3.20	PEM elektrolizör verimi 0.8 iken sistemin toplam tersinmezliklere bağlı olarak ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi ve çevresel yıkım indeksinin sistemin çalışma sıcaklığına göre değişimi.....	67
Şekil 3.21	PEM elektrolizör verimi 0.8 iken sistemin toplam tersinmezliklere bağlı olarak ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi ve çevresel uyum indeksinin sistemin çalışma sıcaklığına göre değişimi.....	69

KISALTMALAR VE SİMGELER

\dot{m}	Kütlesel debi (kg/saat)
\dot{Q}	Plakalı ısı eşanjörüne sağlanan geçek ısı transfer değeri (kW)
\dot{Q}_{max}	Plakalı ısı eşanjörüne sağlanan maksimum transfer değeri (kW)
ε	Plakalı ısı eşanjörünün etkinliği
W_t	Pompanın teorik işi (kW)
W_G	Pompanın gerçek işi (kW)
W_{PEM}	PEM elektrolizöre verilmesi gereken elektrik miktarı (kW)
\dot{Q}_{PEM}	PEM elektrolizöre verilmesi gereken ısı miktarı (kW)
C_p	Özgül ısı değeri (kJ/kgK)
s^o	Referans entropisi (kJ/kgK)
h^o	Oluşum entalpisi (kJ/kg)
T	Sıcaklık (K)
P	Basınç (bar)
E_{PEM}	PEM elektrolizöre verilmesi gereken entalpi voltajı (volt)
F	Faraday sabiti (C/mol)
$\eta_{enerji\ sis}$	Sistemin enerji verimi
LHV_{H_2}	Hidrojenin alt ısı değeri (kJ/kg)
h	Entalpi (kJ/kg)
h_0	1 atm 25°C deki entalpi değeri (kJ/kg)
s	Entropi (kJ/kgK)
s_0	1 atm 25°C deki entropi değeri (kJ/kgK)
T_o	Çevre sıcaklığı (K)
\dot{E}_{ex}	Toplam ekserji (kW)
\dot{E}_{ex}^{fiz}	Fiziksel ekserji (kW)
\dot{E}_{ex}^{kim}	Kimyasal ekserjisi (kW)
η_{ex}	Ekserji verimi
I	Tersinmezlikler (kW)
(r_{aeo}^{sis})	Atık ekserji oranı
(r_{kn}^{sis})	Yeniden kullanılabilir atık ekserji oranı
(r_{km}^{sis})	Yeniden kullanılamayan atık ekserji oranı

f_{exy}^{sis}	Sistemin ekserjetik yıkım faktörü
$C_{çyk}^{sis}$	Sistemin çevresel yıkım katsayısı
$\theta_{çyi}^{sis}$	Sistemin çevresel yıkım indeksi
$\theta_{çui}^{sis}$	Sistemin çevresel uyum indeksi
f_{exk}^{sis}	Sistemin ekserjetik kararlılık faktörü
θ_{exs}^{sis}	Sistemin ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi

Alt ve üst indisler

g	Giriş
$\ç$	Çıkış
ks	Kompresör ara soğutma ünitesinden gelen su
ss	Saf su
$P1$	I. Plakalı ısı eşanjörü
$P2$	II. Plakalı ısı eşanjörü
$p-m$	Pompa –Motor sistemi
$s-p$	Sirkülayon pompası
PEM	PEM (Proton Exchange Membrane) elektrolizör
H_2	Hidrojen
O_2	Oksijen
H_2O	Su
ex	Ekserji
sis	Sistem

BÖLÜM I

GİRİŞ

Enerji insanoğlunun temel girdilerinin karşılanmasında, ülkelerin sosyal ve ekonomik olarak kalkınmasında en önemli gereksinimlerden biridir. Dünya nüfusu ve endüstriyel gelişmelere paralel olarak enerji gereksinimi giderek artmakta buna karşın fosil enerji kaynaklarının rezervleri hızla tükenmektedir. Birincil enerji kaynaklarının rezervlerinin kısıtlı olması, yakıt fiyat artışları, nüfus artışı, sanayileşme, ulusal ve yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi zorunluluğu, 21. yüzyılın sosyal ekonomik yapılanması mevcut yakıtların çevre üzerinde olumsuz etkileri (sera etkisi, küresel ısınma, iklim değişiklikleri, yağış değişkenliği, asit yağmurları, sağlık problemleri gibi), yeni enerji teknolojileri kapsamında, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı gerekliliğinin temellerini oluşturmaktadır [1].

Sürdürülebilir kalkınmanın, ekonomik, sosyal ve çevresel boyutlarda temel unsuru olan sürdürülebilir enerjinin ve teknolojilerinin gereksinimi; dünya nüfusunun, teknolojik gelişmelerin ve yaşam standartlarının gün geçtikçe yükselmesi ile birlikte giderek artmaktadır [2]. Günümüz koşulları dikkate alındığında, uzun zamandan beridir yerel ve endüstriyel uygulamalarda yaygın ve sorumsuz bir şekilde kullanılmakta olan doğal gaz, kömür ve petrol gibi fosil kökenli yakıtların yerel, bölgesel ve küresel huzursuzluğu ne derece artırdığı açıkça görülmektedir [3,4]. Ayrıca, artan enerji ihtiyacı, hızlı nüfus artışı, teknolojik gelişmeler, hayat standardının düşmesi gibi önemli faktörler de yerel ve küresel kararlılığı bozmakta ve küresel huzursuzluğu artırmaktadır. Bütün bu faktörler, kullanılabilir fosil yakıt rezervlerinin azalmasına, çevre, hava ve su kirliliğinin giderek artmasına, ozon tabakasının zarar görmesine, yerel ve küresel ısınma ve kirlenmeye, sel ve deprem felaketlerine, kıtasal kaymalara, yeşil ve sulak alanların giderek azalmasına, yerel ve küresel enerji gereksiniminin artmasına, vb. gibi olumsuzluklara neden olmaktadır [5]. Bu olumsuzlukların neticesinde; kıtalararası göçler, yerel ve bölgesel nüfus değişimleri, açlık, kullanılabilir yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kirlenmesi, sağlık ve hastalık problemleri, terörist faaliyetler, yerel, bölgesel ve dünya savaşları gibi küresel sorunların arttığı açıkça görülmektedir [6,7].

Yukarıda sıralanan olumsuz etkiler, temiz ve her yerde bulunabilecek yeni bir enerji kaynağı ile kısmen veya tamamen yok edilebilir. Mükemmel bir enerji taşıyıcısı olan hidrojenin, fosil kökenli olmayan kaynaklardan (biyokütle, su vb.) elde edilebilecek özellikte olması, hidrojenin sınırlı rezervlere sahip fosil kökenli yakıtlara çok iyi bir alternatif oluşturacağı gerçeğini ortaya koymaktadır [3,4,8].

Hidrojen çok iyi bir enerji taşıyıcısıdır, fakat hidrojeni fosil kökenli veya fosil kökenli olmayan kaynaklardan üretmek için de enerji gerekmektedir. Özellikle endüstriyel uygulamalarda, sanayide ve yakıt pilli taşıtlarda yüksek saflıklı hidrojene ihtiyaç duyulması temiz hidrojen üretim teknolojilerinin önemini daha da artırmaktadır. Dolayısıyla, yüksek saflıklı hidrojen üretimini gerçekleştirmek için kullanılan teknolojilerden bir tanesi de yüksek basınçlı PEM elektroliz tekniğini kullanan teknolojilerdir. Yüksek basınçlı PEM elektroliz tekniği özellikle hidrojen gaz istasyonlarında kullanılması gereken önemli bir tekniktir. Bu teknik sayesinde hem sıkıştırma hem de depolama için kullanılan enerjinin minimize edilmesi mümkündür.

Bu düşünceler ışığında, hidrolik enerji destekli hidrojen gaz yakıt istasyonunun en önemli alt birimlerinden biri olan yüksek basınçlı hidrojen üretimi ünitesinin ekserjetik performansının ve ekserjetik sürdürülebilirlik davranışının nasıl olduğu araştırılmalı ve ortaya konulmalıdır. Bu çerçevede, Termodinamiğin İkinci Kanunu kapsamında ekserji analizi yapılmalı, elde edilen ekserji analizi sonuçlarını dikkate alarak ekserjetik sürdürülebilirlik analizi gerçekleştirilmelidir. Burada şunu da ifade etmek gerekir ki, yapılan literatür araştırmaları, yüksek basınçlı hidrojen üretimi üzerine yapılan enerji ve ekserji analizi çalışmalarının oldukça sınırlı olduğunu, bununla birlikte, yüksek basınçlı hidrojen üretim işleminin sürdürülebilirlik analizi üzerine herhangi bir çalışmanın olmadığını göstermiştir. Bu, yapılan bu tez çalışmasının bilimsel ve endüstriyel orijinalitesini açıkça ortaya koymaktadır.

Bu tez çalışmasında, hidrolik enerji destekli hidrojen gaz yakıt istasyonu için saatte 3 kg hidrojen üretimini gerçekleştirecek olan yüksek basınçlı hidrojen üretim alt biriminin termodinamik modellenmesi ve ekserjetik sürdürülebilirlik analizi çalışılmıştır. Özellikle, belli bir debide (3 kg/saat) hidrojen üretiminin gerçekleşmesi durumunda, sistemin enerjetik ve ekserjetik performansı, ekserjetik sürdürülebilirliği ve çevresel uyumu üzerinde çalışma basıncı ve sıcaklığı gibi parametrelerin etkisi araştırılmıştır.

1.1 Tez Çalışmasının Amacı ve Önemi

Bu çalışmada amaç; hidrolik enerji destekli hidrojen gaz yakıt istasyonu için saatte 3 kg hidrojen üretimini gerçekleştirecek olan yüksek basınçlı hidrojen üretim alt biriminin termodinamik modellenmesini ve ekserjetik sürdürülebilirlik analizini gerçekleştirmektir. Çalışma parametrik niteliklidir. Bu parametrik çalışmada, sistem çalışma basıncı, sistem çalışma sıcaklığı, PEM elektrolizör verimi gibi parametreler dikkate alınmıştır. Bu çalışma kapsamında ilk olarak; yüksek basınçta hidrojen üretim alt ünitesini etkileyen parametreler incelenmiştir. Bu aşamada, sistemde meydana gelen toplam kayıplar, sistemin enerji verimi, yüksek basınçlı PEM elektrolizör için gerekli olan elektrik miktarı ve ısı miktarı gibi parametreler hesaplanmıştır. Bu parametrelerin hesaplanmasında sistemin temel çalışma parametreleri olan basınç (1, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150, 200 bar), sıcaklık (70, 75 ve 80 °C), çevre sıcaklığı (25 °C), PEM elektrolizör verimi (0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 1), pompa-motor ve sirkülasyon pompası verimi (0.8), hidrojen çıkış debisi (3 kg/saat), sisteme giren saf suyun debisi (27 kg/saat) alınmıştır. İkinci olarak; yüksek basınçlı hidrojen üretim sisteminin ekserji ve sürdürülebilirlik parametreleri belirlenmiştir. En son olarak ta belirlenen bu ekserji ve sürdürülebilirlik parametrelerinin artan basınç ve sıcaklık değerlerine göre değişimi incelenmiştir.

Bu kapsamda gerçekleştirilen tez çalışmasının, aşağıda sıralanan bilimsel, endüstriyel, teknolojik ve akademik yararları sağlayacağı tahmin edilmektedir.

- Yüksek basınçta hidrojen üreten bir sistemin termodinamik ve sürdürülebilirlik analizi konusunda yapılan akademik ve bilimsel nitelikli orijinal bir çalışma olması,
- Sürdürülebilir ve yenilenebilir hidrojen üretimi üzerine yapılan bilimsel, endüstriyel, teknolojik ve akademik çalışmalara alternatif oluşturması,
- Hidrolik enerji destekli hidrojen gaz istasyonlarının kullanıldığı yerel ve endüstriyel alanlarda yüksek basınçlı hidrojen üretiminin sürdürülebilirlik yönlerinin belirlenmesi konusunda yeni bir anlayış ortaya koyması,
- Farklılığını, oluşturulan entegrasyon ünitesinden alan bu parametrik çalışmanın gelecekte yapılması düşünülen deneysel çalışmalara bir referans oluşturması,
- Özellikle yüksek basınçlı hidrojen üreten PEM elektrolizör sistemini de içeren yüksek basınçlı hidrojen üretim alt biriminin termodinamik ve sürdürülebilirlik analizlerinin en

kapsamlı biçimde literatüre kazandırılmış olması çalışmanın orijinalitesini açıkça ortaya koymaktadır.

1.2 Literatür Araştırması

Bu tez çalışması kapsamında yapılan literatür araştırması; hidrojen ve hidrojen gazının özellikleri, hidrojen üretim yöntemleri, özellikle elektroliz yöntemiyle hidrojen üretim teknikleri, PEM elektrolizör özellikle yüksek basınçlı hidrojen üreten PEM elektrolizör üzerine yapılan çalışmaları sunar.

1.2.1 Hidrojen gazının özellikleri

Yalnızca bir proton ve bir elektrondan oluşan ve periyodik tablonun başında yer alan hidrojen, en hafif elementtir. Hidrojen evrendeki en bol bulunan elementlerden biridir. Renksiz, kokusuz, tatsız ve zehirsiz özelliklere sahip hidrojen, içten yanmalı motorda yakıldığında neredeyse hiç zararlı emisyon açığa çıkarmaz ve tek yan ürün sudur. Evrendeki en bol bulunan element olmasına karşın, hidrojen gezegenimizde saf halde bulunmamaktadır. Hidrojen, suda oksijenle birleşik olarak ve fosil yakıtlarda ve sayısız hidrokarbon bileşiklerde, karbon ve diğer elementlerle birleşik halde bulunmaktadır [9].

Hidrojen bilinen tüm yakıtlar içerisinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahiptir. (Üst ısıl değeri 140.9 MJ/kg, alt ısıl değeri 120.7 MJ/kg). 1 kg hidrojen 2.1 kg doğal gaz veya 2.8 kg petrolün sahip olduğu enerjiye sahiptir. Hidrojen petrol yakıtlarına göre ortalama 1.33 kat daha verimli bir yakıttır [10].

1.2.2 Hidrojen üretim yöntemleri

Hidrojen doğal gaz ve kömür gibi fosil yakıtlardan; biyokütle, su, güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından kimyasal, biyolojik, elektrolitik, fotolitik ve termokimyasal metotlar ile üretilmektedir [11].

1.2.3 Elektroliz yöntemiyle hidrojen üretim teknikleri

Elektroliz, bilinen en eski hidrojen üretim yöntemlerinden biridir ve yenilenebilir enerji kaynakları ile entegrasyonu, son yıllarda kaydedilen teknolojik gelişmelerle mümkün gözükmemektedir. Suyun doğru akım kullanarak hidrojen ve oksijenlerine ayrılması işlemine elektroliz denmektedir. Hidrojen üretimi için en basit yöntem olarak bilinmektedir. İlke olarak bir elektroliz hücresi içinde, genelde düzlem bir metal veya karbon plakalar olan iki elektrot ve bunların içine daldırıldığı elektrolit olarak adlandırılan iletken bir sıvı bulunmaktadır. Doğru akım kaynağı bu elektrotlara bağlandığında akım iletken sıvı içinde pozitif elektrottan negatif elektrota doğru akacaktır. Bunun sonucu olarak ta elektrolit içindeki su, katottan çıkan hidrojen ve anottan çıkan oksijen gazına ayrışacaktır. Suyun elektrolizi için normal basınç ve sıcaklıklarda 1.23 volt yeterlidir. Tepkimenin yavaş olması ve elektroliz işlemi sırasında meydana gelen dirençlerden dolayı elektroliz işlemi için daha fazla gerilime ihtiyaç vardır. Hidrojen üretim hızı, gerçek akım şiddeti ile orantılı olduğundan, ekonomik nedenlerle yüksek akım yoğunlukları yeğlenmektedir. Bundan dolayı pratikte suyun ayrışması için hücre başına uygulanan gerilim 2 volt dolayındadır. Bir elektroliz düzeneğinde ayrıştırılan elementlerin miktarı, devreden geçen yük miktarı ile doğru orantılıdır [12].

1.2.4 PEM elektrolizör yardımıyla hidrojen üretimi

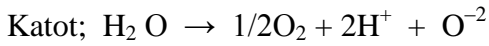
Elektrolizör; hidrojen gazı üretmek için suyun elektrolizini kolaylaştıran bir alettir. En çok kullanılan elektrolizörler alçak basınçta hidrojen oluşturur ve sıvı bazik bir elektrolit kullanır (KOH veya NaOH). Bu basınçlarda hidrojenin depolanması aşırı derecede büyük kaplar gerektirir [13]. PEM elektrolizör, potansiyel olarak hidrojeni oluşturmak, sıkıştırmak ve depolamak için basit ve dayanıklı olan etkili bir teknolojidir ve çalışma prensibi olarak yakıt pilinin tam tersi olarak düşünülebilir. Bir PEM elektrolizörün çalışma koşulları genel olarak şöyledir [14].

- Kullanılan membran: Nafion-112/117
- Çalışma sıcaklığı: 70, 80 °C
- Çalışma basıncı (yüksek basınçlarda): 200 bar

- Hidrojen üretim kapasitesi: 100 Nm³/dk-10 Nm³/saat
- Elektrik gücü: 100 W-50 kW

1.2.5 SOEC yardımıyla hidrojen üretimi

Saf su buhar formda katoda gönderilir. Sisteme uygulanan gerilimle birlikte katot tarafına gönderilen su buharı hidrojen gazına ve oksijen iyonlarına ayrılır. Açığa çıkan hidrojen gazı dış ortama alınarak uygun bir şekilde depolanır. Oksijen iyonları ise katottan anoda doğru elektrolit boyunca hareket eder ve anot tarafında oksijen gazı olarak açığa çıkar. Oluşan kimyasal reaksiyonlar;



Yüksek sıcaklıkta yapılan elektroliz oda sıcaklığında yapılan elektrolizden daha verimlidir. Çünkü suyu ayrıştırmak için gerekli enerjinin bir kısmı ısı enerjisinden sağlanmaktadır [14]. SOEC elektrolizörün çalışma koşulları genel olarak aşağıdaki gibidir [14].

- Kullanılan membran: Y₂O₃/ZrO₃ (YSZ)
- Çalışma sıcaklığı: 850, 1000 °C
- Akım yoğunluğu: 300 mA/cm²

1.2.6 Alkalın elektrolizör yardımıyla hidrojen üretimi

Hidrojen üreten teknolojilerden bir diğeri de alkalın elektrolizörlerdir. Bu konuda literatürde oldukça fazla bilgi mevcuttur. Burada kısaca alkalın elektrolizörün genel çalışma koşulları verilmiştir [14].

- Kullanılan zar: NiO (20-40 % KOH)
- Çalışma sıcaklığı: 70, 90 °C
- Çalışma basıncı (yüksek basınçlarda): 7-30 bar
- Hidrojen üretim kapasitesi: 1-760 Nm³/saat

1.2.7 Yüksek basınçta PEM elektrolizi ile hidrojen üretimi üzerine yapılan çalışmalar

Etievant ve arkadaşları 50 bar basınçta, saatte 1 Nm³ yüksek basınçta hidrojen üreten 5kW gücünde bir PEM elektrolizör sistemi üzerinde çalışmalar yapmışlardır [15].

Demin ve arkadaşları yüksek sıcaklıkta çalışan katı oksit elektrolizi (SOEC) incelemişler ve teorik modellemesini yapmışlardır [16].

Engel ve arkadaşları güneş enerjisinden elde ettikleri 6 kW lık DC elektrik enerjisini PEM elektrolizörde kullanarak dakikada 20 litre ve 100 psi basınçla hidrojen üreten sistem tasarlamışlardır [17].

Ni ve arkadaşları PEM elektrolizör sisteminin matematiksel modellemesini yaparak sistemin ihtiyaç duyduğu volt değerini matematiksel olarak deneysel çalışmalarla birlikte hesaplamışlardır. Ayrıca voltaj değerlerine etki eden diğer değişkenler hakkında da çalışmalar yapmıştır [18].

Dale ve arkadaşları 6kW gücünde bir PEM elektrolizör sistemini incelemişler ve sistemin termodinamik modelini çıkarmışlardır [19].

Laoun, yüksek basınçlı hidrojen üreten elektroliz sistemini termodinamiksel olarak incelemiş, sıcaklık ve basınç ile güç, voltaj ve verim arasında bağıntılar geliştirmiş ve bu değerleri grafiksel olarak incelemiştir. Yaptığı bu çalışmada sistemin basıncı arttığında PEM elektrolizöre verilmesi gereken gücün arttığını bulmuştur. Ayrıca PEM elektrolizörün verimi arttığında PEM elektrolizöre verilmesi gereken gücün azaldığını belirlemiştir [20].

Deschamps ve arkadaşları saatte 1.5 m³, 30 bar basınçta hidrojen üreten sisteminin voltaj, akım ve güç değerlerini inceleyerek bu değerler üzerinde grafiksel olarak çalışmışlardır [21].

Santarelli ve arkadaşları yüksek basınçlı PEM elektrolizörü teorik ve deneysel olarak inceleyerek, PEM elektrolizör için gerekli olan voltaj ve elektrik güç miktarlarını

basınca ve sıcaklığa göre değişimlerini incelemişlerdir. Buldukları değerlerde yüksek basınçlı PEM elektrolizör için gerekli olan voltaj ve elektrik güç miktarlarının basınç arttığında arttığını, aynı değerlerin sıcaklık arttığında ise azaldığı bulmuşlardır. Basınç değeri olarak 7 bar ile 70 bar, sıcaklık değeri olarak ta 42 °C ve 58 °C değerlerini almışlardır [22].

Yılancı ve arkadaşları 1.2 kW lık PEM yakıt pili sisteminin ekserji ve enerji analizleri yaparak gerekli olan akım yoğunluğuna bağlı olarak PEM yakıt pilinin enerji ve ekserjisini grafiksel olarak incelemiştir [23].

Ni ve arkadaşları SOEC (solid oxide electrolysis cell) ile hidrojen üreten sistemin enerji ve ekserji analizlerini yaparak, sistem için gerekli olan ısı, iş ve toplam iş miktarlarını belirlemişlerdir. Ayrıca ele aldıkları sistemin akım yoğunluğuna bağlı olarak elektrolizör için gerekli olan voltaj değerlerini çalışma sıcaklığına göre grafiksel olarak incelemişlerdir. Sistemin enerji ve ekserjisinin akım yoğunluğuna bağlı olarak çalışma sıcaklığına göre değişimini grafiksel olarak incelemişlerdir [24].

Balta ve arkadaşları yüksek sıcaklıklı buhar elektrolizörü tasarlayarak enerji ve ekserji analizleri üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Elektrolizör üstesine verilmesi gereken elektrik işi, ısı ve toplam işin sıcaklığa göre değişimi grafiksel olarak incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada sistemin sıcaklığı arttığı iş miktarının azalığını, ısı miktarının arttığını ve toplam enerjinin ise arttığı bulmuşlardır. Ayrıca enerji ve ekserji analizlerini grafiksel olarak incelemişlerdir [25].

Moulthrop günde 13 kg hidrojen üreten 15 bar basınçta çalışan PEM eletrolizörün çalışma performansını incelemiştir [26].

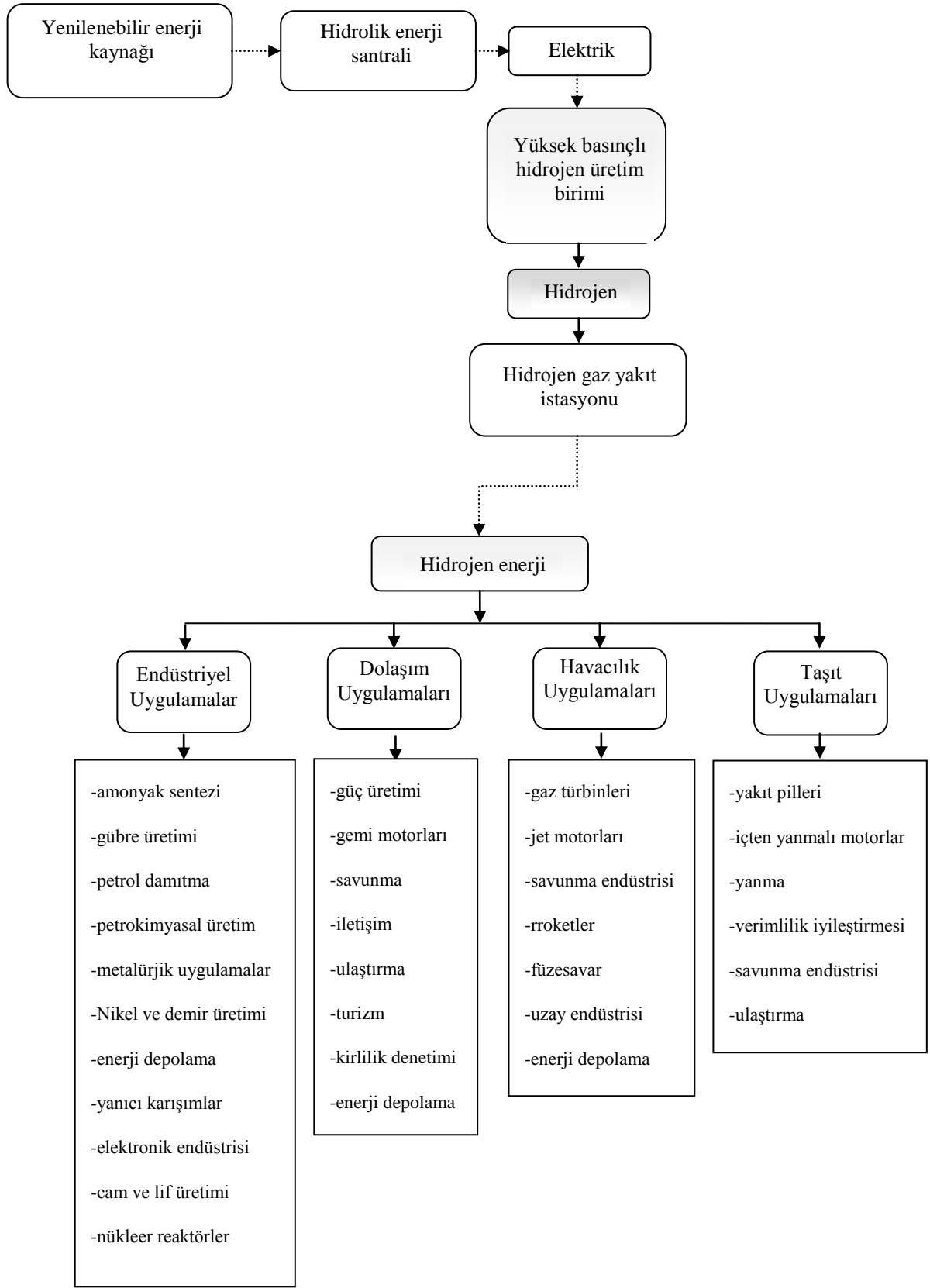
Literatür araştırmalarından görüldüğü üzere, yüksek basınçlı hidrojen üreten PEM elektrolizör ile ilgili yapılan termodinamik çalışmalar oldukça kısıtlı olmakla birlikte özellikle sürdürülebilirlik analizi üzerine herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu tez çalışmasının temel amacı, hidrolik enerji destekli hidrojen gaz istasyonunun yüksek basınçlı hidrojen üreten alt biriminin termodinamik modellenmesini gerçekleştirmek ve özellikle ekserji analizine bağlı olarak sürdürülebilirlik analizini yapmaktır.

1.2.8 Enerji, ekserji ve sürdürülebilirlik analizinin gereksinimi

Enerji analizi, Termodinamiğin Birinci Kanunu kapsamında yapılır. Enerji analizi ile bir sistemin tasarlanıp tasarlanamayacağına karar vermede ve mevcut bir sistemdeki tersinmezliklerin azaltılmasında hangi tedbirlerin alınacağına karar vermek oldukça zordur. Bu ancak Termodinamiğin İkinci Kanunu kapsamında yapılan ekserji analizi ile mümkün olabilir [27].

Bir sistemin çevreye ve kullandığı enerji kaynağına uyumlu olup olmadığını belirlemek için ekserjetik sürdürülebilirlik analizinin yapılması gerekir [28].

Yukarıdaki açıklamalardan da anlaşılacağı gibi bir sistemin; verimliliğinin artırılabilmesi, küresel ısınmaya neden olabilecek çevresel etkilerinin belirlenebilmesi ve bu etkilerin minimum düzeye indirilebilmesi için ekserji ve sürdürülebilirlik analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda Şekil 1.1 yenilenebilir ve sürdürülebilir bir sistem olan yüksek basınçlı hidrojen üretim sisteminin çevresel uyumluluğunu şematik olarak gösterir.



Şekil 1.1 Yenilenebilir ve sürdürülebilir bir sistem olan yüksek basınçlı hidrojen üretim sisteminin çevresel uyumluluğu ([28] nolu kaynaktan düzeltilmiştir).

BÖLÜM II

YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1 Giriş

Bu tez çalışmasında, tasarlanan hidrolik enerji destekli hidrojen istasyonu için gerekli yüksek basınçlı hidrojen gazı ihtiyacını karşılayabilecek alt birimin termodinamik modellenmesi kapsamında enerji, ekserji ve sürdürülebilirlik analizleri parametrik olarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar, teorik çalışmalar ve termodinamik çalışmalar şeklinde detaylı olarak aşağıda sunulmuştur.

2.2 Teorik Çalışmalar

Bu tez çalışmasının teorik çalışmalar kısmında, tasarlanan yüksek basınçta hidrojen üretim sisteminin çalışma prensibine uygun kabuller yapılarak, yüksek basınçlı hidrojen üretim sisteminin çalışma prensibi ve akış şeması sunulmuştur.

2.2.1 Genel kabuller

1. Saf suyun sisteme giriş sıcaklığı 20 °C ve giriş basıncı 1 atm olarak alınmıştır.
2. Sistemde hidrojen üretiminin saatte 3 kg olduğu kabul edilmiştir.
3. Sisteme sağlanan saf suyun debisi saatte 27 kg olarak kabul edilmiştir.
4. Saf suyu sıkıştıran pompanın izantropik çalıştığı kabul edilmiştir.
5. PEM elektrolizörün çalışma sıcaklıkları 70, 75 ve 80 °C olarak kabul edilmiştir [14].
6. PEM elektrolizörün verimi 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 ve 1 olarak kabul edilmiştir.
7. PEM elektrolizörün çalışma basınçları 1, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150 ve 200 bar olarak kabul edilmiş [14], PEM elektrolizörde sıcaklık ve basınç kaybının olmadığı kabul edilmiştir.
8. Sistemde kullanılan plakalı ısı eşanjörler adyabatik olarak kabul edilmiştir.
9. Sistem için gerekli enerji ihtiyacının HES ten sağlandığı kabul edilmiştir.

10. Sistemden elde edilen hidrojen ve oksijen gerçek gaz olarak kabul edilmiş, ele alınan yüksek basınçta hidrojen üretim sistemindeki bütün elemanlar SASA olarak ele alınmış ve hesaplamalar bu çerçevede yapılmıştır.
11. Sistemde kullanılan pompaların verim 0.8 olarak kabul edilmiştir.
12. Sistemde yüksek basınçta çalışıldığında basınca ve sıcaklığa bağlı olarak değişen termodinamik özellikler Nist'ten alınmıştır [29]. Başka kaynaklardan alınacak değerlere bağlı olarak sonuçlar değişiklik gösterebilir. Bu çalışmada verilerin kaynağı olarak Nist seçilmiştir.
13. Sistemin çalıştığı çevrenin sıcaklığı ve basıncı 25 °C ve 1 atm olarak kabul edilmiştir.
14. Saf suyu ısıtmak için kullanılan suyun sıcaklığı 90 °C ve basıncı 3 bar olarak kabul edilmiştir.
15. Sistemin ekserji hesaplamalarında kullanılan kimyasal ekserji değerleri literatürden alınmıştır [30].
16. PEM elektrolizöre sağlanan toplam enerjinin bir kısmı elektrik olarak kullanılırken diğer bir kısmı da elektrolizör içerisinde ısıya dönüşür. Membranın yerel iyonik iletkenliği, $\sigma \geq T\Delta S$, ise tersinmezliklerden dolayı ısı üretimi suyun ayrışma reaksiyonu için gerekli olan ısıdan ya daha yüksek ya da bu ısıya eşittir. Dolayısıyla, PEM elektrolizörde gerçekleşen reaksiyon için dışarıdan ekstra ısı vermeye gerek yoktur. Yani $Q_{Isi,PEM} = E_{Isi,PEM} = 0$ olur. Bu durumda, elektrolizörde üretilen fazla ısı termal radyasyon yoluyla referans çevreye atılır. Eğer, $\sigma < T\Delta S$ ise o zaman üretilen ısının değeri termal gereksinimden daha düşüktür ve elektrolizörde reaksiyonun gerçekleşmesi için ilave ısıya ihtiyaç vardır [31].

2.2.2 Sistemdeki etkili büyüklükler

Yüksek basınçta hidrojen üretim sisteminin termodinamik modellenmesi ve sürdürülebilirlik çalışmaları sırasında dikkate alınan büyüklükler üç alt başlık altında sunulmuştur.

2.2.2.1 Sabit büyüklükler

Tez çalışmasının amaçları kapsamında, parametrik çalışmaların gerçekleştirilmesi için, sistemdeki sabit büyüklükler literatürde sunulmuş olan farklı çalışmalardan alınmıştır.

Çizelge 2.1 Sistemdeki sabit büyüklükler

Sabit büyüklükler	Sembol	Birim	Değer	Referans
Üniversal gaz sabiti	R_u	kJ/kmolK	8.314	[34]
Faraday sabiti	F	C/mol	96485	[18]
Çevre sıcaklığı	T_o	K	298.15	Kabul
Saf suyun debisi	\dot{m}_{ss}	kg/saat	27	Kabul
Saf suyun sıcaklığı	T_{ss}	K	293	Kabul
Çevre basıncı	P_o	atm	1	Kabul
Saf suyun özgül ısısı	$C_{p_{ss}}$	kJ/kgK	4.1901	[29]
Komp. sisteminden gelen suyun özgül ısısı	$C_{p_{ks}}$	kJ/kgK	4.2048	[29]
Suyun referans entropisi	$s_{H_2O}^o$	J/molK	69.9	[38]
Hidrojenin referans entropisi	$s_{H_2}^o$	J/molK	130.7	[38]
Oksijen referans entropisi	$s_{O_2}^o$	J/molK	205.1	[38]
Suyun oluşum entalpisi	$h_{H_2O}^o$	kJ/kmol	-285.5	[38]
Pompanın verimi	η_p	Boyutsuz	0.8	Kabul
PEM elektrolizör verimi	η_{PEM}	Boyutsuz	0.5-1	Kabul
Hidrojenin kimyasal ekserjisi	$\dot{E}_{H_2}^{kim}$	kJ/kg	117113	[30]
Oksijenin kimyasal ekserjisi	$\dot{E}_{O_2}^{kim}$	kJ/kg	124.451	[30]
Suyun kimyasal ekserjisi	\dot{E}_{ex,H_2O}^{kim}	kJ/kg	49.97	[30]

2.2.2.2 Ölçülebilen büyüklükler

Gerçekleştirilmiş olan bu parametrik çalışmada, bazı sabit büyüklükler literatürden alınmış ve çalışmalar bu sabit büyüklüklere göre sürdürülmüştür. Bu tez çalışmasına benzer nitelikte yapılabilecek deneysel çalışmalarda, bir önceki bölümdeki sabit büyüklükler dışında, sistemin farklı kısımlarında ölçülmesi gereken büyüklükler de bulunmaktadır.

Çizelge 2.2 Sistemdeki ölçülebilen büyüklükler

Ölçülebilen büyüklükler	Sembol	Birim	Değer
Hidrojenin kütleli debisi	\dot{m}_{H_2}	kg/saat	3
Saf suyun kütleli debisi	\dot{m}_{H_2O}	kg/h	27
Oksijenin kütleli debisi	\dot{m}_{O_2}	kg/h	24
Saf suyun I. Plakalı ısı eşanjörüne giriş sıcaklığı	T_{gss}^{P1}	K	293
Saf suyun I. Plakalı ısı eşanjöründen çıkış sıcaklığı	$T_{çss}^{P1}$	K	343-353
Komp. suyunun I. Plakalı ısı eşanjörüne giriş sıcaklığı	T_{gks}^{P1}	K	363
Komp. suyunun I. Plakalı ısı eşanjöründen çıkış sıcaklığı	$T_{çks}^{P1}$	K	298
Saf suyun pompa-motor sistemine giriş sıcaklığı	T_{gss}^{p-m}	K	343-353
Saf suyun pompa-motor sisteminden çıkış sıcaklığı	$T_{çss}^{p-m}$	K	343.1-355.2
Saf suyun pompa-motor sistemine giriş basıncı	P_{gss}^{p-m}	Bar	1
Saf suyun pompa-motor sisteminden çıkış basıncı	$P_{çss}^{p-m}$	Bar	1-200
Saf suyun PEM elektrolizöre giriş sıcaklığı	T_{H_2O}	K	343.1-355.2
Saf suyun PEM elektrolizöre giriş basıncı	P_{H_2O}	Bar	1-200
Hidrojenin PEM elektrolizörden çıkış sıcaklığı	T_{H_2}	K	343.1-355.2
Hidrojenin PEM elektrolizörden çıkış basıncı	P_{H_2}	Bar	1-200
Oksijenin PEM elektrolizörden çıkış sıcaklığı	T_{O_2}	K	343.1-355.2
Oksijenin PEM elektrolizörden çıkış basıncı	P_{O_2}	Bar	1-200
Hidrojenin II. Plakalı ısı eşanjörüne giriş sıcaklığı	T_{g,H_2}^{P2}	K	343.1-355.2
Hidrojenin II. Plakalı ısı eşanjörüne giriş basıncı	P_{g,H_2}^{P2}	Bar	1-200
Hidrojenin II. Plakalı ısı eşanjöründen çıkış sıcaklığı	$T_{ç,H_2}^{P2}$	K	298
Hidrojenin II. Plakalı ısı eşanjöründen çıkış basıncı	$P_{ç,H_2}^{P2}$	Bar	1-200
Komp. Suyunun Sir. Pompasına giriş-çıkış sıcaklığı	T_{gks}^{sp}	K	363
Komp. Suyunun Sir. Pompasına giriş-çıkış basıncı	P_{gks}^{sp}	Bar	1-3

2.2.2.3 Hesaplanabilen büyüklükler

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar sırasında kullanılan hesaplanabilen büyüklükler aşağıdaki gibidir.

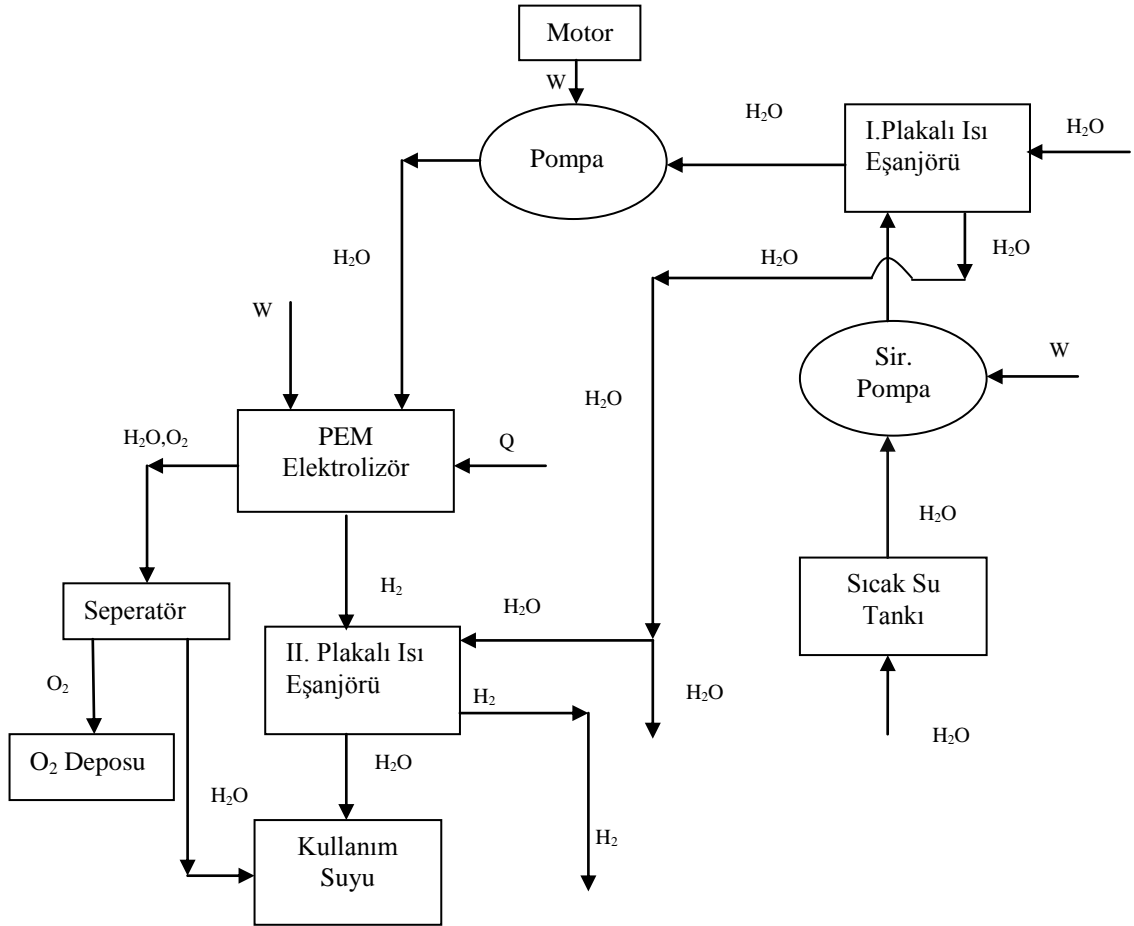
Çizelge 2.3 Sistemdeki hesaplanabilen büyüklükler

Hesaplanabilen büyüklükler	Sembol	Boyutsuz	Değer
Kompresör sisteminden gelen sıcak suyun debisi	\dot{m}_{gks}^{P1}	kg/h	Değişken
Saf suyun I. Plakalı ısı eşanjöründen alacağı ısı miktarı	\dot{Q}_{ss}^{P1}	kW	Değişken
Komp. suyunun I. Plakalı ısı eşanjörüne bırakacağı ısı miktarı	\dot{Q}_{ks}^{P1}	kW	Değişken
I. Plakalı ısı eşanjörün etkinliği	ε^{P1}	Boyutsuz	Değişken
Pompa-Motor sisteminin teorik işi	\dot{W}_t^{p-m}	kW	Değişken
Pompa-Motor sisteminin gerçek işi	\dot{W}_G^{p-m}	kW	Değişken
Hidrojenin debisi	\dot{m}_{H_2}	kg/h	Değişken
Oksijenin debisi	\dot{m}_{O_2}	kg/h	Değişken
Saf suyun debisi	\dot{m}_{H_2O}	kg/h	Değişken
PEM elektrolizör için gerekli olan iş miktarı	\dot{W}_{PEM}	kW	Değişken
PEM elektrolizör için gerekli olan ısı miktarı	\dot{Q}_{PEM}	kW	Değişken
PEM elektrolizör için gerekli olan entalpi voltajı	E_{PEM}	Volt	Değişken
II. Plakalı ısı eşanjörüne gelen komp. suyunun debisi	\dot{m}_{gks}^{P2}	kg/h	Değişken
Hidrojenin II. Plakalı ısı eşanjörüne bırakacağı ısı miktarı	$\dot{Q}_{H_2}^{P2}$	kW	Değişken
Komp. suyunun II. Plakalı ısı eşanjöründen alacağı ısı miktarı	\dot{Q}_{ks}^{P2}	kW	Değişken
Sirkülasyon pompasının teorik iş miktarı	\dot{W}_t^{sp}	kW	Değişken
Sirkülasyon pompasının gerçek iş miktarı	\dot{W}_G^{sp}	kW	Değişken
Tüm sistemin enerji verimi	$\eta_{enerji\ sis}$	Boyutsuz	Değişken
II.Plakalı ısı eşanjörün ekserji girişi	$\dot{E}_{ex,g}^{P1}$	kW	Değişken
I.Plakalı ısı eşanjörün ekserji çıkışı	$\dot{E}_{ex,\zeta}^{P1}$	kW	Değişken
I.Plakalı ısı eşanjörün ekserji verimi	η_{ex}^{P1}	Boyutsuz	Değişken
I.Plakalı ısı eşanjörün tersinmezliği	I^{P1}	kW	Değişken
Pompa-Motor sisteminin giriş ekserjisi	$\dot{E}_{ex,g}^{p-m}$	kW	Değişken
Pompa-Motor sisteminin çıkış ekserjisi	$\dot{E}_{ex,\zeta}^{p-m}$	kW	Değişken
Pompa-Motor sisteminin ekserji verimi	η_{ex}^{p-m}	Boyutsuz	Değişken
Pompa-Motor sisteminin tersinmezliği	I^{p-m}	kW	Değişken
PEM elektrolizörün giriş ekserjisi	$\dot{E}_{ex,g}^{PEM}$	kW	Değişken
PEM elektrolizörün çıkış ekserjisi	$\dot{E}_{ex,\zeta}^{PEM}$	kW	Değişken
Hidrojenin ekserjisi	\dot{E}_{ex,H_2}	kW	Değişken
Oksijenin ekserjisi	\dot{E}_{ex,O_2}	kW	Değişken

Çizelge 2.3' ün devamı

Suyun ekserjisi	\dot{E}_{ex,H_2O}	kW	Değişken
PEM elektrolizöre sağlanan ısının ekserjisi	$\dot{E}_{ex,ısı}^{PEM}$	kW	Değişken
PEM elektrolizörün ekserji verimi	η_{ex}^{PEM}	Boyutsuz	Değişken
PEM elektrolizörün tersinmezliği	I^{PEM}	kW	Değişken
II. Plakalı ısı eşanjörün giriş ekserjisi	$\dot{E}_{ex,g}^{P2}$	kW	Değişken
II. Plakalı ısı eşanjörün çıkış ekserjisi	$\dot{E}_{ex,c}^{P2}$	kW	Değişken
II. Plakalı ısı eşanjörün ekserji verimi	η_{ex}^{P2}	Boyutsuz	Değişken
II. Plakalı ısı eşanjörün tersinmezliği	I^{P2}	kW	Değişken
Sirkülasyon pompasının çıkış ekserjisi	$\dot{E}_{ex,c}^{sp}$	kW	Değişken
Sirkülasyon pompasının giriş ekserjisi	$\dot{E}_{ex,g}^{sp}$	kW	Değişken
Sirkülasyon pompasının tersinmezliği	I^{sp}	kW	Değişken
Sirkülasyon pompasının ekserji verimi	η_{ex}^{sp}	Boyutsuz	Değişken
Tüm sistemin ekserjetik verimi	η_{ex}^{sis}	Boyutsuz	Değişken
Sisteme giren toplam ekserji girişi	$\dot{E}_{ex,g}^{sis}$	kW	Değişken
Sistemin atık ekserji oranı	r_{aeo}^{sis}	Boyutsuz	Değişken
Ekserjetik yıkım faktörü	f_{exy}^{sis}	Boyutsuz	Değişken
Çevresel yıkım katsayısı	$C_{çyk}^{sis}$	Boyutsuz	Değişken
Çevresel yıkım katsayısı	$\theta_{çyi}^{sis}$	Boyutsuz	Değişken
Çevresel uyum indeksi	$\theta_{çui}^{sis}$	Boyutsuz	Değişken
Ekserjetik kararlılık faktörü	f_{exk}^{sis}	Boyutsuz	Değişken
Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi	θ_{exs}^{sis}	Boyutsuz	Değişken

2.2.3 Yüksek basınçlı hidrojen gazı üretim sisteminin akış şeması ve çalışma prensibi



Şekil 2.1 Yüksek basınçlı hidrojen üretim sisteminin şematik gösterimi ([32,33] numaralı kaynaklardan yararlanılarak tasarlanmış ve geliştirilmiştir)

Yukarıdaki sistem yüksek basınçlı hidrojen üretimi için tasarlanmıştır. Sistemin genel çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir. Saf su I. plakalı ısı eşanjörüne 20 °C ve 1 atm de girer ve PEM elektrolizörün çalışma sıcaklıkları olan 70, 75 ve 80 °C'ye kadar sıcaklığı artırılır. Saf suyun ısıtılması, yüksek basınçlı hidrojen sıkıştırma ve depolama sistemindeki kompresör ara soğutma aşamasından sağlanan 90 °C sıcaklığa sahip su ile yapılmaktadır. Isıtılan saf su yüksek basınçlı hidrojen üretimi için sistemdeki pompa-motor sistemi ünitesine gönderilir. Burada saf suyun basıncı artırılır. Basıncı artırılmış olan saf su, daha sonra elektroliz işlemine tabi tutulmak üzere PEM elektrolizöre gönderilir. PEM elektrolizörde saf su elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda bileşenleri olan oksijen ve hidrojen gazlarına ayrılır. Oluşan oksijen ve su ilk önce

seperatör ünitesinde ayrıştırılırlar. Seperatör ünitesinde ayrıştırılan su kullanım suyu deposuna gönderilir. Oksijen gazı ise, değişik amaçlarda kullanılmak üzere depolanır. Elde edilen yüksek basınçlı hidrojen gazının ısısı, sabit basınçta, II. plakalı ısı eşanjörü yardımıyla alındıktan sonra hidrojen gazı sıkıştırılmak ve depolanmak üzere kompresör ünitesine gönderilir. Burada hidrojeni soğutmak için sağlanan su, ilk aşamada saf suyun sıcaklığın artırmak için I. plakalı ısı eşanjörünü terk eden sıcaklığı düşük olan sudan sağlanmaktadır. Tasarlanan bu sistemde saatte 3 kg hidrojen gazı üretimi amaçlanmaktadır. Yüksek basınçlı hidrojen üretimi için tasarlanan bu sistem için gerekli olan elektrik gücü ise hidroelektrik santralden sağlanır.

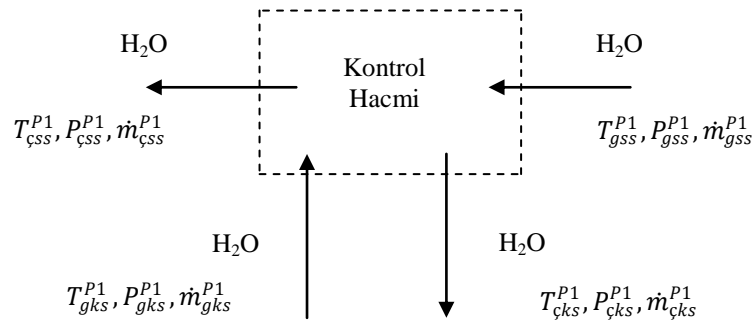
2.3 Termodinamik Çalışmalar

Termodinamik analiz çalışmaları kapsamında, yüksek basınçlı hidrojen üretim sistemini oluşturan ünitelerin ve sistemin termodinamik modellemesi ve sürdürülebilirlik analizi ayrıntılı olarak gerçekleştirilmiştir.

2.3.1 Yüksek basınçlı hidrojen gazı üretim sisteminin enerji analizi

Enerji analizi kapsamında sistemi oluşturan I. Plakalı ısı eşanjörün, Pompa-Motor sisteminin, PEM elektrolizörün, II. Plakalı ısı eşanjörün, sirkülasyon pompasının ve genel sistemin kapsamlı bir şekilde enerji analizleri yapılmıştır.

2.3.1.1 I. Plakalı ısı eşanjörünün enerji analizi



Şekil 2.2 I.Plakalı ısı eşanjörünün enerji etkileşim diyagramı

Sistemde kullanılmasının amacı; elektroliz olacak saf suyun sıcaklığını PEM elektrolizörün çalışma sıcaklığına (70, 75 ve 80 °C) yükseltmektir.

Sistemin sürekli akışlı sürekli açık (SASA) bir termodinamik sistem olarak kabul edilmesi durumunda kütle korunum ifadesi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{m}_{gks}^{P1} = \dot{m}_{\check{c}ks}^{P1} \quad \dot{m}_{gss}^{P1} = \dot{m}_{\check{c}ss}^{P1} \quad (2.1)$$

Saf suyun alacağı ısı miktarı [34];

$$\dot{Q}_{ss}^{P1} = \dot{m}_{gss}^{P1} C_p^{P1} (T_{\check{c}ss}^{P1} - T_{gss}^{P1}) \quad (2.2)$$

Kompresör ara soğutmadan gelen sıcak suyun, elektroliz işlemine tabi tutulacak olan saf suya bırakacağı ısı miktarı [34] ;

$$\dot{Q}_{ks}^{P1} = \dot{m}_{gks}^{P1} C_p^{P1} (T_{gks}^{P1} - T_{\check{c}ks}^{P1}) \quad (2.3)$$

Denklem 2.2 ve 2.3' ten yararlanılarak sıcak suyun debisi aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$\dot{m}_{gks}^{P1} C_p^{P1} (T_{gks}^{P1} - T_{\check{c}ks}^{P1}) = \dot{m}_{gss}^{P1} C_p^{P1} (T_{\check{c}ss}^{P1} - T_{gss}^{P1}) \quad (2.4)$$

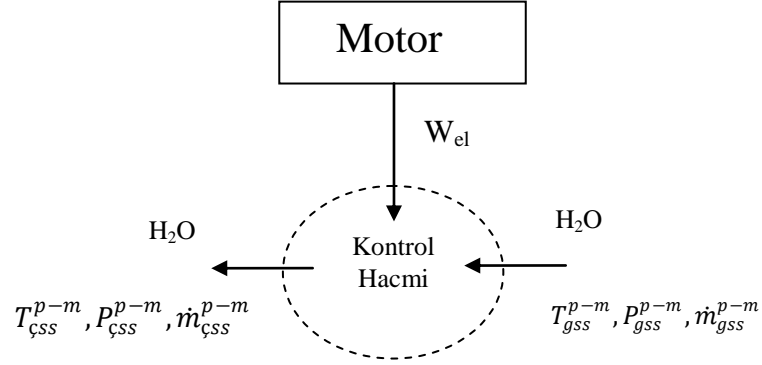
$$\frac{\dot{m}_{gks}^{P1}}{\dot{m}_{gss}^{P1}} = \frac{C_p^{P1} (T_{\check{c}ss}^{P1} - T_{gss}^{P1})}{C_p^{P1} (T_{gks}^{P1} - T_{\check{c}ks}^{P1})} \quad (2.5)$$

$$\dot{m}_{gks}^{P1} = \frac{\dot{m}_{gss}^{P1} C_p^{P1} (T_{\check{c}ss}^{P1} - T_{gss}^{P1})}{C_p^{P1} (T_{gks}^{P1} - T_{\check{c}ks}^{P1})} \quad (2.6)$$

\dot{m}_{gss}^{P1} ; I. plakalı ısı eşanjörüne giren saf suyun debisi (kg/saat), \dot{m}_{gks}^{P1} ; kompresör ara soğutma ünitesinden gelen sıcak suyun suyun debisi (kg/saat) (sıcak su tankındaki suyun debisi sirkülasyon pompası tarafından istenilen değerlerde ayarlanacaktır.), C_p^{P1} ; saf suyun özgül ısı değeri (kJ/kgK), C_p^{P1} ; kompresör ara

soğutma ünitesinden gelen suyun özgül ısı değeri (kJ/kgK), $T_{gss}^{P1}, T_{çss}^{P1}$; saf suyun eşanjöre giriş ve çıkış sıcaklıkları (K), $T_{gks}^{P1}, T_{çks}^{P1}$; kompresör ara soğutma ünitesinden gelen suyun giriş ve çıkış sıcaklıkları (K).

2.3.1.2 Pompa-Motor sisteminin enerji analizi



Şekil 2.3 Pompa-Motor sisteminin enerji etkileşim diyagramı

Sistemde kullanılmasının amacı; yüksek basınçlı hidrojen üretimi için elektrolizöre gönderilecek olan saf suyun basıncını sabit sıcaklıkta artırmaktır.

Pompa-Motor sisteminin kütle korunumu ifadesi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{m}_{gss}^{p-m} = \dot{m}_{çss}^{p-m} \quad (2.7)$$

Pompanın çalışması izantropik düşünülmüştür.

$$s_{gss}^{p-m} = s_{çss}^{p-m} \quad (2.8)$$

Pompanın enerji korunum ifadesi [34];

$$\dot{Q}^{p-m} - \dot{W}^{p-m} = \sum \dot{m}_{çss}^{p-m} \left(h_{çss}^{p-m} + \frac{v_{çss}^{p-m 2}}{2} + gz_{çss}^{p-m} \right) - \sum \dot{m}_{gss}^{p-m} \left(h_{gss}^{p-m} + \frac{v_{gss}^{p-m 2}}{2} + gz_{gss}^{p-m} \right) \quad (2.9)$$

Pompanın teorik iş ifadesi [34];

$$\dot{W}_t^{p-m} = \dot{m}_{gss}^{p-m} v_{f,gss} (P_{css}^{p-m} - P_{gss}^{p-m}) = \dot{m}_{gss}^{p-m} (h_{2s} - h_{gss}^{p-m}) \quad (2.10)$$

Pompanın gerçek iş ifadesi [34];

$$\dot{W}_G^{p-m} = \frac{\dot{W}_t^{p-m}}{\eta} \quad (2.11)$$

$$\dot{W}_G^{p-m} = \dot{m}_{gss}^{p-m} (h_{2a} - h_{gss}^{p-m}) \quad (2.12)$$

\dot{W}_t^{p-m} ; pompanın teorik işi (kW), \dot{m}_{gss}^{p-m} ; pompaya giren saf suyu debisi (kg/saat), h_{gss}^{p-m} ; saf suyun pompaya giriş entalpisi (kJ/kg), $v_{f,gss}$; sıcaklık ve basınca göre saf suyun özgül hacmi (m^3/kg), \dot{W}_G^{p-m} ; pompanın gerçek işi (kW), η ; pompanın verimi (Sistemde kullanacağımız pompanın verimi 0,8 kabul edildi), h_{2a} ; pompanın gerçek çalışma şartları sonunda saf suyun entalpi değeri (kJ/kg), h_{2s} ; pompanın teorik çalışma şartları sonunda saf suyun entalpi değeri (kJ/kg).

Bu denklemde bulunan h_{2a} ve h_{2s} değerine karşılık gelen sıcaklık değerleri termodinamik tablolardan bulunur. Bulunan sıcaklık değeri, saf suyun pompada sıkıştırma aşamasında kazanmış olduğu ısıdan kaynaklanmaktadır.

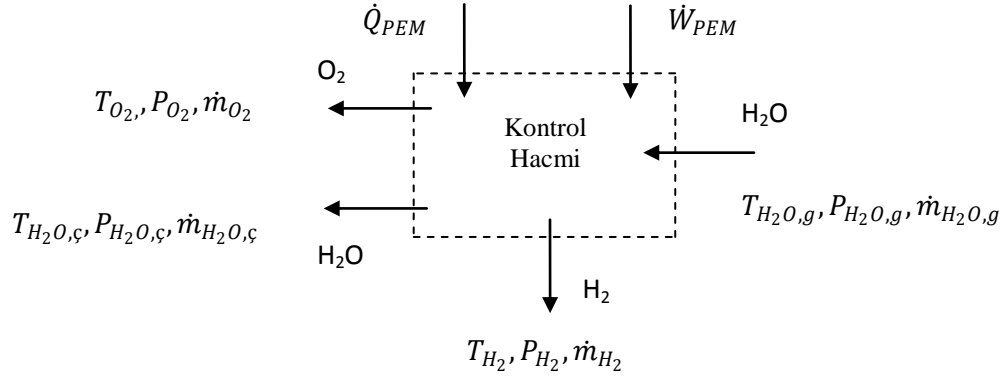
2.3.1.3 PEM (Proton Exchange Membrane) elektrolizörün enerji analizi

Bu çalışmada yüksek basınçlı hidrojeni elde etmek için yüksek basınçlı PEM elektrolizör kullanılmıştır. Öncelikle, elektrolitik hidrojen üretimi için teorik olarak gerekli enerji ihtiyacını belirlemek gerekir. Bilindiği üzere, yüksek basınçlı PEM elektroliz işlemi için gerekli toplam enerji ihtiyacı [31].

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (2.13)$$

şeklinde hesaplanır. Bu denklemde, ΔG ; PEM elektrolizörün elektrik enerjisi ihtiyacı, $T\Delta S$; PEM elektrolizörün termal enerji ihtiyacını gösterir.

PEM elektrolizörün sistemde kullanılmasının amacı; basıncı artırılmış olana saf suyu elektrokimyasal yolla elektroliz ederek yüksek basınçlı hidrojen gazı elde etmektir.



Şekil 2.4 PEM elektrolizörün enerji etkileşim diyagramı

Sistemde meydana gelen toplam kimyasal reaksiyon [35];



PEM elektrolizörün kütle dengesi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{H_2O,s} + \dot{m}_{H_2} = \dot{m}_{H_2O,g} \quad (2.14)$$

PEM Elektrolizör ünitesinden elde edilecek hidrojenin debi hesabı [35];

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{J}{2F} \quad (2.15)$$

Tasarlanan bu sistemden saatte 3 kg hidrojen elde edilecektir.

J: Sisteme uygulanması gereken akım yoğunluğu

F; Faraday sabiti F=96485 C/mol

Sistemden çıkacak olan suyun debisi [35];

$$\dot{m}_{H_2O,çıkış} = \dot{m}_{H_2O,giriş} - \frac{J}{2F} \quad (2.16)$$

Sistemden çıkacak olan oksijenin debisi [35];

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{J}{4F} \quad (2.17)$$

PEM elektrolizöre verilmesi gereken elektrik miktarı (ΔG) [36];

$$\begin{aligned} \dot{W}_{PEM} = & \dot{m}_{H_2} \left[T_{H_2} \left(s_{H_2}^o + c_{H_2} \ln \left(\frac{T_{H_2}}{298} \right) - ZR \ln \left(\frac{P_{H_2}}{1 \text{atm}} \right) \right) - c_{H_2} (T_{H_2} - 298) \right] \\ & + \dot{m}_{O_2} \left[T_{O_2} \left(s_{O_2}^o + c_{O_2} \ln \left(\frac{T_{O_2}}{298} \right) - ZR \ln \left(\frac{P_{O_2}}{1 \text{atm}} \right) \right) - c_{O_2} (T_{O_2} - 298) \right] \\ & - \dot{m}_{H_2O} \left[T_{H_2O} \left(s_{H_2O}^o + c_{H_2O} \ln \left(\frac{T_{H_2O}}{298} \right) \right) - (h_{H_2O}^o + c_{H_2O} (T_{H_2O} - 298)) \right] \end{aligned} \quad (2.18)$$

T_2 ; PEM elektrolizörün çalışma sıcaklığı (K), P_2 ; PEM elektrolizörün çalışma basıncı (bar), c_{O_2} , c_{H_2} , c_{H_2O} ; oksijenin, hidrojenin ve suyun sıcaklık ve basınca göre özgül ısı değerleri (J/gK), $s_{O_2}^o$, $s_{H_2}^o$, $s_{H_2O}^o$; oksijenin, hidrojenin ve suyun oluşum entropileri (J/gK), \dot{m}_{O_2} , \dot{m}_{H_2} , \dot{m}_{H_2O} ; oksijenin, hidrojenin ve suyun PEM elektrolizöre giriş ve çıkış debileri (kg/saat), $S_{g,PEM}$; sistemin genel entropi değişimi, Z ; hidrojen ve oksijenin sıkıştırılabilme faktörü. Sistemden elde edilen hidrojen ve oksijen gazları gerçek gaz özellikleri göstermektedir. Dolayısıyla bu gazların hesabı yapılırken sıkıştırılabilme faktörü dikkate alınmalıdır.

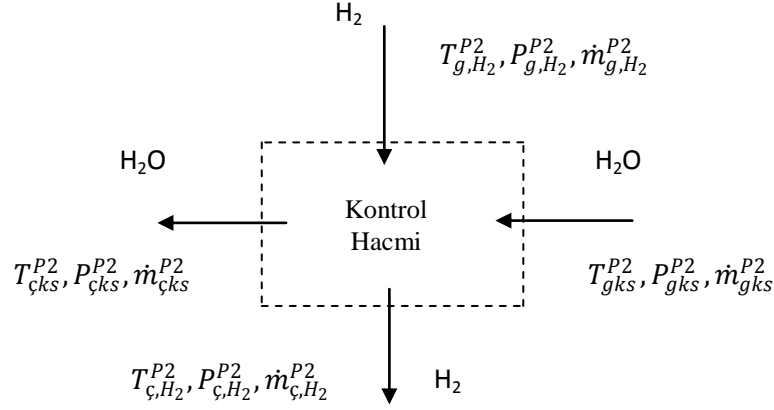
PEM elektrolizörün termal enerji ihtiyacı ($T\Delta S$) [36];

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{PEM} = & \dot{m}_{H_2O} \left(-h_{H_2O}^o - c_{H_2O} (T_{H_2O} - 298) \right) + \dot{m}_{H_2} \left(c_{H_2} (T_{H_2} - 298) \right) \\ & + \dot{m}_{O_2} \left(0,5c_{O_2} (T_{O_2} - 298) \right) + \dot{W}_{PEM} \end{aligned} \quad (2.19)$$

PEM Elektrolizör için gerekli olan entalpi voltaj değeri [37];

$$E_{PEM} = -\frac{\Delta G}{nF} = -\frac{\dot{W}_{PEM}}{2F} \quad (2.20)$$

2.3.1.4 II. Plakalı ısı eşanjörünün enerji analizi



Şekil 2.5 II. Plakalı ısı eşanjörün enerji etkileşim diyagramı

Sistemde kullanılmasının amacı; PEM elektrolizör ünitesinden edilen hidrojenin sıkıştırma aşamasına geçmeden önce sıcaklığının sistem çalışma sıcaklığından ortam sıcaklığına düşürmektir.

II. plakalı ısı eşanjörünün kütle korunumu ifadesi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{m}_{g,H_2}^{P2} = \dot{m}_{\zeta,H_2}^{P2} \quad \dot{m}_{g,ks}^{P2} = \dot{m}_{\zeta,ks}^{P2} \quad (2.21)$$

PEM elektrolizör ünitesinde üretilen yüksek basınçlı hidrojenin II. plakalı ısı eşanjörüne bırakacağı ısı miktarı;

$$\dot{Q}_{H_2}^{P2} = \dot{m}_{g,H_2}^{P2} C_{p,g,H_2}^{P2} (T_{g,H_2}^{P2} - T_{\zeta,H_2}^{P2}) \quad (2.22)$$

Saf suyu ısıtmak için kullanılan suyun, ısısını bıraktıktan sonra hidrojeni soğutmak için plakalı ısı eşanjöründen alacağı ısı miktarı;

$$\dot{Q}_{ks}^{P2} = \dot{m}_{g,ks}^{P2} C_{p,g,ks}^{P2} (T_{\zeta,ks}^{P2} - T_{g,ks}^{P2}) \quad (2.23)$$

$$\dot{m}_{g,ks}^{P2} C_{p,g,ks}^{P2} (T_{\zeta,ks}^{P2} - T_{g,ks}^{P2}) = \dot{m}_{g,H_2}^{P2} C_{p,g,H_2}^{P2} (T_{g,H_2}^{P2} - T_{\zeta,H_2}^{P2}) \quad (2.24)$$

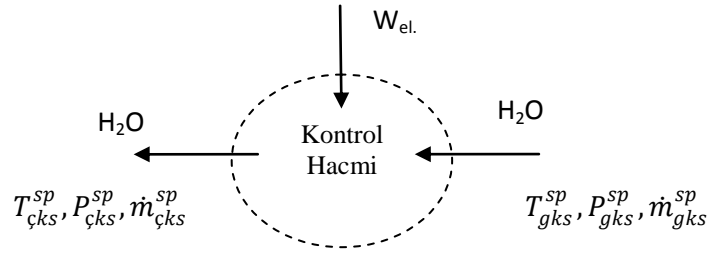
$$\frac{\dot{m}_{gks}^{P2}}{\dot{m}_{g,H_2}^{P2}} = \frac{C_{p,g,H_2}^{P2} (T_{g,H_2}^{P2} - T_{\check{c},H_2}^{P2})}{C_{p,gks}^{P2} (T_{\check{c}ks}^{P2} - T_{gks}^{P2})} \quad (2.25)$$

II. plakalı ısı eşanjörüne verilecek olan suyun debisi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\dot{m}_{gks}^{P2} = \frac{\dot{m}_{g,H_2}^{P2} C_{p,g,H_2}^{P2} (T_{g,H_2}^{P2} - T_{\check{c},H_2}^{P2})}{C_{p,gks}^{P2} (T_{\check{c}ks}^{P2} - T_{gks}^{P2})} \quad (2.26)$$

\dot{m}_{gks}^{P2} ; II. plakalı ısı eşanjörüne giren kompresör suyu (kg/saat), \dot{m}_{g,H_2}^{P2} ; PEM elektrolizör ünitesinden gelen yüksek basınçlı sıcak hidrojen gazının debisi (kg/saat), $C_{p,gks}^{P2}$; II. plakalı ısı eşanjörüne gelen kompresör suyunun özgül ısı değeri (kJ/kgK), C_{p,g,H_2}^{P2} ; PEM elektrolizör ünitesinden gelen hidrojenin özgül ısı değeri (J/gK), $T_{g,H_2}^{P2}, T_{\check{c},H_2}^{P2}$; hidrojen gazının II. plakalı ısı eşanjörüne giriş ve çıkış sıcaklıkları (K), $(T_{gks}^{P2}, T_{\check{c}ks}^{P2})$; kompresör suyunun II. plakalı ısı eşanjörüne giriş ve çıkış sıcaklıkları (K).

2.3.1.5 Sirkülasyon pompasının enerji analizi



Şekil 2.6 Sirkülasyon pompasının enerji etkileşim diyagramı

Sistemde kullanılmasının amacı; I. Plakalı ısı eşanjörüne giden kompresör ara soğutma ünitesinden gelen sıcak suyun sirkülasyonunu sağlamaktır.

Sirkülasyon pompasının kütle korunumu ifadesi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{m}_{gks}^{sp} = \dot{m}_{\check{c}ks}^{sp} \quad (2.27)$$

Sirkülasyon pompasının çalışması izantropik düşünülmüştür.

$$s_{gks}^{sp} = s_{\check{c}ks}^{sp} \quad (2.28)$$

Sirkülasyon pompasının enerji korunum ifadesi [34];

$$\dot{Q}^{sp} - \dot{W}^{sp} = \sum \dot{m}_{\check{c}ks}^{sp} \left(h_{\check{c}ks}^{sp} + \frac{V_{\check{c}ks}^{2sp}}{2} + gz_{\check{c}ks}^{sp} \right) - \sum \dot{m}_{gks}^{sp} \left(h_{gks}^{sp} + \frac{V_{gks}^{2sp}}{2} + gz_{gks}^{sp} \right) \quad (2.29)$$

Sirkülasyon pompasının teorik iş ifadesi;

$$\dot{W}_t^{sp} = \dot{m}_{gks}^{sp} v_{f,gks} (P_{\check{c}ks}^{sp} - P_{gks}^{sp}) = \dot{m}_{gks}^{sp} (h_{2s} - h_{gks}^{sp}) \quad (2.30)$$

Sirkülasyon pompasının gerçek iş ifadesi;

$$\dot{W}_G^{sp} = \frac{\dot{W}_t^{sp}}{\eta} \quad (2.31)$$

$$\dot{W}_G^{sp} = \dot{m}_{gks}^{sp} (h_{2a} - h_{gks}^{sp}) \quad (2.32)$$

\dot{W}_t^{sp} ; sirkülasyon pompasının teorik işi (kW), \dot{m}_{gks}^{sp} ; kompresör ara soğutma ünitesinden gelen sıcak suyu debisi (kg/saat), h_{gks}^{sp} ; kompresör ara soğutma ünitesinden gelen sıcak suyun giriş entalpisi (kJ/kg), $v_{f,gks}$; sıcaklık ve basınca göre kompresör suyunun özgül hacmi (m^3/kg), \dot{W}_G^{sp} ; sirkülasyon pompasının gerçek işi (kW), η ; sirkülasyon pompasının verimi (sistemde kullanacağımız sirkülasyon pompasının verimi 0.8 kabul edildi), h_{2a} ; sirkülasyon pompasının gerçek çalışma şartları sonunda saf suyun entalpi değeri (kJ/kg), h_{2s} ; sirkülasyon pompasının teorik çalışma şartları sonunda saf suyun entalpi değeri (kJ/kg).

2.3.1.6 Tüm sistemin enerji analizi

Tüm sistemin genel enerji verim ifadesi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\eta_{enerji\ sis} = \frac{Gaye}{Bedel} \quad (2.33)$$

$$\eta_{enerji\ sis} = \frac{\dot{m}_{H_2} [LHV_{H_2} + (h_{H_2} - h_o^{H_2})]}{\dot{W}_{PEM} + \dot{W}_G^{p-m} + \dot{W}_G^{sp} + \dot{Q}_{PEM} + \dot{Q}^{P1}} \quad (2.34)$$

\dot{W}_{PEM} : PEM elektrolizöre verilen iş miktarı (kW).

\dot{W}_G^{p-m} : Pompa-motor sistemine verilen gerçek iş miktarı (kW).

\dot{W}_G^{sp} : Sirkülasyon pompasına verilen gerçek iş miktarı (kW).

\dot{Q}_{PEM} : PEM elektrolizöre verilen ısı miktarı (kW).

\dot{Q}^{P1} : I. Plakalı ısı eşanjörünün ısıtma yükü (kW).

LHV_{H_2} : Hidrojenin alt ısı değeri (120.7 MJ/kg).

\dot{m}_{H_2} : PEM elektrolizörden elde edilen hidrojen miktarı (kg/saat) (bu çalışmada sistemden elde edilen hidrojen miktarı 3 kg/saat olarak sabit kabul edilmiştir).

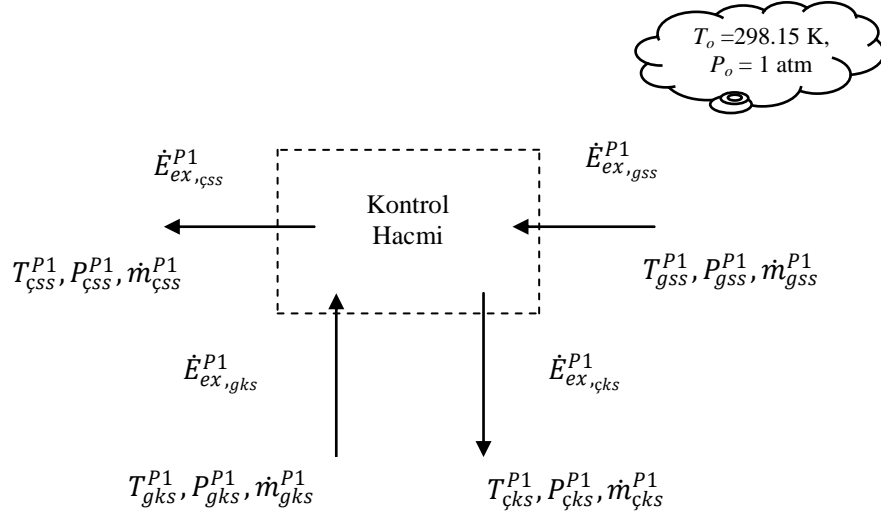
h_{H_2} : Sistemden çıkan hidrojenin 25 °C sıcaklıkta ve çalışma basıncındaki entalpi değeri (kJ/kg).

$h_o^{H_2}$: Hidrojenin 25 °C sıcaklıkta ve 1 atm basınçtaki entalpisi (kJ/kg).

2.3.2 Yüksek basınçlı hidrojen gazı üretim sisteminin ekserji analizi

Ekserji analizi kapsamında sistemi oluşturan I. plakalı ısı eşanjörün, pompa-motor sisteminin, PEM elektrolizörün, II. plakalı ısı eşanjörün, sirkülasyon pompasının ve genel sistemin kapsamlı bir şekilde ekserji analizleri yapılmıştır.

2.3.2.1 I.Plakalı ısı eşanjörünün ekserji analizi



Şekil 2.7 I. Plakalı ısı eşanjörün ekserji etkileşim diyagramı

Genel ekserji ifadesi aşağıdaki gibi yazılır [38];

$$\dot{E}_{ex} = \dot{E}_{ex}^{fiz} + \dot{E}_{ex}^{kim} \quad (2.35)$$

I. plakalı ısı eşanjörün ekserji dengesini aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{E}_{ex,g}^{P1} = \dot{E}_{ex,\ç}^{P1} \quad (2.36)$$

$$\dot{E}_{ex,g}^{P1} = \dot{E}_{ex,gss}^{P1} + \dot{E}_{ex,gks}^{P1} \quad (2.37)$$

$$\dot{E}_{ex,\ç}^{P1} = \dot{E}_{ex,\çss}^{P1} + \dot{E}_{ex,\çks}^{P1} \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} & \dot{m}_{gss}^{P1} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{gss} \\ & + \dot{m}_{gks}^{P1} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{gks} \\ & = \dot{m}_{\çss}^{P1} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{\çss} \\ & + \dot{m}_{\çks}^{P1} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{\çks} \end{aligned} \quad (2.39)$$

h ; sıcaklık ve basınca göre suyun entalpi değeri (kJ/kg), h_o ; suyun 1 atm 25 °C'deki entalpisi (kJ/kg), s ; sıcaklık ve basınca göre suyun entropisi (J/gK), s_o ; suyun 1 atm 25°C'deki entropisi (J/gK), \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} ; suyun kimyasal ekserjisi (kJ/kg).

I. plakalı ısı eşanjörün genel ekserji verimi aşağıdaki gibi yazılır [38].

$$\eta_{ex}^{P1} = \frac{E_{ex,c,\zeta} - E_{ex,c,g}}{E_{ex,h,g} - E_{ex,h,\zeta}} = \frac{\dot{E}_{ex,\zeta ss}^{P1} - \dot{E}_{ex,gss}^{P1}}{\dot{E}_{ex,gks}^{P1} - \dot{E}_{ex,\zeta ks}^{P1}} \quad (2.40)$$

2.40 nolu denklemde değerler yerine yazılırsa;

$$\eta_{ex}^{P1} = \frac{\left[\dot{m}_{\zeta ss}^{P1} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{H_2O}^{kim} \right)_{\zeta ss} - \dot{m}_{gss}^{P1} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{H_2O}^{kim} \right)_{gss} \right]}{\left[\dot{m}_{gks}^{P1} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{H_2O}^{kim} \right)_{gks} - \dot{m}_{\zeta ks}^{P1} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{H_2O}^{kim} \right)_{\zeta ks} \right]}$$

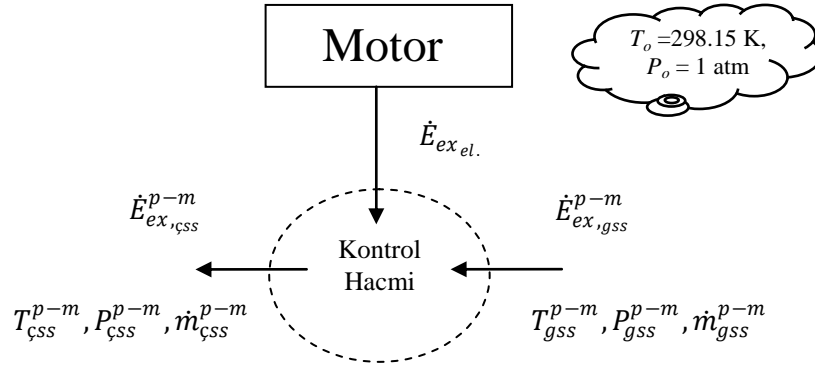
I. plakalı ısı eşanjörün genel ekserji verimi ifadesi elde edilir.

I. plakalı ısı eşanjörün toplam tersinmezliği aşağıdaki gibi yazılır.

$$I^{P1} = \dot{E}_{ex,gss}^{P1} + \dot{E}_{ex,gks}^{P1} - \dot{E}_{ex,\zeta ss}^{P1} - \dot{E}_{ex,\zeta ks}^{P1} \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned} I^{P1} &= \dot{m}_{gss}^{P1} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{gss} \\ &+ \dot{m}_{gks}^{P1} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{gks} \\ &- \dot{m}_{\zeta ss}^{P1} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{\zeta ss} \\ &- \dot{m}_{\zeta ks}^{P1} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{\zeta ks} \end{aligned} \quad (2.42)$$

2.3.2.2 Pompa-Motor sisteminin ekserji analizi



Şekil 2.8 Pompa-Motor sisteminin ekserji etkileşim diyagramı

Pompa-Motor sisteminin genel ekserji ifadesi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{E}_{ex,g}^{p-m} = \dot{E}_{ex,\zeta}^{p-m} \quad (2.43)$$

$$\dot{E}_{ex,\zeta}^{p-m} = \dot{E}_{ex,\zeta SS}^{p-m} \quad (2.44)$$

$$\dot{E}_{ex,g}^{p-m} = \dot{E}_{ex,el.} + \dot{E}_{ex,gSS}^{p-m} \quad (2.45)$$

$$\dot{E}_{ex,el.} = \dot{W}_G^{p-m} \quad (2.46)$$

$$\dot{E}_{ex,gSS}^{p-m} = \dot{m}_{gSS}^{p-m} \left((h - h_0) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{gSS} \quad (2.47)$$

$$\dot{E}_{ex,\zeta SS}^{p-m} = \dot{m}_{\zeta SS}^{p-m} \left((h - h_0) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{\zeta SS} \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} & \dot{m}_{gSS}^{p-m} \left((h - h_0) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{gSS} + \dot{W}_G^{p-m} \\ & = \dot{m}_{\zeta SS}^{p-m} \left((h - h_0) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{\zeta SS} \end{aligned} \quad (2.49)$$

h ; sıcaklık ve basınca göre suyun entalpi değeri, h_0 ; suyun oluşum entalpisi, s ; sıcaklık

ve basınca göre suyun entropisi, s_o ; suyun oluşum entropisi, \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} ; suyun kimyasal ekserjisi (kJ/kg).

Pompa-Motor sisteminin ekserji verimi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\eta_{ex}^{p-m} = \frac{\dot{E}_{ex,\zeta}^{p-m}}{\dot{E}_{ex,g}^{p-m}} = \frac{\dot{E}_{ex,\zeta_{SS}}^{p-m}}{\dot{E}_{ex,el.} + \dot{E}_{ex,g_{SS}}^{p-m}} \quad (2.50)$$

Pompa-Motor sisteminin toplam tersinmezliği aşağıdaki gibi yazılır.

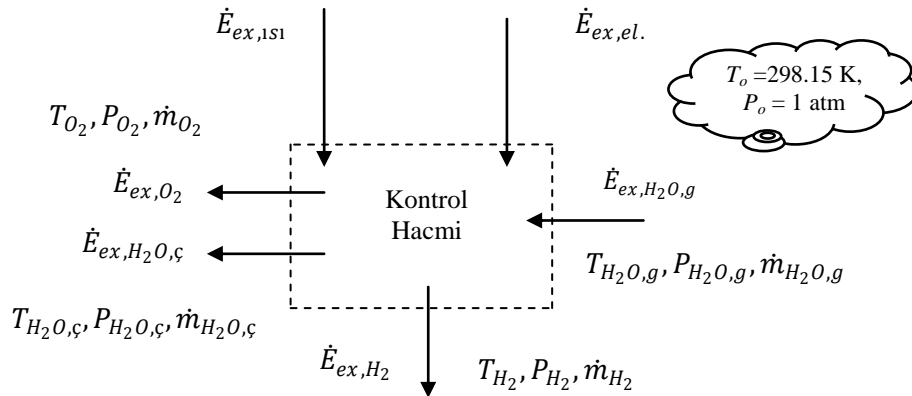
$$I = \dot{E}_{ex,g} - \dot{E}_{ex,\zeta} \quad (2.51)$$

$$I^{p-m} = \dot{E}_{ex,g}^{p-m} - \dot{E}_{ex,\zeta}^{p-m} \quad (2.52)$$

$$I^{p-m} = \dot{E}_{ex,el.} + \dot{E}_{ex,g_{SS}}^{p-m} - \dot{E}_{ex,\zeta_{SS}}^{p-m} \quad (2.53)$$

$$I^{p-m} = \dot{m}_{g_{SS}}^{p-m} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{g_{SS}} + W_G^{p-m} - \dot{m}_{\zeta_{SS}}^{p-m} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{\zeta_{SS}} \quad (2.54)$$

2.3.2.3 PEM (Proton Exchange Membrane) elektrolizörün ekserji analizi



Şekil 2.9 PEM elektrolizörün ekserji etkileşim diyagramı

PEM elektrolizörün ekserji dengesi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{E}_{ex,g} = \dot{E}_{ex,\zeta} \quad (2.55)$$

$$\dot{E}_{ex,g}^{PEM} = \dot{E}_{ex,1s1}^{PEM} + \dot{E}_{ex,el}^{PEM} + \dot{E}_{ex,H_2O,g} \quad (2.56)$$

$$\dot{E}_{ex,\zeta}^{PEM} = \dot{E}_{ex,H_2} + \dot{E}_{ex,O_2} + \dot{E}_{ex,H_2O,\zeta} \quad (2.57)$$

(2.55) ve (2.56) nolu denklemde ki parametreler aşağıdaki gibi yazılır [24].

$$\dot{E}_{ex,1s1}^{PEM} = \left(1 - \frac{T_o}{T}\right) \dot{Q}_{PEM,1s1} \quad (2.58)$$

$$\dot{E}_{ex,el}^{PEM} = \dot{W}_{PEM} \quad (2.59)$$

PEM elektrolizörün genel ekserji ifadesi [38];

$$\dot{E}_{ex} = \dot{E}_{ex}^{fiz} + \dot{E}_{ex}^{kim} \quad (2.60)$$

$$\dot{E}_{ex}^{fiz} = (h - h_o) - T_o(s - s_o) \quad (2.61)$$

PEM elektrolizörden çıkan hidrojenin toplam ekserjisi;

$$\dot{E}_{ex,H_2} = \dot{m}_{H_2} \left[((h - h_o) - T_o(s - s_o))_{H_2} + \dot{E}_{H_2}^{kim} \right] \quad (2.62)$$

PEM elektrolizörde çıkan oksijenin toplam ekserjisi;

$$\dot{E}_{ex,O_2} = \dot{m}_{O_2} \left[((h - h_o) - T_o(s - s_o))_{O_2} + \dot{E}_{O_2}^{kim} \right] \quad (2.63)$$

PEM elektrolizöre giren suyun toplam ekserjisi;

$$\dot{E}_{ex,H_2O,g} = \dot{m}_{H_2O,g} \left[((h - h_o) - T_o(s - s_o))_{H_2O} + \dot{E}_{H_2O}^{kim} \right]_g \quad (2.64)$$

PEM elektrolizörde çıkan suyun toplam ekserjisi;

$$\dot{E}_{ex,H_2O,\zeta} = \dot{m}_{H_2O,\zeta} \left[((h - h_o) - T_o(s - s_o))_{H_2O} + \dot{E}_{H_2O}^{kim} \right]_{\zeta} \quad (2.65)$$

PEM elektrolizörün genel ekserji dengesi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{E}_{ex,g} = \dot{E}_{ex,\zeta} \quad (2.66)$$

$$\begin{aligned} & \dot{m}_{H_2O,g} \left[((h - h_o) - T_o(s - s_o))_{H_2O} + \dot{E}_{H_2O}^{kim} \right]_g + \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) \dot{Q}_{PEM,ISI} + \dot{W}_{PEM} \\ & = \dot{m}_{O_2} \left[((h - h_o) - T_o(s - s_o))_{O_2} + \dot{E}_{O_2}^{kim} \right] + \dot{m}_{H_2} \left[((h - h_o) - T_o(s - s_o))_{H_2} + \dot{E}_{H_2}^{kim} \right] \\ & + \dot{m}_{H_2O,\zeta} \left[((h - h_o) - T_o(s - s_o))_{H_2O} + \dot{E}_{H_2O}^{kim} \right]_{\zeta} \end{aligned} \quad (2.67)$$

T_o ; çevre sıcaklığı (25 °C) , \dot{m}_{H_2} , \dot{m}_{O_2} ve \dot{m}_{H_2O} ; hidrojenin, oksijenin ve suyun debileri (kg/saat), $\dot{E}_{H_2}^{kim}$; hidrojenin kimyasal ekserjisi (kJ/kg) , $\dot{E}_{O_2}^{kim}$; oksijenin kimyasal ekserjisi (kJ/kg), $\dot{E}_{H_2O}^{kim}$; suyun kimyasal ekserjisi (kJ/kg) , s_o ; hidrojenin, oksijenin ve suyun 1atm 25 °C deki entropisi (J/gK), h_o ; hidrojenin, oksijenin ve suyun 1atm 25 °C deki entalpisi (kJ/kg), h ; hidrojenin, oksijenin ve suyun çalışma sıcaklığı ve basıncına göre entalpisi (kJ/kg), s ; hidrojenin, oksijenin ve suyun çalışma sıcaklığı ve basıncına göre entropisi (J/gK).

PEM elektrolizörün ekserji verimi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\eta_{ex}^{PEM} = \frac{\dot{E}_{ex,H_2}}{\dot{E}_{ex,ISI}^{PEM} + \dot{E}_{ex,el}^{PEM} + \dot{E}_{ex,H_2O}} \quad (2.68)$$

\dot{E}_{ex,H_2} ; elektrolizör ünitesinden çıkan hidrojenin ekserjisi (kW), $\dot{E}_{ex,ISI}^{PEM}$; elektrolizör ünitesine verilen ısının ekserjisi (kW), \dot{E}_{ex,H_2O} ; elektrolizör ünitesine giren suyun ekserjisi (kW), $\dot{E}_{ex,el}^{PEM}$; elektrolizör ünitesine verilen elektrik işinin ekserjisi (kW).

Genel tersinmezlik ifadesi;

$$I = \dot{E}_{ex,g} - \dot{E}_{ex,\zeta} \quad (2.69)$$

PEM elektrolizörün toplam tersinmezlikleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$I^{PEM} = \dot{E}_{ex,g}^{PEM} - \dot{E}_{ex,\zeta}^{PEM} \quad (2.70)$$

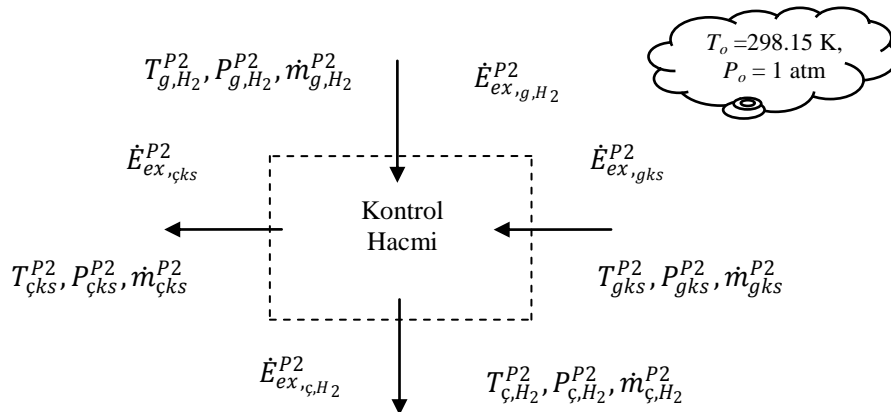
$$\dot{E}_{ex,g}^{PEM} = \dot{E}_{ex,ns1}^{PEM} + \dot{E}_{ex,el}^{PEM} + \dot{E}_{ex,H_2O,g} \quad (2.71)$$

$$\dot{E}_{ex,\zeta}^{PEM} = \dot{E}_{ex,H_2} + \dot{E}_{ex,O_2} + \dot{E}_{ex,H_2O,\zeta} \quad (2.72)$$

$$I^{PEM} = \dot{E}_{ex,ns1}^{PEM} + \dot{E}_{ex,el}^{PEM} + \dot{E}_{ex,H_2O,g} - \dot{E}_{ex,H_2} - \dot{E}_{ex,O_2} - \dot{E}_{ex,H_2O,\zeta} \quad (2.73)$$

$$\begin{aligned} I^{PEM} = & \dot{m}_{H_2O,g} \left[\left((h - h_o) - T_o(s - s_o) \right)_{H_2O} + \dot{E}_{H_2O}^{kim} \right]_g + \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) \dot{Q}_{PEM,ns1} + W_{PEM} \\ & - \dot{m}_{O_2} \left[\left((h - h_o) - T_o(s - s_o) \right)_{O_2} + \dot{E}_{O_2}^{kim} \right] - \dot{m}_{H_2} \left[\left((h - h_o) - T_o(s - s_o) \right)_{H_2} + \dot{E}_{H_2}^{kim} \right] \\ & - \dot{m}_{H_2O,\zeta} \left[\left((h - h_o) - T_o(s - s_o) \right)_{H_2O} + \dot{E}_{H_2O}^{kim} \right]_{\zeta} \end{aligned} \quad (2.74)$$

2.3.2.4 II. Plakalı ısı eşanjörün ekserji analizi



Şekil 2.10 II. Plakalı ısı eşanjörün ekserji etkileşim diyagramı

II. Plakalı ısı eşanjörün ekserji dengesi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{E}_{ex,g}^{P2} = \dot{E}_{ex,\zeta}^{P2} \quad (2.75)$$

$$\dot{E}_{ex,g}^{P2} = \dot{E}_{ex,g,H_2}^{P2} + \dot{E}_{ex,gks}^{P2} \quad (2.76)$$

$$\dot{E}_{ex,\zeta}^{P2} = \dot{E}_{ex,\zeta,H_2}^{P2} + \dot{E}_{ex,\zeta ks}^{P2} \quad (2.77)$$

$$\begin{aligned} & \dot{m}_{gks}^{P2} \left((h - h_0) - T_0(s - s_0) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{gks} \\ & + \dot{m}_{g,H_2}^{P2} \left((h - h_0) - T_0(s - s_0) + \dot{E}_{ex,H_2}^{kim} \right)_{g,H_2} \\ & = \dot{m}_{\zeta ks}^{P2} \left((h - h_0) - T_0(s - s_0) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{\zeta ks} \\ & + \dot{E}_{ex,\zeta,H_2}^{P2} \left((h - h_0) - T_0(s - s_0) + \dot{E}_{ex,H_2}^{kim} \right)_{\zeta,H_2} \end{aligned} \quad (2.78)$$

h ; sıcaklık ve basınca göre suyun ve hidrojenin entalpi değerleri (kJ/kg), h_0 ; suyun ve hidrojenin 1 atm 25 °C deki entalpisi (kJ/kg), s ; sıcaklık ve basınca göre suyun ve hidrojenin entropisi (J/gK), s_0 ; suyun ve hidrojenin 1 atm 25 °C deki entropisi (J/gK), \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} ; Suyun kimyasal ekserjisi (kJ/kg), \dot{E}_{ex,H_2}^{kim} ; hidrojenin kimyasal ekserjisi (kJ/kg).

II. plakalı ısı eşanjörünün ekserji verimi [38];

$$\eta_{ex}^{P2} = \frac{\dot{E}_{ex,c,\zeta} - \dot{E}_{ex,c,g}}{\dot{E}_{ex,h,g} - \dot{E}_{ex,h,\zeta}} = \frac{\dot{E}_{ex,\zeta ks}^{P2} - \dot{E}_{ex,gks}^{P2}}{\dot{E}_{ex,g,H_2}^{P2} - \dot{E}_{ex,\zeta,H_2}^{P2}} \quad (2.79)$$

2.79 nolu denklemde değerler yerine yazılırsa;

$$\eta_{ex}^{P2} = \frac{\dot{m}_{\zeta ks}^{P2} \left((h - h_0) - T_0(s - s_0) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{\zeta ks} - \dot{m}_{gks}^{P2} \left((h - h_0) - T_0(s - s_0) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{gks}}{\dot{m}_{g,H_2}^{P2} \left((h - h_0) - T_0(s - s_0) + \dot{E}_{ex,H_2}^{kim} \right)_{g,H_2} - \dot{E}_{ex,\zeta,H_2}^{P2} \left((h - h_0) - T_0(s - s_0) + \dot{E}_{ex,H_2}^{kim} \right)_{E\zeta,H_2}}$$

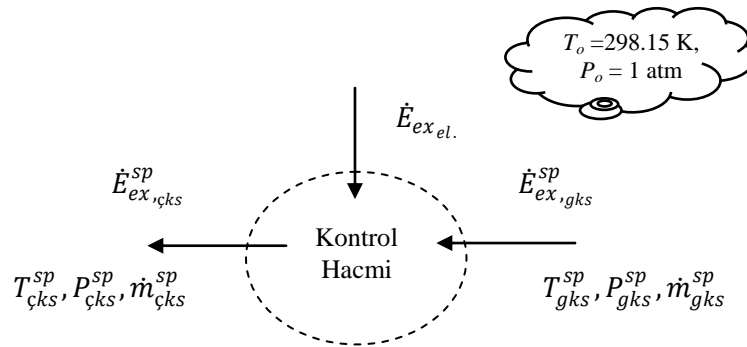
II. plakalı ısı eşanjörün genel ekserji verimi ifadesi elde edilir.

II. plakalı ısı eşanjörün toplam tersinmezliği aşağıdaki gibi yazılır.

$$I^{P2} = \dot{E}_{ex,g,H_2}^{P2} + \dot{E}_{ex,gks}^{P2} - \dot{E}_{ex,\zeta,H_2}^{P2} - \dot{E}_{ex,\zeta,ks}^{P2} \quad (2.80)$$

$$\begin{aligned} I^{P2} = & \dot{m}_{gks}^{P2} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{gks} \\ & + \dot{m}_{g,H_2}^{P2} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2}^{kim} \right)_{g,H_2} \\ & - \dot{m}_{\zeta,ks}^{P2} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{\zeta,ks} \\ & - \dot{E}_{ex,\zeta,H_2}^{P2} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2}^{kim} \right)_{\zeta,H_2} \end{aligned} \quad (2.81)$$

2.3.2.5 Sirkülasyon pompasının ekserji analizi



Şekil 2.11 Sirkülasyon pompasının ekserji etkileşim diyagramı

Sirkülasyon pompasının genel ekserji dengesi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{E}_{ex,g}^{sp} = \dot{E}_{ex,\zeta}^{sp} \quad (2.82)$$

$$\dot{E}_{ex,g}^{sp} = \dot{E}_{ex,gks}^{sp} + \dot{E}_{ex,el.} \quad (2.83)$$

$$\dot{E}_{ex,\zeta}^{sp} = \dot{E}_{ex,\zeta,ks}^{sp} \quad (2.84)$$

$$\dot{E}_{ex,el.} = \dot{W}_G^{p-m} \quad (2.85)$$

$$\dot{E}_{ex,gks}^{sp} = \dot{m}_{gks}^{sp} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{gks} \quad (2.86)$$

$$\dot{E}_{ex,\zeta ks}^{sp} = \dot{m}_{\zeta ks}^{sp} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{\zeta ks} \quad (2.87)$$

(2.84), (2.85) ve (2.86) nolu denklemler yerlerine yazılırsa sirkülasyon pompasının genel ekserji dengesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} & \dot{m}_{gks}^{sp} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{gks} + \dot{W}_G^{sp} \\ & = \dot{m}_{\zeta ks}^{sp} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{\zeta ks} \end{aligned} \quad (2.88)$$

h ; sıcaklık ve basınca göre suyun entalpi değeri (kJ/kg) , h_o ; suyun 1 atm 25 °C deki entalpisi (J/gK), s ; sıcaklık ve basınca göre suyun entropisi (J/gK) , s_o ; suyun 1atm 25 °C deki entropisi (J/gK), $\dot{E}_{H_2O}^{kim}$; suyun 1atm ve 25 °C de kimyasal ekserjisi (kJ/kg).

Sirkülasyon pompasının ekserji verimi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\eta_{ex}^{sp} = \frac{\dot{E}_{ex,\zeta}^{sp}}{\dot{E}_{ex,g}^{sp}} = \frac{\dot{E}_{ex,\zeta ks}^{sp}}{\dot{E}_{ex,gks}^{sp} + \dot{E}_{ex,el.}} \quad (2.89)$$

Sirkülasyon pompasının tersinmezliği aşağıdaki gibi yazılır.

$$I^{sp} = \dot{E}_{ex,g} - \dot{E}_{ex,\zeta} \quad (2.90)$$

$$I^{sp} = \dot{E}_{ex,g}^{sp} - \dot{E}_{ex,\zeta}^{sp} \quad (2.91)$$

$$I^{sp} = \dot{E}_{ex,sp,gks} + \dot{E}_{ex,el.} - \dot{E}_{ex,sp,\zeta ks} \quad (2.92)$$

$$\begin{aligned} I^{sp} & = \dot{m}_{gks}^{sp} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{gks} + \dot{W}_G^{sp} \\ & - \dot{m}_{\zeta ks}^{sp} \left((h - h_o) - T_o(s - s_o) + \dot{E}_{ex,H_2O}^{kim} \right)_{\zeta ks} \end{aligned} \quad (2.93)$$

2.3.3 Yüksek basınçlı hidrojen gazı üretim sisteminin sürdürülebilirlik analizi

Ekserjetik sürdürülebilirlik analizini yapmadan önce, kesinlikle ekserji analizi yapılmalıdır. Prosesi tanımlayabilen ekserji denge denkleminde yararlanarak sürdürülebilirlik analiz terimleri türetilebilir.

Bir sistem için ekserji temelli sürdürülebilirlik parametreleri aşağıdaki gibi teorik olarak göz önüne alınır [39].

- Ekserjetik verim (η_{ex}^{sis})
- Atık ekserji oranı ($r_{aéo}^{sis}$)
- Yeniden kullanılabilir atık ekserji oranı (r_{kn}^{sis})
- Yeniden kullanılmayan atık ekserji oranı (r_{km}^{sis})
- Ekserji yıkım faktörü (f_{exy}^{sis})
- Çevresel yıkım katsayısı (C_{cy}^{sis})
- Çevresel yıkım indeksi (θ_{cyi}^{sis})
- Çevresel uyum indeksi ($\theta_{çui}^{sis}$)
- Ekserjetik kararlılık faktörü (f_{exk}^{sis})
- Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi (θ_{exs}^{sis})

2.3.3.1 Ekserjetik verim

Sistemden alınmak istenen çıkış eksejisinin sisteme giren ekserjiye bölünmesiyle elde edilir.

Sistemin genel ekserji verim ifadesi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\eta_{ex}^{sis} = \frac{E_{faydal\ 1,\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1}^{sis}}{\dot{E}_{ex,g}^{sis}} \quad (2.94)$$

$$\eta_{ex}^{sis} = \frac{\dot{m}_{H_2} \dot{E}_{ex,H_2}}{\dot{E}_{ex,n1s1}^{PEM} + \dot{E}_{ex,el}^{PEM} + \dot{E}_{ex,el}^{p-m} + \dot{E}_{ex,el}^{sp} + \dot{E}_{ex,gss}^{P1}} \quad (2.95)$$

$\dot{E}_{ex,gs}^{P1}$: I. Plakalı ısı eşanjörüne giren saf suyun ekserjisi (kW)

$\dot{E}_{ex,el}^{SP}$: Sirkülasyon pompasına verilen işin ekserjisi (kW)

$\dot{E}_{ex,el}^{p-m}$: Pompa-motor sistemine verilen işin ekserjisi (kW)

$\dot{E}_{ex,isi}^{PEM}$: PEM elektrolizör ünitesine verilen ısının ekserjisi (kW)

$\dot{E}_{ex,el}^{PEM}$: PEM elektrolizör ünitesine verilen elektrik işinin ekserjisi (kW)

\dot{E}_{ex,H_2} : Tüm sistem çıkış sıcaklığı ve basıncına göre hidrojenin ekserjisi (kJ/kg)

2.3.3.2 Atık ekserji oranı

Atık ekserji oranı sistemden sağlanan toplam atık ekserji çıkışının toplam ekserji girişine oranıyla elde edilir [39].

$$r_{aao}^{sis} = \frac{\sum \dot{E}_{ex,aao}^{sis}}{\dot{E}_{ex,g}^{sis}} = \frac{(\dot{E}_{ex,kn}^{sis} + \dot{E}_{ex,km}^{sis})}{\dot{E}_{ex,g}^{sis}} \quad (2.96)$$

$\sum \dot{E}_{ex,aao}^{sis}$; toplam atık ekserji oranı, $\dot{E}_{ex,g}^{sis}$; toplam sisteme giren ekserji (kW), $\dot{E}_{ex,kn}^{sis}$; yeniden kullanılabilir atık ekserji oranı (kW), $\dot{E}_{ex,km}^{sis}$; yenido kullanılamayan atık ekserji oranı.

Toplam atık ekserji oranı hesaplanırken sistemdeki toplam kullanılabilir ve kullanılamayan atık ekserjilerin bilinmesi gerekir. Sistemde yeniden kullanılabilir ekserji olarak; PEM elektrolizör ünitesinden çıkan oksijenin ve II. plakalı ısı eşanjöründen çıkan suyun ekserjisi dikkate alınmıştır. Sistemde yeniden kullanılamayan atık ekserji bulunmamaktadır.

2.3.3.2.1 Yeniden kullanılabilir atık ekserji oranı

Sistemde yeniden kullanılabilir ekserji olarak; PEM elektrolizör ünitesinden çıkan oksijenin ve II. plakalı ısı eşanjöründen çıkan suyun ekserjisi dikkate alınmıştır [39].

$$r_{kn}^{sis} = \frac{\sum \dot{E}_{ex,kn}^{sis}}{\dot{E}_{ex,g}^{sis}} \quad (2.97)$$

$\dot{E}_{ex,km}^{sis}$; yeniden kullanılabilir atık ekserji çıkışı (kW), $\dot{E}_{ex,g}^{sis}$; toplam ekserji girişi, r_{km}^{sis} ; yeniden kullanılabilir atık ekserji oranı.

2.3.3.2.2 Yeniden kullanılmayan atık ekserji oranı

Sistemde yeniden kullanılmayan atık ekserji bulunmamaktadır.

$$r_{km}^{sis} = \frac{\sum \dot{E}_{ex,km}^{sis}}{\dot{E}_{ex,g}^{sis}} \quad (2.98)$$

$\dot{E}_{ex,km}^{sis}$; yeniden kullanılmayan atık ekserji çıkışı (kW), $\dot{E}_{ex,g}^{sis}$; toplam ekserji girişi (kW), r_{km}^{sis} ; yeniden kullanılmayan atık ekserji oranı.

2.3.3.3 Ekserjetik yıkım faktörü

Ekserjetik yıkım faktörü; sistemin ekserjetik sürdürülebilirlik açısından pozitif etkilerinin azalma miktarını gösteren önemli bir sürdürülebilirlik parametresidir. Bu pozitif etkiler; sistemden daha fazla net ekserji elde etmek ve sistemde meydana gelen atık ekserji oranlarının azalmasıdır. 0 ile 1 arasında değer alır [39].

Ekserji yıkım faktörü sistemin toplam ekserji yıkımının toplam ekserji girişine bölünmesiyle elde edilir. Sistemin toplam ekserji yıkımı ise sistemde meydana gelen toplam tersinmezliklere eşittir. Sistemdeki toplam tersinmezliklerin bulunması için sistemde bulunan her bir elemanın tersinmezliklerinin bulunması gerekir. Tersinmezlik ise sistemi oluşturan tüm ünitelerin giriş ve çıkış ekserjilerinin farkına eşittir [39].

Sistemde meydana gelen toplam tersinmezlikler aşağıdaki gibi yazılır.

$$I = E_{ex,g} - E_{ex,\zeta} \quad (2.99)$$

$$I^{top} = I^{sp} + I^{P1} + I^{PEM} + I^{P2} + I^{p-m} \quad (2.100)$$

Ekserjetik yıkım faktörü genel olarak aşağıdaki gibi yazılır.

$$f_{exy}^{sis} = \frac{\dot{E}_{ex,y}^{sis}}{\dot{E}_{ex,g}^{sis}} \quad (2.101)$$

$\dot{E}_{ex,y}^{sis}$; sistemin toplam ekserji yıkımı (kW), $\dot{E}_{ex,g}^{sis}$; toplam ekserji girişi (kW), f_{exy}^{sis} ; ekserji yıkım faktörü.

$$f_{exy}^{sis} = \frac{I^{top}}{\dot{E}_{ex,g}^{sis}} = \frac{I^{sp} + I^{P1} + I^{PEM} + I^{P2} + I^{p-m}}{\dot{E}_{ex,ns1}^{PEM} + \dot{E}_{ex,el}^{PEM} + \dot{E}_{ex,el}^{p-m} + \dot{E}_{ex,el}^{sp} + \dot{E}_{ex,gss}^{P1}} \quad (2.102)$$

2.3.3.4 Çevresel yıkım katsayısı

Bir sistemin ekserjetik sürdürülebilirlik açısından pozitif etkisini vurgulamak için; sistemin çevresel yıkım katsayısının, Termodinamiğin 2. Kanununa göre belirlenmesi gerekir. Buna göre çevresel yıkım katsayısı direkt olarak ekserjetik verimle alakalıdır. Çevresel yıkım katsayısı 1 ile $+\infty$ aralığında değişmektedir. Pratik uygulamalarda bu değer 1'e yakın olması istenmektedir. Çevreye uyumlu bir sistemle çevresel yıkımın azaltılması mümkündür. Bu katsayı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır [39].

$$C_{çyk}^{sis} = \frac{1}{\eta_{ex}^{sis}} \quad (2.103)$$

η_{ex}^{sis} ; ekserjetik verim, $C_{çyk}^{sis}$; çevresel yıkım katsayısı.

2.3.3.5 Çevresel yıkım indeksi

Çevresel yıkım indeksi, sistemin faydasız atık ekserji çıkışı ve ekserji yıkımından dolayı, bu sistemlerin çevreye zararlı olup olmadığını belirten önemli bir parametredir. Bu indeks 1 ile $+\infty$ arasında değer almaktadır ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır [39].

$$\theta_{çyi}^{sis} = f_{exy}^{sis} \times C_{çyk}^{sis} \quad (2.104)$$

$\theta_{çyi}^{sis}$; çevresel yıkım indeksi, f_{exy}^{sis} ; ekserji yıkım faktörü, $C_{çyk}^{sis}$; çevresel yıkım katsayısı.

2.3.3.6 Çevresel uyum indeksi

Çevresel uyum indeksi sistemin çevreye uygunluğunu belirtir. Sistemin çevreye uyumluğunu artırmak için; sistemin çevresel uyum indeksinin ideal değerlere yakın olması gerekir, bunun için de sistemin çevresel yıkım indeksinin minimum değerlerde olması gerekmektedir. 0 ile $+\infty$ sonsuz arası değer alır. Genel olarak bir sistemin çevresel uyum indeksi aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır [39].

$$\theta_{\text{çui}}^{\text{sis.}} = \frac{1}{\theta_{\text{çyi}}^{\text{sis.}}} \quad (2.105)$$

$\theta_{\text{çui}}^{\text{sis.}}$; çevresel uyum indeksi, $\theta_{\text{çyi}}^{\text{sis.}}$; çevresel yıkım indeksi.

2.3.3.7 Ekserjetik kararlılık faktörü

Bir sistemin kararlılığını belirlemek için; sistemde meydana gelen ekserji üretimlerinin ve ekserji yıkımlarının dikkate alınması gerekir. Bu faktör 0 ile 1 arasında değer almaktadır. Sistemin çevreye uyumlu olması için ekserjetik kararlılık faktörünün 1'e yakın olması gerekmektedir. Bir sistemin genel olarak ekserjetik kararlılık faktörü aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır [39].

$$f_{\text{ek}}^{\text{sis.}} = \frac{Ex_{\text{faydal 1,çıkış}}^{\text{sis.}}}{I_{\text{top}} + Ex_{\text{faydal 1,çıkış}}^{\text{sis.}}} = \frac{\dot{E}_{\text{ex,H}_2}}{I^{\text{sp}} + I^{\text{P1}} + I^{\text{PEM}} + I^{\text{P2}} + I^{\text{p-m}} + \dot{E}_{\text{ex,H}_2}} \quad (2.106)$$

şeklinde genel bir ifade elde edilir.

$Ex_{\text{faydal 1,çıkış}}^{\text{sis.}}$; faydalı ürün ekserjisi, I_{top} ; sistemin toplam tersinmezlikleri.

2.3.3.8 Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi

Ekserji, bir sistemin herhangi bir proses boyunca veriminin değişimini ve sistemdeki termodinamik kayıplardaki artış ve azalışları belirlemeye yardımcı olmaktadır. Ekserji verimliliğindeki artış, enerji kayıplarındaki azalmadan dolayı zararlı çevresel etkileri

azaltır. Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi Termodinamiğin 2. Kanununa göre belirlenen önemli bir parametredir. Ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin belirlenmesinde, çevresel uyum indeksinin ve ekserjetik kararlılık faktörünün dikkate alınması gerekir. Bu değer 0 ile $+\infty$ arasında bir değer almaktadır. En genel olarak bir sistemin ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi aşağıdaki gibi hesaplanır [39].

$$\theta_{exs}^{sis} = \theta_{çui}^{sis} \times f_{exk}^{sis} \quad (2.107)$$

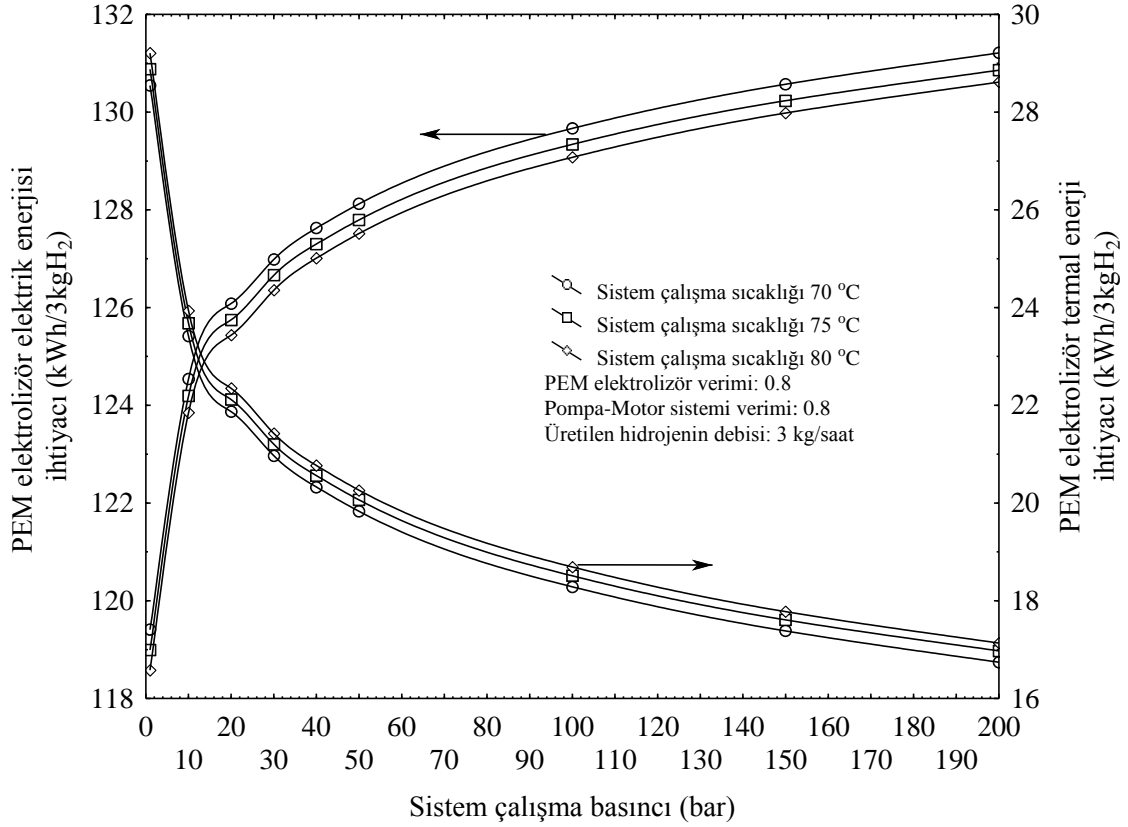
θ_{exs}^{sis} ; ekserji sürdürülebilirlik indeksi, $\theta_{çui}^{sis}$; çevresel uyum indeksi, f_{exk}^{sis} ; ekserjetik kararlılık faktörü.

BÖLÜM III

BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Çalışmanın bu bölümünde, saatte 3 kg hidrojen üreten ve depolayan bir hidrojen gaz istasyonu için gerekli yüksek basınçlı hidrojen üretimini gerçekleştiren alt birimin enerji, ekserji ve sürdürülebilirlik analizlerine ait bulgular sunulmuş ve detaylı olarak tartışılmıştır.

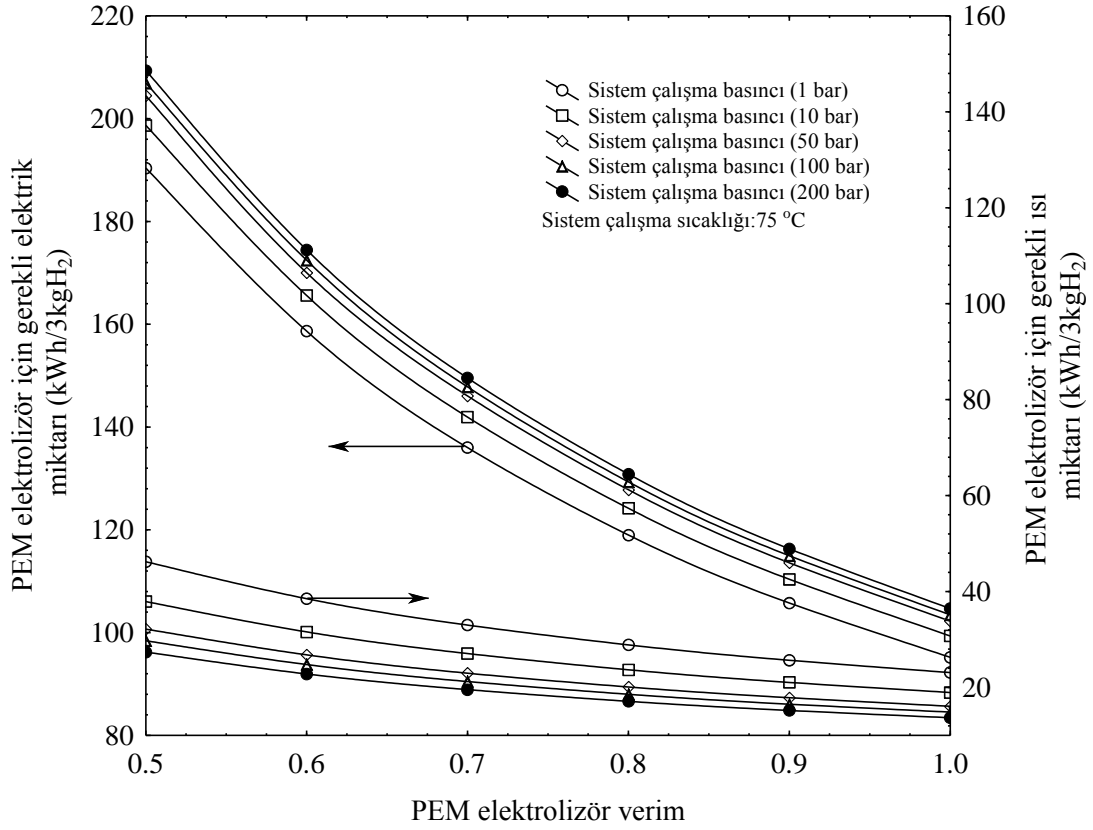
Şekil 3.1’de sistem çalışma basıncına göre PEM elektrolizör için gerekli elektrik ve termal enerji ihtiyacının sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi sunulmuştur. Burada PEM elektrolizörün enerji verimi 0.8, pompa-motor sisteminin verimi 0.8 ve üretilecek olan hidrojen gazının debisi kabullerde ifade edildiği gibi 3 kg/saat olarak alınmıştır. Ayrıca bu grafikte sistem çalışma basıncına (1 bar, 10 bar, 20 bar, 30 bar, 40 bar, 50 bar, 100 bar, 150 bar, 200 bar) bağlı olarak PEM elektrolizör için gerekli olan elektrik ve termal enerji ihtiyacının sistem çalışma sıcaklıklarına göre değişimi incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, sistem çalışma basıncı arttığında PEM elektrolizöre verilmesi gereken elektrik enerjisi ihtiyacının arttığı ve termal enerji ihtiyacının azaldığı görülmektedir. Ayrıca sistem çalışma basıncı sabit alındığında sistem çalışma sıcaklığı (70 °C, 75 °C ve 80 °C) artırıldığına PEM elektrolizöre verilmesi gereken elektrik enerjisi ihtiyacının azaldığı ve termal enerji ihtiyacının arttığı görülmektedir. Örneğin; PEM elektrolizörün verimi 0.8 kabul edildiğinde, sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda, tüm sistem çalışma sıcaklığı 70 °C seçildiğinde PEM elektrolizöre verilmesi gereken elektrik enerji ihtiyacı 131.096 kWh/3kgH₂ termal enerji ihtiyacı ise 16.935 kWh/3kgH₂ olmaktadır. Aynı çalışma şartlarında sistem çalışma basıncı 50 bar olduğu durumda PEM elektrolizöre verilmesi gereken elektrik enerji ihtiyacı 128.091 kWh/3kgH₂ termal enerji ihtiyacı ise 19.884 kWh/3kgH₂ olmaktadır. Ayrıca sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda sistem çalışma sıcaklığı 75 °C olduğunda 130.848 kWh/3kgH₂ elektrik enerjisine, 17.106 kWh/3kgH₂ termal enerjiye, 80 °C olduğunda 130.603 kWh/3kgH₂ elektrik enerjisine ve 17.274 kWh/3kgH₂ termal enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 3.1 Sistem çalışma basıncına bağlı olarak PEM elektrolizör elektrik enerjisi ihtiyacının ve termal enerji ihtiyacının sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi

Şekil 3.2’de PEM elektrolizör verimine göre PEM elektrolizör için gerekli olan iş ve ısı miktarlarının çalışma basıncına göre değişimi sunulmuştur. Burada PEM elektrolizörün enerji verimi 0.5 ile 1 arası, sistem çalışma sıcaklığı 75 °C kabul edilmiş ve üretilecek olan hidrojen gazının debisi kabullerde ifade edildiği gibi 3 kg/saat olarak alınmıştır. Ayrıca bu grafikte PEM elektrolizör verimi 0.5 ile 1 arası alınarak 75 °C çalışma sıcaklığında, sistem çalışma basıncına göre (1 bar, 10 bar, 50 bar, 100 bar, 200 bar) PEM elektrolizör için gerekli olan ısı ve iş miktarları incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, PEM elektrolizörün verimi arttığında PEM elektrolizöre verilmesi gereken iş ve ısı miktarlarının azaldığı görülmüştür. Ayrıca 75 °C çalışma sıcaklığında sabit verimde sistem çalışma basıncı arttığında PEM elektrolizöre verilmesi gereken iş miktarının arttığı ve ısı miktarının düştüğü görülmektedir. Örneğin; PEM elektrolizörün çalışma basıncı 50 bar ve sistem çalışma sıcaklığı 75 °C kabul edildiğinde PEM elektrolizörün verimi 0.6 alındığında 170.389 kWh/3kgH₂ elektrik işine ve 26.798 kWh/3kgH₂ ısıya ihtiyaç duyulurken aynı çalışma şartlarında PEM elektrolizörün verimi 0.8 alındığında 127.792 kWh/3kgH₂ elektrik işine ve 20.099 kWh/3kgH₂ ısıya ihtiyaç duyulmaktadır.

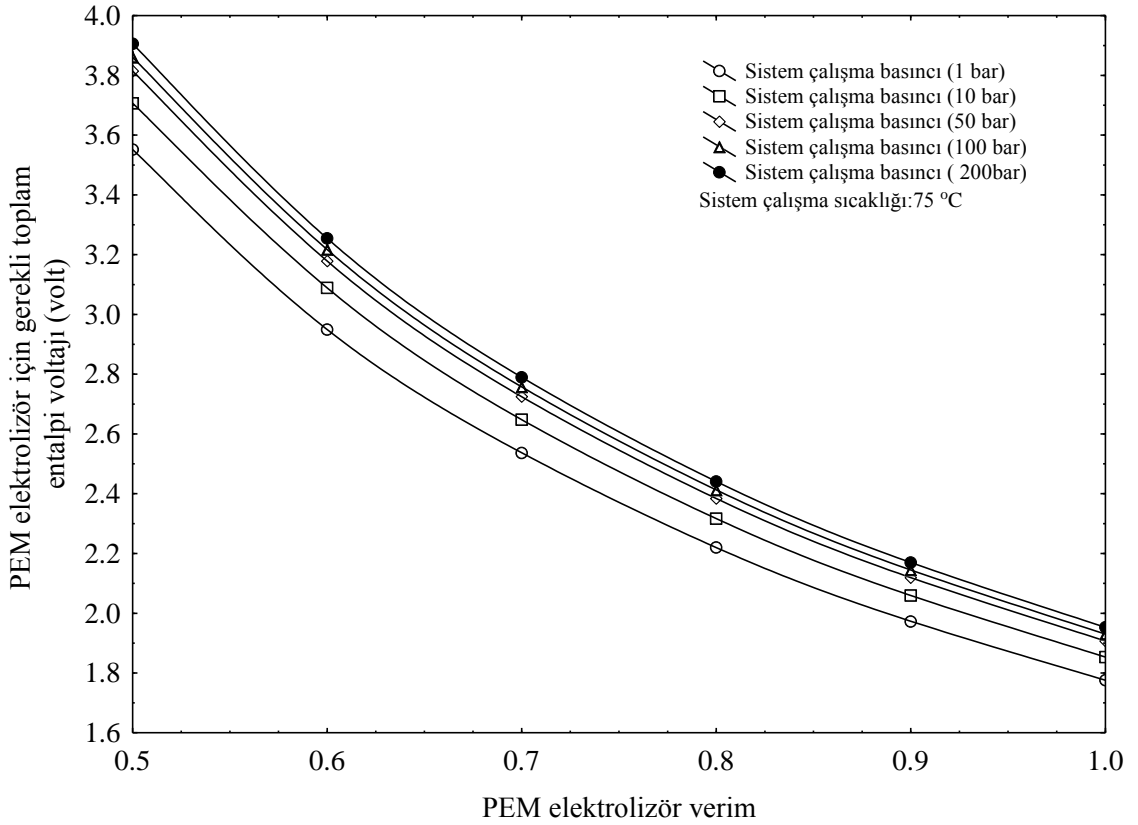
Ayrıca PEM elektrolizörün verimi 0.8 ve sistem çalışma sıcaklığı 75 °C alındığında 100 bar çalışma basıncında 129.335 kWh/3kgH₂ elektrik işine ve 18.580 kWh/3kgH₂ ısıya ihtiyaç duyulurken aynı çalışma şartlarında çalışma basıncı 200 bar alındığında 130.848 kWh/3kgH₂ elektrik işine ve 17.106 kWh/3kgH₂ ısıya ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 3.2 PEM elektrolizör verimine bağlı olarak PEM elektrolizör için gerekli olan iş ve ısı miktarlarının sistem çalışma basıncına göre değişimi

Şekil 3.3'te PEM elektrolizör verimine göre PEM elektrolizör için gerekli olan entalpi voltajının çalışma basıncına göre değişimi sunulmuştur. Burada PEM elektrolizörün çalışma verimi 0.5-1 arası, sistem çalışma sıcaklığı 75 °C kabul edilmiş ve üretilecek olan hidrojen gazının debisi kabullerde ifade edildiği gibi 3 kg/saat olarak alınmıştır. Ayrıca bu grafikte PEM elektrolizör verimi 0.5 ile 1 arası alınarak 75 °C çalışma sıcaklığında, sistem çalışma basıncına göre (1 bar, 10 bar, 50 bar, 100 bar, 200 bar) PEM elektrolizör için gerekli olan entalpi voltajı incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, PEM elektrolizörün verimi arttığında PEM elektrolizöre verilmesi gereken entalpi voltajı miktarının azaldığı görülmüştür. Ayrıca 75 °C çalışma sıcaklığında sabit verimde sistem çalışma basıncı arttığında PEM elektrolizöre verilmesi gereken entalpi voltajı miktarının arttığı görülmektedir. Örneğin; PEM elektrolizörün çalışma basıncı 50

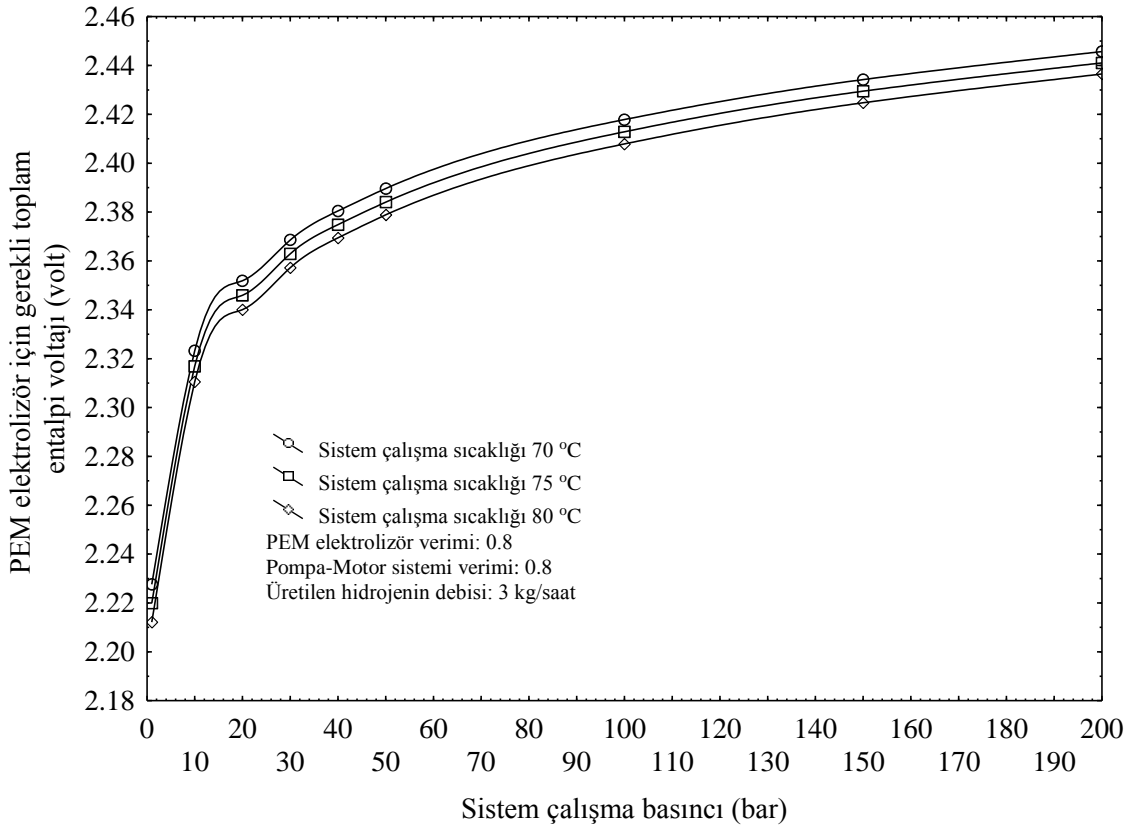
bar ve sistem çalışma sıcaklığı 75 °C kabul edildiğinde PEM elektrolizörün verimi 0.6 alındığında 3.17 volt entalpi voltajına ihtiyaç duyulurken aynı çalışma şartlarında PEM elektrolizörün verimi 0.8 alındığında 2.384 volt entalpi voltajına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca PEM elektrolizörün verimi 0.8 ve sistem çalışma sıcaklığı 75 °C alındığında 100 bar çalışma basıncında 2.412 volt entalpi voltajına ihtiyaç duyulurken aynı çalışma şartlarında çalışma basıncı 200 bar alındığında 2.441 volt entalpi voltajına ihtiyaç duyulmaktadır. Grafikte görüldüğü gibi sisteme verilmesi gereken elektrik işi miktarı basınca göre arttığından PEM elektrolizöre verilmesi gereken entalpi voltajı değeri de artmaktadır.



Şekil 3.3 PEM elektrolizör verimine bağlı olarak PEM elektrolizör için gerekli olan entalpi voltajı miktarının sistem çalışma basıncına göre değişimi

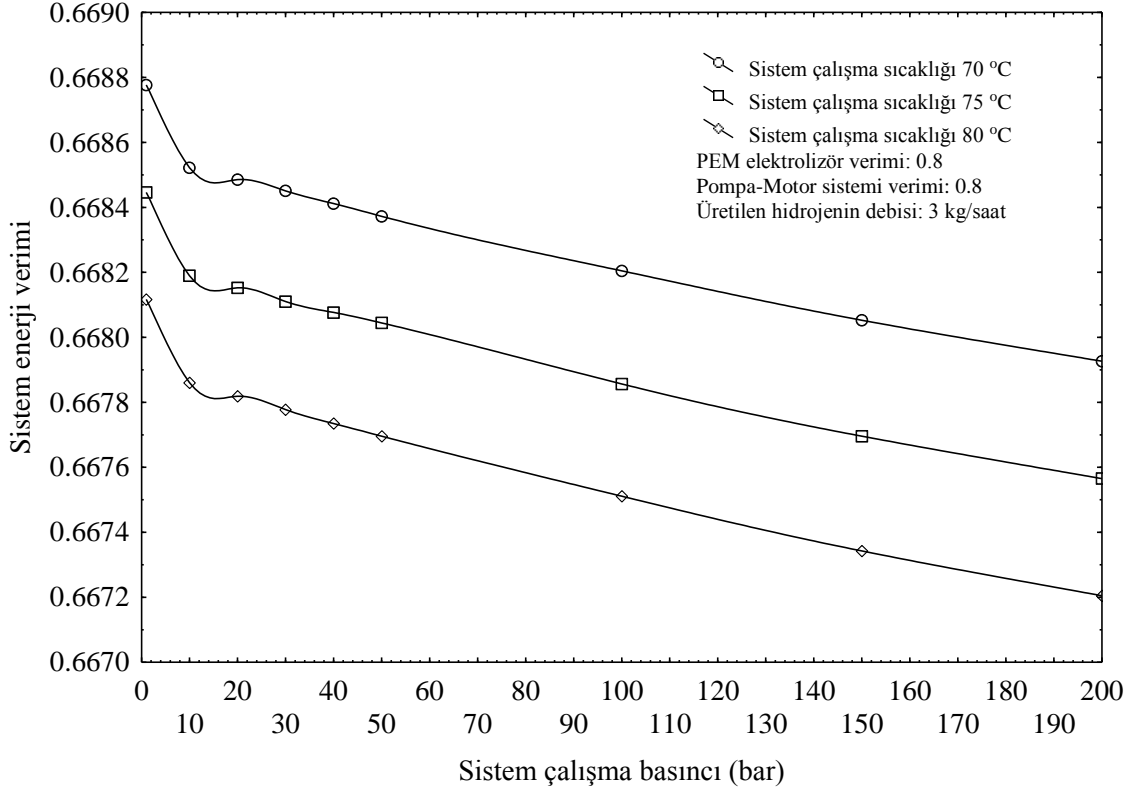
Şekil 3.4'te sistem çalışma basıncına göre PEM elektrolizör için gerekli olan entalpi voltajının çalışma sıcaklığına göre değişimi sunulmuştur. Burada PEM elektrolizörün enerji verimi 0.8, pompa-motor sisteminin verimi 0.8 ve üretilecek olan hidrojen gazının debisi kabullerde ifade edildiği gibi 3 kg/saat olarak alınmıştır. Ayrıca bu grafikte PEM elektrolizör enerji verimi 0.8 alınarak (1 bar, 10 bar, 20 bar, 30 bar, 40

bar, 50 bar, 100 bar, 150 bar, 200 bar) çalışma basınçlarına bağlı olarak (70 °C, 75 °C ve 80 °C) çalışma sıcaklıklarında göre PEM elektrolizör için gerekli olan entalpi voltajı incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, PEM elektrolizör enerji verimi 0.8 alındığında ve sabit sistem çalışma sıcaklığında, sistem çalışma basıncı arttığında PEM elektrolizör verilmesi gereken entalpi voltajı değerinin arttığı, aynı çalışma şartlarında çalışma basıncı sabit alındığında sistem çalışma sıcaklığı arttığında PEM elektrolizöre verilmesi gereken entalpi voltajı değerinin azaldığı görülmektedir. Örneğin; PEM elektrolizörün verimi 0.8 ve çalışma basıncı 50 bar alındığında ve sistem çalışma sıcaklığı 70°C olduğunda PEM elektrolizöre verilmesi gereken entalpi voltajı 2.389 volt olurken aynı şartlarında sistem çalışma sıcaklığı 75 °C olduğu durumda 2.384 volt entalpi voltajına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca PEM elektrolizörün enerji verimi 0.8 ve sistem çalışma sıcaklığı 75 °C olduğunda 100 bar çalışma basıncında 2.412 volt entalpi voltajına ihtiyaç duyulurken aynı çalışma şartlarında çalışma basıncı 200 bar alındığında 2.441 volt entalpi voltajına ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 3.4 Sistem çalışma basıncına bağlı olarak PEM elektrolizör için gerekli olan entalpi voltajı miktarının sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi

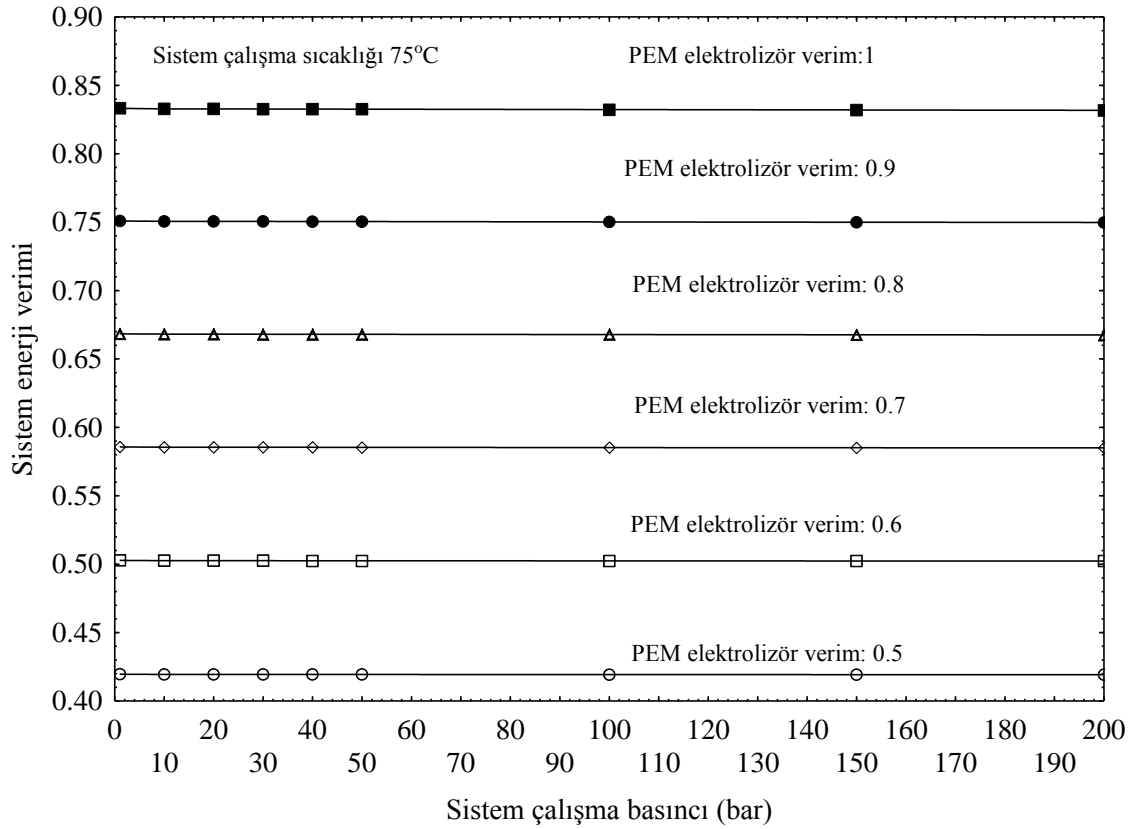
Şekil 3.5'te sistem çalışma basıncına göre sistem enerji veriminin çalışma sıcaklığına göre değişimi sunulmuştur. Burada PEM elektrolizörün, pompa-motor sisteminin ve sirkülasyon pompasının verimi 0.8, sistem çalışma sıcaklığı 70 °C, 75 °C ve 80 °C kabul edilmiş ve üretilecek olan hidrojen gazının debisi kabullerde ifade edildiği gibi 3 kg/saat olarak alınmıştır. Ayrıca bu grafikte 1 bar, 10 bar, 20 bar, 30 bar, 40 bar, 50 bar, 100 bar, 150 bar, 200 bar çalışma basınçlarına bağlı olarak 70 °C, 75 °C ve 80 °C çalışma sıcaklıklarına göre sistemin enerji verimi incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, sabit sistem çalışma sıcaklığında sistem çalışma basıncı arttığında sistemin enerji veriminin azaldığı, aynı çalışma şartlarında sistem çalışma basıncı sabit alındığında sistem çalışma sıcaklığı arttığında sistemin enerji veriminin azaldığı görülmektedir. Örneğin; PEM elektrolizörün, pompa-motor sisteminin ve sirkülasyon pompasının verimi 0.8, çalışma basıncı 50 bar alındığında ve sistem çalışma sıcaklığı 70 °C alındığında sistemin enerji verimi 0.669 olurken aynı şartlarında sistem çalışma sıcaklığının 75 °C olduğu durumda sistemin verimi 0.668 olmaktadır. Ayrıca PEM elektrolizörün, pompa-motor sisteminin, sirkülasyon pompasının verimi 0.8 ve sistem çalışma sıcaklığı 75 °C alındığında 100 bar çalışma basıncında sistemin enerji verimi 0.668, aynı çalışma şartlarında çalışma basıncı 200 bar alındığında sistemin enerji verimi 0.667 olmaktadır.



Şekil 3.5 Sistem çalışma basıncına bağlı olarak tüm sistemin enerji veriminin sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi

Şekil 3.6'da sistem çalışma basıncına göre sistem enerji veriminin PEM elektrolizör enerji verimine göre değişimi sunulmuştur. Burada PEM elektrolizörün verimi 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1 arası, pompa-motor sisteminin ve sirkülasyon pompasının verimi 0.8, sistem çalışma sıcaklığı 70 °C, 75 °C ve 80 °C kabul edilmiş ve üretilecek olan hidrojen gazının debisi kabullerde ifade edildiği gibi 3 kg/saat olarak alınmıştır. Ayrıca bu grafikte, sistem çalışma basınçlarına(1 bar, 10 bar, 20 bar, 30 bar, 40 bar, 50 bar, 100 bar, 150 bar, 200 bar) bağlı olarak, PEM elektrolizör verimine (0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1) göre sistemin enerji verimi incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, sabit sistem çalışma sıcaklığında (75 °C), PEM elektrolizörün verimi arttığında sistemin enerji veriminin arttığı, PEM elektrolizör verimi azaldığında ise sistem enerji veriminin azaldığı görülmektedir. Ayrıca grafikte PEM elektrolizörün enerji verimi sabit alındığında sistem çalışma basıncı arttığında sistemin enerji veriminin azaldığı görülmektedir. Örneğin; sistem çalışma basıncı 50 bar ve çalışma sıcaklığı 75 °C sabit alındığında, PEM elektrolizörün verimi 0.6 olduğunda sistemin enerji verimi 0.505 olurken aynı çalışma şartlarında PEM elektrolizörün verimi 0.8 olduğu durumda sistemin enerji verimi 0.668 olmaktadır. Ayrıca PEM elektrolizörün verimi 0.8 ve sistem çalışma

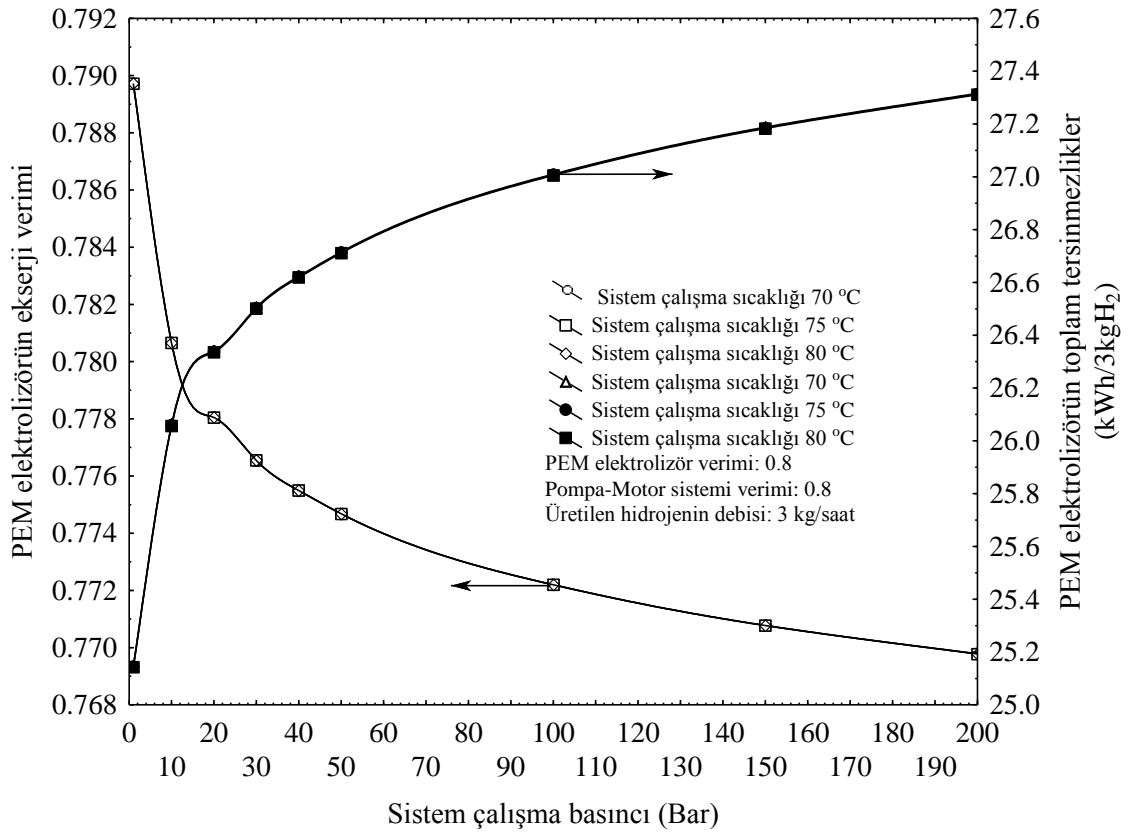
sıcaklığı 75 °C sabit alındığında, çalışma basıncı 100 bar olduğunda 0.668 olurken, 200 bar olduğu durumda sistem enerji verimi 0.667 olmaktadır.



Şekil 3.6 Sistem çalışma basıncına bağlı olarak sistem enerji veriminin PEM elektrolizör enerji verimine göre değişimi

Şekil 3.7’de sistem çalışma basıncına göre PEM elektrolizörün ekserji veriminin ve PEM elektrolizörün toplam tersinmezliklerinin çalışma sıcaklığına göre değişimi sunulmuştur. Burada PEM elektrolizörün enerji verimi 0.8, pompa-motor sisteminin verimi 0.8 ve üretilecek olan hidrojen gazının debisi kabullerde ifade edildiği gibi 3 kg/saat olarak alınmıştır. Ayrıca bu grafikte sistem çalışma basıncına bağlı olarak (1 bar, 10 bar, 20 bar, 30 bar, 40 bar, 50 bar, 100 bar, 150 bar, 200 bar) PEM elektrolizörün ekserji veriminin ve PEM elektrolizör toplam tersinmezliklerinin çalışma sıcaklıklarına (70 °C, 75 °C ve 80 °C) göre değişimi incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, sistem çalışma basıncı arttığında PEM elektrolizörün ekserji veriminin düştüğü ve toplam tersinmezliklerinin de arttığı görülmektedir. Ayrıca, sistem çalışma basıncı sabit alındığında sistem çalışma sıcaklığı arttığında PEM elektrolizörün ekserji veriminin arttığı, toplam tersinmezliklerinin de azaldığı görülmektedir. Örneğin; PEM

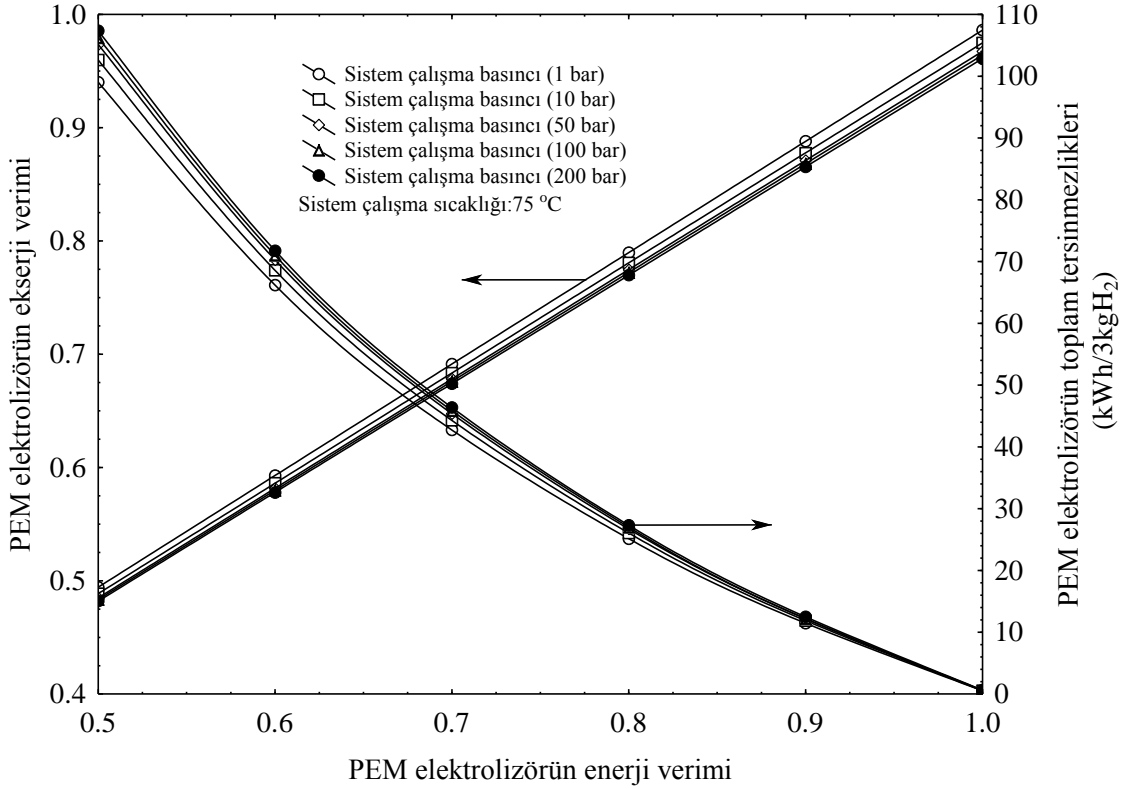
elektrolizörün verimi 0.8, sistem çalışma basıncı 200 bar ve sistem çalışma sıcaklığı 70°C olduğu durumda PEM elektrolizörün ekserji verimi 0.769, toplam tersinmezlikleri 27.316 kWh/3kgH₂ olurken sistem çalışma sıcaklığı 75°C olduğunda PEM elektrolizörün ekserji verimi 0.770 toplam tersinmezlikleri 27.313 kWh/3kgH₂ olmaktadır. Ayrıca sistem çalışma basıncı 30 bar olduğu durumda sistem çalışma sıcaklığı 70 °C olduğunda PEM elektrolizörün ekserji verimi 0.776 toplam tersinmezlikleri 26.504 kWh/3kgH₂ olurken aynı çalışma şartlarında sistem çalışma sıcaklığı 75 °C olduğunda PEM elektrolizörün ekserji verimi 0.777 toplam tersinmezlikleri 26.502 kWh/3kgH₂ olmaktadır.



Şekil 3.7 Sistem çalışma basıncına bağlı olarak PEM elektrolizör ekserji veriminin ve PEM elektrolizörün toplam tersinmezliklerinin sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi

Şekil 3.8’de PEM elektrolizör enerji verimine göre PEM elektrolizörün ekserji veriminin ve PEM elektrolizör toplam tersinmezliklerin çalışma basıncına göre değişimi sunulmuştur. Burada PEM elektrolizörün verimi 0.5 ile 1 arası, sistem çalışma sıcaklığı 70 °C, 75 °C ve 80 °C kabul edilmiş ve üretilecek olan hidrojen gazının debisi kabullerde ifade edildiği gibi 3 kg/saat olarak alınmıştır. Ayrıca bu grafikte PEM

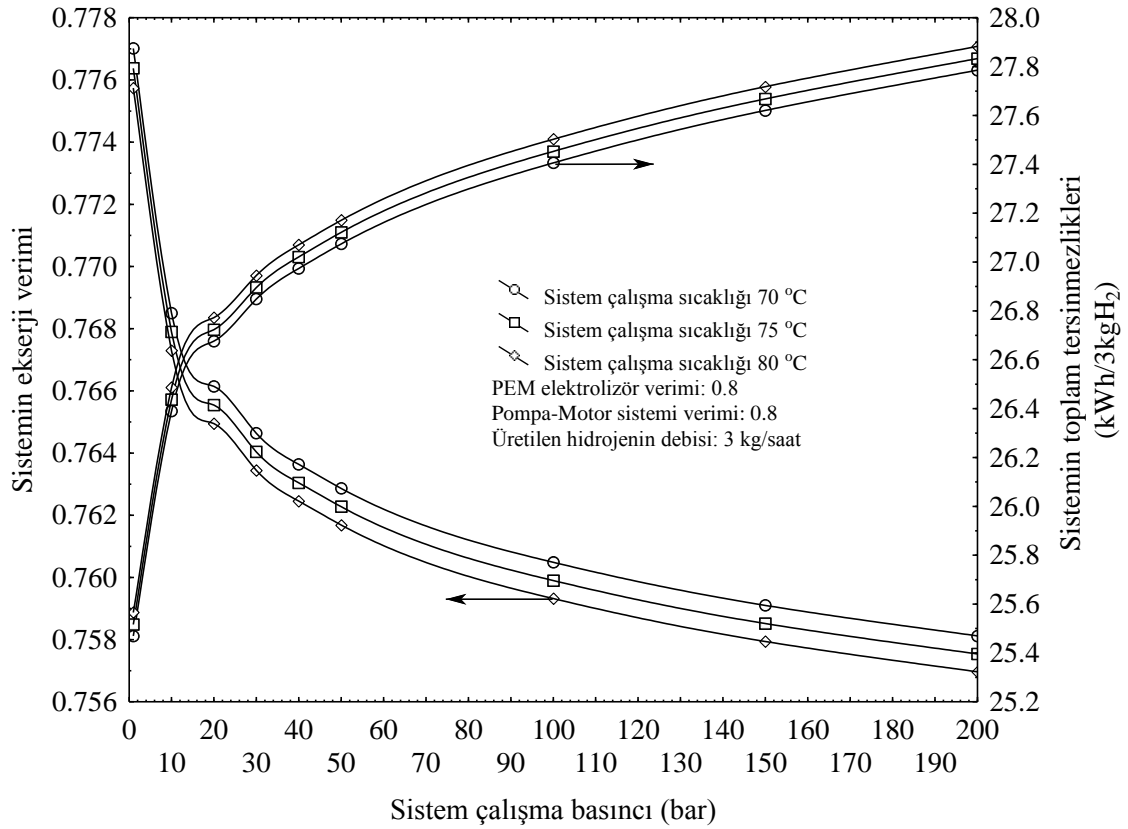
elektrolizör enerji verimine (0.5 ile 1 arası) bağı olarak sistem çalışma basıncına (1 bar, 10 bar, 20 bar, 30 bar, 40 bar, 50 bar, 100 bar, 150 bar, 200 bar) bağı olarak PEM elektrolizörün ekserji veriminin ve PEM elektrolizör toplam tersinmezliklerinin değişimi incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, PEM elektrolizörün verimi sabit alındığında sistem çalışma basıncı arttığında PEM elektrolizörün ekserji veriminin düştüğü ve toplam tersinmezliklerinin de arttığı görülmektedir. Ayrıca sistem çalışma basıncı sabit alındığında PEM elektrolizörün enerji verimi arttığında PEM elektrolizörün ekserji veriminin arttığı, toplam tersinmezliklerinin de azaldığı görülmektedir. Örneğin; PEM elektrolizörün verimi 0.8 kabul edildiğinde, sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda, sistem çalışma sıcaklığı 75 °C seçildiğinde PEM elektrolizörün ekserji verimi 0.769, toplam tersinmezlikleri de 27.313 kWh/3kgH₂ olurken sistem çalışma basıncı 100 bar olduğuunda ekserji verimi 0.772, toplam tersinmezlikleri de 27.007 kWh/3kgH₂ olmaktadır. Ayrıca sistem çalışma basıncı 30 bar olduğu durumda PEM elektrolizör enerji veriminin 0.6 olduğuda PEM elektrolizör ekserji verimi 0.582 toplam tersinmezlikleri 69.744 kWh/3kgH₂ olurken aynı çalışma şartlarında PEM elektrolizörün enerji veriminin 0.8 olduğuun durumda ekserji verimi 0.776 toplam tersinmezlikler 26.502 kWh/3kgH₂ olmaktadır.



Şekil 3.8 PEM elektrolizörün enerji verimine bağlı olarak PEM elektrolizörün ekserji verimi ve toplam tersinmezliklerinin sistem çalışma basıncına göre değişimi

Şekil 3.9'da sistem çalışma basıncına göre sistem ekserji veriminin ve sistem toplam tersinmezliklerinin sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi sunulmuştur. Burada PEM elektrolizörün enerji verimi 0.8, pompa-motor sisteminin verimi 0.8 ve üretilecek olan hidrojen gazının debisi kabullerde ifade edildiği gibi 3 kg/saat olarak alınmıştır. Ayrıca bu grafikte sistem çalışma basıncına bağlı olarak (1 bar, 10 bar, 20 bar, 30 bar, 40 bar, 50 bar, 100 bar, 150 bar, 200 bar) sistemin ekserji veriminin ve sistemin toplam tersinmezliklerinin çalışma sıcaklıklarına göre değişimi incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, sistem çalışma basıncı arttığında sistemin ekserji veriminin düştüğü ve toplam tersinmezliklerinin de arttığı görülmektedir. Ayrıca sistem çalışma basıncı sabit alındığında sistem çalışma sıcaklığı (70 °C, 75 °C ve 80 °C) arttığında sistemin ekserji veriminin azaldığı, toplam tersinmezliklerinin de arttığı görülmektedir. Örneğin; PEM elektrolizörün verimi 0.8 kabul edildiğinde, sistem çalışma 200 bar olduğu durumda, sistem çalışma sıcaklığı 70 °C seçildiğinde sistemin ekserji verimi 0.758, toplam tersinmezlikleri de 27.785 kWh/3kgH₂ olurken sistem çalışma sıcaklığı 75 °C olduğunda sistemin ekserji verimi 0.757 toplam tersinmezlikleride 27.832 kWh/3kgH₂

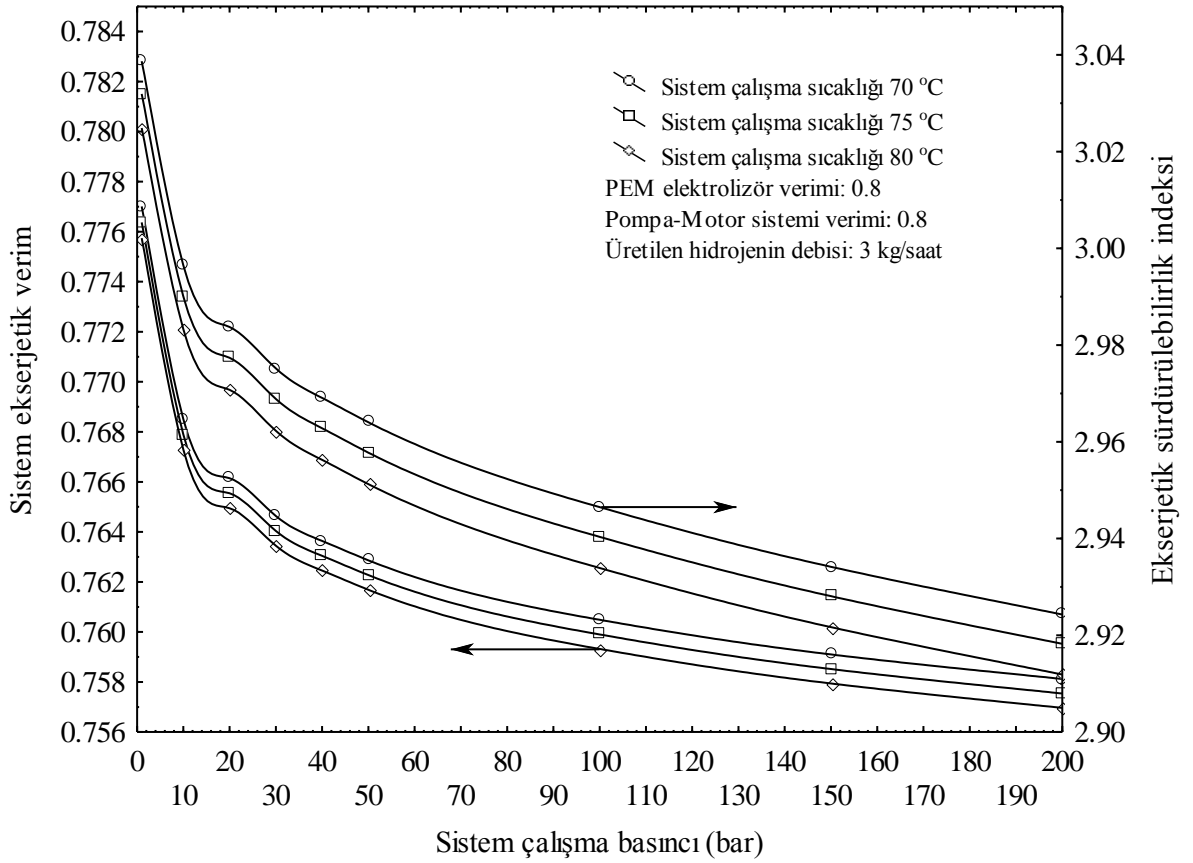
olmaktadır. Ayrıca PEM elektrolizörün verimi 0.8 kabul edildiğinde sistem çalışma sıcaklığı 75°C olduğu durumda sistem çalışma basıncı 100 bar seçildiğinde sistem ekserji verimi 0.759, toplam tersinmezlik 27.452 kWh/3kgH₂ olurken aynı çalışma şartlarında sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda sistem ekserji verimi 0.757, toplam tersinmezlik 27.832 kWh/3kgH₂ olmaktadır.



Şekil 3.9 Sistem çalışma basıncına bağlı olarak sistemin ekserji veriminin ve sistemin toplam tersinmezliklerinin sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi

Şekil 3.10'da sistem çalışma basıncına göre sistem ekserji veriminin ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi sunulmuştur. Burada PEM elektrolizörün enerji verimi 0.8, pompa-motor sisteminin verimi 0.8 ve üretilecek olan hidrojen gazının debisi kabullerde ifade edildiği gibi 3 kg/saat olarak alınmıştır. Ayrıca bu grafikte sistem çalışma basıncına bağlı olarak (1 bar, 10 bar, 20 bar, 30 bar, 40 bar, 50 bar, 100 bar, 150 bar, 200 bar) sistemin ekserji veriminin ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, sistem çalışma basıncı arttığında sistemin ekserji veriminin ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin düştüğü görülmektedir.

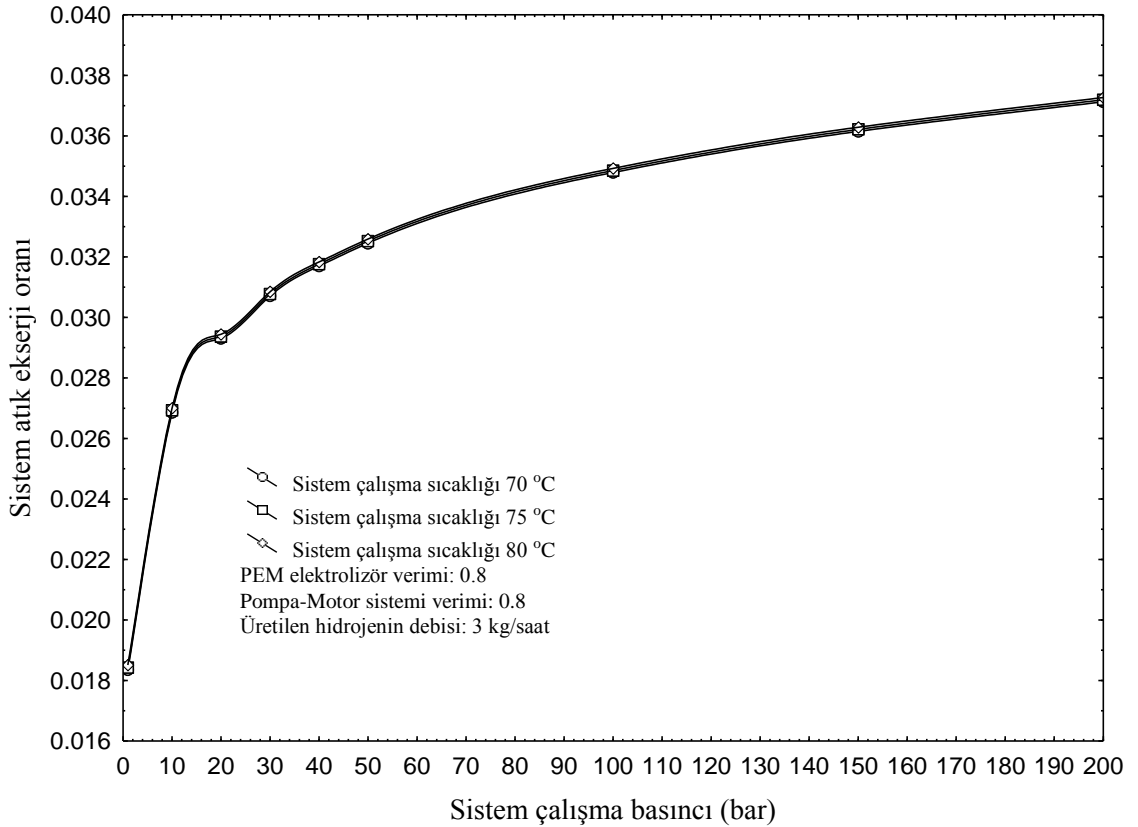
Ayrıca sistem çalışma basıncı sabit alındığında sistem çalışma sıcaklığı (70 °C, 75 °C ve 80 °C) arttığında sistemin ekserji veriminin ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin azaldığı görülmektedir. Örneğin; sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda, sistem çalışma sıcaklığı 70 °C seçildiğinde sistemin ekserji verimi 0.758, ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.924 olurken, sistem çalışma sıcaklığı 75 °C olduğunda sistemin ekserji verimi 0.757, ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.918 olmaktadır. Ayrıca sistem çalışma sıcaklığı 75 °C olduğu durumda sistem çalışma basıncı 100 bar seçildiğinde sistem ekserji verimi 0.759, ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.940 olurken aynı çalışma şartlarında sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda sistem ekserji verimi 0.757, ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.918 olmaktadır.



Şekil 3.10 Sistem çalışma basıncına bağlı olarak sistem ekserji veriminin ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi

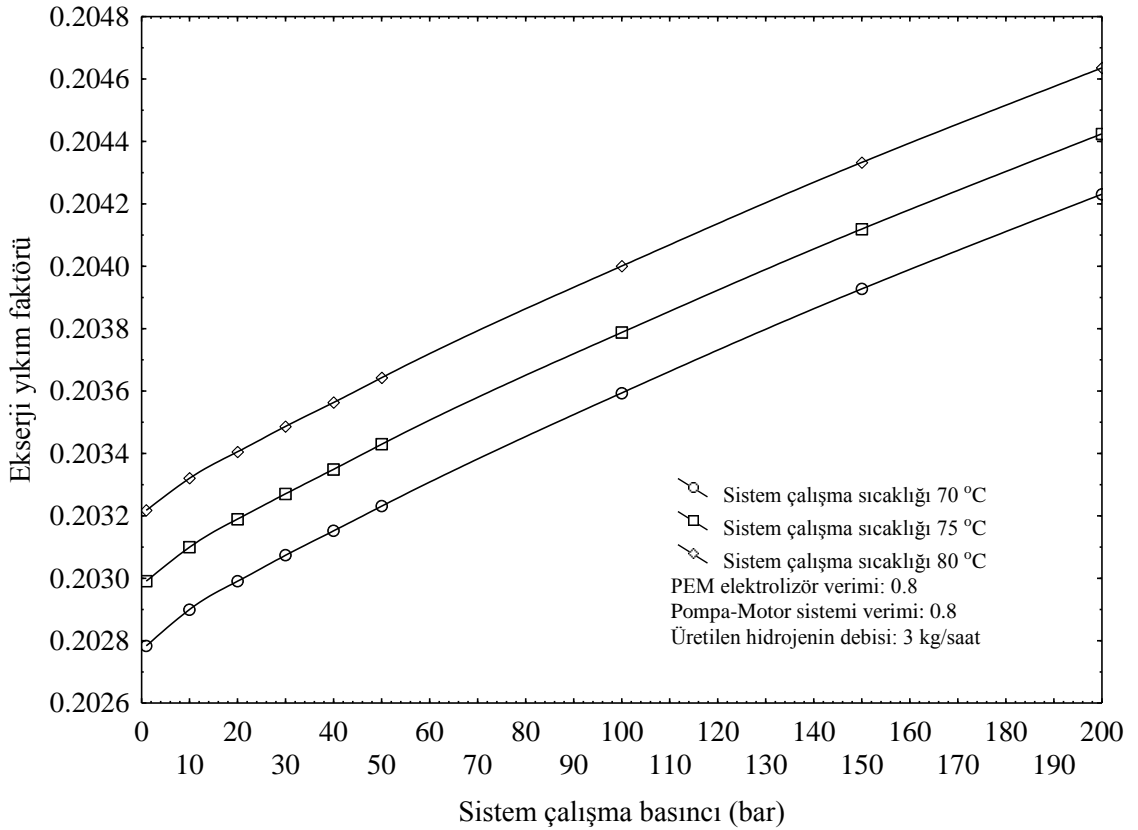
Şekil 3.11'de sistem çalışma basıncına göre sistem atık ekserji oranının sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi sunulmuştur. Burada PEM elektrolizörün enerji verimi 0.8, pompa-motor sisteminin verimi 0.8 ve üretilecek olan hidrojen gazının debisi kabullerde

ifade edildiği gibi 3 kg/saat olarak alınmıştır. Ayrıca bu grafikte sistem çalışma basıncına bağlı olarak (1 bar, 10 bar, 20 bar, 30 bar, 40 bar, 50 bar, 100 bar, 150 bar, 200 bar) atık ekserji oranının çalışma sıcaklıklarına göre değişimi incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, sistem çalışma basıncı arttığında sistem atık ekserji oranının arttığı görülmektedir. Ayrıca sistem çalışma basıncı sabit alındığında sistem çalışma sıcaklığı (70 °C, 75 °C ve 80 °C) arttığında sistem atık ekserji oranının arttığı görülmektedir. Örneğin; sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda, sistem çalışma sıcaklığı 70 °C seçildiğinde sistemin atık ekserji oranı 0.0371 olurken, sistemin çalışma sıcaklığı 75 °C olduğunda sistemin atık ekserji oranı 0.0372 olmaktadır. Ayrıca PEM elektrolizörün verimi 0.8 kabul edildiğinde sistem çalışma sıcaklığı 75 °C olduğu durumda sistem çalışma basıncı 100 bar seçildiğinde sistemin atık ekserji oranı 0.0348 olurken aynı çalışma şartlarında sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda sistem atık ekserji oranı 0.0372 olmaktadır.



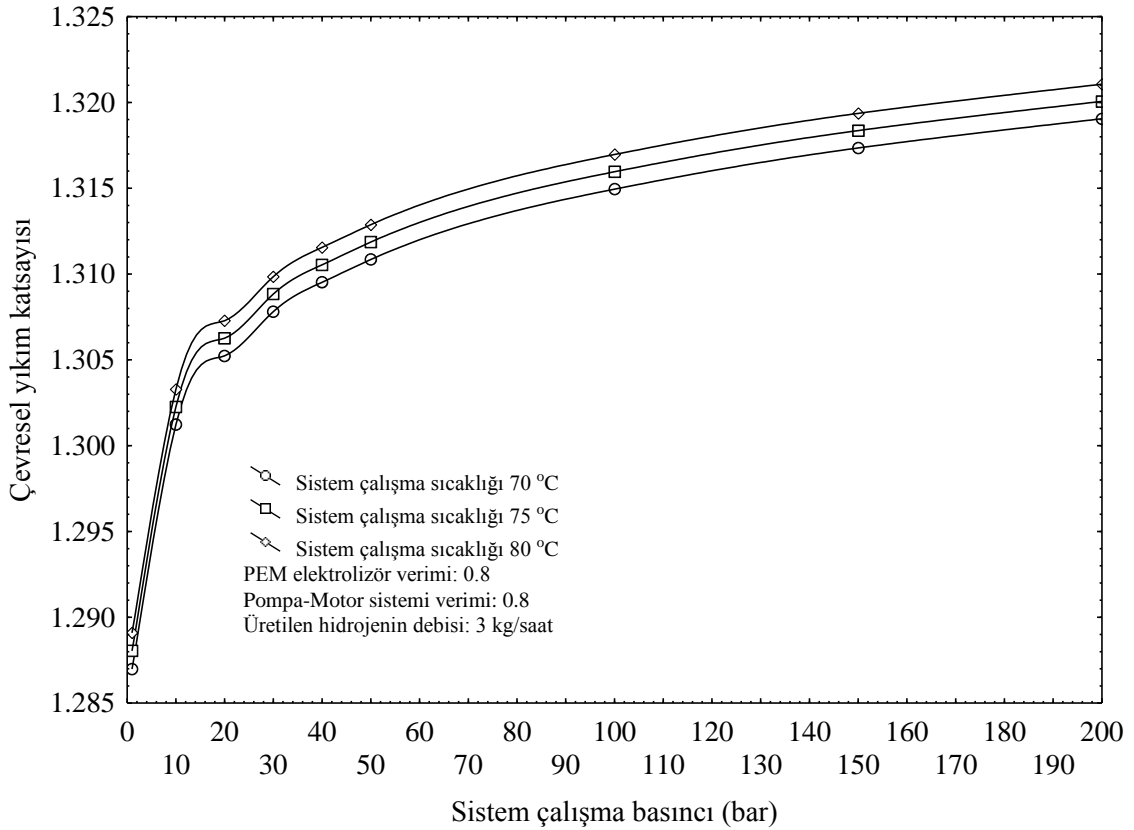
Şekil 3.11 Sistem çalışma basıncına bağlı olarak sistem atık ekserji oranının sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi

Şekil 3.12’de sistem çalışma basıncına göre ekserji yıkım faktörünün çalışma sıcaklığına göre değişimi sunulmuştur. Burada PEM elektrolizörün enerji verimi 0.8, pompa-motor sisteminin verimi 0.8 ve üretilecek olan hidrojen gazının debisi kabullerde ifade edildiği gibi 3 kg/saat olarak alınmıştır. Ayrıca bu grafikte sistem çalışma basıncına bağlı olarak (1 bar, 10 bar, 20 bar, 30 bar, 40 bar, 50 bar, 100 bar, 150 bar, 200 bar) ekserji yıkım faktörünün çalışma sıcaklıklarına göre değişimi incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, sistem çalışma basıncı arttığında ekserji yıkım faktörünün arttığı görülmektedir. Ayrıca sistem çalışma basıncı sabit alındığında sistem çalışma sıcaklığı (70 °C, 75 °C ve 80 °C) arttığında ekserji yıkım faktörünün arttığı görülmektedir. Örneğin; sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda, sistem çalışma sıcaklığı 70 °C seçildiğinde ekserji yıkım faktörü 0.204 olurken, sistemin çalışma sıcaklığı 75 °C olduğunda ekserji yıkım faktörü 0.205 olmaktadır. Ayrıca sistem çalışma sıcaklığı 75 °C olduğu durumda sistem çalışma basıncı 100 bar seçildiğinde sistemin atık ekserji oranı 0.203 olurken aynı çalışma şartlarında sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda sistem atık ekserji oranı 0.205 olmaktadır.



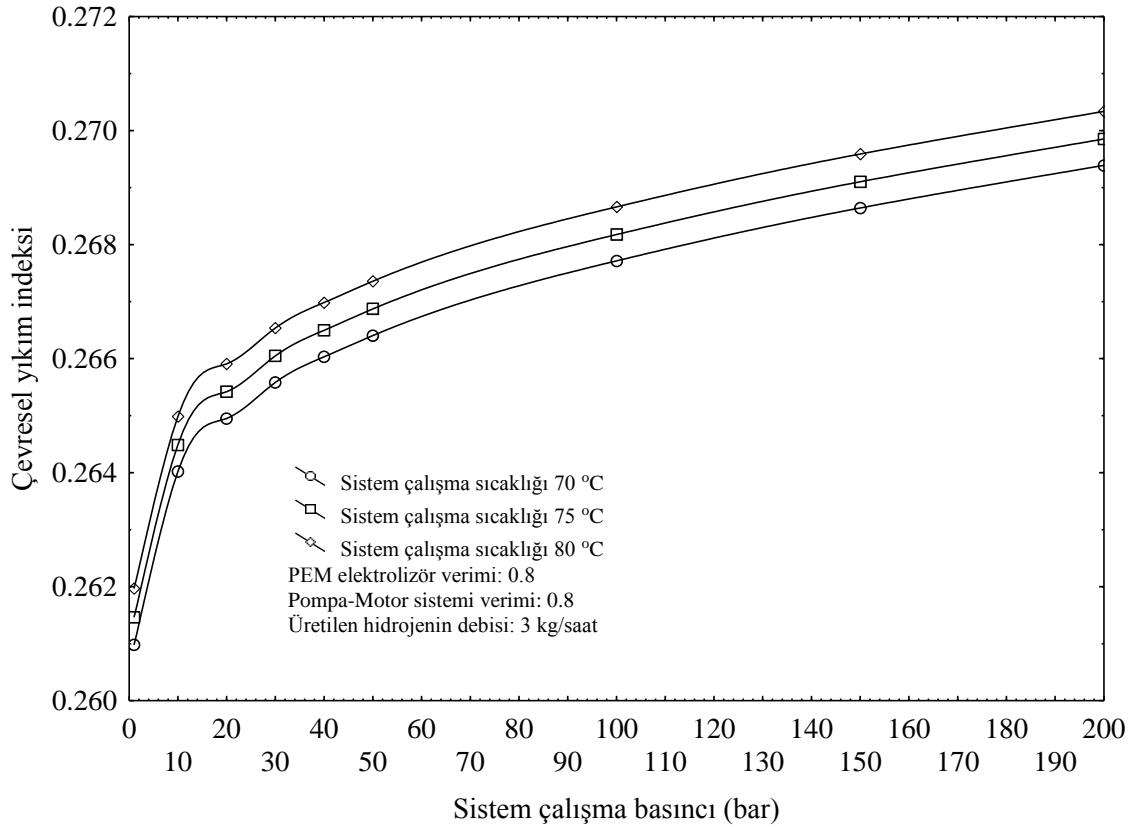
Şekil 3.12 Sistem çalışma basıncına bağlı olarak ekserjetik yıkım faktörünün sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi

Şekil 3.13'te sistem çalışma basıncına göre çevresel yıkım katsayısının sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi sunulmuştur. Burada PEM elektrolizörün enerji verimi 0.8, pompa-motor sisteminin verimi 0.8 ve üretilecek olan hidrojen gazının debisi kabullerde ifade edildiği gibi 3 kg/saat olarak alınmıştır. Ayrıca bu grafikte sistem çalışma basıncına bağlı olarak (1 bar, 10 bar, 20 bar, 30 bar, 40 bar, 50 bar, 100 bar, 150 bar, 200 bar) çevresel yıkım katsayısının çalışma sıcaklıklarına göre değişimi incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, sistem çalışma basıncı arttığında çevresel yıkım katsayısının arttığı görülmektedir. Ayrıca sistem çalışma basıncı sabit alındığında sistem çalışma sıcaklığı (70 °C, 75 °C ve 80 °C) arttığında çevresel yıkım katsayısının arttığı görülmektedir. Örneğin; sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda, sistem çalışma sıcaklığı 70 °C seçildiğinde çevresel yıkım katsayısı 1.319 olurken, sistemin çalışma sıcaklığı 75 °C olduğunda çevresel yıkım katsayısı 1.320 olmaktadır. Ayrıca sistem çalışma sıcaklığı 75 °C olduğu durumda sistem çalışma basıncı 100 bar seçildiğinde yıkım katsayısı 1.315 olurken aynı çalışma şartlarında sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda çevresel yıkım katsayısı 1.320 olmaktadır.



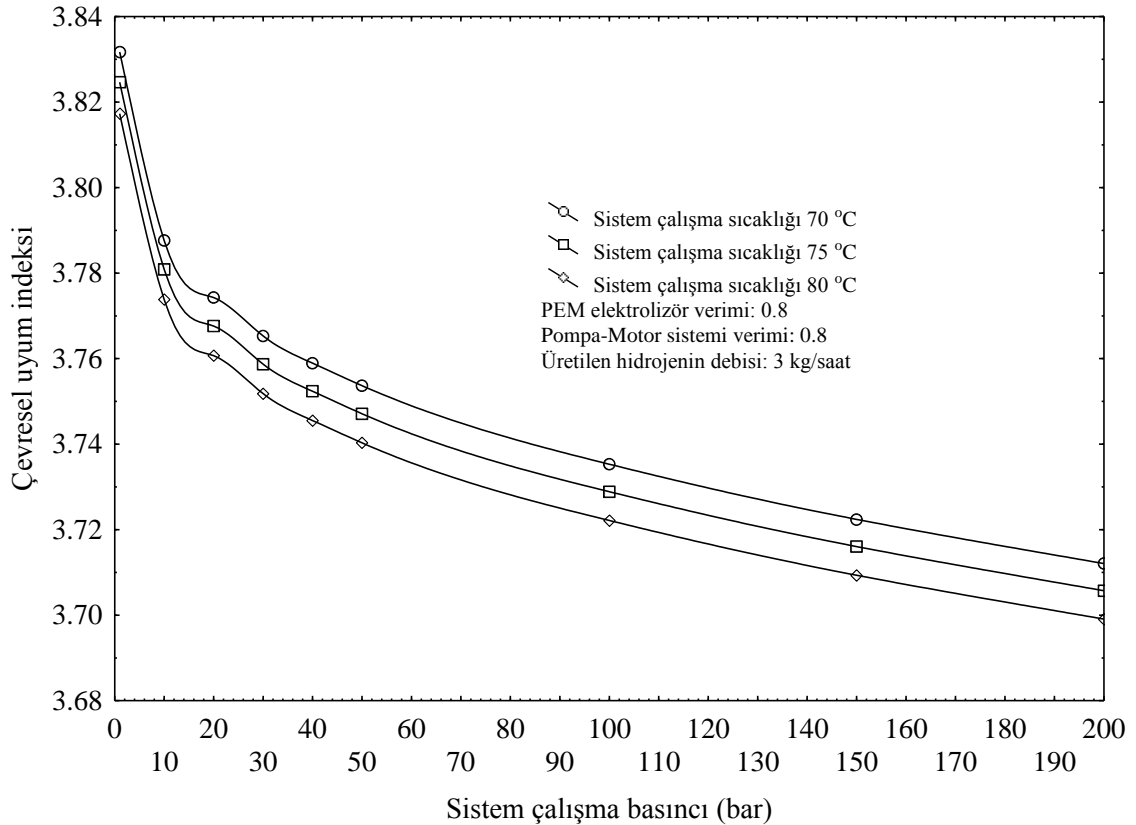
Şekil 3.13 Sistem çalışma basıncına bağlı olarak çevresel yıkım katsayısının sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi

Şekil 3.14'te sistem çalışma basıncına göre çevresel yıkım indeksinin sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi sunulmuştur. Burada PEM elektrolizörün enerji verimi 0.8, pompa-motor sisteminin verimi 0.8 ve üretilecek olan hidrojen gazının debisi kabullerde ifade edildiği gibi 3 kg/saat olarak alınmıştır. Ayrıca bu grafikte sistem çalışma basıncına bağlı olarak (1 bar, 10 bar, 20 bar, 30 bar, 40 bar, 50 bar, 100 bar, 150 bar, 200 bar) çevresel yıkım indeksinin sistem çalışma sıcaklıklarına göre değişimi incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, sistem çalışma basıncı arttığında çevresel yıkım indeksinin arttığı görülmektedir. Ayrıca sistem çalışma basıncı sabit alındığında sistem çalışma sıcaklığı (70 °C, 75 °C ve 80 °C) arttığında çevresel yıkım indeksinin arttığı görülmektedir. Örneğin; sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda, sistem çalışma sıcaklığı 70 °C seçildiğinde çevresel yıkım indeksi 0.269 olurken, sistemin çalışma sıcaklığı 75 °C olduğunda çevresel yıkım indeksi 0.270 olmaktadır. Ayrıca sistem çalışma sıcaklığı 75 °C olduğu durumda sistem çalışma basıncı 100 bar seçildiğinde çevresel yıkım indeksi 0.268 olurken aynı çalışma şartlarında sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda çevresel yıkım indeksi 0.270 olmaktadır.



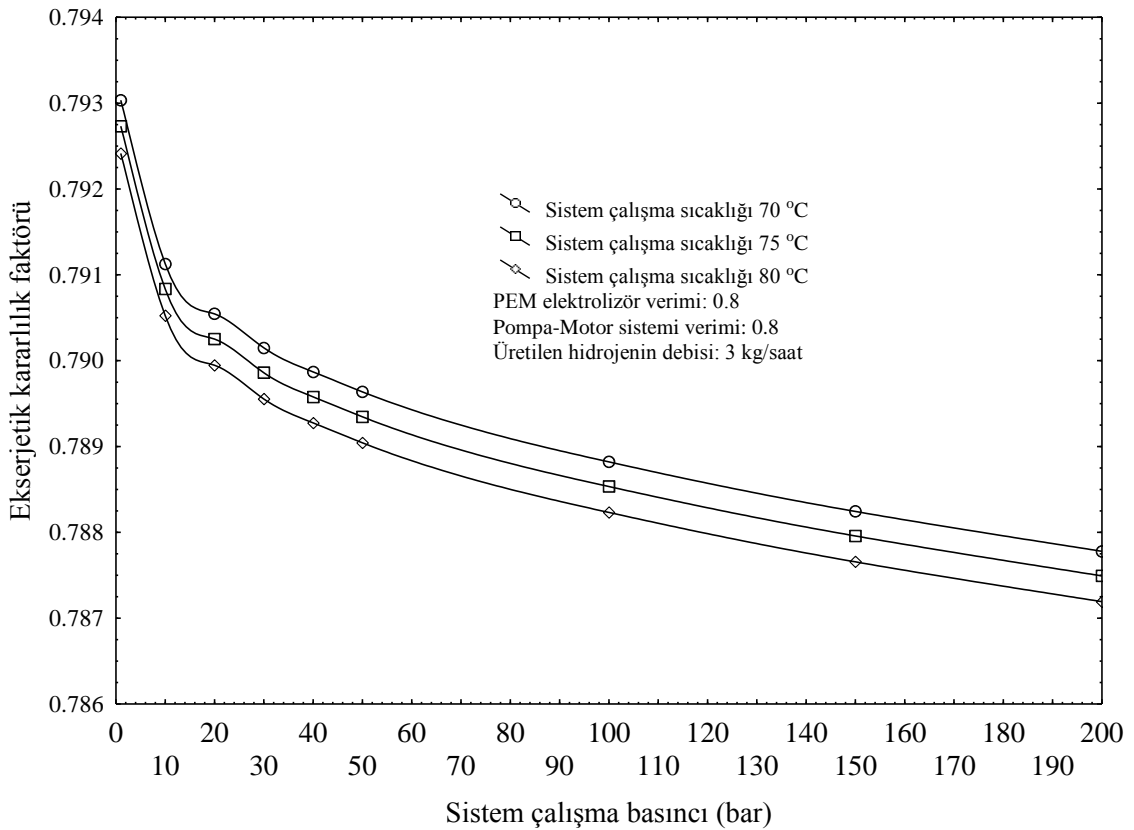
Şekil 3.14 Sistem çalışma basıncına bağlı olarak çevresel yıkım indeksinin sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi

Şekil 3.15'te sistem çalışma basıncına göre çevresel uyum indeksinin sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi sunulmuştur. Burada PEM elektrolizörün enerji verimi 0.8, pompa-motor sisteminin verimi 0.8 ve üretilecek olan hidrojen gazının debisi kabullerde ifade edildiği gibi 3 kg/saat olarak alınmıştır. Ayrıca bu grafikte sistem çalışma basıncına bağlı olarak (1 bar, 10 bar, 20 bar, 30 bar, 40 bar, 50 bar, 100 bar, 150 bar, 200 bar) çevresel uyum indeksinin çalışma sıcaklıklarına göre değişimi incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, sistem çalışma basıncı arttığında çevresel uyum indeksinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca sistem çalışma basıncı sabit alındığında sistem çalışma sıcaklığı (70 °C, 75 °C ve 80 °C) arttığında çevresel uyum indeksinin azaldığı görülmektedir. Örneğin; sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda, sistem çalışma sıcaklığı 70 °C seçildiğinde çevresel uyum indeksi 3.712 olurken, sistemin çalışma sıcaklığı 75 °C olduğunda çevresel uyum indeksi 3.706 olmaktadır. Ayrıca sistem çalışma sıcaklığı 75 °C olduğu durumda sistem çalışma basıncı 100 bar seçildiğinde çevresel uyum indeksi 3.723 olurken aynı çalışma şartlarında sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda çevresel uyum indeksi 3.706 olmaktadır.



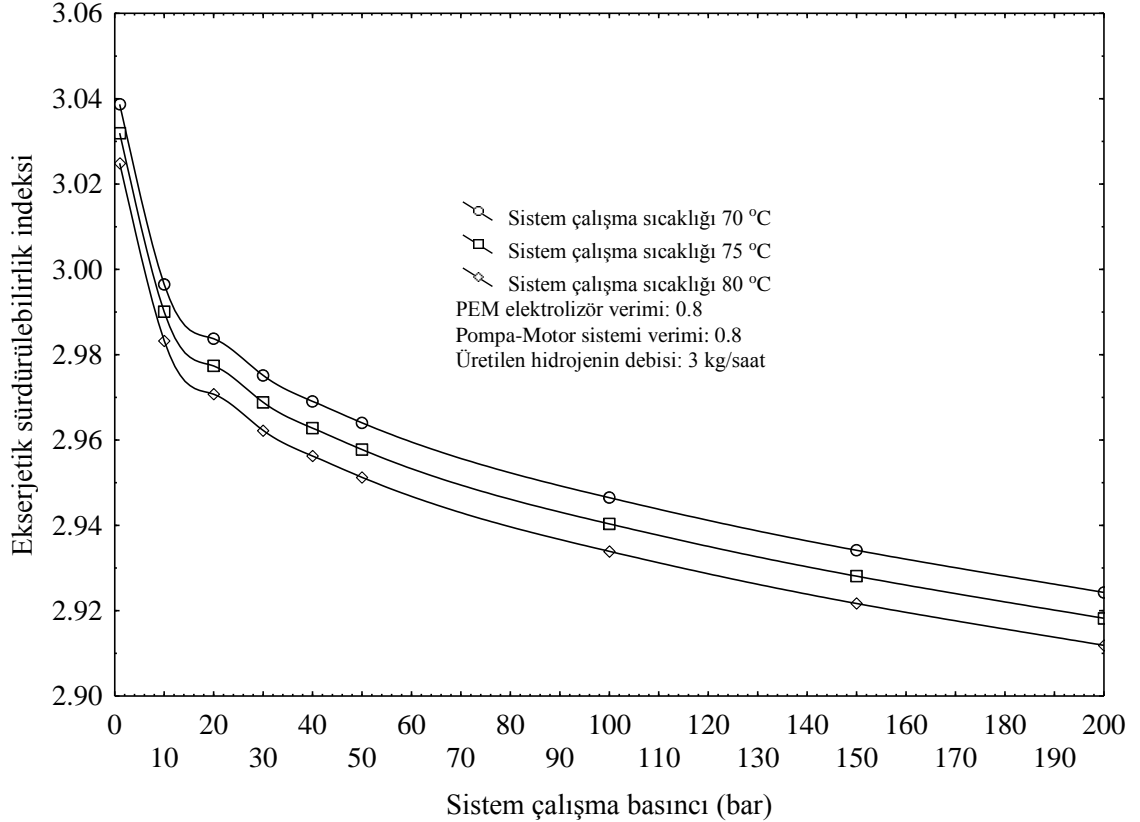
Şekil 3.15 Sistem çalışma basıncına bağlı olarak çevresel uyum indeksinin sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi

Şekil 3.16’da sistem çalışma basıncına göre ekserjetik kararlılık faktörünün sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi sunulmuştur. Burada PEM elektrolizörün enerji verimi 0.8, pompa-motor sisteminin verimi 0.8 ve üretilecek olan hidrojen gazının debisi kabullerde ifade edildiği gibi 3 kg/saat olarak alınmıştır. Ayrıca bu grafikte sistem çalışma basıncına bağlı olarak (1 bar, 10 bar, 20 bar, 30 bar, 40 bar, 50 bar, 100 bar, 150 bar, 200 bar) ekserjetik kararlılık faktörünün çalışma sıcaklıklarına göre değişimi incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, sistem çalışma basıncı arttığında ekserjetik kararlılık faktörünün azaldığı görülmektedir. Ayrıca sistem çalışma basıncı sabit alındığında sistem çalışma sıcaklığı (70 °C, 75 °C ve 80 °C) arttığında ekserjetik kararlılık faktörünün azaldığı görülmektedir. Örneğin; sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda, sistem çalışma sıcaklığı 70 °C seçildiğinde ekserjetik kararlılık faktörü 0.788 olurken, sistemin çalışma sıcaklığı 75 °C olduğunda ekserjetik kararlılık faktörü 0.787 olmaktadır. Ayrıca sistem çalışma sıcaklığı 75°C olduğu durumda sistem çalışma basıncı 100 bar seçildiğinde ekserjetik kararlılık faktörü 0.789 olurken aynı çalışma şartlarında sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda ekserjetik kararlılık faktörü 0.787 olmaktadır.



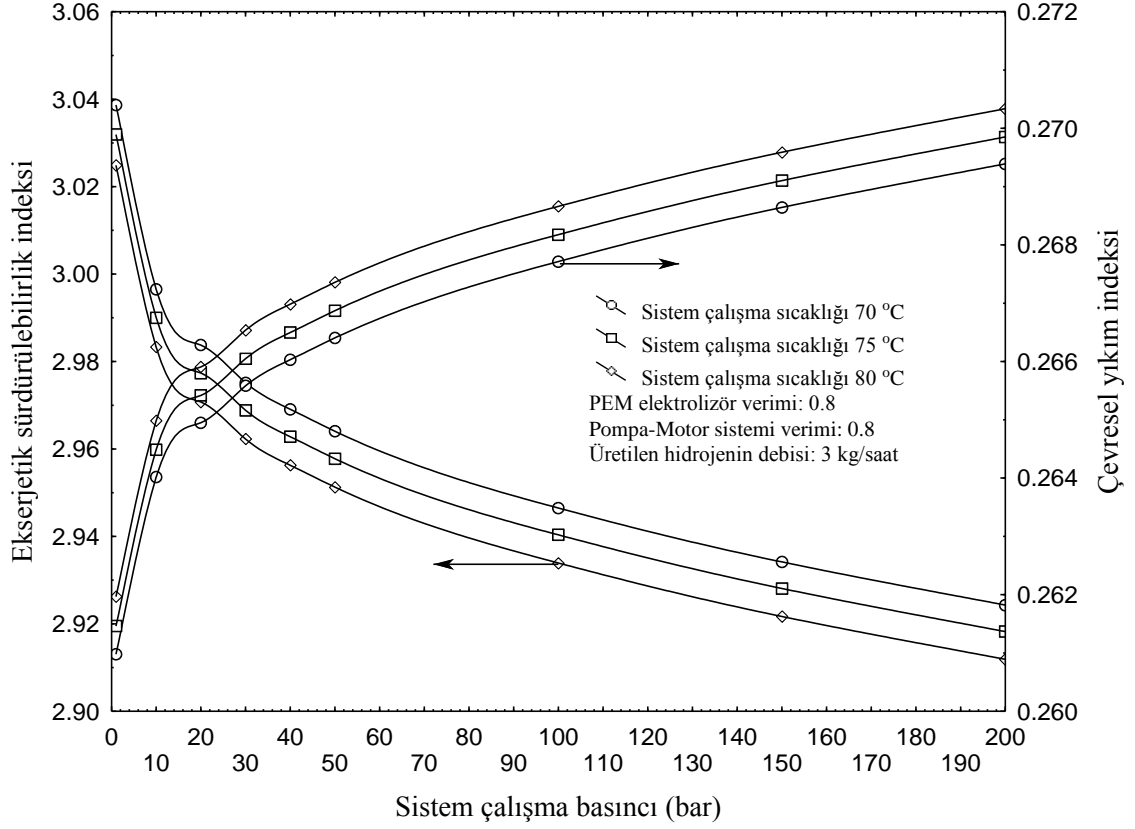
Şekil 3.16 Sistem çalışma basıncına bağlı olarak ekserjetik kararlılık faktörünün sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi

Şekil 3.17’de sistem çalışma basıncına göre ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi sunulmuştur. Burada PEM elektrolizörün enerji verimi 0.8, pompa-motor sisteminin verimi 0.8 ve üretilecek olan hidrojen gazının debisi kabullerde ifade edildiği gibi 3 kg/saat olarak alınmıştır. Ayrıca bu grafikte sistem çalışma basıncına bağlı olarak (1 bar, 10 bar, 20 bar, 30 bar, 40 bar, 50 bar, 100 bar, 150 bar, 200 bar) ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin çalışma sıcaklıklarına göre değişimi incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, sistem çalışma basıncı arttığında ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca sistem çalışma basıncı sabit alındığında sistem çalışma sıcaklığı (70 °C, 75 °C ve 80 °C) arttığında ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin azaldığı görülmektedir. Örneğin; sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda, sistem çalışma sıcaklığı 70 °C seçildiğinde ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.924 olurken, sistemin çalışma sıcaklığı 75 °C olduğunda ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.918 olmaktadır. Ayrıca sistem çalışma sıcaklığı 75 °C olduğu durumda sistem çalışma basıncı 100 bar seçildiğinde ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.940 olurken aynı çalışma şartlarında sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.918 olmaktadır.



Şekil 3.17 Sistem çalışma basıncına bağlı olarak ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin sistem çalışma sıcaklığına göre değişimi

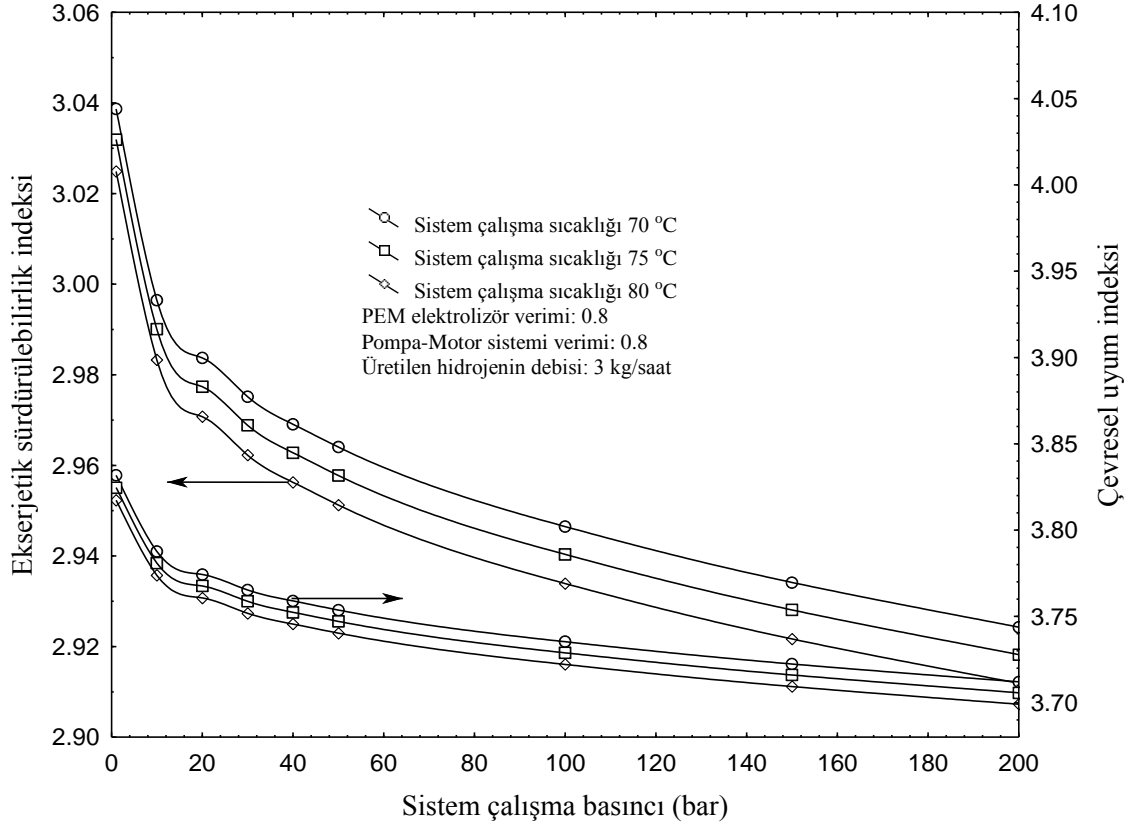
Şekil 3.18’de sistem çalışma basıncına göre ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin ve çevresel yıkım indeksinin çalışma sıcaklığına göre değişimi sunulmuştur. Burada PEM elektrolizörün enerji verimi 0.8, pompa-motor sisteminin verimi 0.8 ve üretilecek olan hidrojen gazının debisi kabullerde ifade edildiği gibi 3 kg/saat olarak alınmıştır. Ayrıca bu grafikte sistem çalışma basıncına bağlı olarak (1 bar, 10 bar, 20 bar, 30 bar, 40 bar, 50 bar, 100 bar, 150 bar, 200 bar) ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin ve çevresel yıkım indeksinin çalışma sıcaklıklarına göre değişimi incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, sistem çalışma basıncı arttığında ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin düştüğü ve çevresel yıkım indeksinin de arttığı görülmektedir. Ayrıca sistem çalışma basıncı sabit alındığında sistem çalışma sıcaklığı (70 °C, 75 °C ve 80 °C) arttığında ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin azaldığı, çevresel yıkım indeksinin de arttığı görülmektedir. Örneğin; sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda, sistem çalışma sıcaklığı 70 °C seçildiğinde ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.924, çevresel yıkım indeksi de 0.269 olurken sistem çalışma sıcaklığı 75°C olduğunda ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.918 çevresel yıkım indeksi de 0.270 olmaktadır. Ayrıca sistem çalışma sıcaklığı 70°C olduğu durumda sistem çalışma basıncı 100 bar seçildiğinde ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.941, çevresel yıkım indeksi 0.268 olurken aynı çalışma şartlarında sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.924 ve çevresel yıkım indeksi 0.269 olmaktadır.



Şekil 3.18 Sistem çalışma basıncına bağlı olarak ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin ve çevresel yıkım indeksinin sistemin çalışma sıcaklığına göre değişimi

Şekil 3.19'da sistem çalışma basıncına göre ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin ve çevresel uyum indeksinin çalışma sıcaklığına göre değişimi sunulmuştur. Burada PEM elektrolizörün enerji verimi 0.8, pompa-motor sisteminin verimi 0.8 ve üretilecek olan hidrojen gazının debisi kabullerde ifade edildiği gibi 3 kg/saat olarak alınmıştır. Ayrıca bu grafikte sistem çalışma basıncına bağlı olarak (1 bar, 10 bar, 20 bar, 30 bar, 40 bar, 50 bar, 100 bar, 150 bar, 200 bar) ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin ve çevresel uyum indeksinin çalışma sıcaklıklarına göre değişimi incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, sistem çalışma basıncı arttığında ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin azaldığı ve çevresel uyum indeksinin de azaldığı görülmektedir. Ayrıca sistem çalışma basıncı sabit alındığında sistem çalışma sıcaklığı (70 °C, 75 °C ve 80 °C) arttığında ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin azaldığı, çevresel uyum indeksinin de azaldığı görülmektedir. Örneğin; sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda, sistem çalışma sıcaklığı 70 °C seçildiğinde ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.924, çevresel uyum indeksi de 3.712 olurken sistem çalışma sıcaklığı 75 °C olduğunda ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.918, çevresel uyum indeksi de 3.706 olmaktadır. Ayrıca sistem çalışma sıcaklığı

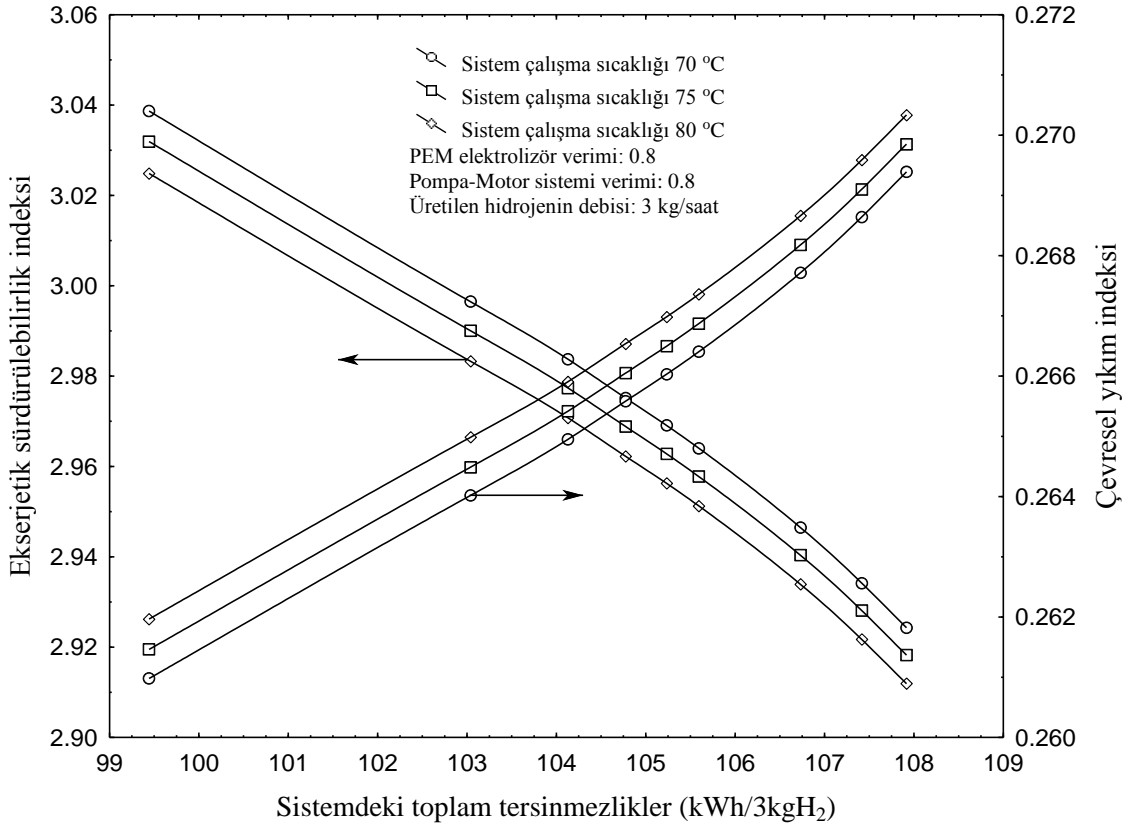
75°C olduğu durumda sistem çalışma basıncı 100 bar seçildiğinde ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.940, çevresel uyum indeksi 3.729 olurken aynı çalışma şartlarında sistem çalışma basıncı 200 bar olduğu durumda ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.918, çevresel uyum indeksi 3.706 olmaktadır.



Şekil 3.19 PEM elektrolizör verimi 0.8 iken sistem çalışma basıncına bağlı olarak ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi ve çevresel yıkım indeksinin sistemin çalışma sıcaklığına göre değişimi

Şekil 3.20'de Sistemin toplam tersinmezliklerine göre ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin ve çevresel yıkım indeksinin çalışma sıcaklığına göre değişimi sunulmuştur. Burada PEM elektrolizörün verimi 0.8 kabul edilmiş ve üretilecek olan hidrojen gazının debisi kabullerde ifade edildiği gibi 3 kg/saat olarak alınmıştır. Sistemde en fazla ekserji kaybı (toplam tersinmezlikler) PEM elektrolizör veriminin 0.5, sistem çalışma basıncının 200 bar ve sistem çalışma sıcaklığının 80 °C olduğu çalışma şartlarında olmaktadır. Ayrıca bu grafikte sistemdeki maksimum toplam tersinmezliklerine bağlı olarak ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin ve çevresel yıkım indeksinin çalışma sıcaklıklarına göre değişimi incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, sistemin toplam tersinmezlikleri arttığında ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin düştüğü ve çevresel yıkım indeksinin de arttığı görülmektedir. Ayrıca sistem toplam tersinmezlikleri sabit

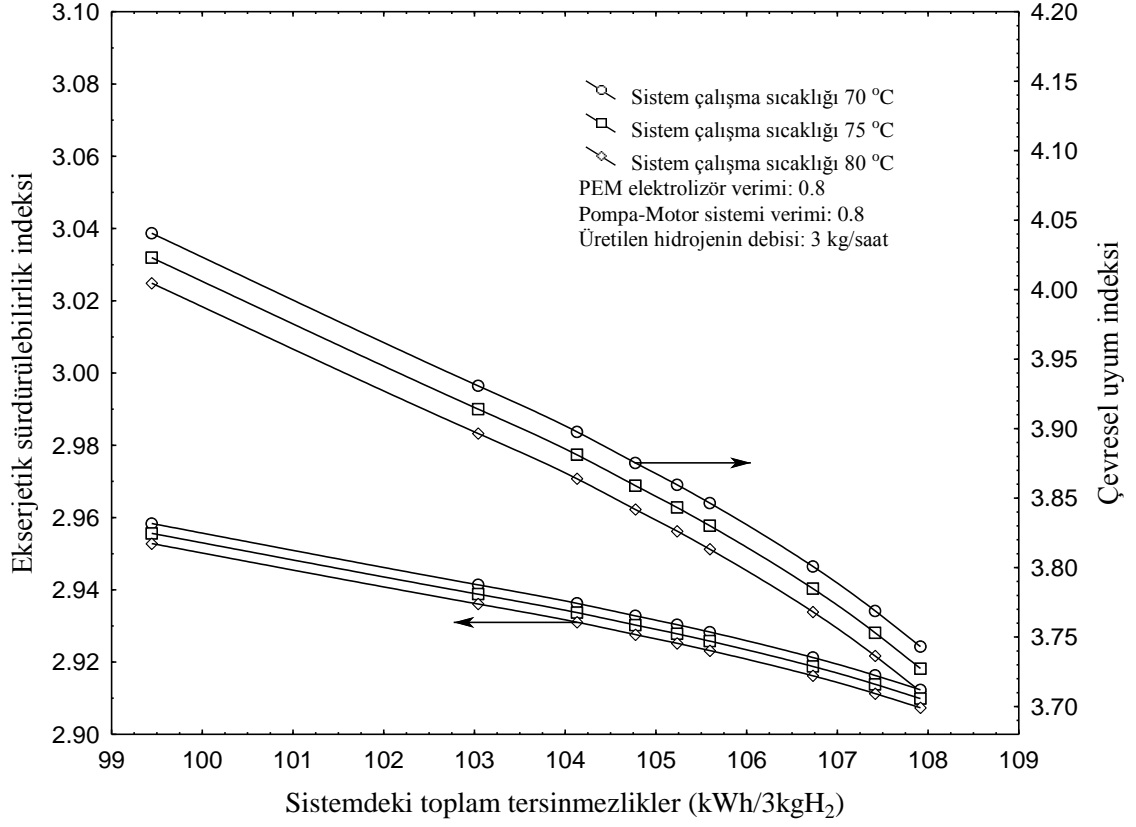
alındığında sistem çalışma sıcaklığı 70 °C, 75 °C ve 80 °C arttığında ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin azaldığı, çevresel yıkım indeksinin de arttığı görülmektedir. Örneğin; PEM elektrolizörün verimi 0.8 kabul edildiğinde, sistemdeki toplam tersinmezliklerin 107.916 kWh/3kgH₂ olduğu durumda, sistem çalışma sıcaklığı 70 °C seçildiğinde ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.924, çevresel yıkım indeksi de 0.269 olurken sistem çalışma sıcaklığı 75 °C olduğunda ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.918 çevresel yıkım indeksi de 0.270 olmaktadır. Ayrıca PEM elektrolizörün verimi 0.8 kabul edildiğinde sistem çalışma sıcaklığı 75 °C olduğu durumda sistemdeki toplam tersinmezliklerin 106.730 kWh/3kgH₂ olduğu durumda ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.940, çevresel yıkım indeksi 2.268 olurken aynı çalışma şartlarında sistemdeki toplam tersinmezliklerin 107.916 kWh/3kgH₂ olduğu durumda ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.918, çevresel yıkım indeksi 0.270 olmaktadır.



Şekil 3.20 PEM elektrolizör verimi 0.8 iken sistemin toplam tersinmezliklere bağlı olarak ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi ve çevresel yıkım indeksinin sistemin çalışma sıcaklığına göre değişimi

Şekil 3.21'de Sistemin toplam tersinmezliklerine bağlı olarak ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin ve çevresel uyum indeksinin çalışma sıcaklığına göre

değişimi sunulmuştur. Burada PEM elektrolizörün verimi 0.8 kabul edilmiş ve üretilecek olan hidrojen gazının debisi kabullerde ifade edildiği gibi 3 kg/saat olarak alınmıştır. Sistemde en fazla ekserji kaybı (toplam tersinmezlikler) PEM elektrolizör veriminin 0.5, sistem çalışma basıncının 200 bar ve sistem çalışma sıcaklığının 80°C olduğu çalışma şartlarında olmaktadır. Ayrıca bu grafikte sistemin toplam tersinmezliklerine bağlı olarak ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin ve çevresel uyum indeksinin çalışma sıcaklıklarına göre değişimi incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, sistemin toplam tersinmezlikleri arttığında ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin azaldığı ve çevresel uyum indeksinin de azaldığı görülmektedir. Ayrıca sistem toplam tersinmezlikleri sabit alındığında sistem çalışma sıcaklığı 70 °C, 75 °C ve 80 °C arttığında ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin azaldığı, çevresel yıkım indeksinin de azaldığı görülmektedir. Örneğin; PEM elektrolizörün verimi 0.8 kabul edildiğinde, sistemdeki toplam tersinmezliklerin 107.916 kWh/3kgH₂ olduğu durumda, sistem çalışma sıcaklığı 70 °C seçildiğinde ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.924, çevresel uyum indeksi de 3.712 olurken sistem çalışma sıcaklığı 75 °C olduğunda ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.918 çevresel uyum indeksi de 3.705 olmaktadır. Ayrıca PEM elektrolizörün verimi 0.8 kabul edildiğinde sistem çalışma sıcaklığı 75 °C olduğu durumda sistemdeki toplam tersinmezliklerin 106.730 kWh/3kgH₂ olduğu durumda ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.940, çevresel uyum indeksi 3.728 olurken aynı çalışma şartlarında sistemdeki toplam tersinmezliklerin 107.916 kWh/3kgH₂ olduğu durumda ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.918 ve çevresel uyum indeksi 3.705 olmaktadır.



Şekil 3.21 PEM elektrolizör verimi 0.8 iken sistemin toplam tersinmezliklere bağlı olarak ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi ve çevresel uyum indeksinin sistemin çalışma sıcaklığına göre değişimi

BÖLÜM IV

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, saatte 3 kg yüksek basınçta hidrojen üretimi gerçekleştiren sistemin parametrik olarak incelenmesi ele alınmıştır. Bu çalışmada; sistem çalışma basıncı ve sıcaklığına göre yüksek basınçlı PEM elektrolizöre gerekli olan iş ve ısı miktarlarının ve tüm sistemin enerji, ekserji ve sürdürülebilirlik analizleri yapılmıştır. Bu parametrik çalışmanın ileride yapılması düşünülen konuyla ilgili pratik uygulamalara katkıda bulunması beklenmektedir. Bu çalışma sonucunda, sistem çalışma basıncı ve sıcaklığına göre sistemdeki diğer büyüklüklerin parametrik değerleri aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır.

- PEM elektrolizör verimi 0.6, sistem çalışma basıncı 200 bar, çalışma sıcaklığı 75 °C olması durumunda; yüksek basınçlı PEM elektrolizör için gerekli olan iş miktarı 174.464 kWh/3kgH₂, gerekli olan ısı miktarı 22.809 kWh/3kgH₂, PEM elektrolizör ekserji verimi 0.578 olurken, aynı çalışma şartlarında sistem çalışma basıncının 100 bar olması durumunda; PEM elektrolizör için gerekli olan iş miktarı 172.447 kWh/3kgH₂, gerekli olan ısı miktarı 24.774 kWh/3kgH₂, PEM elektrolizör ekserji verimi 0.579 olarak bulunmuştur.

- PEM elektrolizör verimi 0.7, sistem çalışma basıncı 200 bar, çalışma sıcaklığı 75 °C olması durumunda; yüksek basınçlı PEM elektrolizör için gerekli olan iş miktarı 149.540 kWh/3kgH₂, gerekli olan ısı miktarı 19.550 kWh/3kgH₂, PEM elektrolizör ekserji verimi 0.6739 olurken, aynı çalışma şartlarında sistem çalışma basıncının 100 bar olması durumunda; PEM elektrolizör için gerekli olan iş miktarı 147.812 kWh/3kgH₂, gerekli olan ısı miktarı 21.234 kWh/3kgH₂, PEM elektrolizör ekserji verimi 0.676 olarak bulunmuştur.

- PEM elektrolizör verimi 0.7, sistem çalışma basıncı 200 bar, çalışma sıcaklığı 75 °C olması durumunda; yüksek basınçlı PEM elektrolizör için gerekli olan iş miktarı 149.540 kWh/3kgH₂, gerekli olan ısı miktarı 19.550 kWh/3kgH₂, PEM elektrolizör ekserji verimi 0.674 olurken, aynı çalışma şartlarında sistem çalışma sıcaklığının 70 °C olması durumunda; PEM elektrolizör için gerekli olan iş miktarı 14.824 kWh/3kgH₂,

gerekli olan ısı miktarı 19.354 kWh/3kgH₂, PEM elektrolizör ekserji verimi 0.674 olarak bulunmuştur.

- PEM elektrolizör verimi 0.8, sistem çalışma basıncı 200 bar, çalışma sıcaklığı 75 °C olması durumunda; sistemdeki toplam ekserji kaybı 27.774 kWh/3kgH₂, sistemin ekserji verimi 0.757 sistemin çevresel yıkım indeksi 0.268 ve sistemin ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.9295 olurken, aynı çalışma şartlarında sistem çalışma basıncının 100 bar olması durumunda; PEM sistemdeki toplam ekserji kaybı 27.366 kWh/3kgH₂, sistemin ekserji verimi 0.759, sistemin çevresel yıkım indeksi 0.267 ve sistemin ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.951 olarak bulunmuştur.

- PEM elektrolizör verimi 0.8, sistem çalışma basıncı 200 bar, çalışma sıcaklığı 75 °C olması durumunda; sistemdeki toplam ekserji kaybı 27.774 kWh/3kgH₂, sistemin ekserji verimi 0.757 sistemin çevresel yıkım indeksi 0.269 ve sistemin ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.929 olurken, aynı çalışma şartlarında sistem çalışma sıcaklığının 70 °C olması durumunda; sistemdeki toplam ekserji kaybı 27.705 kWh/3kgH₂, sistemin ekserji verimi 0.758, sistemin çevresel yıkım indeksi 0.268 ve sistemin ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.934 olarak bulunmuştur.

- PEM elektrolizör verimi 0.8, sistem çalışma basıncı 200 bar, çalışma sıcaklığı 75 °C olması durumunda; sistemdeki toplam ekserji kaybı 27.774 kWh/3kgH₂, sistemin ekserji verimi 0.757 sistemin çevresel yıkım indeksi 0.268 ve sistemin ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 2.929 olurken, aynı çalışma şartlarında PEM elektrolizör veriminin 0.7 olması durumunda; sistemdeki toplam ekserji kaybı 46.801 kWh/3kgH₂, sistemin ekserji verimi 0.758, sistemin çevresel yıkım indeksi 0.453 ve sistemin ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 1.515 olarak bulunmuştur.

- PEM elektrolizör verimi 0.8, sistem çalışma basıncı 200 bar, çalışma sıcaklığı 75 °C olması durumunda; sistemin enerji verimi 0.667 olurken, aynı çalışma şartlarında çalışma sıcaklığının 70 °C olması durumunda; sistemin enerji verimi 0.668 olarak bulunmuştur.

- PEM elektrolizör verimi 0.8, sistem çalışma basıncı 200 bar, çalışma sıcaklığı 75 °C olması durumunda; sistemin enerji verimi 0.667 olurken, aynı çalışma şartlarında sistem

çalışma basıncının 100 bar olması durumunda; sistemin enerji verimi 0.668 olarak bulunmuştur.

- PEM elektrolizör verimi 0.8, sistem çalışma basıncı 200 bar, çalışma sıcaklığı 75 °C olması durumunda; sistemin enerji verimi 0.667 olurken, aynı çalışma şartlarında PEM elektrolizör veriminin 0.7 olması durumunda; sistemin enerji verimi 0.585 olarak bulunmuştur.

Hidrolik enerji destekli hidrojen gaz yakıt istasyonu için yüksek basınçlı hidrojen üretimini sağlayan birim, sürdürülebilirlik ve çevresel uyum açısından sisteme entegrasyonu için; ekserji veriminin yüksek olduğu, atık ekserji oranının, ekserji yıkım faktörünün, çevresel yıkım katsayısının düşük olduğu, çevresel uyum indeksinin, ekserjetik kararlılık faktörünün ve ekserjetik sürdürülebilirlik indeksinin yüksek olduğu değerlerin seçilmesi önerilir.

KAYNAKLAR

- [1] Veziroğlu, T. N ve Bockris, J. O Solar Hydrogen Energy: the Power to Save the Earth, McDonald Group, Optima, England, 1991.
- [2] Midilli, A., Dincer, I., Ay, M., Sustainable Energy Strategies for Green Energy Supply, Proceedings of the International Green Energy Conference, Waterloo, Ontario, Canada, 12-16, June, 2005.
- [3] Midilli, A., Dincer, I., Rosen, M. A., On Hydrogen Energy Strategies, Proceedings of Hydrogen and Fuel Cells Conference and Trade Show, Toronto, Canada, 25-28, September, 2004
- [4] Midilli, A., Dincer, I., Rosen, M. A., On Hydrogen Energy Strategies and Global Stability and Unrest, Proceedings of Hydrogen and Fuel Cells Conference and Trade Show, Toronto, Canada, 25-28, September, 2004.
- [5] Midilli, A., Ay, M., Dinçer, I., Hidrojenin Dünya Barışına Katkısının Parametrik Değerlendirilmesi, V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Cilt 2: 681-691, İstanbul, 26-28, Mayıs, 2004.
- [6] Midilli, A., Ay, M., Dincer, I., Rosen, M. A., On Hydrogen and Hydrogen Energy Strategies I: Current Status and Needs, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 9, 255-271, (2005).
- [7] Midilli, A., Ay, M., Dincer, I., Rosen, M. A., On Hydrogen and Hydrogen Energy Strategies II: Future Projections Affecting Global Stability and Unrest, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 9, 273-287, 2005.
- [8] Midilli, A., Ay, M., Dincer, I., Rosen, M. A., On Hydrogen Energy Strategy: The Key Role In This Century and Beyond, Proceeding of The First Cappadocia Mechanical Engineering Symposium, Cappadocia, Turkey, 14-16, July, 2004.
- [9] Aslan, Ö., Hidrojen Ekonomisine Doğru, İstanbul Ticaret Üniversitesi, Sosyal Bilimler Dergisi, Yıl:6, Sayı:11, 283-298, Bahar 2007/2.
- [10] Delikanlı, K., Bayhan, M., Jankowski A., Hidrojenin Motorlarda Kullanım ve Motor Gürültüsüne Etkileri, Süleyman Demirel Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, 2005.
- [11] Kantürk, A., Pişkin, S., Alternatif Enerji Taşıyıcısı: Hidrojen ve Yıldız Teknik Üniversitesinde Gerçekleştirilen Çalışmalar, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 2007.
- [12] Baykara S., Sudan Hidrojen Üretimi ve Enerji Sektöründe Hidrojen, Y.T.Ü., Kimya Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 2000.
- [13] Friedland R., H₂ Generating and Fueling Station for Vermont, Proton Hydrogen Technology Group, 2005.

- [14] Mangold K-M., Advanced Electrolyzers, Dechema e.v. Karl-Winnacker-Institut Frankfurt am Main, Germany, 2008.
- [15] Etiévan, C., Puyenchet, C., Millet P., Design and Operating Performances of a 5 kW PEM Water Electrolyser for High Pressure Production of Pure Hydrogen, CETH, Innov'Valley, 91460 Marcoussis, France, 2005.
- [16] Demin, A., Gorbova E., Tsiakaras, P, High Temperature Electrolyzer Based on Solid Oxide Co-ionic Electrolyte: A theoretical Model, School of Engineering, Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, Greece, 2007.
- [17] Engel R. A., Chapman G. S., Chamberlin C. E. ve Lehman P.A., JOS6 Talioy, Byron Mortan, Lois zoo and Nicholas E. Vanderborgh, Los Alamos, New Mexico, 2000.
- [18] Meng Ni., Michael K. H. Leung, Dennis Y. C Leung, Department of Mechanical Engineering, Electrochemistry Modeling of Proton Exchange Membrane (PEM) Water Electrolysis for Hydrogen Production University of Hong Kong, Pokfulam Road, Hong Kong, 2006.
- [19] Dale N. V., Manna M. D., Salehfarb H., Semiempirical Model Based on Thermodynamic Principles for Determining 6 kW Proton Exchange Membrane Electrolyzer Stack Characteristics, Chemical Engineering Department, University of North Dakota, USA, 2008.
- [20] Laoun B., Thermodynamics Aspect of High Pressure Hydrogen Production by Water Electrolysis, Unité de Recherche et d'Application en Energies Renouvelables, 'URAER' Zone Industrielle Gaar Taam, B.P. 88, 47000, Ghardaia, Algeria, 2007.
- [21] Deschamps A., Etievant C., Fateev V., Grigoriev S., Kalinnikov A., Milletec P., V., Poremsky C., Puyenchet, Compagnie Européenne des Technologies de l'Hydrogène, route de Nozay, Etablissements Alcatel, Lyon France, 2006.
- [22] Santarelli M., Medina P., Cali M., Fitting Regression Model and Experimental Validation for a High Pressure PEM Electrolyzer, Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino, Italy, 2009.
- [23] Yılançı A., Oztürk H.K., Atalay O., Dinçer I., Exergy Analysis of a 1.2 kW PEM Fuel Cell System, Pamukkale University, Faculty of Engineering, Denizli, Turkey, 2007.
- [24] Meng Ni, Michael K. H. Leung, Dennis Y. C. Leung, Energy and Exergy Analysis of Hydrogen Production by Solid Oxide Steam Electrolyzer Plant, International Journal of Hydrogen Energy 32, 4648 – 4660, 2007.
- [25] Tolga Balta M., Hepbasli A., Energy and Exergy Efficiency Analysis of Geothermal Based Hydrogen Production Through High-Temperature Steam Electrolysis, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ege University, 35100 Bornova, İzmir, Turkey, 2009.

- [26] Moulthrop L., Water Electrolysis Enables Renewables to Hydrogen, Proton Energy Systems, Inc. Hydrogen Technology Group 10 Technology Drive Wallingford, CT 06492, 2007.
- [27] Dincer, İ., The role of exergy in energy policy making, *Energy Policy*, 30, 137–149, 2002.
- [28] Midilli A., Dincer I., Key Strategies of Hydrogen Energy Systems for Sustainability, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 511–524, 2007.
- [29] Nist Web Sitesi, <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>, 2009.
- [30] Kotas T. J., The Exergy Method of Thermal Plant Analysis, Department of Mechanical Engineering, Queen Mary and Wesfield College, University of London, 1995.
- [31] Meng Ni, Michael K.H. Leung, Dennis Y.C. Leung, Energy and Exergy Analysis of Hydrogen Production by a Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolyzer Plant, *Energy Conversion and Management*, 49, 2748–2756, 2008.
- [32] Oi T., Sakaki Y., Optimum Hydrogen Generation Capacity and Current Density of the PEM-Type Water Electrolyzer Operated Only During the Off-Peak Period of Electricity Demand, *Journal of Power Sources*, 129, 229-237, 2004.
- [33] Görgün H., Dynamic Modelling of a Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolyzer, *International Journal of Hydrogen Energy*, 31, 29-38, 2006.
- [34] Cengel Y. A., Boles M. A., *Thermodynamics an Engineering Approach*, Fifth Edition, Mc Graw Hill, New York, 2006.
- [35] Meng Ni, Michael K.H. Leung, Dennis Y.C. Leung, Parametric Study of Solid Oxide Steam Electrolyzer for Hydrogen Production, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 2305 – 2313, 2007.
- [36] Newell T.A., *Thermodynamic Analysis of an Electrochemical Refrigeration Cycle*, Mechanical and Industrial Engineering Dept., Urbana, 1997.
- [37] Marangino F., Santarelli M., Cali M., Theoretical Model and Experimental Analysis of High Pressure PEM Water Electrolyser for Hydrogen Production, Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino, Torino, Italy, 2008.
- [38] Dinçer I, Rosen M. A., *Energy, Environment and Sustainable Development*, Elsevier, USA, 2007.
- [39] Midilli, A. and Dincer, İ., Development of Some Exergetic Parameters for PEM Fuel Cells for Measuring Environmental Impact and Sustainability, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 3858 – 3872, 2009.