T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAKIT PİLLERİNİN BİRLEŞİK ISI GÜÇ SİSTEMİ OLARAK MEVCUT BİNALARDA KULLANIMI

İbrahim Utku BAŞYAZICI

DOKTORA TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Isı Proses Programı

Danışman
Prof. Dr. Özden AĞRA

Şubat, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAKIT PİLLERİNİN BİRLEŞİK ISI GÜÇ SİSTEMİ OLARAK MEVCUT BİNALARDA KULLANIMI

İbrahim Utku BAŞYAZICI tarafından hazırlanan tez çalışması 26.02.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Özden AĞRA
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Özden AĞRA, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Şevket Özgür ATAYILMAZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. İsmail Cem PARMAKSIZOĞLU, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Nuri Alpay KÜREKÇİ , Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Aliihsan KOCA, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Özden AĞRA sorumluluğunda tarafımca hazırlanan YAKIT PİLLERİNİN BİRLEŞİK ISI GÜÇ SİSTEMİ OLARAK MEVCUT BİNALARDA KULLANIMI başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

İbrahim Utku BAŞYAZICI

İmza

Sevgili eşime...

TEŞEKKÜR

Bu doktora tezinin tamamlanması sürecince değerli bilgi, görüş ve önerileriyle bana devamlı yol gösteren ve cesaretlendiren tez danışmanım Sn.Prof.Dr.Özden Ağra'ya, tüm tez süreci boyunca desteğini hiç esirgemeyen tez jürisi üyelerim Sn.Prof.Dr Şevket Özgür Atayılmaz ve Sn.Prof.Dr.İsmail Cem Parmaksızoğlu'na sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Tüm tez çalışması süresince manevi desteğini esirgemeyerek bana yardımcı olan eşime ve bugünlere gelmemi sağlayan aileme de ayrıca teşekkür ederim.

İbrahim Utku BAŞYAZICI

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ x

ŞEKİL LİSTESİ xi

TABLO LİSTESİ xiii

ÖZET xiv

ABSTRACT xvi

1 GİRİŞ 1

1.1 Yakıt Pili . . . 1
1.2 Yakıt Pili Çalışmalarına Genel Bakış . . . 2
1.3 Tezin amacı . . . 2
1.4 Hipotez . . . 3

2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 4

2.1 Literatür Araştırması Kapsamı . . . 4
2.2 Fosforik Asit Yakıt Pilleri Üzerine Çalışmalar . . . 4
2.3 Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri Üzerine Çalışmalar . . . 8
2.4 Katı Oksit Yakıt Pilleri Üzerine Çalışmalar . . . 9
2.5 Literatür Araştırmasının Değerlendirmesi . . . 10

3 YAKIT PİLİ TEKNOLOJİSİ 12

3.1 Yakıt Pili Çalışma Prensibi . . . 12
3.2 Yakıt Pili Tipleri . . . 13
3.2.1 Fosforik Asit Yakıt Pilleri . . . 14
3.2.2 Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri . . . 14
3.2.3 Katı Oksit Yakıt Pilleri . . . 15
3.3 Yakıt Pili Karakteristikleri . . . 15
3.4 Yakıt Pili Seçimi . . . 15
3.5 Birleşik Isı Güç Sistemi Olarak FAYP Teknolojisi . . . 17

3.5.1 Fosforik Asit Yakıt Pili Temel Bileşenleri 17
3.5.2 FAYP Tipi Yakıt Pili Teknik Karakteristikleri 20
3.5.3 FAYP Tipi Yakıt Pili Ekonomik Karakteristikleri 23

4 ANALİZ METODOLOJİSİ 25
4.1 Veri Kaynakları 25
4.1.1 Örnek Ticari Yapının Değerlendirilmesi 25
4.1.2 Bina Enerji Talebinin İncelenmesi 26
4.1.3 Bina Isıtma ve Soğutma Sisteminin İncelenmesi 27
4.1.4 İklim Verileri 28
4.1.5 Sera Gazı Emisyon Faktörleri 28
4.1.6 Elektrik ve Doğalgaz Fiyat Serileri 29
4.1.7 Döviz Kuru Fiyat Serileri 29
4.2 Ekonomik Analiz Yöntemi 30
4.2.1 Birime İndirgenmiş Elektrik Maliyeti 30
4.2.2 İskonto Oranı 31
4.2.3 Net Bugünkü Değer Metodu 32
4.2.4 İç Verim Oranı (İVO) 32
4.2.5 Geri Ödeme Süresi 33
4.2.6 Fiyat Artışları 34
4.3 Sayısal Analiz Yöntemi 36
4.3.1 Enerji Modeli Akışı 37
4.3.2 Temel Enerji Denklemleri 39
4.3.3 Bina Elektrik Talebinin Dengelenmesi 40
4.3.4 Bina Isı Talebinin Dengelenmesi 42
4.3.5 Enerji Maliyeti ve Karbon Salımı Hesaplamaları 42
4.3.6 Ekipman Modelleri 43

5 YAKIT PİLLİ BİLEŞİK ISI GÜÇ ÜRETİMİ 46
5.1 Enerji Modeli Senaryoları 46
5.1.1 Mevcut Konvansiyonel Sistem 47
5.1.2 Yakıt Pili Senaryosu 01 49
5.1.3 Yakıt Pili Senaryosu 02 51
5.1.4 Yakıt Pili Senaryosu 03 53
5.1.5 Yakıt Pili Senaryosu 04 55
5.1.6 Yakıt Pili Senaryolarının Değerlendirilmesi 57
5.1.7 Hassasiyet Analizleri 58

6 EKONOMİK MUKAYESE İÇİN ÖNERİLER 62
6.1 Yöntem 62

6.2 İskonto Edilmiş Geri Ödeme Süresi İfadeleri 63
6.2.1 Çok Değişkenli Regresyon - Kategorize Edilmiş 63
6.2.2 Çok Değişkenli Regresyon - Kategorize Edilmemiş 66
6.3 İskontolu Geri Ödeme İfadesi Hassasiyet Analizi 69
6.4 Ekonomik Mukayese İçin Grafik Yöntem 72
6.5 İskontolu Geri Ödeme Mukayese Grafikleri 73
6.5.1 7000 USD/kWe - 400 kWe Kapasite İçin Mukayese Grafikleri 73
6.5.2 6000 USD/kWe - 400 kWe Kapasite İçin Mukayese Grafikleri 75
6.5.3 5000 USD/kWe - 400 kWe Kapasite İçin Mukayese Grafikleri 77
6.5.4 4000 USD/kWe - 400 kWe Kapasite İçin Mukayese Grafikleri 79
6.5.5 Mukayase Grafiklerinin Değerlendirilmesi 81

7 SONUÇ **82**
7.1 Sonuçlar 82
7.2 Öneriler 83

KAYNAKÇA **85**

A ENERJİ MODELİ VISUAL BASIC KODLARI **90**
A.1 Yakıt Pili Kısmi Verim Eğrisi Visual Basic Kodu 90
A.2 Kazan Kapasite Kontrolü Visual Basic Kodu 93
A.3 Soğutma Grubu Kapasite Kontrolü Visual Basic Kodu 93
A.4 Isıl Depolama Tankı Visual Basic Kodu 94
A.5 İskontolu Geri Ödeme Hesabı Visual Basic Kodu 97
A.6 İklim Verisi Kopyalama Visual Basic Kodu 100

B TİPİK ENERJİ MODELİ ÇIKTILARI **102**
B.1 Enerji Modeli Yakıt Pili Hesap Modülü - Kış İşletmesi 102
B.2 Enerji Modeli Yakıt Pili Hesap Modülü - Yaz İşletmesi 104

C TİPİK EKONOMİK ANALİZ ÇIKTILARI **107**
C.1 Yakıt Pilli Senaryo 01 Ekonomik Analiz Çıktısı 107
C.2 Yakıt Pilli Senaryo 02 Ekonomik Analiz Çıktısı 108
C.3 Yakıt Pilli Senaryo 03 Ekonomik Analiz Çıktısı 109
C.4 Yakıt Pilli Senaryo 04 Ekonomik Analiz Çıktısı 110

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **111**

SİMGE LİSTESİ

Q_{rc}	Absorbsiyonlu Soğutma Kapasitesi (*kW*)
E_{ab}	Absorpsiyonlu Soğutma Elektrik Talebi (*kW*)
M	Bakım Masrafları (*USD*)
E_b	Bina Elektrik Talebi(*kW*)
Q_{hd}	Bina Isıtma Talebi (*kW*)
Q_{cd}	Bina Soğutma Talebi (*kW*)
$B_{USD/yil}$	Bina Yıllık Toplam Enerji Maliyeti (USD)
$B_{CO_2/yil}$	Bina Yıllık Toplam Karbon Salımı ($kgCO_2$)
F_{UID}	Doğalgaz Üst Isıl Değeri (kWh/m^3)
$F_{g_{CO_2}}$	Doğalgaz Şebekesi Emisyon Faktörü ($kgCO_2/kWh$)
e	Enflasyon (%)
E	Elektrik Enerjisi (*kWh*)
kWh_e	Elektrik Enerjisi Talebi (*kWh*)
kW_e	Elektriksel Kapasite (*kW*)
$E_{g_{CO_2}}$	Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü ($kgCO_2/kWh$)
i_r	Gerçek Eskalasyon (%)
p_r	Gerçek Fiyat (*USD*)
d_r	Gerçek İskonto Oranı (%)
d	İskonto Oranı (%)
I	İlk Yatırım Masrafları (*USD*)
kW_t	Isıl Kapasite(*kW*)
kWh_t	Isıtma Enerjisi Talebi (*kW*h)
E_{hs}	Isıtma Sistemi Elektrik Talebi (*kW*)

F_{hs}	Isıtma Sistemi Doğalgaz Talebi (*kW*)
Q_{rh_1}	Isıtma Sistemi Isı Geri Kazanım Talebi (*kW*)
F_b	Kazan Doğalgaz Talebi (*kW*)
E_{bl}	Kazan Elektrik Talebi(*kW*)
Q_b	Kazan Isıtma Kapasitesi (*kW*)
Q_{ch}	Konvansiyonel Soğutma Kapasitesi (*kW*)
KF	Kritik Elektrik - Gaz Fiyat Farkı (*USD/kWh*)
i_n	Nominal Eskalasyon (%)
p_n	Nominal Fiyat (*USD*)
d_n	Nominal İskonto Oranı (%)
CoP	Soğutma Etki Katsayısı
E_{ch}	Soğutma Grubu Elektrik Talebi(*kW*)
CT_{fan}	Soğutma Kulesi Fan Elektrik Talebi (*kW*)
E_{CT}	Soğutma Kulesi Elektrik Talebi (*kW*)
E_c	Soğutma Sistemi Elektrik Talebi(*kW*)
Q_{rh_2}	Soğutma Sistemi Isı Geri Kazanım Talebi (*kW*)
F_{g_p}	Şebeke Doğalgaz Fiyatı(*USD/kWh*)
E_g	Şebeke Elektriği (*kWh*)
E_{g_p}	Şebeke Elektrik Fiyatı (*USD/kWh*)
S	Tasarruf (*USD*)
FC_m	Yakıt Pili Bakım Maliyeti (*USD/kWh*)
E_{fc_b}	Yakıt Pili Brüt Elektrik Üretimi(*kW*)
F_{fc}	Yakıt Pili Doğalgaz Talebi (*kW*)
Q_{rh}	Yakıt Pili Isı Geri Kazanım Kapasitesi (*kW*)
E_{fc_p}	Yakıt Pili Parazitik Yük (*kW*)
E_{fc}	Yakıt Pili Tarafından Üretilen Elektrik (*kW*)
$FC_{m/yil}$	Yakıt Pili Yıllık Bakım Maliyeti (*USD*)
LR	Yakıt Pili Yüklenme Miktarı (*kW*)
t	Zaman (*Saat*)

KISALTMA LİSTESİ

ABS	Absorpsiyonlu Soğutma Grubu
AOSM	Ağırlıklı Ortalama Sermaye Maliyeti
AID	Alt Isıl DeğerAlt Isıl Değer
AYP	Alkali Yakıt Pili
BEM	Bina Enerji Modellemesi
BGÖ	Basit Geri Ödeme
EKYP	Erimiş Karbonat Yakıt Pili
FAYP	Fosforik Asit Yakıt Pili
İVO	İç Verim Oranı
KOYP	Katı Oksit Yakıt Pili
KSGS	Kondenser Suyu Giriş Sıcaklığı
NBD	Net Bugünkü Değer
ÖBMA	Ömür Boyu Maliyet Analizi
PDMYP	Proton Değişimi Membran Yakıt Pili
ÜID	Üst Isıl Değer

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1 Yakıt pili reaksiyonu . . . 12
Şekil 3.2 Yakıt pili reaksiyonları . . . 13
Şekil 3.3 FAYP Tipi yakıt pili bileşenleri . . . 17
Şekil 3.4 FAYP proses şeması . . . 18
Şekil 3.5 FAYP Yakıt pili kısmi verim (AID) diyagramı . . . 21
Şekil 3.6 FAYP Yakıt pili ısı geri kazanım bağlantı detayları . . . 23
Şekil 4.1 Örnek yapının mimari temsili ve fonksiyonları . . . 26
Şekil 4.2 Bina aylık enerji talebi . . . 27
Şekil 4.3 Saatlik ısıtma ve soğutma talebi (8760 saat) . . . 27
Şekil 4.4 Elektrik ve doğalgaz fiyat serisi (2014 - 2023) . . . 29
Şekil 4.5 TL/USD Döviz kuru (2014 - 2023) . . . 30
Şekil 4.6 İskontolu geri ödeme süresi . . . 34
Şekil 4.7 Elektrik birim fiyat eskalasyon eğilimi . . . 35
Şekil 4.8 Doğalgaz birim fiyat eskalasyon eğilimi . . . 35
Şekil 4.9 Enerji modelleri sınıflandırması . . . 37
Şekil 4.10 Enerji modeli akış şeması . . . 38
Şekil 4.11 Basitleştirilmiş bina enerji akışı . . . 39
Şekil 4.12 Bina elektrik enerjisi talebi . . . 41
Şekil 5.1 FAYP Yakıt pili akış şeması . . . 47
Şekil 5.2 Elektrik yük-süre eğrisi . . . 48
Şekil 5.3 Saatlik talep - yakıt pili kapasitesi . . . 48
Şekil 5.4 Yakıt pili senaryo 01 - Enerji tüketimi . . . 50
Şekil 5.5 Yakıt pili senaryo 01 - Nakit Akışı . . . 51
Şekil 5.6 Yakıt pili senaryo 02 - Enerji tüketimi . . . 52
Şekil 5.7 Yakıt pili senaryo 02 - Nakit Akışı . . . 53
Şekil 5.8 Yakıt pili senaryo 03 - Enerji tüketimi . . . 54
Şekil 5.9 Yakıt pili senaryo 03 - Nakit Akışı . . . 55
Şekil 5.10 Yakıt pili senaryo 04 - Enerji tüketimi . . . 56
Şekil 5.11 Yakıt pili senaryo 04 - Nakit Akışı . . . 57
Şekil 6.1 Birim maliyete göre kategorize edilmiş İGÖ ifadeleri . . . 64
Şekil 6.2 Kategorize edilmiş regresyon modeli veri seti . . . 65
Şekil 6.3 Regresyon modeli hassasiyet analizi . . . 65

Şekil 6.4 Regresyon modeli terimlerinin ağırlığı 66
Şekil 6.5 Regresyon modeli terimlerinin birbirleriyle ilişkisi 67
Şekil 6.6 İGÖ Süresi ifadesi ve model değişkenlerinin ağırlığı 67
Şekil 6.7 Kategorize edilmemiş regresyon modeli veri seti 68
Şekil 6.8 Regresyon modeli hassasiyet analizi 69
Şekil 6.9 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e 4000 USD/kW_e 72
Şekil 6.10 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%1$ İskonto Oranı 7000 USD/kW_e 73
Şekil 6.11 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%3$ İskonto Oranı 7000 USD/kW_e 73
Şekil 6.12 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%6$ İskonto Oranı 7000 USD/kW_e 74
Şekil 6.13 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%9$ İskonto Oranı 7000 USD/kW_e 74
Şekil 6.14 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%1$ İskonto Oranı 6000 USD/kW_e 75
Şekil 6.15 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%3$ İskonto Oranı 6000 USD/kW_e 75
Şekil 6.16 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%6$ İskonto Oranı 6000 USD/kW_e 76
Şekil 6.17 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%9$ İskonto Oranı 6000 USD/kW_e 76
Şekil 6.18 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%1$ İskonto Oranı 5000 USD/kW_e 77
Şekil 6.19 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%3$ İskonto Oranı 5000 USD/kW_e 77
Şekil 6.20 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%6$ İskonto Oranı 5000 USD/kW_e 78
Şekil 6.21 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%9$ İskonto Oranı 5000 USD/kW_e 78
Şekil 6.22 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%1$ İskonto Oranı 4000 USD/kW_e 79
Şekil 6.23 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%3$ İskonto Oranı 4000 USD/kW_e 79
Şekil 6.24 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%6$ İskonto Oranı 4000 USD/kW_e 80
Şekil 6.25 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%9$ İskonto Oranı 4000 USD/kW_e 80
Şekil 6.26 İGÖ kontur grafiği değerlendirmesi 81
Şekil B.1 Tipik kış günü bina enerji talebi 102
Şekil B.2 Tipik kış günü yakıt pili elektrik üretimi 102
Şekil B.3 Tipik kış günü ısı geri kazanım potansiyeli 103
Şekil B.4 Doğal gaz tüketimi ve absorpsiyonlu soğutma performansı 103
Şekil B.5 Tipik kış günü ısı geri kazanım performansı 104
Şekil B.6 Tipik yaz günü bina enerji talebi 104
Şekil B.7 Tipik yaz günü yakıt pili elektrik üretimi 105
Şekil B.8 Tipik yaz günü ısı geri kazanımı potansiyeli 105
Şekil B.9 Doğal gaz tüketimi ve absorpsiyonlu soğutma performansı 106
Şekil B.10 Tipik yaz günü ısı geri kazanım performansı 106
Şekil C.1 Yakıt Pili Senaryo 01 Ekonomik Analiz Çıktısı 107
Şekil C.2 Yakıt Pili Senaryo 02 Ekonomik Analiz Çıktısı 108
Şekil C.3 Yakıt Pili Senaryo 03 Ekonomik Analiz Çıktısı 109
Şekil C.4 Yakıt Pili Senaryo 04 Ekonomik Analiz Çıktısı 110

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Yakıt pili karakteristikleri 15
Tablo 3.2 Yakıt pili karşılaştırması 16
Tablo 3.3 Fostorik asit yakıt pili tipik prosesi 18
Tablo 3.4 Yakıt pili karakteristikleri 20
Tablo 3.5 Tipik ısı geri kazanım kapasite detayları 22
Tablo 4.1 Soğutma sistemi kapasite detayları 28
Tablo 4.2 Isıtma sistemi kapasite detayları 28
Tablo 4.3 Emisyon faktörleri 29
Tablo 4.4 Soğutma grupları kısmi yük CoP değerleri 44
Tablo 4.5 Soğutma Kulesi Fan Enerji Tüketimi 45
Tablo 5.1 Enerji modeli senaryoları 46
Tablo 5.2 Yakıt pili bağlantı kapasiteleri - Senaryo 01 49
Tablo 5.3 Yakıt pili bağlantı kapasiteleri- Senaryo 02 51
Tablo 5.4 Yakıt pili bağlantı kapasiteleri- Senaryo 03 53
Tablo 5.5 Yakıt pili bağlantı kapasiteleri- Senaryo 04 55
Tablo 5.6 Senaryoların Değerlendirilmesi 58
Tablo 5.7 İlk yatırım maliyeti hassasiyeti 59
Tablo 5.8 Faiz hassasisyeti 59
Tablo 5.9 Kritik fiyat eşiği hassasiyeti 60
Tablo 5.10 Şebeke emisyon değeri hassasiyeti 60
Tablo 5.11 İklim şartlarına karşı hassasiyet 61
Tablo 6.1 Veri seti girdileri 63
Tablo 6.2 İGÖ İfadeleri gerçerlilik aralığı 64
Tablo 6.3 İGÖ İfadeleri gerçerlilik aralığı 68
Tablo 6.4 Birim maliyet + iskonto oranı hassasiyeti 70
Tablo 6.5 Kritik fiyat farkı + iskonto oranı hassasiyeti 71
Tablo 6.6 Birim Maliyet + kapasite hassasiyeti 71

ÖZET

Yakıt Pillerinin Birleşik Isı Güç Sistemi Olarak Mevcut Binalarda Kullanımı

İbrahim Utku BAŞYAZICI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Özden AĞRA

Hidrojen ekonomisine geçiş konusundaki tartışmalar binalarda yakıt pili teknolojisinin kullanımı da tekrar gündeme getirmiştir. Binalarda yakıt pillerinin kullanımı diğer sektörel uygulama alanlarına kıyasla daha yavaş ilerlemektedir. Bu açıdan bakıldığında hidrojen ekonomisine geçiş ve geniş çaplı bir hidrojen alt yapısının kurulması yakıt pillerinin binalarda kullanılması açısından avantaj teşkil etmektedir. Yakıt pili teknolojisi mevcut kısıtlar altında bile konvansiyonel kojenerasyon teknolojilerine önemli bir alternatif olarak dikkate alınması gereken bir teknolojidir. Ancak, yakıt pili kullanımı özellikle mevcut binalar söz konusu olduğunda dikkatli bir teknik ve ekonomik eğerlendirmeyi zorunlu kılar.

Herhangi bir enerji sistemi yatırımı ekonomik, teknolojik ve çevresel faktörlere bağlı bir karar verme sürecine gereksinim duyar. Günümüzde yaygın bir hidrojen şebekesi olmadığından yakıt pilleri hidrojeni doğalgaz veya benzeri hidrokarbon türevi yakıtlardan dönüştürerek elde etmek zorundadır. Dolayısıyla sistemin ekonomik performansı elektrik ve doğalgaz fiyatları arasındaki kritik fiyat eşiklerine direkt olarak bağımlıdır. Bu tez çalışmasında bahsi geçen kritik fiyat eşikleri belirlenmiş, sistemin ekonomik geri ödeme süresi karmaşık ekonomik hesaplara gerek duyulmaksızın, kritik elektrik ve doğalgaz farkı, sistem kapasitesi, iskonto oranı, birim yatırım maliyeti ve toplam sistem verimine göre ifade edilmiştir. Elde edilen bu ifade yardımıyla iskonto oranına göre kategorize edilmiş seçim abakları oluşturularak mevcut ticari binalar için yatırım kararı verme sürecinde kullanılabilecek yeni bir yöntem önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fosforik asit yakıt pili, kojenerasyon, birime indirgenmiş elektrik maliyeti.

ABSTRACT

The Use of Fuel Cells as Combined Heat and Power System in Existing Buildings

İbrahim Utku BAŞYAZICI

Department of Mechanical Engineering
Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Özden AĞRA

The discussions on the transition to a hydrogen economy have refocused attention on the evaluation of fuel cell technology for building applications. The adaption of fuel cells in buildings progresses more slowly compared to other industrial applications. From this perspective, the transition to a hydrogen economy and the establishment of a hydrogen infrastructure present advantages for the use of fuel cells in buildings. Even with present limitations, fuel cell technology is a significant alternative to traditional co-generation technologies. However, especially concerning existing buildings the use of fuel cells requires careful technical and economical evaluation.

Any investment in an energy system requires a decision-making process based on economic, technological and environmental factors. Currently, due to the absence of a widespread hydrogen infrastructure, fuel cells must derive hydrogen by converting natural gas or other hydrocarbon-based fuels. Consequently, the economic performance of the system is directly dependent on critical price thresholds between electricity and natural gas. In this study, these critical price thresholds have been identified, and the economic payback period of the system is expressed in terms of the critical electricity and natural gas price difference, system capacity, discount rate, unit investment cost, and overall system efficiency, rather than complex economic calculations. This expression has been used to create decision charts categorized by the discount rate, providing a new method for the decision-making process in investments for existing commercial buildings.

Keywords: Phosphoric acid fuel fell, co-generation, levelized cost of electricity

1
GİRİŞ

1.1 Yakıt Pili

Dünya enerji sistemi hala ağırlıklı olarak fosil yakıtlara dayanmaktadır [1]. Küresel ısınma ve artan çevresel problemler geleneksel enerji sisteminin sürdürülebilir enerji çözümleri ile ikamesini gerektirmektedir. Hidrojen ekonomisine geçiş tartışmalarına paralel olarak yakıt pilleri de alternatif enerji teknolojileri arasında dikkat çekmektedir. Yakıt pilleri elektrokimyasal bir reaksiyon sonucunda kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren cihazlardır. Yakıt pillerinin bu temel özelliği pek çok sabit ve hareketli sistemde temel enerji kaynağı veya yedek güç kaynağı olarak kullanılmalarına olanak sağlamaktadır. Sabit yakıt pili sistemleri genel olarak bina uygulamaları içerisinde değerlendirilmektedir. Binalarda yakıt pillerinin kullanımı potansiyel olarak aşağıdaki avantajları beraberinde getirmektedir[2][3][4].

- Temiz Enerji Kaynağı: Yakıt olarak hidrojen kullanılması durumunda sıfır karbon emisyonu ile elektrik üretilebilmektedir. Hidrojenin doğalgaz gibi mevcut hidrokarbon türevi yakıtlardan elde edilmesi durumunda ise emisyon değerleri konvansiyonel teknolojilere kıyasla düşüktür.
- Yüksek Verim: Yakıt pilleri elektrik üretiminde geleneksel enerji sistemlerine göre daha yüksek bir enerji dönüşüm verimliliği sunar. Dolayısıyla yakıt pilleri birincil enerji kaynaklarının daha etkin bir şekilde kullanılmasına yardımcı olur.
- Isı ve elektriğin birlikte üretimi: Yakıt pili reaksiyonu ekzotermik bir reaksiyondur. Bu nedenle yakıt pilleri geleneksel kojenerasyon veya trijenerasyon teknolojilerine de yüksek verimli bir alternatif oluşturur. Reaksiyon sonucunda açığa çıkan atık ısı ısıtma veya absorpsiyonlu soğutma yoluyla soğutma talebinin karşılanmasında kullanılabilir.
- Sessiz çalışma: Yakıt pilleri genel olarak çok az hareketli parça barındırmaktadır. Bu nedenle sessiz çalışmanın öenmli olduğu hastane, veri

merkezi gibi uygulamalarda doğal olarak avantajlıdır.

- Modüler yapı: Mevcut ticari yakıt pilleri benzer kapasitede üniteler şeklinde üretilmedir. Dolayısıyla bina enerji talebine göre sistem kolaylıkla ölçeklenebilmektedir

1.2 Yakıt Pili Çalışmalarına Genel Bakış

Yakıt pilleri ve yakıt pilli kojenerasyon sistemleri üzerine yapılan çalışmalar, bu sistemlerin ticarileşmesi ve yaygınlaştırılmasını amaçlayan genel bir çabayı yansıtmaktadır. Buna rağmen yakıt pili teknolojisinin bina uygulamaları açısından bir başarıya ulaştığını söylemek mümkün değildir. Yakıt pili maliyetleri hala arzu edilen seviyelere inebilmiş değildir. Mevcut literatür ağırlıklı olarak yakıt pilli sistemlerinin fizibilitesi veya simülasyonu üzerine çalışmaları içermektedir. Bu çerçevenin dışına çıkarak yakıt pili teknolojisi için genelleştirilmiş bir uygulama veya karar verme kriteri ortaya koyan az sayıda yayın bulunmaktadır. Bu çalışmada önerilen yaklaşıma temel olan yayınlar bu çerçevede Bölüm2'de daha detaylı değerlendirilmiştir

1.3 Tezin amacı

Yakıt pili teknolojisinin temel prensipleri içten yanmalı motor teknolojisi ile yaklaşık olarak aynı yıllarda ortaya konulmuştur[5]. Buna rağmen yakıt pillerinin tam anlamıyla ticarileşmesi ve yaygın kullanım alanı bulması hala mümkün olmamıştır. Hidrojen ekonomisi ve sıfır karbonlu bina tasarımı tartışmaları bu anlamda yakıt pillerine yeni bir alan açma potansiyeline sahiptir. Sıfır karbon veya sera gazı azaltım hedeflerine ulaşılabilmesi için sadece yeni yapılacak binalarda değil mevcut yapı stoğunda da çeşitli önlemler alınması gereklidir. Bu noktadan hareketle bu çalışmada da mevcut ticari binalar ele alınmıştır. Yakıt pili tipleri, uygulama koşulları, bina enerji tüketim profilleri, ilk yatırım maliyeti, toplam karbon salımı ve yakıt fiyatları dikkate alınarak bu çalışmada aşağıda sıralanan soruların cevaplanması hedeflenmiştir.

- Mevcut ticari binalar için en uygun yakıt pili tipinin belirlenmesi.
- Seçilen yakıt pilinin mevcut ticari binalarda bileşik ısı güç sistemi olarak kullanılabilirliğinin teknik ve ekonomik olarak değerlendirilmesi.
- Seçilen yakıt pilinin farklı iklim bölgelerinde performansının analizi.

- Anlamlı bir yakıt pili yatırımı için kritik elektrik doğalgaz fiyat farkı eşiklerinin belirlenmesi
- Bu fiyat eşikleri temel alınarak genelleştirilmiş bir ekonomik analiz ifadesi geliştirilmesi.

1.4 Hipotez

Herhangi bir enerji sistemi yatırımı ekonomik, teknolojik ve günümüzde küresel ısınma tehdidini dikkate aldığımızda çevresel faktörlere bağlı bir karar verme sürecine gereksinim duyar. Günümüzde yaygın bir hidrojen şebekesi olmadığından yakıt pilleri hidrojeni doğalgaz veya benzeri hidrokarbon türevi yakıtlardan dönüştürerek elde etmek zorundadır. Dolayısıyla sistemin ekonomik performansı elektrik ve doğalgaz fiyatları arasındaki kritik fiyat eşiklerine direkt olarak bağımlıdır. Bu çalışmada öncelikli olarak geliştirilen enerji modeli yoluyla, ele alınan örnek bina üzerinden çeşitli yakıt pili çalışma senaryoları analiz edilmiş, kritik elektrik-gaz fiyat farkı ve çevresel açıdan anlamlı bir sistem için karbon salımı eşikleri belirlenmiştir. Bu temel analizler genel bir ekonomik analiz çerçevesi geliştirilebilmesi amacıyla yapılmıştır.

Mevcut binalarda yakıt pilli birleşik ısı güç üretimi sistemi yatırımının ekonomik geri dönüş süresini etkileyen en önemli faktörler kritik elektrik-doğalgaz fiyat farkı, faiz, birim ilk yatırım maliyeti, kapasite ve toplam verimdir. Yakıt pilli birleşik ısı güç sistemi yatırımı için iskontolu geri ödeme süresi belli faiz aralığı ve kapasite kısıtlarında, karmaşık ekonomik hesaplara gerek duyulmaksızın bu faktörlere bağlı olarak hesaplanabilir. Bu çalışmadan sistemin ekonomik geri ödeme süresini yukarıda anılan beş faktöre bağlı olarak hesaplamaya olanak veren genelleştirilmiş matematiksel bir ifade ve yine sistemin geri ödeme süresini veren grafik bir yöntem önerilmiştir. Önerilen bu matematiksel ifade; birim ilk yatırım maliyeti, kritik elektrik ve doğalgaz farkı, sistem kapasitesi, iskonto oranı ve toplam sistem verimine göre yakıt pilli birleşik ısı güç sistemi yatırımının iskontolu geri ödeme süresini hesaplamaktadır.

Önerilen genelleştirilmiş ifade mevcut binalarda yakıt pili sistemlerinin hızlı bir şekilde ön ekonomik değerlendirmesini yapmak amacıyla bir grafik yöntemle de kullanılabilir. Bu grafik yöntem, önerilen matematiksel ifade üzerinden geliştirilmiştir. Önerilen ifade ile kapasite, toplam verim ve iskonto oranı üzerinden geri ödeme süresini veren, birim ilk yatırım maliyeti ve iskonto oranına göre kategorize edilmiş seçim abakları oluşturulmuştur. Yatırımcı veya karar vericiler bu seçim abakları yardımıyla yakıt pili sisteminin ön değerlendirmesini yapabilir.

2
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Literatür Araştırması Kapsamı

Yakıt pilleri konusundaki literatür, tasarım, malzeme özellikleri, membran teknolojileri, uygulama problemleri gibi geniş bir yelpazeden yayınları içermektedir. Bu çalışmanın temel ilgi alanı ticari bina uygulamalarıdır. Bu nedenle literatür taraması da genel olarak orta veya büyük ölçekli, Fosforik Asit Yakıt Pili (FAYP), Erimiş Karbonat Yakıt Pili (EKYP) ve Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP) uygulamaları, yakıt pilli kojenerasyon ve trijenerasyon sistemleri dikkate alınarak yapılmıştır. Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili (PDMYP) uygulamaları çalışma sıcaklıkları ve kapasiteleri düşük olduğundan genel olarak bu çalışmanın ilgi alanı dışındadır.

2.2 Fosforik Asit Yakıt Pilleri Üzerine Çalışmalar

FAYP ilk ticarileşmiş yakıt pili teknolojisidir. Bu nedenle erken dönem bina uygulamaları da FAYP tipi yakıt pilleri ile yapılmıştır. D.H. Archer, J.G. Wimer ve M.C. Williams, Pittsburgh şehrindeki bir ofis binasında yakıt pilli kojenerasyon sistemi kurulumu seçeneklerini değerlendirmişlerdir. Analizler 200 kWe kapasitesindeki FAYP ünitelerinin ihtiyaca göre ölçeklendirilmesi ile yapılmıştır. Analizlerde ise temel yük, pik yük, batarya destekli sistem, absoprsiyonlu soğutmanın olup olmaması gibi farklı seçenekler değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda binanın ısıtma sistemi sıcak su rejimi ile yakıt pilinden sağlanabilen sıcak su derecesi arasındaki uyumsuzluklar ile ilk yatırım maliyetinin yüksekliği vurgulanmıştır[6].

Brenscheidt vd. Almanya da bir arıtma tesisinde 200kWe kapasitesinde FAYP tipi bir yakıt pilinin metan ağırlıklı arıtma ürünü gaz ile çalışma performansını incelemiş ve ekonomik analizini yapmışlardır. FAYP pilinin arıtma gazı ile çalıştırılması durumunda %89 kapasite faktörüne ulaşılmasına rağmen işletme maliyetleri oldukça yüksek çıkmıştır. Yirmi yıl çalışma ömrü, %6 faiz oranı, anüite

faktörü 0,0872 alınarak, eşit ödemelerin bugünkü değeri metoduna göre yapılan ekonomik analizlerde işletme maliyeti konvansiyonel sistemlere kıyasla %150 daha yüksek çıkmıştır. Bu analizlerde beş yıllık periyotlarla yapılması gereken ağır bakım maliyetleri ihmal edilmiştir[7].

M. Ishizawa, S.Okada, T.Yamashita, 200kWe kapasitesinde FAYP tipi yakıt pilinin kendi geliştirdikleri özel absorpsiyonlu soğutucu ile bir veri merkezinde kullanılabilirliğini test etmişler ve ısı geri kazanımı dahil olarak %78 toplam verime ulaşmayı başarmışlardır. Çalışmaları sistemin ekonomik analizi hakkında herhangi bir veri içermemektedir[8].

A. Lokurlu vd., yine anüite metodu kullanarak ilk yatırımı maliyeti ve yakıt fiyatlarının fonksiyonu olacak şekilde yakıt pili elektrik üretim maliyeti ile dizel ve gaz yakıtlı konvansiyonel sistemlerin elektrik üretim maliyetlerini karşılaştırmıştır. Yakıt pilleri için ilk yatırım maliyeti 2500 – 12500 €/kWe aralığında, yıllık çalışma saati ise 5000 saat kabul edilmiştir. Farklı ilk yatırım maliyeti senaryolarına göre yapılan analizlerde, 200kWe elektrik üretim kapasitesinde, verimleri sırasıyla %38 ve %45 olan paket kojenerasyon ünitesi ile yakıt pili elektrik üretim maliyeti arasında %100 fark olan durumlar ortaya çıkmıştır[9].

H. Y. Kwak vd., Kore Gas Corporation tarafından işletilen 200kWe kapasitesindeki FAYP yakıt pili için ekserji ve termoekonomik analiz yapmışlardır. Çalışmalarında yakıt pilinin gerçek saha koşullarında yaptıkları performans değerlerini baz almışlardır. Yaptıkları ölçümlere göre FAYP yakıt pilinin tam yükte üst ısıl değere göre verim değeri %43,7 olarak bulunmuştur. H. Y. Kwak vd. FAYP yakıt pilinin birime indirgenmiş elektrik maliyetini 1000 kWe kapasitesindeki gaz türbin tipi kojenerasyon tesisinden %125 daha yüksek bulmuş ve FAYP tipi yakıt pilinin geleneksel sistemlere rekabet edebilmesi için ilk yatırım maliyetini 1500$/kWe mertebesine inmesi gerektiğini belirtmişlerdir [10].

G. Bizzarri ve G. L. Morini geliştirdikleri "Excel Hesap Tablosu" temelli saatlik enerji modeli ile 200kWe FAYP tipi bir yakıt pilinin Kuzey İtalya'da bir hastanede uygulanabilirliğini değerlendirmişlerdir. Net Bugünkü Değer (NBD) metodu kullanılarak, %3 iskonto oranı ve 7 yıl ekonomik ömür kabulüyle 1 – 6 adet arasında yakıt pilinin kullanıldığı farklı seçenekler için yaptıkları ekonomik analizde en düşük ekonomik geri ödeme süresini ise 25,6 yıl, iç verim oranını ise -0,21 olarak tespit etmişlerdir. Buna rağmen G. Bizzarri ve G. L. Morini hastanenin yıllık elektrik enerjisi talebinin %86'sının FAYP yakıt pilleri karşılanabildiğini, ısı geri kazanımı da dahil edilerek karşılaştırma yapıldığında karbon salımın yaklaşık olarak mevcut sistemin yarısı kadar olduğunu belirtmektedir. G. Bizzarri ve G. L.

Morini çalışmalarının sonucunda FAYP yakıt pillerinin mevcut binalarda kullanımı konusundaki en büyük engelin ölçek ekonomisine ulaşılamayışı ve dolayısıyla yüksek maliyetler olduğunu vurgulamaktadır[11].

N. Sammes, R. Bove ve K. Stahl, Almanya'da konut, hastane ve arıtma tesisleri gibi farklı yapı tiplerinde kurulu FAYP ünitelerinin işletme deneyimi, güvenilirlik, bakım ihtiyaçları açısından değerlendirmişlerdir. N. Sammes, R. Bove, K. Stahl, mevcut kurulu FAYP ünitelerinin bu teknolojinin yüksek güvenilirlik, verimlilik ve düşük karbon emisyonuna sahip olduğunu garanti ettiğini belirtmesine rağmen yüksek maliyetlerin yaygın kullanımı engellediğine dikkat çekmektedir[12].

G. Bizzarri İtalya'nın Ferrara bölgesindeki dokuz farklı hastanede 200kWe kapasitedeki FAYP tipi yakıt pilleri ile enerji verimliliği senaryolarını incelemiştir. Çalışmanın amacı hastane elektrik talebi ile toplam yakıt pili sistemi kapasitesi arasındaki ilişkiyi belirlemektir. G. Bizzarri bu amaçla bina elektrik talebi ile yakıt pili tarafından karşılanabilen elektrik oranına dayalı 2.1 ifadesini önermiştir.Burada $n_c * P_{OC}$ (MWe) 7000 saat/yıl çalışma süresi üzerinden FAYP yakıt pilinin yıllık eşdeğer kapasitesini, P_{DA} (MWe) ise hastanenin tüm yıl ortalamasına göre elektrik talebini göstermektedir. Bu ifadenin negatif veya pozitif değerleri toplam yakıt pili kapasitesinin bina talebine kıyasla ne kadar yüksek veya düşük kaldığını göstermektedir. G. Bizzarri'nin çalışmasında incelediği seçeneklerin hiçbiri maliyet açısından anlamlı değildir. Buna rağmen FAYP yakıt pilleri tüm analizlerde birincil enerji tüketimi ve karbon salımının azaltılmasını sağlamıştır. G. Bizzarri şebeke ile paralel çalıştırılan, bina talebinden daha düşük kapasite boyutlandırılmış yakıt pili sisteminin en yüksek faydayı sağladığını belirtmektedir[13].

$$opr = \frac{(n_c * P_{OC} - P_{DA})}{P_{DA}} \tag{2.1}$$

G. Bizzarri ve G. L. Morini bir hastane için doğalgazlı kazanlar ve elektrik tahrikli soğutma gruplarını içeren, konvansiyonel iklimlendirme sistemine sahip bir hastanede FAYP yakıt pili, solar termal Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) ve solar fotovoltaik sistemlerin kullanıldığı durumları ekonomik geri ödeme süresi ve karbon salımı açısından kıyaslamıştır. Analizler mevcut sisteme iki adet 200kWe FYAP yakıt pili ilave edileceği kabulüyle yapılmış, solar termal ORÇ ve fotovoltaik sistem kapasitesi yakıt pilleri ile eşdeğer olacak şekilde seçilmiştir. FAYP ve ORÇ senaryoları yaz mevsiminde atık ısıdan yararlanma oranının arttırılabilmesi için absorpsiyonlu soğutma gruplarını da içermektedir. Hiçbir sistem net bir ekonomik getiri sağlamamasına rağmen, birincil enerji tüketimi ve karbon salımı her bir seçenek için konvansiyonel sistemden daha düşüktür [14].

M. A. Darwish, Kuveyt 'de bir hayvan kliniğinde 200 kWe kapasitesinde FAYP tipi yakıt pilinin trijenerasyon sistemi olarak kullanımını değerlendirmiştir. M. A. Darwish, herhangi bir ekonomik analiz yöntemi kullanmadan sistem bileşenlerinin toplam ilk yatırım maliyeti üzerinden değerlendirme yapmış ve ekonomik bir sistem kurulumu için FAYP maliyetinin 2000 $/kWe veya daha altında olması gerektiğini belirtmiştir[15].

H. Ito, New York'da bir apartman kompleksi için 400 kWe kapasitesinde FAYP yakıt pilinin kojenerasyon sistemi olarak kullanılabilirliğini değerlendirmiştir. Analizler HOMER yazılımı kullanarak yapılmıştır. Ancak, HOMER yazılımı FAYP yakıt pillerini direk olarak modelleyememektedir. Bu nedenle H. Ito, HOMER yazılımında FAYP kısmi verim eğrisini paket kojenerasyon ünitesi gibi tanımlayarak benzeşim yapmıştır. Analizler FAYP yakıt pilinin bina ısıtma ihtiyacını veya elektrik talebini izleyecek şekilde çalışmasını temel alan iki farklı senaryoya göre yapılmıştır. FAYP yakıt pilinin ısıtma talebini izlemesi durumunda ortaya çıkacak dur kalk şeklinde çalışma gibi problemler simülasyonlarda göz ardı edilmiştir. Çalışmanın sonucuna göre ısıtma talebini izleyen seçenek ekonomik olarak anlamlı değildir. Elektrik talebin izleyen seçenek bina enerji talebi yakıt pili kapasitenin üzerinde olduğu için daha dengeli bir işletme seçeneği sunmakta ve bu seçenek için BGÖ süresi sekiz sene çıkmaktadır. Ancak, New York elektrik şebekesi emisyon CO2 faktörü 300 g/kWh gibi oldukça düşük bir değerde olduğundan FAYP seçeneği toplam karbon salımının artmasına sebep olmuştur[16].

S. Acha vd., 645 kWe elektrik, 619 kWt ısıtma pik talebi olan bir supermarket uygulamasında 400kWe kapasitesindeki FAYP yakıt pili ile konvansiyonel paket kojenerasyon ünitesinin yıl boyunca performansını, geliştirdikleri termoekonomik optimizasyon modeli ile kıyaslamışlardır. Finansal destek mekanizmaları olmaksızın FAYP yatırımın geri ödeme süresi belirgin bir şekilde uzamakta, paket kojenerasyon her türlü seçenek için daha avantajlı çıkmaktadır. S. Acha vd.'nin çalışması farklı doğalgaz, elektrik fiyat senaryolarına göre yatırımın geri ödeme sürelerinin nasıl değiştiğini irdeleyen bir hassasiyet analizini de içermektedir[17].

J. Liu, S. C. Kim, K. Y. Shin kapalı bir yüzme havuzu ve spor kompleksinde FAYP tipi yakıt pilinin havuz ısıtmasına da destek verecek şekilde kullanımını değerlendirmişlerdir. Sistemin matematiksel modeli ve binanın üç boyutlu enerji modeli TRNSYS 18 yazılımında kurgulanmıştır. FAYP yakıt pilinin kapasitesi 440 kWe olarak verilmiştir. TRNSYS 18 yazılımı ile çeşitli işletme seçenekleri için yapılan analizlerde basit geri ödeme süreleri 6.9 yıl ile 10.7 yıl arasında bulunmuştur [18].

L. Yuan-Hu vd., Güney Kore'de bölge ısıtma sistemine de hizmet eden 10,56 MWe kapasitesindeki FAYP enerji santralinin %60 -79 seviyelerinde olan toplan verimini geliştirdikleri kademeli ısı pompası ve gizli ısı geri kazanımı çözümü ile %90 seviyesine çıkarmışlardır. Önerilen sistem için yatırımın geri ödeme süresi iki yıldır. Bu çalışma toplam kapasite, bölgesel ısıtma ve ısı pompası teknolojisinin FAYP yakıt pilleriyle birlikte kullanımı ve ölçek faktörünün getirdiği ekonomik avantajı göstermesi açısından önemlidir [19].

I. M. Reverte, T. Gómez-Navarro, C. Sánchez-Díaz, vd., Valencia'da 4194 konuttan oluşan bir bölge için 4 MWt ısıtma talebine göre boyutlandırılmış yakıt pilli kojenerasyon tesisinin teknik ve ekonomik analizini yapmışlardır. Önerdikleri sistem 9 adet 440 kWe elektrik, 454 kWt ısıtma kapasitesine sahip FAYP tipi yakıt pilini içermektedir. Analizler ısı yükünü izleme, elektrik yükünü izleme gibi işletme seçeneklerinin teknik ve ekonomik değerlendirilmesini içermektedir. Çalışmada temel ekonomik karşılaştırma kriteri olarak BGÖ süresi kullanılmıştır [20].

H. Park vd., mega-watt ölçeğinde bir FAYP enerji santrali ve hidrojen üretim tesisi için simülayon temelli bir çalışma yapmışlardır. Sistemin elektrik üretim kapasitesi 3.395–3.539 MWe aralığındayken hidrojen üretim kapasitesi 19.94–40.00 kg/h seviyesindedir. Ekonomik analizlere NBD metodu kullanılmış, birim elektrik üretim maliyetini hesaplarında ise Birime İndirgenmiş Elektrik Maliyeti (BİEM) metodu tercih edilmiştir. Yapılan simülasyonlara göre yatırımın geri ödeme süresi üç farklı seçenek için 7.09 ile 10.05 yıl arasındadır [21].

2.3 Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri Üzerine Çalışmalar

Y. Ma vd., yakıt pili uygulamaları için geliştirdikleri Excel üzerinde çalışan Visual Basic tabanlı ekonomik fizibilite yazılımı ile 250kWe kapasitesinde EKYP'nin ekonomik analizini yapmışlardır. Ele aldıkları örnekte yakıt pili sadece elektrik üretmek üzere çalıştırılmış, hidrojen yakıt pili reformasyon ünitesiyle doğalgazdan dönüştürülerek elde edilmiştir. Y. Ma vd. tarafından geliştirilen ekonomik fizibilite yazılımı NBD metodunu kullanmaktadır. Yapılan analiz sonucunda EKYP ekonomik olarak negatif nakit akışına yol açtığı görülmüştür. Bu çalışma EKYP'nin çevresel performansı hakkında veri içermemektedir[22].

S. Sevencan vd., proton değişim membranlı (PDMYP) ve EKYP tipi yakıt pilli kojenerasyon sistemlerinin İsveç koşullarında elektrik üretim maliyetlerini diğer konvansiyonel sistemlerle kıyaslamışlardır. Çalışmanın yapıldığı 2010 yılı için her iki yakıt pili tipi için elektrik üretim maliyeti diğer konvansiyonel teknolojilerin elektrik üretim maliyetinden yüksektir. S. Sevencan vd., yaptıkları geleceğe

dönük projeksiyonlarda EKYP'nin ancak 2020 yılında rekabetçi olabileceğini belirtmişlerdir[23].

D. Kim vd., EKYP tipi yakıt pillerinin optimum uygulanması için konut ve konut dışı yapı tiplerinde kullanılabilecek bir ekonomik ve çevresel değerlendirme yönetimi ortaya koymuşlardır. Geliştirdikleri yazılım 100 – 3600 kWe aralığında EKYP pili sistemleri için ısıtma, elektrik talebini izleme veya tam güçte sürekli çalışma senaryolarını Ömür Boyut Maliyet Analizi (ÖBMA) çerçevesinde NBD metoduna göre değerlendirebilmektedir. EKYP pilinin ölçeklendirilmesi 100 kWe aralıkla olmaktadır[24].

S. Sevencan vd., 2.8 MWe kapasitesinde EKYP'nin bir veri merkezi projesinde ana elektrik kaynağı olarak kullanımını değerlendirmiştir. Yakıt pilinin atık ısısından 1400 kWt kapasitesinde bir absorpsiyonlu soğutma grubunda yararlanılarak veri merkezinin soğutma ihtiyacının da karşılanması düşünülmüştür. NBD metoduna göre yapılan ekonomik analize göre EKYP anlamlı bir yatırım olmaktan uzaktır[25].

2.4 Katı Oksit Yakıt Pilleri Üzerine Çalışmalar

E. J. Naimaster ve A. K. Sleiti ticari binalarda KOYP kullanımı eQuest Bina Enerji Modelleme (BEM) yazılımı ile değerlendirmişlerdir. Orta ölçekli, 7000 m² bir ofis binası için yakıt pilli kojenerasyon sistemi kurgusunda çalıştırılmak üzere seçtikleri KOYP kapasitesi 175 kWe. eQuest KOYP tipi yakıt pilini direkt olarak modelleyememektedir. Bu nedenle KOYP pili tipik bir elektrik jeneratörü gibi düşünülerek yazılımda yakıt pilinin verim eğrisi benzetim yöntemiyle tanımlanmıştır. Farklı iklim bölgelerine göre yapılan simülasyonlarda KOYP ısıtmanın ağırlıklı olduğu yerlerde senelik şebeke elektrik maliyetini %14.5, karbon salımını %62 azaltmıştır. Ancak BGÖ metoduna göre yapılan hesaplamalarda kabul edilen ilk yatırım maliyetleri oldukça düşüktür [26].

J. M. P. Chen ve M. Ni, Hong Kong'da 262 odalı bir otel için KOYP yakıt pillerinin trijenerasyon çözümü olarak uygulanabilirliğini değerlendirmiştir. Sistem 5 adet 200 kWe kapasitesinde KOYP, absorpsiyonlu soğutma grupları ve KOYP ünitelerinin dur kalk yaparak çalışmasını önlemek için batarya gruplarını da içermektedir. J. M. P. Chen ve M. Ni, %50 sübvansiyon ile trijenerasyon çözümü için BGÖ süresini 5.7 yıl bulmuştur[27].

D. McLarty, J. Brouwer, bölgesel enerji sistemlerinin analizi için geliştirilmiş DG-BEAT yazılımıyla Amerika'nın farklı eyaletlerindeki gaz ve elektrik fiyat

farklarına bağlı olarak ticari binalarda kullanımı KOYP için en anlamlı ilk yatırım maliyetlerini belirlemiştir. Örneğin, Kaliforniya, New York ve Connecticut'ta 7000-10.000 $/kWe toplam kurulu maliyet aralığı için KYOP ekonomik bulunmuştur Isı talebinin yüksek olduğu eyaletlerde KOYP çözümünün daha ekonomik olduğu görülmektedir. Bu çalışma gaz ve elektrik fiyatları arasındaki farkın yakıt pili işletmesine etkisini göstermesi açısından önemlidir. Yöntemin esası NBD metoduna göre şebekeye eşdeğer elektrik fiyatını sağlayan KYOP çözümünün kurulu maliyetinin hesaplanması şeklindedir. Yani model KOYP ömrü boyunca an az şebekeye eşdeğer maliyette elektrik üretmesi için ilk yatırım maliyeti, ısı geri kazanım miktarı ne olmalı sorunu cevaplamaktadır[28].

F. Accurso vd., KOYP kojenerasyon sisteminin konut dışı binalarda uygulanabilirliğini değerlendirmek için teknik ve ekonomik bir fizibilite analizi yapmıştır. Tekno-ekonomik analizi hastane ve otel binaları ve bunların gerçek ısıtma, soğutma ve elektrik yük profilleri dikkate alınarak farklı yönetmelik ve gereksinimlere sahip çeşitli Avrupa ülkeleri için yapılmıştır. Karşılaştırmada baz senaryo olarak şebeke elektriği kullanımı ve ısıtmada da standart doğalgazlı kazanları olduğu çözüm dikkate alınmıştır. Yapılan analizler, KOYP sisteminin yüksek ilk yatırım maliyetine rağmen Almanya, İtalya ve İngiltere gibi elektrik fiyatlarının yüksek olduğu ülkelerde çeşitli sübvansiyonlarla hastane gibi yapılarda uygulanabileceğini göstermektedir. KOYP elektrik üretim maliyeti BİEM metoduyla hesaplanmıştır[29].

P. Marocco vd., KOYP sistemlerinin ticarileştirilmesi için geliştiren Avrupa Birliği projesi ComSos projesi çerçevesinde Karışık Tamsayı Doğrusal Programlama yöntemine dayalı bir optimizasyon yöntemi geliştirmişlerdir. P. Marocco vd., ilk yatırım maliyeti, KOYP kullanım ömrü, verimlilik ve en önemlisi elektrik ile gaz fiyatları arasındaki farka bağlı olarak KOYP kurulumunun avantajlı olduğu bölgeleri belirlemektir[30].

2.5 Literatür Araştırmasının Değerlendirmesi

Yakıt pili temelli kojenerasyon sistemleri literatürüne genel olarak bakıldığından erken dönem FAYP uygulamalarından başlayarak bu sistemlerin ticarileşmesi ve yaygınlaştırılması için sürekli bir çaba olduğu görülmektedir. Buna rağmen son yirmi yılda yakıt pili maliyetleri istenilen seviyelere inmemiş, ölçek ekonomisine ulaşılamamıştır. Mevcut çalışmalar ağırlıklı olarak belli bir proje, bölge veya bina tipi için yapılan fizibilite çalışmaları veya enerji simülasyonları şeklindedir. Durum tespitinin dışında yakıt pili teknolojisinin teknik ve ekonomik sınırlarını

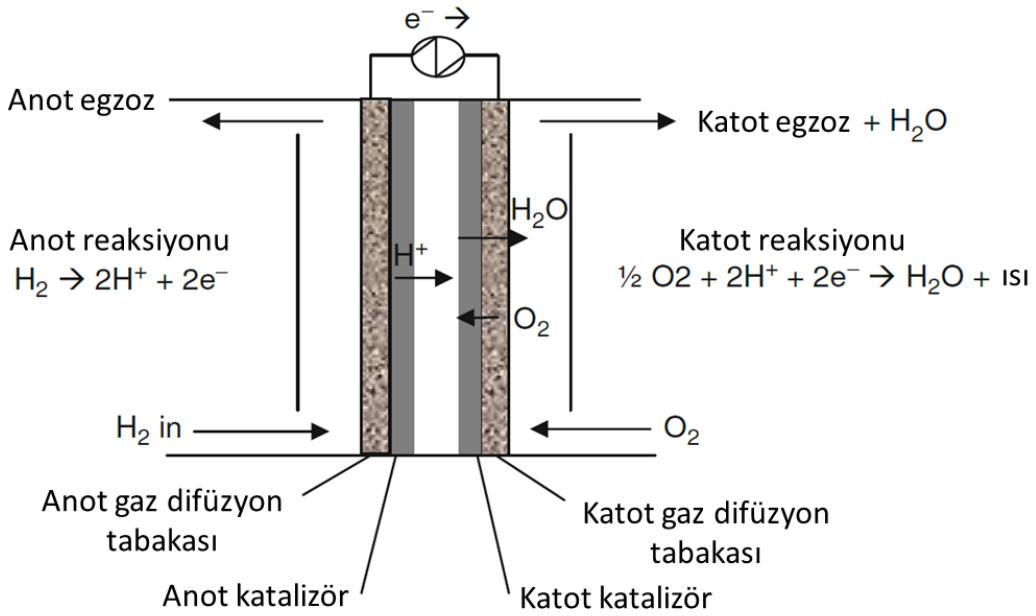
dikkate alarak genelleştirilmiş bir uygulama yaklaşımı veya karar verme kriteri ortaya koyan az sayıda çalışma bulunmaktadır. G. Bizzarri[13], D. McLarty, J. Brouwer[28] ve P. Marocco vd.'nin[30] çalışmaları bunların arasında gösterilebilir. Bu çalışmada da literatürdeki mevcut boşluklar dikkate alınarak kapasite, toplam verim, elektrik ve doğalgaz fiyat farkı ile faiz oranına bağlı olarak yakıt pilleri için iskontolu geri ödeme süresini veren bir matematiksel ifade ve grafik olarak ekonomik mukayase yapılmasına olanak sağlayan yeni bir yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen matematiksel ifade karmaşık ekonomik hesapların yapılmasına gerek kalmaksızın tekil bir denklem ile temel bir ekonomik karar verme kriterlerinden birisi olan iskontolu geri ödeme süresini vermektedir. Grafik yöntem ise özellikle ön değerlendirme aşamasında yine karmaşık ekonomik hesaplara gerek kalmaksızın farklı kapasite seçeneklerinin mukayase edilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada ayrıca yakıt pillerinin mevcut binalarda kullanım koşulları değerlendirilmiş, anlamlı bir ekonomik ve çevresel performans için sınır değerleri belirlenmiştir.

3
YAKIT PİLİ TEKNOLOJİSİ

Bu bölümde genel olarak yakıt pili teknolojisinin, özel olarak ise bina uygulamaları için en uygun yakıt pili tipinin genel değerlendirmesi yapılmıştır.

3.1 Yakıt Pili Çalışma Prensibi

Yakıt pili elektrokimyasal bir reaksiyon sonucunda kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren bir cihazdır. Bu kimyasal reaksiyon bir elektrolitin varlığında gerçekleşir. Bir yakıt pilini oluşturan temel bileşenler Şekil 3.1'de verilmiştir. Bu temel bileşenler iyon transferinin gerçekleştiği elektrolit ortam, yakıtın beslendiği anot ve oksitleyici gazın beslendiği katot şeklinde sıralanabilir. Yakıt pili



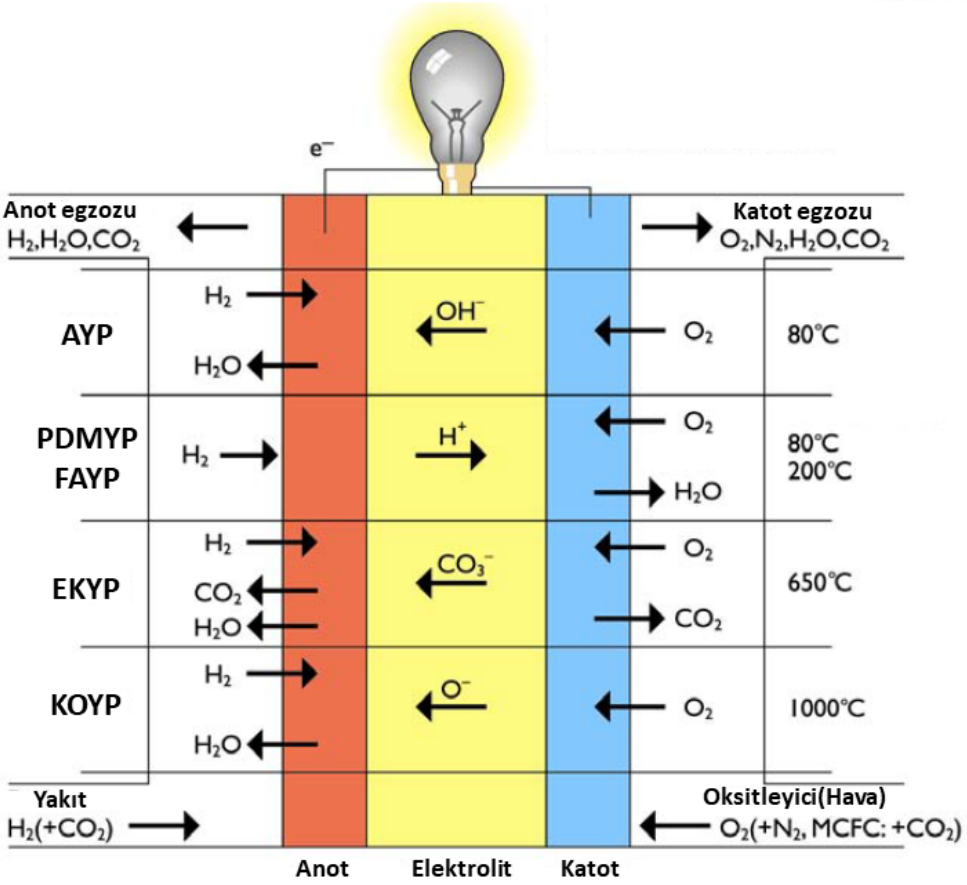
Şekil 3.1 Yakıt pili reaksiyonu[31]

reaksiyonu gaz fazındaki yakıtın (hidrojen) anot tarafından beslenmesiyle başlar. Katot tarafından ise oksitleyici (hava veya direk olarak oksijen) beslenir. Elektrolit ise iyon akışısını sağlayarak anot tarafından katoda elektronların transferini sağlar.

Bu reaksiyon sonucunda elektriğin yanında kullanılabilir atık ısı da oluşur. Bu çalışmanın çıkış noktası açısından da önemli olan ekzotermik reaksiyon sırasında açığa çıkan bu ısının verimli bir şekilde kullanımıdır. Açığa çıkan ısı miktarı ve çalışma sıcaklığı yakıt pilinin tipine göre değişmektedir.

3.2 Yakıt Pili Tipleri

Yukarıda açılanan temel reaksiyon prensibi, Şekil 3.2'de görüldüğü gibi yakıt tipi, kullanılan elektrot, anot ve katot özellikleri, değişmekle birlikte tüm yakıt tipleri için benzerdir. Yakıt pilleri genellikle kullanılan elektrolitin tipine göre isimlendirilmektedir. Bu çalışmada temel olarak çalışma sıcaklıkları nedeniyle kojenerasyon uygulamalarında kullanılabilecek FAYP, KOYP ve EKYP tipi yakıt pilleri değerlendirilmiştir. PDMYP gibi düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri genellikle evsel uygulamalarda tercih edildiğinden bu çalışmanın ilgi alanı dışındadır. Kojenerasyon veya trijenerasyon uygulamalarında kullanılabilecek yakıt pili tipleri, avantaj ve dezavantajları aşağıda değerlendirilmiştir.



Şekil 3.2 Yakıt pili reaksiyonları[2]

3.2.1 Fosforik Asit Yakıt Pilleri

FAYP tipi yakıt pilleri ilk ticarileşen yakıt pili uygulamalarındandır. Prensipleri 1960'lı yıllarda ortaya konulmasına rağmen asıl geliştirme faaliyetleri Amerikan Enerji Bakanlığı'nın 1973 yılında başlayan araştırma programı ile olmuştur. İlk başarılı ticari uygulamalar ise 1990'lı yılların başında ortaya çıkmıştır[32]. Yine Amerikan Savunma Bakanlığı 30 farklı askeri üste FAYP kullanılmasını sağlayan bir yatırım programı geliştirerek, hastane, yüzme havuzu, kışlalar, ofis binaları, endüstriyel laboratuvarlar, çamaşırhaneler, endüstriyel mutfaklar, kontrol merkezleri gibi farklı yapılarda yakıt pilli kojenerasyon ve trijenerasyon uygulamalarıyla ilgili deneyimin oluşmasına katkıda bulunmuştur [33]. FAYP yakıt pilleri elektrolit olarak konsantre sıvı fosforik asit kullanır. Fosforik asit elektrolit teflon kaplı silikon karbür bir matris içerisinde muhafaza edilir. Çalışma sıcaklıkları 150 – 220°C arasındadır. FAYP yakıt pillerinin yakıt içerisindeki karbondioksit ve karbonmonoksit gibi safsızlıklara toleransı fazladır. Dolayısıyla yakıtın saf hidrojen olarak girmesi zorunlu değildir. Bina uygulamaları söz konusu olduğunda hidrojen elde genellikle yakıt pillerine bütünleşik buhar reformasyon ünitesi ile olmaktadır. FAYP yakıt pilleri doğalgaz, arıtma gazı (metan içeriği düşük, çürütme prosesi ile açığa çıkan gazlar) veya LPG ile çalışabilir. FAYP yakıt pillerinin Alt Isıl Değer'e (AID) göre verimleri %36 – 42 arasında değişmektedir[3]. FAYP tip yakıt pillerinin en büyük dezavantajlarından biri pahalı platinyum katalizör kullanmasıdır. FAYP kojenerasyona uygundur. Literatür araştırmasında da görüldüğü gibi farklı bina uygulamalarında kullanılan, ihtiyaca göre ölçeklendirilmiş 200 - 400 kW_e kapasitesinde paket FAYP sistemleri halen aktif olarak kullanılmaktadır.

3.2.2 Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri

Bu sınıfa giren yakıt pilleri elektrolit olarak erimiş karbonat tuz karışımı kullanır. Yüksek sıcaklıkta, yaklaşık 650°C'de çalışan bir yakıt pili olduğundan kojenerasyona uygundur. Yüksek çalışma sıcaklığı aynı zamanda nikel gibi ucuz katalizörlerinde kullanılmasına izin verir. Elektrolit genellikle lityum karbonat ile potasyum karbonat karışımından oluşmaktadır ve bu elektrolit karışımı poroz seramik matris içerisinde muhafaza edilir [2]. EKYP tipi yakıt pillerinin en önemli dezavantajı kullanılan elektrolitlerin aşırı derecede korozif olmasıdır. Ayrıca yüksek çalışma sıcaklığı, yakıt pilinin mekanik dayanımını, dolayısıyla toplam çalışma ömrünü etkilemektedir. ÜID'e göre verimleri %40-50 civarındadır. EKYP tipi yakıt pillerinin 100 kWe kapasitesinden başlayarak MWe ölçeğine kadar çeşitli çeşitli ticari uygulamaları bulunmaktadır [32].

3.2.3 Katı Oksit Yakıt Pilleri

KOYP tamamen katı halde çalışan, oksit iyon taşıyıcı seramik malzemeyi elektrolit olarak kullanan yakıt pilledir. Bu özellikleri nedeniyle diğer tüm yakıt pillerinden daha basittirler[3]. KOYP tipi yakıt pilleri 1000°C'de çalıştıkları için kojenerasyona uygundur. Elektrolit kaynaklı korozyon problemleri yoktur ancak yüksek sıcaklıkta çalışma EKYP tipi yakıt pillerinde olduğu gibi avantaj ve dezavantajları beraberinden getirmektedir. Yüksek sıcaklıkta çalışma soylu metal katalizör kullanımına ihtiyacı ortadan kaldırır. Ancak dur kalk şeklinde çalışmaya pek uygun değillerdir. Aynı zamanda ilk çalıştırma süreleri de fazladır. Yüksek sıcaklıkta çalışma nedeniyle ömürleri göreceli olarak daha kısadır Personel güvenliği ve ısı kaybını önlemek için ciddi yalıtım uygulanması gereklidir[2]. ÜID'e göre KOYP pillerinin verimi %45 - 55 civarındadır. KOYP diğer yakıt pili tiplerine kıyasla sülfür ve CO toleransı çok yüksektir. Hatta CO yakıt olarak kullanılabilir. Bu özellikleri nedeniyle hidrojen dışındaki biyogaz, kömür sentez gazı, doğalgaz gibi farklı yakıtlarla da çalışmaya uygundur.

3.3 Yakıt Pili Karakteristikleri

Bina uygulamaları için yakıt pili seçimi; işletme ve bakım gereksinimleri, ısı göre kazanım özellikleri, verim, yük altında esnek çalışma, kapasitenin ihtiyaca göre ölçeklendirilebilmesi gibi farklı kriterlere göre değerlendirilerek yapılmalıdır.

Tablo 3.1 Yakıt pili karakteristikleri

Tip	Verim(ÜID)	Çalışma Sıcaklığı	Tipik kapasite
	$\%$	$^{\circ}C$	kW_e
FAYP	40	150-200	400
EKYP	50	600-700	300 - 1400
KOYP	55	500-1000	250

Tablo 3.1'de karşılaştırılan her bir yakıt pili kojenerasyona uygundur ancak uygulama detayları açısında bu yakıt pilleri çeşitli farklı özelliklere sahiptir. Burada verilen kapasiteler mevcut ticari yakıt pili alternatiflerinin tipik kapasitelerini yansıtmaktadır. Bina uygulamaları dikkate alınarak bu yakıt pili tiplerinin avantaj ve dezavantajları Tablo 3.2'de verilmiştir.

3.4 Yakıt Pili Seçimi

FAYP tipi yakıt pilleri 80000-10000 saat arası kullanım ömrüne ulaşabilen yegane ticari yakıt pili teknolojisidir[31].Yeni nesil FAYP uygulamalarında yapılacak ağır bakımlarla bu süre uzatılabilmektedir. Tablo 3.2incelendiğinde FAYP yakıt

pillerinin yaygın kullanım deneyimi ve uzun kullanım ömrü nedeniyle öne çıktığı görülmektedir. Yakıt pili maliyetlerinin yüksekliği dikkate alındığında uzun çalışma ömrü daha kritik hale gelmektedir.

Tablo 3.2 Yakıt pili karşılaştırması

Tip	Avantajlar	Dezavantajlar
FAYP	• Kojenerasyona uygun • Hidrojen dışındaki yakıtlarla çalışmaya uygun • Yakıt içerisindeki safsızlıklara toleransı yüksek • Uygulama deneyimi fazla • Uzun kullanım ömrü	• Uzun ilk çalıştırma süresi • Yakıt içerisindeki sülfüre karşı hassas • Pahalı platinyum katalizör
EKYP	• Kojenerasyona uygun • Hidrojen dışındaki yakıtlarla çalışmaya uygun • Yüksek verim	• Uzun ilk çalıştırma süresi • Yüksek sıcaklıkta çalışma • Korozif elektrolit • Birim hacim başına kapasitesi düşük
KOYP	• Kojenerasyona uygun • Hidrojen dışındaki yakıtlarla çalışmaya uygun • Yüksek verim • Korozif olmayan katı elektrot	• Uzun ilk çalıştırma süresi • Çok yüksek sıcaklıkta çalışma • Aç/kapa şeklinde çalışmaya uygun değil • Personel güvenliği kritik

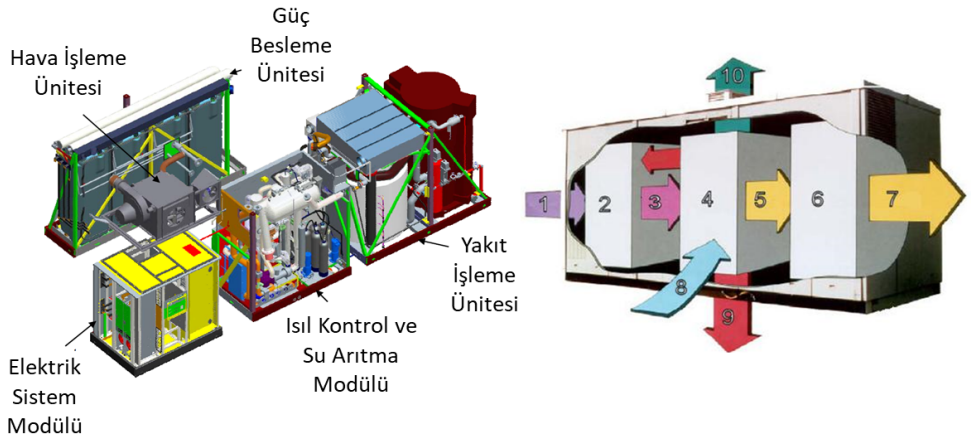
EKYP ve KOYP tipi yakıt pilleri yüksek çalışma sıcaklıkları nedeniyle arızaya daha yatkındır. KOYP pilleri personel güvenliği çaısından ekstra yalıtım gibi önlemlerine ihtiyaç duyar. Tüm yakıt pilleri reaksiyonun başlatılabilmesi için belli bir çalışma sıcaklığına kadar ısıtılmalıdır. Yakıt pili bu süre boyunca harici enerji kaynağına itiyaç duyar. Dolayısıyla ilk çalıştırma süresinin uzunluğu enerji tüketimi açısından bir dezavantajdır. KOYP pilleri en yüksek çalışma sıcaklığına sahip yakıt pili olduğundan aç/kapa şeklinde çalıştırma bu tip yakıt pillerinde daha problemlidir. Bu genel avantaj ve dezavantajlar ile bina uygulamaları özelinde 1990'lı yılların başından beri süregelen kullanım deneyimi dikkate alınarak bu çalışmada yakıt pilli birleşik ısı güç sistemi uygulaması olarak FAYP tipi yakıt pilleri ele alınmıştır.

3.5 Birleşik Isı Güç Sistemi Olarak FAYP Teknolojisi

Bina uygulamalarında sabit güç kaynağı olarak kullanılabilecek tüm yakıt pili uygulamaları arasında FAYP tipi yakıt pilleri öne çıktığından 1975 - 1985 yılları arasında FAYP yakıt pili teknolojisi üzerine çeşitli araştırma projeleri yürütülmüştür. [34][35].İlk ticari yakıt pilli kojenerasyon veya birleşik ısı güç sistemi de 200 kWe kapasitesinde bir FAYP yakıt pili uygulamasıdır. [34]. Bu tez çalışmasına temel teşkil eden FAYP teknolojisiyle ilgili teknik ve ekonomik faktörler bu bölümde değerlendirilmiştir.

3.5.1 Fosforik Asit Yakıt Pili Temel Bileşenleri

Ticari bir yakıt pili Şekil 3.1'de temsil edilen temel yakıt pili reaksiyonu gerçekleştirmek üzere bir araya getirilmiş çeşitli bileşenleri içeren paket bir sistemdir. Bina uygulamaları açısından temel problem bu sistemin girdisi olacak yakıtın teminidir. Hidrojenenin genel bir servis sağlayıcıdan temin edilmesi hala mümkün değildir. Bu nedenle FAYP ve diğer büyük ölçekli KOYP ve EKYP sistemleri hidrojeni genellikle doğalgazdan veya diğer hidrokarbon türevi gazlardan dönüştürmek suretiyle elde ederler.



Şekil 3.3 FAYP Tipi yakıt pili bileşenleri[36][37]

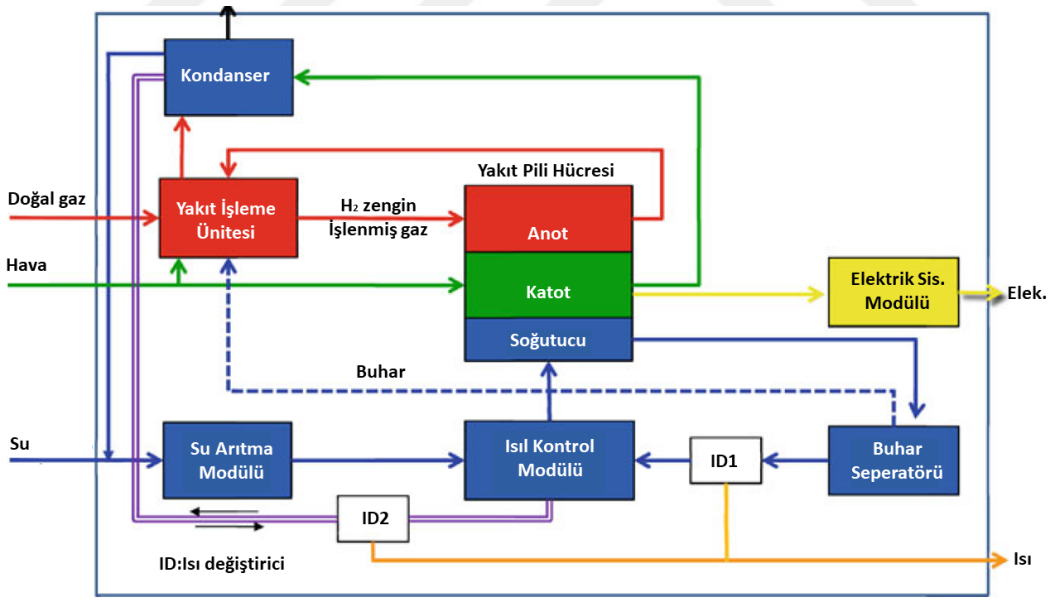
Ticari bir FAYP tipi yakıt pilinin temel bileşenleri ve yakıt pili prosesi aşağıdaki sırayla Şekil 3.3 üzeinden takip edilebilir[36].

Tablo 3.3 Fostorik asit yakıt pili tipik prosesi

Aşama	Proses
1	Yakıt girişi
2	Yakıtın reformasyon yoluyla hidrojene dönüştürülmesi
3	Hidrojence zengin gaz çıkışı
4	Elektrokimyasal reaksiyonun gerçekleştiği yakıt pili hücresi
5	Doğru akımın güç besleme ünitesine iletimi
6	Güç besleme ünitesinde (inverter) doğru akımın alternatif akıma çevrilmesi
7	Alternatif akımın bina şebekesine beslenmesi
8	Oksitleyici ya da hava (4 aşamasında reaksiyona dahil olur)
9	Kullanılabilir atık ısı
10	Atmosfere atılan ısı (9.aşamada kullanılmaması halinde)

3.5.1.1 Yakıt İşleme Ünitesi

Yakıt işleme ünitesi ticari FAYP tipi pillerinin temel bileşenlerinden birisidir. Yakıt işleme ünitesi doğalgaz şebekesine bağlanarak şebeke gazını hidrojence zengin gaza çevirir ve bu gaz reaksiyona girmek üzere yakıt pilinin anot tarafına beslenir. Yakıt işleme ünitesi sülfür ayırıcı, buhar reformasyon ünitesi, amonyak ayırıcı ve kondenserden oluşur.



Şekil 3.4 FAYP proses şeması[31]

Sülfür ayırıcı şebeke doğalgazına koku vermek için kullanılan sülfürü ayırır. Sülfür FAYP kullanımı açısından en problemli unsurdur. Sülfür ayrılması bu nedenle kritiktir. Buhar reformasyon ünitesi yüksek sıcaklıktaki su buharı ile metanı Denklem 3.1'e göre işleme tabi tutar.

$$2CH_4 + 3H_2O = 7H_2 + CO + CO_2 \tag{3.1}$$

Bu reaksiyon sonucu ortaya çıkan CO ve CO_2'de tekrar su buharı ile Denklem3.2'ye göre işleme tabi tutulur.

$$CO + H_2O = H_2 + CO_2 \tag{3.2}$$

Bu reaksiyon sonucunda şebeke gazının içeriğinde bulunan az miktarda nitrojen de amonyağa dönüşür. Oluşan bu amonyak amonyak ayırıcıda ayrılır. Yakıt pili reaksiyonu sonucunda ortaya çıkan su buharı kondenser ünitesinde yoğuşturularak yakıt işleme ünitesinde tekrar kullanılır.

3.5.1.2 Yakıt Pili Hücresi

Yakıt pili hücresi matris yapıda yakıt pili reaksiyonunun gerçekleştiği elektrolit, anot ve katotun bulunduğu kısımdır. Denklem 3.3'de temel yakıt pili reaksiyonu,

Temel yakıt pili reaksiyonu:

$$2H_2 + O_2 = 2H_2O \tag{3.3}$$

Anot tarafı reaksiyonu:

$$2H_2 = 4H^+ + 4e^- \tag{3.4}$$

Katot tarafı reaksiyonu:

$$O_2 + 4e^- + 4H^+ = 2H_2O \tag{3.5}$$

3.5.1.3 Isıl Yönetim ve Su Arıtma Modülü

Isıl yönetim ve su arıtma ve su arıtma modülü yakıt pili reaksiyonu sonucunda ortaaya çıkan suyu tekrar buhar reformasyon ünitesine gönderilmesini, gerekirse besleme suyu takviyesini, yakıt pili hücresinin soğutulmasını ve ısı geri kazanımı fonksiyonlarını kontrol eder. Besleme suyu takviyesi dış hava sıcaklığı $30°C$ altında olduğu sürece gerekli değildir.

3.5.1.4 Elektrik Sistem Modülü

Elektrik sistem modülü yakıt pili tarafından üretilen doğru akımın alternatif akıma çevrilmesini, voltaj kontrolünüi voltajın bina şebekesi ile senkronizasyonunu sağlar.

3.5.1.5 Hava İşleme Ünitesi

Katot tarafına beslenecek havanın filtrasyonunu, soğutulması gereken yakıt pili bileşenleri için soğutma havasının sağlanmasını garanti eder.

3.5.1.6 Soğutma Ünitesi

Soğutma ünitesi atık ısının binada kullanılmaması durumunda tahliyesini sağlayan bir kondenser ünitesinden oluşmaktadır. Bu soğutucu genellikle yakıt pili paketinin parçası olarak tedatik edilir ancak yakıt pili gerektiğinde merkezi bir soğutma devresine de bağlanabilir.

3.5.2 FAYP Tipi Yakıt Pili Teknik Karakteristikleri

3.5.2.1 Tipik Kapasite

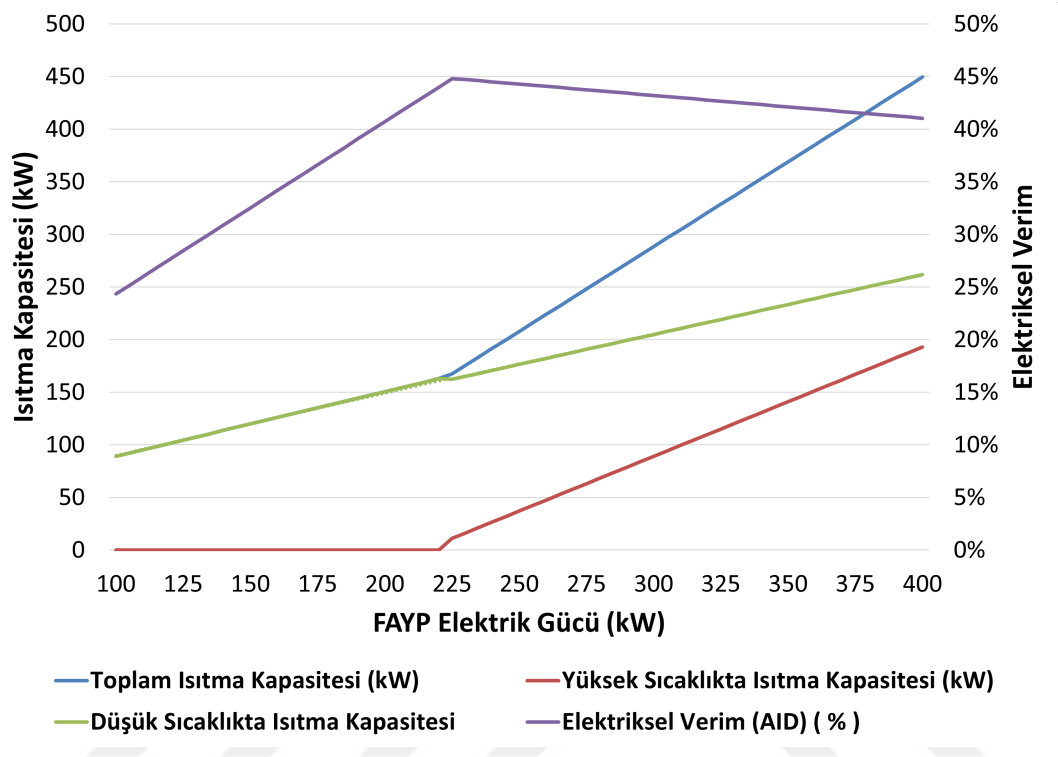
Bu çalışmada ele alınan FAYP tipi yakıt pili 400 kW_e net elektrik üretim kapasitesine sahiptir. Toplam elektrik talebine göre 400 kW_e kapasitesinde üniteler seri bağlanarak toplam kapasite arttırılabilmektedir. Orta ölçekli tüm ticari yakıt pili uygulamalarında kapasitelerinde çeşitliliği sınırlıdır. Ölçek ekonomisine ulaşılamadığından üreticiler genellikle tek bir kapasite üzerinden üretim yapmaktadır. FAYP yakıt pillerinde de tüm yakıt pillerinde olduğu gibi başlangıç kayıpları söz konusudur. İlk çalıştırma süresi 3 - 5 saat arasında değişebilir. Bu süre boyunca parazitik yükler 150 - 180 kW_e mertebesindedir [17].

Tablo 3.4 Yakıt pili karakteristikleri

Özellikler	Birim	Değerler
Nominal Elektriksel Kapasite	kW_e	400
Nominal Elektriksel Verim (AID)	%	42
Gaz Tüketimi (ÜID)	kW_t	1055
İlk çalıştırma süresi	*saat*	4
İlk çalıştırma parasitik yük	kW_e	150
Yakıt pili hücresi ömrü	Yıl	10
Minumum kısmi yük	%	10
Yüksek dereceli ısıtma kapasitesi	kW_t	190
Düşük dereceli ısıtma kapasitesi	kW_t	260

3.5.2.2 Kısmi Yük Performansı

FAYP yakıt pilinin kısmi yük performansı, kısmi yüklerdeki verim değerleri ve minumum kapasite sınırları yakıt pilinin bina profili ile nasıl eşleneceğini anlamak açısından önemlidir.



Şekil 3.5 FAYP Yakıt pili kısmi verim (AID) diyagramı

Yakıt pilinin kısmi yük verimi 225 kW_e kapasitesine kadar artmakta bu değerden sonra tekrar düşmeye başlamaktadır. Yakıt pili $100kW_e$ altında da çalışabilmesine rağmen bu yüklerde uzun süre çalıştırılması anlamlı değildir. Yakıt pili performansı ya da yakıt hücresinin verimi zamanla azalmaktadır. İki ağır bakım arasında verimdeki azalma miktarı $\%1.2$ mertebesindedir. Yakıt pilinin verimi düştükte yakıt tüketimi ve atık ısı miktarı artmaktadır. Dolayısıyla Şekil 3.5'te verilen kısmi verim performansı Bölüm 4.3 detayları açıklanan enerji modelinde bu şekilde tanımlanmıştır.

3.5.2.3 Verimin Alt veya Üst Isıl Değere Göre Tanımlanması

Yakıt pilleri üzerinde çalışmalarda verimin alt veya üst ısıl değere göre tanımlanması önemlidir. Pek çok üretici kataloglarını Şekil 3.5'de görüldüğü gibi verimler Alt Isıl Değer(AID) cinsinden tanımlanmaktadır. Pek çok yakıt pili çalışmasında da bu ayrım iyi tanımlanmadan analizler yapılmakta, dolayısıyla yakıt pili performansıyla ilgili yanıltıcı sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. [38]. Bu çalışmada girdi olarak gerçek tüketim verileri kullanılmaktadır. Gaz şirketleri de

faturalandırmayı üst ısıl değer üzerinden yapmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada da maliyet performans dengesinin doğru kurulabilmesi için analizler üst ısıl değere göre yapılmıştır [17]. Yakıt pilinin toplam sistem verimi, doğalgaz üst ısıl değeri ve F_{UID}, yakıt pilinin parazitik elektrik tüketimi E_{fp} düşüldükten sonra yakıt pili tarafından üretilen net elektrik miktarı E_{fc}'ye göre Denklem 3.7 da verilmiştir.

- Yakıt pili net elektrik üretimi:

$$E_{fc} = E_{fc_b} - E_{fc_p} \tag{3.6}$$

- Yakıt pili verimi:

$$\eta_{fC} = \frac{E_{fc}}{F_{\ddot{U}ID}} \tag{3.7}$$

3.5.2.4 Isı geri kazanım detayları

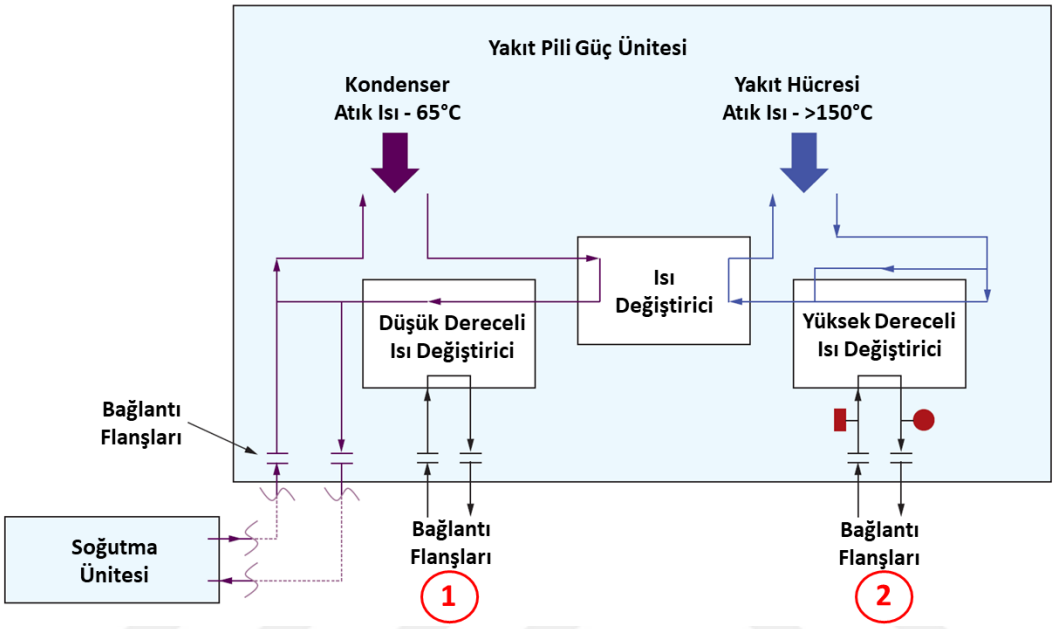
FAYP tipi bir yakıt pilinin ısı geri kazanım konfigürasyonu Şekil 3.6'da gösterilmiştir. FAYP yakıt pillerinde kaydalı atık ısı yüksek ve düşük sıcaklık olmak üzere iki farklı sıcaklıkta dışarı atılır. Bu sıcaklık değerleri kullanıcı ihtiyaçlarına göre FAYP yakıt pilinin limitleri dahilde değiştirilebilmektedir. Yakıt pili 400 kW_e elektrik üretirken tipik ısıtma kapasitesi Tablo 3.5'te verilen giriş çıkış sıcaklıklarına göre verilmiştir. Çıkış su sıcaklığının yükseltilmesi durumunda düşük sıcaklıkta ısı geri kazanım potansiyeli azalmaktadır. Yakıt pili yüksek sıcaklık ısı değiştiricisi istenmesi halinde yaklaşık $120°C$ sıcaklığına ulaşılabilmektedir. Ancak, bu durumda düşük sıcaklıkta ısı geri kazanımı mümkün değildir. Tüm enerji yüksek sıcaklık tarafında transfer edilmiş olmaktadır.

Tablo 3.5 Tipik ısı geri kazanım kapasite detayları

Isı Geri Kazanımı	Debi	Giriş Su Sıcaklığı	Çıkış Su Sıcaklığı	Tipik kapasite
	ł/s	$°C$	$°C$	kW_t
Yüksek Sıcaklık	4.13	71	82	190
Düşük Sıcaklık	2.48	26	51	260

Yüksek sıcaklıktaki atık ısının direk olarak kullanılmaması durumunda FAYP yakıt pili yüksek sıcaklıktaki tüm atık ısıyı dahili eşanjörü yardımıyla düşük sıcaklıkta atık ısıya çevirmektedir. Yakıt pilinin dahili eşanjörlerinin sıcak tarafı daima sıcaktır. Bu eşanjörlerden transfer edilecek ısı miktarını yakıt pilinin kendisi kontrol etmemektedir. Transfer edilebilecek ısının miktarını eşanjörün mevcut kapasitesi dahilinde kullanıcı belirlemektedir.

Yakıt pilinde gerçekleşen kimyasal reaksiyon sonucu açığa çıkan atık ısıdan faydalanılmaması durumunda FAYP kendi soğutma ünitesi ile bu ısıyı atmosfere atmak zorundadır. Şekil3.6'da şematize edilen sistem tamamen FAYP yakıt pilinin iç yapısı ile ilgilidir. FAYP yakıt pili "1" numaralı yüksek veya "2" numaralı düşük dereceli ısı değiştiricisi bağlantı flanşları kullanılarak ihtiyaca göre sıcak su, mahal ısıtma veya absorpsiyonlu soğutma talebini karşılayabilmektedir. [36].



Şekil 3.6 FAYP Yakıt pili ısı geri kazanım bağlantı detayları

3.5.3 FAYP Tipi Yakıt Pili Ekonomik Karakteristikleri

3.5.3.1 İlk Yatırım Maliyeti

Yakıt pili teknolojisi pahalı bir teknolojidir ve geçtiğimiz yirmi yılda yapılan fiyat projeksiyonu çalışmalarından hemen hiçbirisi gerçekleşmemiştir. Yakıt pillerinin kurulu elektrik gücü başına maliyetlerinin 1500 \$/kW_e mertebelerine düşeceğine dair üretim hacmine bağlı yapılan çalışmalar günümüz gerçeklerinden uzaktır [39][40]. Bu fiyat mertebesi pek çok çalışmada yakıt pillerinin mevcut konvansiyonel teknolojilerle yarışabilmesi için minumum fiyat eşiği olarak belirtilmiştir [41]. Yakıt pili sistemleri için güncel sistem maliyet aralığı olarak minumum 5000 - 7000 \$/kW_e mertebesi verilebilir [42] [43] [44]. Bu maliyet aralığı tüm ekipman, montaj, devreye alma, işçilik ve ısı geri kazanımı sistemi dahil toplam kurulu maliyeti yansıtmaktadır. Projenin konumu, toplam kapasite ya da cihaz sayısına göre toplam kurulu maliyet için farklı rakamlar söz konusu olabilir. Literatürde 9000 - 10000 \$/kW_e aralığında çeşitli maliyetler raporlanmıştır [45]. Tekil sistemler için üreticiler daha yüksek fiyat verme eğilimindedir. Bu nedenle fizibilite çalışmalarında bu fiyat eşiklerinin üst sınırı dikkate alınmalıdır [36].

3.5.3.2 İşletme Maliyeti

FAYP tipi yakıt pillerinin temel avantajı gerçek saha koşullarında test edilmiş uzun işletme ömrüdür. Yakıt hücresi için verilen 40.000 saat katalog değerleri aşılabilmektedir. Ağır bakım öncesi 70.000 saat ve üzeri çalışma ömrüne ulaşmış FAYP yakıt pili uygulamaları bulunmaktadır[31]. Bu ağır bakım harcamaları toplam ömür boyu maliyet içerisinde önemli bir yer tutmaktadır.FAYP yakıt pilleri bakım maliyetleri açısından değerlendirildiğinde 0.015 – 0.035 \$/kWh_e aralığında rakamların oluşturğu görülmektedir. [39] [41] [40].

4
ANALİZ METODOLOJİSİ

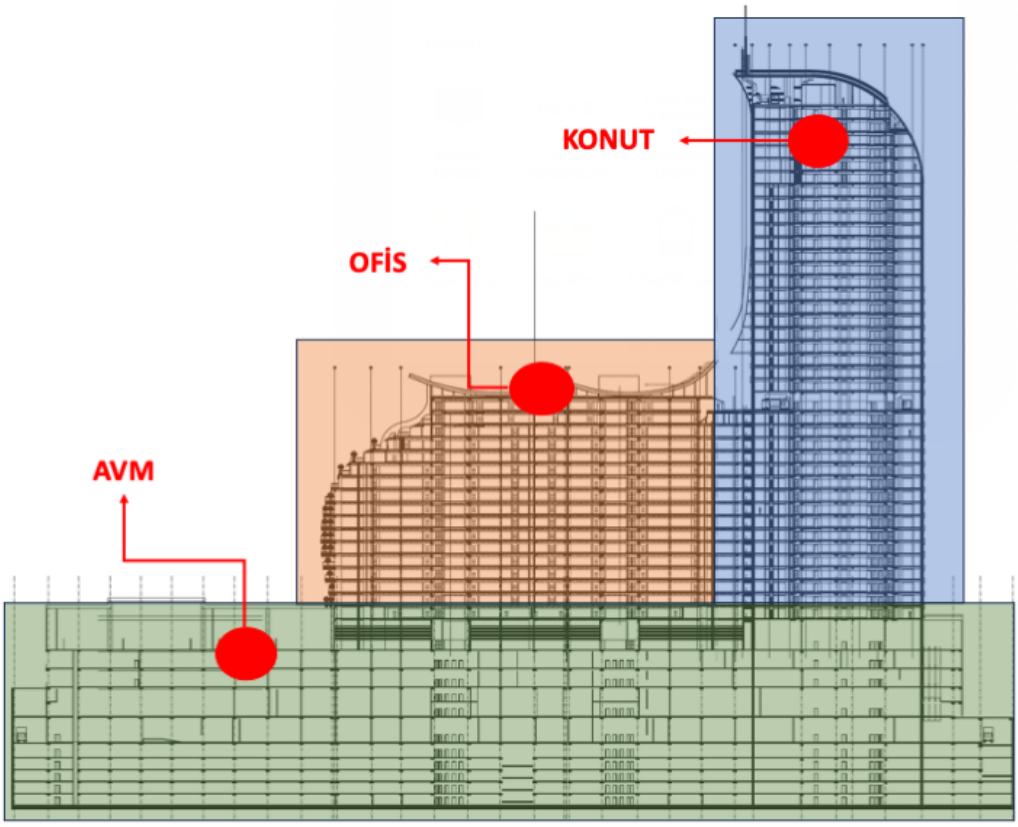
Bu bölümde tez çalışmasının esasını oluşturulan genel teknik ve ekonomik analiz metodolojisi, kullanılan veriler ve önerilen analiz metodolojisinin uygulanması için kullanılanılan araçlar değerlendirilmiştir.

4.1 Veri Kaynakları

Bu tez çalışmasında kullanılan veriler örnek uygulama olarak ele alına çok fonsiyonlu, karma kullanımlı ticari yapı kompleksinin iklimlendirme sistemi detaylarıyla yapının enerji tüketimlerine ait verileri içermektedir.

4.1.1 Örnek Ticari Yapının Değerlendirilmesi

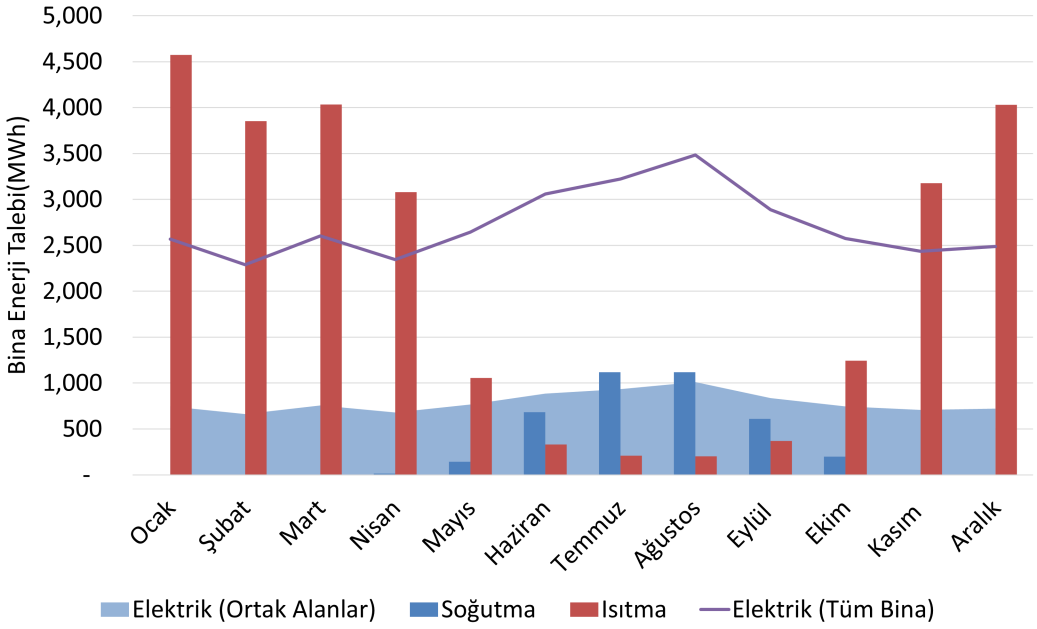
Bu çalışmada alışveriş merkesi, ofis ve konut tipi farklı kullanım özelliklerine sahip 379.787m² kapalı alana sahip İstanbul Anadolu yakasında ticari bir yapı kompleksi ele alınmıştır. Yapının tüm fonksiyonlara hizmet edecek şekilde tasarlanmış alışveriş merkezi teknik yönetimi tarafından işletilen tek bir ısı ve enerji merkezi bulunmaktadır. Ele alınan yapı bu haliyle mevcut ticari binalarda yakıt pili teknolojisinin uygulanması açısından iyi bir örnektir. Söz konusu yapı birkaç karakteristik unsuru nedeniyle hem kojenerasyona hem de yakıt bili kullanımına uygundur. İlk olarak ele alınan yapı alışveriş merkezi, ofis konut/konaklama gibi farklı fonsiyonları içerdiğinden yazın sürekli bir ısıtma (konut sıcak su talebi) talebi ve yılın büyük kısmına yayılan bir soğutma talebi bulunmaktadır. Binanın baz elektrik talebi, seçilecek kapasiteye bağlı olarak yakıt pillerinin sürekli devrede kalmasını garanti edecek, dur kalk şeklinde çalışmaya mahal vermeyecek seviyededir. Tüm yapının enerji sistemi tek noktadan yönetilmektedir. Dolayısıyla yakıt pillerinin işletilmesi açısından avantajlı bir durum söz konusudur. Bu haliyle seçilen örneğin mevcut ticari binalarda yakıt pili kullanımının avantaj ve dezavantajlarını ortaya koyacak bir perspektif vereceği rahatlıkla söylenebilir.



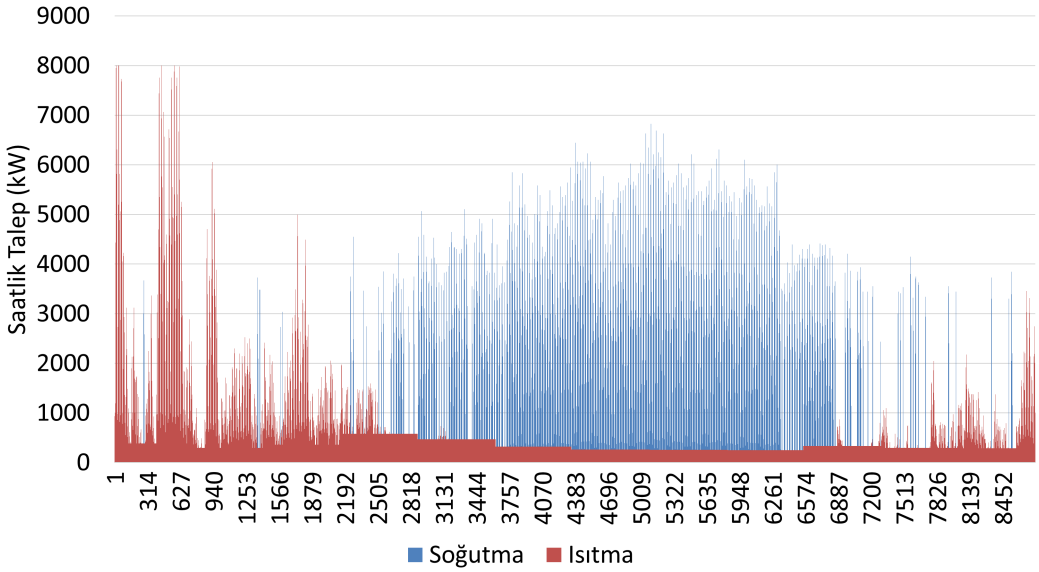
Şekil 4.1 Örnek yapının mimari temsili ve fonksiyonları

4.1.2 Bina Enerji Talebinin İncelenmesi

Bina enerji tüketimlerine ait veriler saatlik olarak temin edilmiştir. Bina enerji talebi incelendiğinde yapıda farklı fonksiyonların mevcut olmasının binanın enerji profillerine yansıdığı görülmektedir. Tipik bir kojenerasyon veya trijenerasyon sistemi için yatırım kararı verilebilmesi bu profiller ile doğrudan ilgilidir. Ele alınan binada yaz mevsimi de dahil olmak üzere sürekli bir ısı talebi bulunmaktadır. Mayıs ile Ekim ayları arasında da sürekli bir soğutma talebi bulunmaktadır. Dolayısıyla yakıt pili atık ısısı direkt olarak ısıtmada veya absorpsiyonlu soğutma yardımıyla soğutmada kullanılabilir. Bina elektrik talebi artan soğutma ihtiyacı nedeniyle yaz mevsiminde artmaktadır. En yüksek talebin olduğu ay Ağustos ayıdır. FAYP uygulaması da bu noktada konvansiyonel sistem üzerindeki yükün azaltılmasına yardımcı olabilir. Saatlik ısıtma ve soğutma talebi tüm sene boyunca incelendiğinde talebin dağılımı daha iyi anlaşılmaktadır. Kış aylarında dış sıcaklığa bağlı olarak değişken ısıtma pikleri söz konusudur. Toplam talep 8000 kW_t mertebesine çıkabilmektedir. Yaz aylarında ise soğutma talebi maksimum 6000 kW_t mertebesine çıkmaktadır. Yaz döneminde ısıtma talebi ise 250 - 500 kW_t aralığında seyretmektedir. Bu talebin hemen hepsi konutların sıcak su ihtiyacından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.2 Bina aylık enerji talebi



Şekil 4.3 Saatlik ısıtma ve soğutma talebi (8760 saat)

4.1.3 Bina Isıtma ve Soğutma Sisteminin İncelenmesi

Ele alınan yapının mevcut iklimlendirme sistemini besleyen soğutma grupları ve kazanlar tamamıyla konvansiyonel mantıkla düzenlenmiştir. Soğutma sistemi iki adet santrifüj ve bir adet vidalı soğutma grubundan; ısıtma sistemi ise iki adet yüksek ve bir adet düşük kapasiteli doğalgaz yakan çelik sıcak su kazanından oluşmaktadır.

Hem soğutma hem de ısıtmada ana dağıtım pompa grupları; sabit debili primer ve değişken debili sekonder pompa grupları şeklinde düzenlenmiştir. Kapasite

detayları Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilmiştir. Soğutma grubu kapasiteleri 35/29$°C$ kondenser suyu giriş ve çıkış sıcaklığı, 11/6 $°C$ soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklığına, kazan kapasiteleri ise 80/60 $°C$ su rejimine göre belirlenmiştir.

Tablo 4.1 Soğutma sistemi kapasite detayları

Soğutma Grubu	Soğutma Gücü	Kompresör Kapasitesi	CoP	IPLV
Tip	kW_t	kW_e		
Santrifüj 01	3330	565	5.89	8.15
Santrifüj 02	3330	565	5.89	8.15
Vidalı 03	988	231	4.28	5.54

Tablo 4.2 Isıtma sistemi kapasite detayları

Sıcak Su Kazanı	Isıtma Kapasitesi	Brülör Kapasitesi	Verim
Tip	kW_t	kW_t	%
Kazan 01	3500	513 - 58375	93,6
Kazan 02	3500	513 - 5837	93,6
Kazan 03	1000	90 - 1674	92,8

Cihaz kapasiteleri incelendiğinde eş kapasite cihaz kullanılması yerine yaz ve kış yüklerinin dağılımına göre cihazların bölündüğü görülmektedir. Kısmi yüklerin daha rahat karşılanabilmesi için soğutma düşük kapasitesli bir adet vidalı soğutma grubu, ısıtmada ise yaz kazanı olarak kullanılacak düşük kapasiteli bir kazan kullanımı öngörülmüştür. Yakıt pilinin atık ısısından yararlanılması ilerleyen bölümlerde görüleceği yaz kazanı kullanımını ciddi olarak azaltacaktır.

4.1.4 İklim Verileri

FAYP yakıt pilinin mevcut ısıtma ve soğutma sistemine entegrasyonu için ele aldığımız yapı İstanbul'da olduğundan simülasyonlarda öncelikli olarak İstanbul koşulları dikkate alınmıştır. FAYP simülasyonları saatlik bazda yapılmıştır. Dolayısıyla farklı iklim koşullarında testlerin yapılabilmesi içinde saatlik iklim verisine ihtiyaç vardır. Bu amaçla EPW formatında iklim verileri kullanılacaktır. EPW formatı bina enerji simülasyonları için temel iklim verisi formatıdır [46].

4.1.5 Sera Gazı Emisyon Faktörleri

Bu çalışmanın bir diğer ayağı da mevcut binalarda FAYP yakıt pili kullanılması durumunda sera gazı emisyonlarında bir azalma olup olmadığının belirlenmesidir. Bu amaçla karbon salımı hesaplamalarında Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayınlanan, 08.08.2022 tarihli, "Türkiye Elektrik Üretimi ve Elektrik Tüketim Noktası Emisyon Faktörleri Bilgi Formu" baz alınmıştır.

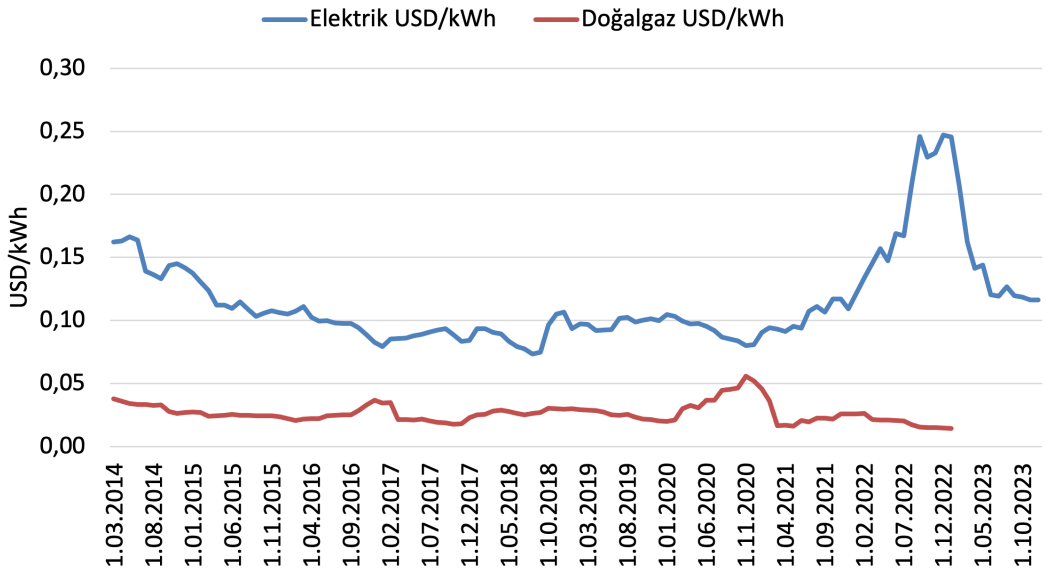
Yakıt pili yardımıyla üretilen elektriğin emisyon değeriyle şebeke emisyon değeri kıyaslanarak yakıt pilinin emisyon performansı tespit edilmiştir. Yakıt pili sadece elektrik üretimi durumu (ısı geri kazanım olmayan durumu), elektrik şebekesi ve doğalgaz emisyon faktörleri Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.3 Emisyon faktörleri

Emisyon Tipi	Emisyon Faktörü
	$kgCO_2/kWh$
Yakıt Pili (Sadece Elektrik Üretimi)	0.4760
Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü	0.4840
Doğalgaz Emisyon Faktörü	0.2340

4.1.6 Elektrik ve Doğalgaz Fiyat Serileri

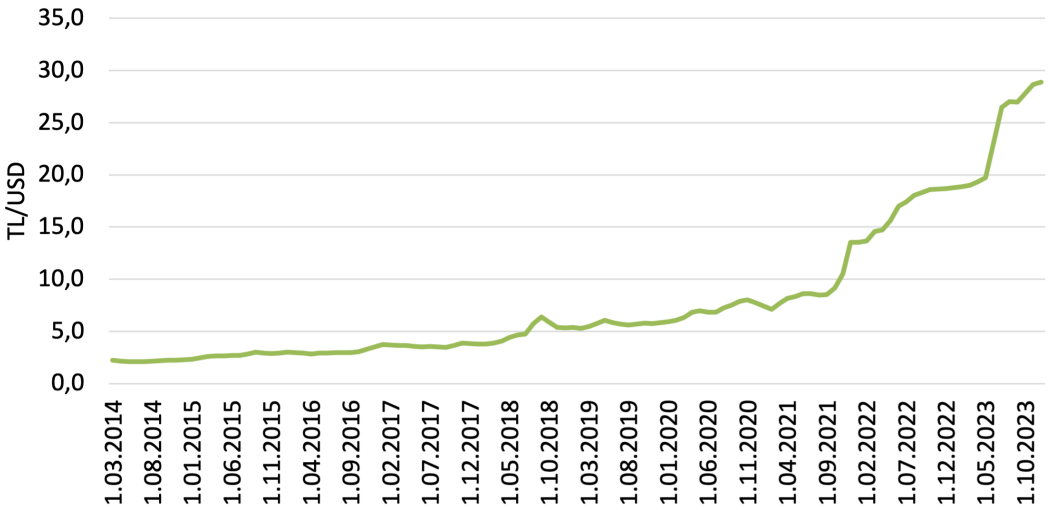
Ekonomik analizlerde kullanılan doğalgaz ve elektrik fiyat serileri olarak yapının işletmeye açıldığı ile 01.03.2014 tarihi 01.12.2023 arasındaki fiyat değişimleri esas alınmıştır.



Şekil 4.4 Elektrik ve doğalgaz fiyat serisi (2014 - 2023)

4.1.7 Döviz Kuru Fiyat Serileri

Ekonomik analizler dolar bazında yapıldığından doğalgaz ve elektrik birim fiyatları da T.C Merkez Bankası USD - TL kuru kullanılarak aynı tarihteki dolar değerine çevrilmiştir.



Şekil 4.5 TL/USD Döviz kuru (2014 - 2023)

4.2 Ekonomik Analiz Yöntemi

Ekonomik ve finansal analiz kavramları birçok çalışmada birbirinin yerine kullanılmasına rağmen ekonomik analiz yaklaşım olarak finansal analizden farklıdır. Kabaca bakıldığında her iki yöntemde bir yatırım veya projenin karlılığını amaçlar. Ancak karlılık kavramı her iki yaklaşımda aynı şeyi ifade etmemektedir. Finansal analiz ele alınan projede yatırımcının karlılığını hedefler, ekonomik analiz ise genel toplumsal faydayı da göz önüne alarak nakit akışını sadece pazar fiyatları üzerinden oluşacak dengeye göre kurgulamaz [47]. Örneğin karbon salımı faktörü ve buna bağlı oluşacak dolaylı maliyetler finansal analizin konusu olmayabilir. Bu çalışmada paranın zaman değeri dikkate alınarak aşağıda verilen Birime İndirgenmiş Elektrik Maliyeti, İskontolu Geri Dönüş Süresi, İç Verim Oranı, Net Bugünkü Değer gibi temel ekonomik analiz yöntemleri kullannılmıştır.

4.2.1 Birime İndirgenmiş Elektrik Maliyeti

Bu çalışmada FAYP tipi yakıt piliyle üretilen elektriğin maliyetini hesaplamak için temel ekonomik analiz yöntemi olarak "Birime İndirgenmiş Elektrik Maliyeti" metodu kullanılmıştır. Bu yöntem enerji sistemlerinin yatırım planlanmasında ve farklı teknolojilerin elektrik üretim maliyetini kıyaslamakta yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem ele alınan teknolojinin ömrü boyunca elektrik üretim maliyetinin ortalama net bugünkü değerini hesaplamayı sağlar. Dolayısıyla şebeke fiyatıyla ilgili teknolojinin elektrik üretim maliyetnini kıyaslamak içinde bir baz oluşturur. BİEM genel ifadesi Denklem 4.1'de verilmiştir[48].

$$\textit{BİEM} = \frac{\sum_{t=0}^{n} \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+d)^t}}{\sum_{t=0}^{n} \frac{E_t}{(1+d)^t}} \tag{4.1}$$

Burada, *d* iskonto oranı, *t* yılındaki yatırım yatırım maliyeti I_t, bakım maliyeti M_t, yakıt maliyeti F_t, elektrik üretim miktarı E_t olarak ifade edilir. Eğer maliyetler USD cinsinden, elektrik üretimi kWh olarak alınırısa ***BİEM***, USD/kWh olarak ifade edilir. Görüldüğü gibi genel ***BİEM*** hesaplama yaklaşımında kojenerasyon veya trijenerasyon gibi sistemlerin atık ısıdan faydalanarak işletme maliyetini düşürdüğü dikkate alınmamaktadır. Bu çalışmada ***BİEM***, Denklem 4.2'de verildiği şekilde kullanılmıştır. [49].

$$\textit{BİEM} = \frac{\sum_{t=0}^{n} \frac{I_t + M_t + F_t - S_t}{(1+d)^t}}{\sum_{t=0}^{n} \frac{E_t}{(1+d)^t}} \tag{4.2}$$

Burada, S_t atık ısının kullanılması yoluyla sağlanan ekonomik faydadır.

4.2.2 İskonto Oranı

Bir enerji sistemi yatırımın karlılığı temel olarak o yatırımın ömür boyu performansı ile ilgilidir. Yatırımın ömür boyunca yapılacak bakım masrafları, yakıt masrafları ve faydalardan oluşan nakit akışı paranın zaman değeri dikkate alınarak bugünkü değer cinsinden ifade edilmeli ya da başka bir deyişle iskonto edilmelidir. İskonto değerinin doğru seçilmesi yatırımın karlılığını direkt olarak etkilediğinden önemlidir. Başka bir ifadeyle, bugün elimizdeki para yarın sahip olacağımız aynı miktarda paradan değerli olduğundan iskonto oranı kaybolan fırsat maliyetini veya faiz yoluyla elde edilebilecek geliri ifade eder. Geniş çaplı enerji yatırımları genellikle yüksek sermaye girdisine ihtiyaç duyar. Dolayısıyla sermayenin maliyeti yatırımcının öz sermayesi, banka kredisi, devlet teşvikleri gibi çeşitli finansal araçların bileşkesi olabilir. Finansal analiz perspektifinden iskonto oranı, Ağırlıklı Ortalama Sermaye Maliyeti(AOSM) dikkate alınark belirlenir[50]. Ancak yukarıda da belirtildiği gibi bu çalışmada iskonto oranı denildiği zaman genel olarak faiz anlaşılmalıdır. Bu çalışmada hesaplamalar USD cinsinden yapıldığından iskonto oranlarının belirlenmesinde NIST Ömür Boyu Maliyet Analizi İçin Enerji Fiyat Endeksleri ve İskonto Faktörleri 2023 dikkate alınmıştır [51].

Burada belirtilmesi gereken diğer önemli bir nokta iskonto faktörünün enflasyon ile ilişkisidir. İskonto faktörü enflasyon dahil edilerek, "Nominal İskonto Faktörü" veya enflasyon etkisi düşülerek "Gerçek İskonto Faktörü" olarak ifade edilebilir. Bu çalışmada, *nakit akışları enflasyon etkisi dahil edilerek hesaplanmış, iskonto faktörü de nominal değeriyle alınmıştır.* Gerçek ve nominal iskonto faktörü arasındaki ilişki Denklem 4.3ve 4.4'te verilmiştir.

$$d_r = \left[\frac{(1+d_n)}{(1+e)}\right] - 1 \tag{4.3}$$

$$d_n = (1+d_r)\,(1+e) - 1 \tag{4.4}$$

Özetle, nakit akışı hesaplarında enflasyon etkisi hariç tutulduysa iskonto oranında da enflasyon etkisi hariç tutulmalı; nakit akışı hesaplarına enflasyon oranı dahil edildiyse iskonto oranı gerçek değerinde alınmalıdır.

4.2.3 Net Bugünkü Değer Metodu

Net bugünkü değer metodu yatırım kararlarının verilebilmesi için temel yaklaşımlardan birisindir. NBD metodunda da yatırımın ömrü boyunca yapılan tüm masraflar ve yatırımdan elde edilen kar başka bir deyişle net nakit akışı bugünkü değere getirilir [50]. Bizim ele aldığımız problemde masraflar; yıllık bakım masrafları, belirli periyotlarla yapılan ağır bakım masrafları ve yakıt masraflarıdır. FAYP yakıt pili yatırımından elde edilen kar ise yakıt pili atık ısının bina ısıtma ve absorbsiyonlu soğutma yoluyla soğutmada kullanılması sonucunda elde edilen faydadır. Yatırımın anlamlı olabilmesiçin NBD değeri pozitif olmalıdır ancak NBD pozitif olmak kaydıyla yatırımın karlılık değerlendirmesi veya net fayda yatırımcı beklentisine göre değişebilir. Net bugünkü değer hesaplarında hurda maliyeti ihmal edilmiştir.

$$\mathit{NBD} = -I_0 + \sum_{t=0}^{n} \frac{M_t + F_t - S_t}{(1+d)^t} \geq 0 \tag{4.5}$$

4.2.4 İç Verim Oranı (İVO)

İç verim oranı, net bugünkü değeri sıfır yapan iskonto veya faiz değeridir. Genellikle bankacılar veya finans kuruluşları tarafından tercih edilen bir karşılaştırma yöntemidir. Karlı bir yatırımda *İVO* iskonto oranından büyük veya iskonto oranına

eşit olmalıdır.

$$NBD = -I_0 + \sum_{t=0}^{n} \frac{M_t + F_t - S_t}{(1 + İVO)^t} \geq 0 \tag{4.6}$$

$$İVO \geq d \tag{4.7}$$

4.2.5 Geri Ödeme Süresi

Geri ödeme süresi hesaplamarında iki ayrı yaklaşım kullanılmıştır. Birincisi iskonto faktörünü dikkate almayan basit geri ödeme süresi, diğeri ise iskontolu geri ödeme süresidir.

4.2.5.1 Basit Geri Ödeme Süresi (BGÖ)

Basit geri ödeme süresi iskonto faktörünü veya başka bir deyişle paranın zaman değerini dikkate almayan geri ödeme süresi hesaplama yöntemidir. Basit geri ödeme süresi, FAYP gibi uygulamalarda; yatırımın maliyetinin, bu uygulamanın sağladığı yıllık enerji tasarrufu değerine bölünmesiyle elde edilen süre olarak tanımlanabilir [36]. BGÖ metodu özellikle yatırımın geri ödeme süresi beklentisinin kısa olduğu uygulamalarda bir karşılaştırma metodu olarak etkilidir ancak paranın zaman değeri dikkate alınmadığından daha uzun süreli yatırım planlamasında hata payı artar.

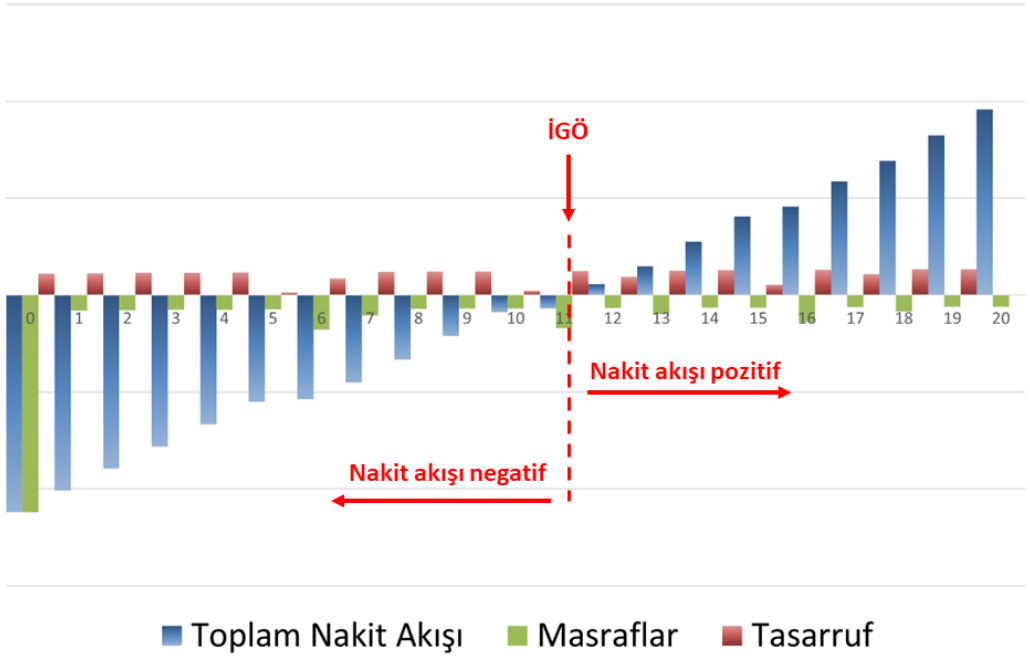
$$BGÖ = \frac{I_0}{S_{yıl}} \tag{4.8}$$

4.2.5.2 İskontolu Geri Ödeme Süresi (İGÖ)

İskontolu geri ödeme süresi yatırım süresi boyunca iskonto edilen net kar veya faydanın yatırım maliyetine eşit olduğu süredir. Burada İGÖ ancak iteratif olarak çözülebilir. İskontolu geri ödeme süresi her zaman basit geri ödeme süresinden büyüktür [50]. İGÖ süresi için önerilen sayısal çözüm metodolojisiyle birlikte Bölüm 4.3'te açıklanmıştır.

$$-I_0 + \sum_{t=1}^{t = t_{İGÖ}} \frac{S_t}{(1 + d)^{t_{İGÖ}}} = 0 \tag{4.9}$$

İskontolu geri ödeme süresi nakit akışı grafiği üzerinde Şekil4.6'te gösterildiği şekilde açıklanabilir. Buna göre İGÖ nakit akışının pozitif değere döndüğü noktadır. İGÖ paranın zaman değerini ve gelecekteki nakit akışlarını da dikkate aldığı özellikle uzun süreli yatırımlarda daha anlamlıdır. Bu metodunun hassasiyetini belirlyen en önemli nokta iskonto süresinin tespitidir.

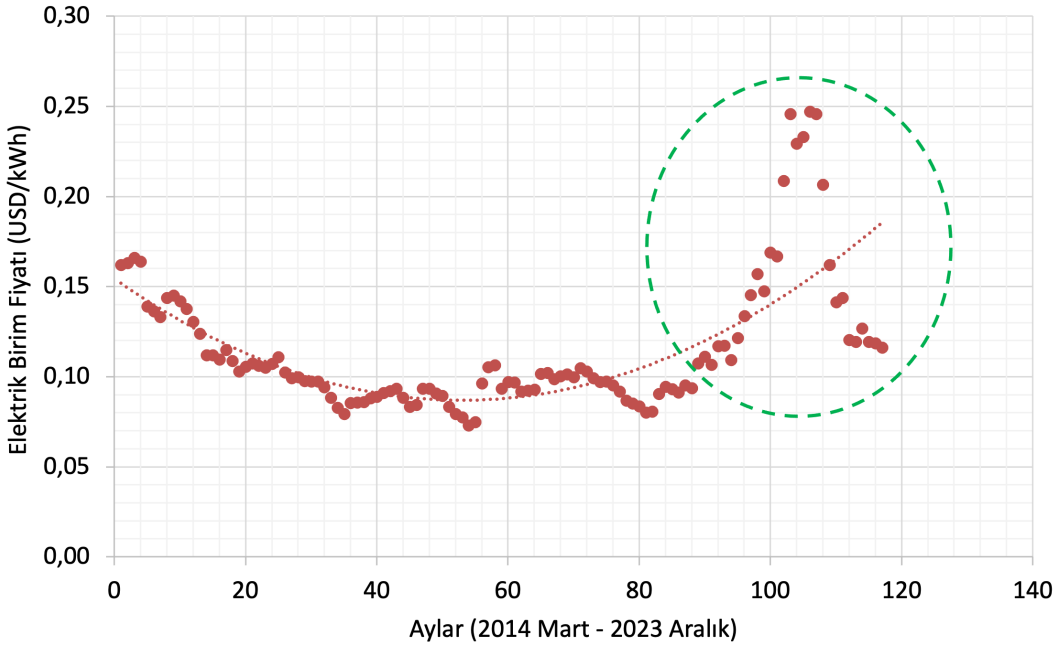


Şekil 4.6 İskontolu geri ödeme süresi

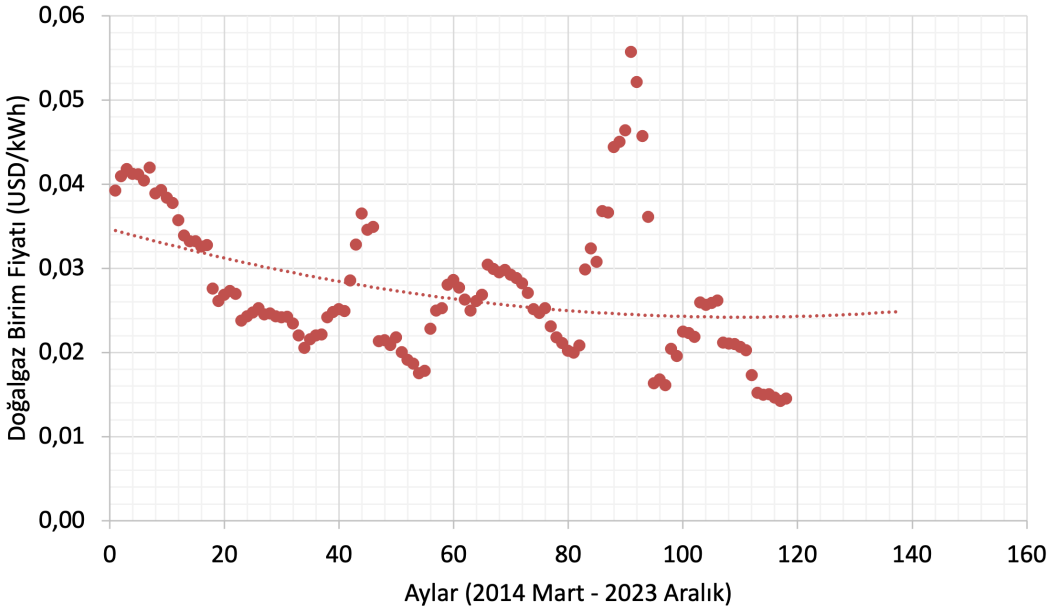
4.2.6 Fiyat Artışları

Fiyat artışları veya eskalasyon değerleri bu çalışma özelinde elektrik birim fiyatı, doğalgaz birim fiyatıyla, işletme ve bakım maliyeti fiyatlarını etkilemektedir. Elektrik ve doğalgaz fiyatlarının yatırımın ömrü boyunca değişimi yatırımın ekonomik performansı üzerinde direkt olarak etkilidir. Bir fiyat sepeti içerisinde tanımlı bir malın fiyatının değişimi sepetin fiyatının değişiminden farklı olabilir. Daha genel bir ifadeyle ele alınan ürün, mal veya hizmet için eskalasyon değeri enflasyonun altında veya üzerinde olabilir [50].

Gelecekteki birim fiyatların tahmin edilmesi ekonomik tahminlerin doğası ve fiyat değişimlerine etki eden değişkenlerin fazlalığı nedeniyle oldukça problemlidir. Elektrik ve gaz fiyat değişimlerinin tahmin edilmesinden kullanılan temel yöntemlerden birisi geçmiş fiyat serilerinden yola çıkılarak fiyat değişim eğiliminin belirlenmesidir. Şekil 4.7 ve 4.8'de elektrik ve gaz fiyatlarının değişim eğilimleri verilmiştir.



Şekil 4.7 Elektrik birim fiyat eskalasyon eğilimi



Şekil 4.8 Doğalgaz birim fiyat eskalasyon eğilimi

Genel eğilimdeki sapmalar döviz kuru ve gösterge faizdeki ani değişimlerle doğrudan ilgilidir. Örneğin Şekil 4.7'de yeşil olarak işaretli bölge böyle bir dönemi yansıtmaktadır. Doğalgaz fiyatları daha fazla sübvanse edildiğinden genel artış eğilimi daha sınırlıdır. Buna göre mevcut fiyat serileri temel alınarak elektrik fiyat eskalasyonu %3,3 doğalgaz fiyat eskalasyonu ise %0,91 olarak bulunmuştur. İskonto oranına benzer şekilde, birim fiyat eskalasyonları da nominal veya enflasyon etkisi dikkate alınarak gerçek değerinde ifade edilebilir. Analizlerde nakit akışı ve iskonto nominal oranı değerinde alındığından nakit akışına etki eden birim fiyat hesaplamaları da nominal değerler üzerinden yapılmıştır. Uzun vade

enflasyon etkisi daha önce belirtildiği gibi iskonto oranının nominal değerinde alınmasıyla hesaba dahil edilmektedir.

Yatırım süresi boyunca fiyatların değişimini veren ifade Denklem 4.10'da verilmiştir. Burada *t* yatırım süresini, p_n, *t* yılındaki nominal fiyatı, i_n ise nominal eskalasyon değerini belirtmektedir.

$$p_{n_{(t)}} = p_0 + (1 + i_n)^t \tag{4.10}$$

$$i_n = (1 + i_r) \cdot (1 + e) - 1 \tag{4.11}$$

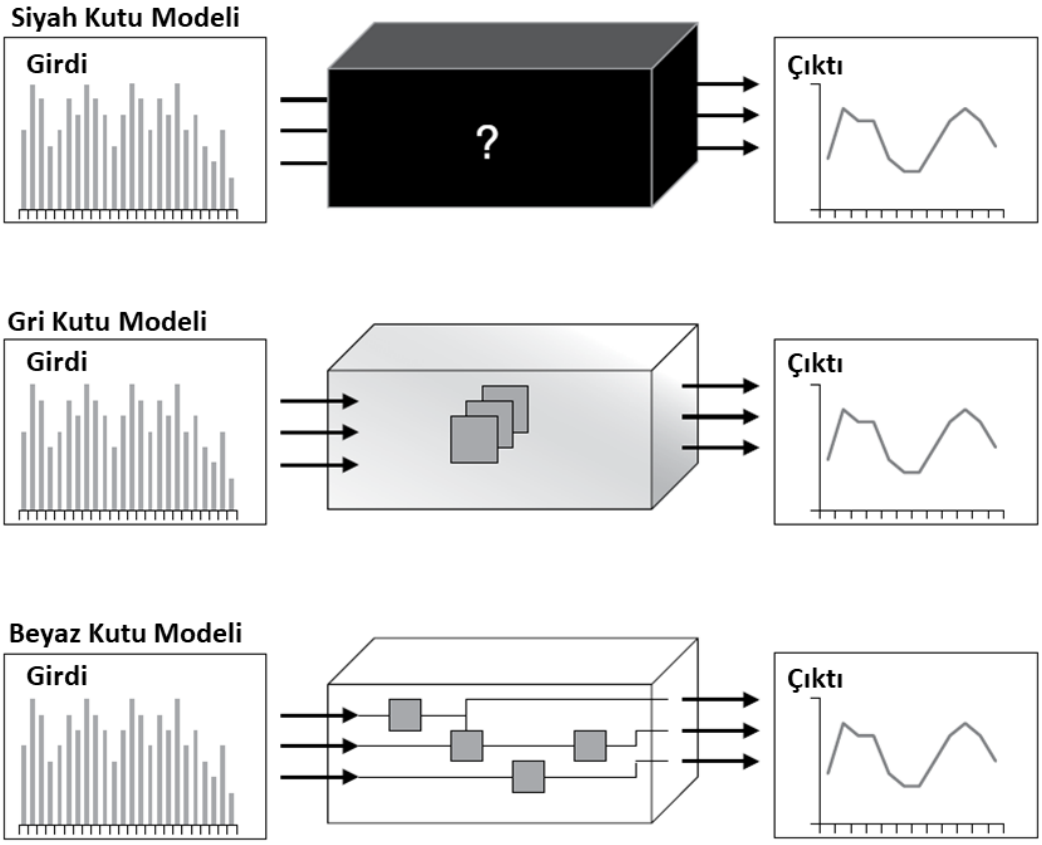
Fiyatlar enflasyon etkisi düşülerek hesaplanmak istenirse nominal eskalasyon terimi i_n, gerçek eskalasyon terimi i_r ile değiştirilmelidir. Nominal ve gerçek terimler arasındaki ilişki Denklem 4.11'da verilmiştir.

4.3 Sayısal Analiz Yöntemi

Bina enerji modellemesi (BEM) için kullanılan mevcut yazılımlar yakıt pili teknolojisinin incelenmesi açısından kısıtlı olanaklar sunmaktadır [52][53]. Bu konuda geçtiğimiz yıllarda yapılan çalışmalar da mevcut BEM yazılımlarına yakıt pili temelli sistemlerin dahil edilmesini sağlamamıştır. Bu nedenle binanın saatlik enerji talebini dikkat alarak yakıt pili performansını değerlendirebilecek MS Excel ve Visual Basic Programlama dili tabanlı bir bina enerji simülasyon modeli geliştirilmiştir. BEM modelleri veya genel olarak enerji modelleri üç kategoride sınıflandırılmaktadır [54].

- Kara Kutu Modelleri: Bu modeller girdi ve çıktılar arasındaki ilişkiyi istatistiksel veya makine öğrenmesi tabanlı yöntemlerle kurar. Sistemin iç mekanizması veya fiziği modelin ilgisinin dışındadır.
- Beyaz Kutu Modelleri: Bu modeller girdi ve çıktılar arasındaki ilişkiyi kesin bağıntılar üzerinden kurar. Dolayısıyla sistemin iç işleyiş mekanizması örneğin kimyasal reaksiyonların detayları modele yansır. Ancak bu modeller tüm girdilerin hassas bir şekilde modelde tanımlanmasına ihtiyaç duyar
- Gri Kutu Modelleri: Bu tip modeller girdi çıktılar arasındaki ilişki temel bağıntılar üzerinden kurar. Örneğin modelin girdisi örneği istatistiksel iklim verisi, çıktılar da buna dayalı bina ısı kaybı veya kazancı hesaplamaları

olabilir.



Şekil 4.9 Enerji modelleri sınıflandırması[54]

4.3.1 Enerji Modeli Akışı

Enerji modelinin temel akışı Şekil 4.10'de gösterildiği gibi ilk olarak saatlik elektrik, ısıtma ve soğutma talebinin tanımlanmasıyla başlamaktadır. Model içerisinde ısıtma soğutma talebi hesaplanmamaktadır. Enerji modeli girilen enerji talep verilerine göre yakıt pili tarafından üretilen elektrik miktarı ile şebekeden çekilen elektrik miktarını tanımlanan yakıt pili sayısı ve yakıt pili kısmi verim eğrisine göre tanımlamaktadır. Yakıt pili verim eğrisini tanımlayan temel Visual Basic kodu eklerde verilmiştir. Model elektrik talebini dengelerken aynı zamanda bina ısıtma ve/veya soğutma sisteminde (absorpsiyonlu soğutma yoluyla) kullanacak şekilde yakıt pili tarafından üretilen ısıyı da dengelemektedir. Model sonuç olarak bina enerji talebinin ne kadarının yakıt pili, ne kadarının şebeke tarafından karşılandığını hesaplamaktadır.

Enerji talebinin hesaplanmasına paralel olarak model seçilen yakıt pili sayısı, elektrik ve gaz fiyatları girdileri, kurulum maliyeti ve iskonto oranına göre birime ingirgenmiş elektrik maliyeti, basit geri dönüş oranı, iskontolu geri dönüş süresi ve

iç verim oranını hesaplamaktadır. Modelin ekonomik analiz süresi yirmi yıldır. Bu süre yakıt pilinin mümkün olabilecek en yüksek kullanım ömrü dikkate alınarak belirlenmiştir. Dolayısıyla modelin temel ekonomik çıktısı olan nakit akışı yirmi yıllık süre için hesaplanmaktadır. Model saatlik enerji girdi çıktısını dengelerken girilen emisyon faktörlerine göre toplam karbon salımını da hesaplamaktadır. Yakıt



Şekil 4.10 Enerji modeli akış şeması

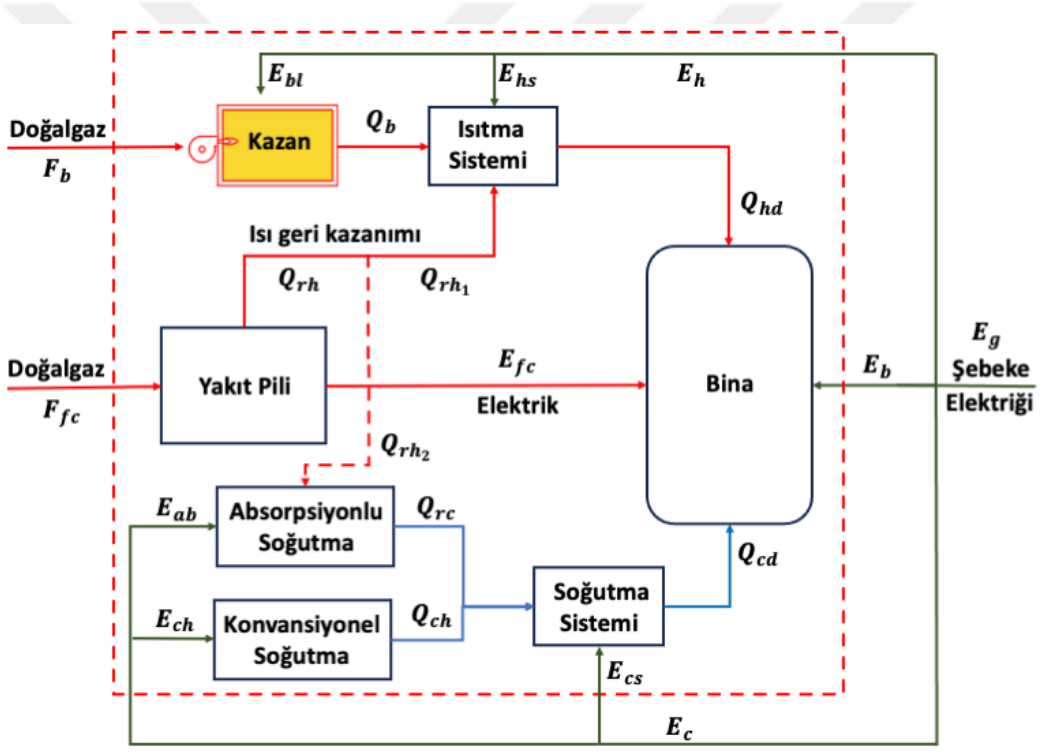
pilli birleşik ısı güç üretiminin modellenmesi için burada önerilen yaklaşımda bir "Gri Kutu" yaklaşımıdır. Yakıt pili reaksiyonu ve reaksiyon detayları önerilen modelin ilgisi dışındadır. Yakıt pili performansı kısmi yük eğrisi üzerinden modellenmiş, başka bir deyişle giren yakıt miktarına karşılık üretilen ısı ve elektrik miktarı modelde tanımlanmıştır. FAYP enerji simülasyon modeli enerji talebinin ne kadarının mevcut sistem ne kadarının FAYP ile karşılanabileceğini saatlik enerji dengesini hesaplayarak bulmaktadır. Dolayısıyla FAYP enerji simülasyon modeli hem yakıt pili tarafından üretilen elektriği hem de atık ısıyı hesaplayarak bina talebine göre ısı ve elektriği dengelemekte, binanın konvansiyonel sistemden ısı ve elektrik talebinin ne kadar azaltabileceğini belirlemektedir.

4.3.2 Temel Enerji Denklemleri

Önerilen enerji modeli saatlik olarak bina birincil enerji talebi ile şebekeden çekilen enerji miktarı ve yakıt pili tarafından üretilen elektrik enerjisini dengelemektedir.Denklem 4.12'da verildiği gibi yıl boyunca şebekeden çekilen elektrik enerjisi ile yakıt piliyle üretilen elektrik enerjisinin toplamı; bina elektrik enerjisi talebine eşit olmak zorundadır. Saatlik elektrik enerjisi talebi modelin temel girdisidir.

- Bina elektrik enerjisi dengesi:

$$\sum_{t=1}^{t=8760} \left(E_{g(t)} + E_{fc(t)}\right) = \sum_{t=1}^{t=8760} \left(E_{b(t)} + E_{c(t)} + E_{h(t)}\right) \tag{4.12}$$



Şekil 4.11 Basitleştirilmiş bina enerji akışı

- Yakıt pili elektrik üretimi:

$$\sum_{t=1}^{t=8760} F_{fc(t)} \times \eta_{fc_e(t)} = \sum_{t=1}^{t=8760} E_{fc(t)} \tag{4.13}$$

- Yakıt pili ısı geri kazanımı:

$$\sum_{t=1}^{t=8760} F_{fc(t)} \times \eta_{fc_t(t)} = \sum_{t=1}^{t=8760} Q_{rh(t)} \tag{4.14}$$

$$\sum_{t=1}^{t=8760} Q_{rh(t)} = \sum_{t=1}^{t=8760} \left(Q_{rh_1(t)} + Q_{rh_2(t)}\right) \tag{4.15}$$

- Bina ısıtma enerjisi talebi:

$$\sum_{t=1}^{t=8760} Q_{rh_1(t)} + \sum_{t=1}^{t=8760} F_{b(t)} \times \eta_{b(t)} = \sum_{t=1}^{t=8760} Q_{hd(t)} \tag{4.16}$$

- Bina soğutma enerjisi talebi:

$$\sum_{t=1}^{t=8760} Q_{rc(t)} + \sum_{t=1}^{t=8760} Q_{ch(t)} = \sum_{t=1}^{t=8760} Q_{cd(t)} \tag{4.17}$$

$$\sum_{t=1}^{t=8760} Q_{rh_{2(t)}} \times CoP_{abs(t)} + \sum_{t=1}^{t=8760} E_{ch} \times C0P_{ch(t)} = \sum_{t=1}^{t=8760} Q_{cd(t)} \tag{4.18}$$

- Yıllık Toplam Kojenerasyon Verimi:

$$\eta_{fc_{yıl}} = \frac{\sum_{t=1}^{t=8760} E_{fc(t)} + \sum_{t=1}^{t=8760} Q_{rh(t)}}{\sum_{t=1}^{t=8760} F_{fc(t)}} \tag{4.19}$$

- Yıllık Elektrik Verimi:

$$\eta_{fc_e} = \frac{\sum_{t=1}^{t=8760} E_{fc(t)}}{\sum_{t=1}^{t=8760} F_{fc(t)}} \tag{4.20}$$

- Yıllık Isıl Verim:

$$\eta_{fc_t} = \frac{\sum_{t=1}^{t=8760} Q_{rh(t)}}{\sum_{t=1}^{t=8760} F_{fc(t)}} \tag{4.21}$$

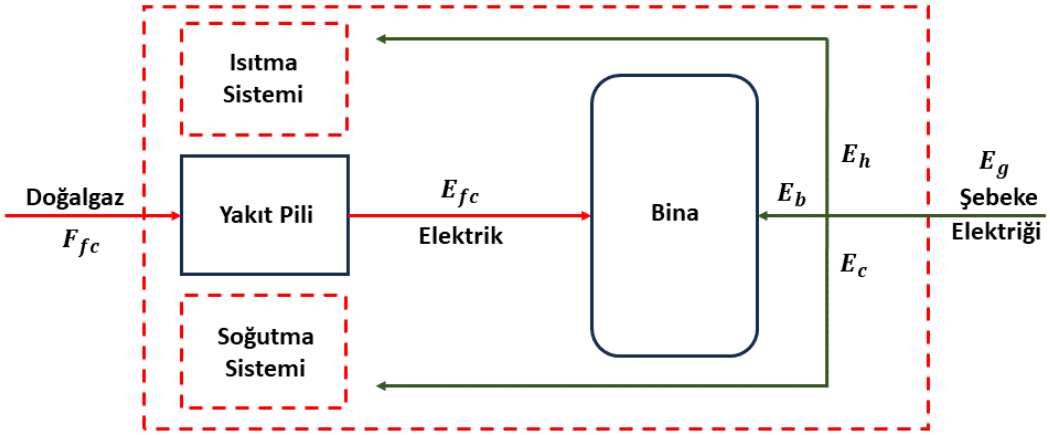
4.3.3 Bina Elektrik Talebinin Dengelenmesi

Burada önerilen enerji modeli yaklaşımı yakıt pillerinin mevcut ticari binalarda kullanım performasını incelemeyi amaçlamaktadır. Yakıt pili mevcut bir binada baz elektrik yükünü, ısı talebini veya elektrik talebini izleyecek şekilde çalıştırılabilir.

Ancak yakıt pili ısı yükünü izlemesi durumunda hem daha dengesiz çalışmakta hem de sistem verimleri makul seviyelerin altına düşebilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada baz yük ve elektrik talebini izleme seçenekleri tercih edilmiştir.

- Bina toplam elektrik enerjisi talebi:

$$\sum_{t=1}^{t=8760} E_{b(t)_{toplam}} = \sum_{t=1}^{t=8760} \left(E_{b(t)} + E_{c(t)} + E_{h(t)}\right) \tag{4.22}$$



Şekil 4.12 Bina elektrik enerjisi talebi

- Yakıt Pili Yüklenme Karakteristiği:

$$LR_e = \sum_{n=1}^{n_{fc}} LR_{fc} \times FC_e \tag{4.23}$$

Burada FC_e yakıt pilinin kW_e cinsinden kapasitesidir. LR_{fc} yakıt pilinin anlık yüklenme oranıdır. Denlem 4.23 ile tanımlanan LR_e ifadesi yakıt pili sayısına göre toplam yüklenme oranını verir.

- Toplam elektrik talebi:

$$E_{Toplam} = E_b + E_h + E_c \tag{4.24}$$

- Elektrik talebi yakıt pili yüklenme oranından büyük:

$$LR_e \leq E_{Toplam} \rightarrow E_{Toplam} = LR_e + E_g \tag{4.25}$$

- Elektrik talebi yakıt pili maksimum ve minumum yüklenme oranı arasında:

$$LR_emin \leq \ E_{Toplam} \leq LR_emax \rightarrow E_{Toplam} = LR_e \tag{4.26}$$

- Elektrik talebi yakıt pili minumum yüklenme oranından küçük:

$$E_b < LR_emin \rightarrow E_{Toplam} = E_g \tag{4.27}$$

4.3.4 Bina Isı Talebinin Dengelenmesi

Yakıt pilinin elektrik talebini izlemesi durumunda yakıt pili tarafından üretilen ısı miktarı tamamen elektrik üretim profiline bağımlıdır. Absorpsiyonlu soğutma yoksa tüm atık ısı ısıtmaya, varsa ısıtma öncelikli olarak absorpsiyonlu soğutmaya da yönlendirilir.

- Yakıt pili atık ısı miktarı bina talebinden küçük:

$$Q_{rh_1} < Q_{hd} \rightarrow Q_{hd} = Q_{rh_1} + Q_b \tag{4.28}$$

- Yakıt pili atık ısı miktarı bina talebine eşit:

$$Q_{rh_1} = Q_{hd} \rightarrow Q_{hd} = Q_{rh_1} \tag{4.29}$$

- Yakıt pili atık ısı miktarı bina talebinden büyük:

$$Q_{rh_1} > Q_{hd} \rightarrow Q_{hd} = Q_{rh_1} - Q_{h_e} \tag{4.30}$$

Burada Q_{h_e} atık ısının kullanılamayan kısmını belirtmektedir. Absorpsiyonlu soğutma talebiyle ısıtma talebi aynı anda mevcutsa enerji modeli öncelikli olarak Denklem 4.28, 4.29 ve 4.30'de verilen adımları kontrol eder. Atık ısı bina ısıtma talebine göre öncelikli olarak ısıtma dengelendikten sonra soğutmaya yönlendirilir ve Q_{rh_2} için soğutmada aynı adımlar tekrarlanır.

4.3.5 Enerji Maliyeti ve Karbon Salımı Hesaplamaları

Ekonomik hesapların girdisi olacak senelik toplam enerji tüketim, karbon salımı ve enerji maliyetleri Şekil 4.10 akış şemasında belirtildiği gibi 8760 saatlik enerji simülasyonunun sonucunda hesaplanır.

- Bina yıllık enerji maliyeti:

$$\sum_{t=1}^{t=8760} (E_{g(t)} \times E_{g_p(t)} + F_{fc(t)} \times F_{g_p(t)} + F_{b(t)} \times F_{g_p(t)}) = B_{USD/yıl} \quad (4.31)$$

- Bina yıllık karbon salımı:

$$\sum_{t=1}^{t=8760} (E_{g(t)} \times E_{gCO_2} + F_{fc(t)} \times F_{gCO_2} + F_{b(t)} \times F_{gCO_2}) = B_{CO_2/yıl} \quad (4.32)$$

- Yakıt pili yıllık bakım maliyeti:

$$\sum_{t=1}^{t=8760} E_{fc(t)} \times FC_m = FC_{m/yıl} \quad (4.33)$$

4.3.6 Ekipman Modelleri

Bu bölümde enerji tüketimi açısından kritik ekipmanların modellenmesiyle ilgili detaylar açıklanmıştır.

4.3.6.1 Soğutma Grupları

Soğutma grupları bina enerji tüketimi açısından en kritik mekanik tesisat elemanlarından birisidir. Bu çalışmada ele alınan ticari bina kompleksinin soğutma talebi santrifüj ve vidalı soğutma grupları ile karşılanmaktadır. Yakıt pili analizinde ise atık sının kullanılması yoluyla soğutma yapan sıcak su tahrikli absorpsiyonlu soğutma grupları kullanılmıştır.

Tüm soğutma grupları saatlik soğutma talebine göre yüklenme miktarını ve o saatteki yaş termometre sıcaklığına göre kondenser suyu giriş sıcaklığını belirlemektedir. Enerji modeli de bu talebin oluştuğu saatteki kondenser suyu giriş sıcaklığına göre kısmi yük CoP değerini seçmektedir. Farklı kondenser suyu giriş sıcaklıklarına göre (KSGS - C°) soğutma gruplarının kısmi yük CoP performas değerleri Tablo 4.4'de verilmiştir. Soğutma grubunun herhangi bir *t* anındaki enerji tüketmi o andaki CoP değeri ve soğutma talebine göre belirlenmektedir.

Li-Br solüsyonunun kristalleşme riski nedeniyle absorpsiyonlu soğutma grupları için minumum kondenser suyu giriş sıcaklığı daha yüksektir. Absorpsiyonlu soğutma grupları için minumum kısmi yük değeri % 30'dur. Denklem 4.18'de soğutma gruplarının enerji dengesi verilmiştir.

Tablo 4.4 Soğutma grupları kısmi yük CoP değerleri

Santrifüj Soğutma Grubu Kısmi Yük COP değerleri									
KSGS	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%
32.2	5.59	5.75	6.21	5.88	5.81	5.56	5.00	4.33	3.31
29.4	5.92	6.10	6.58	6.21	6.17	5.88	5.29	4.57	3.50
26.7	6.29	6.45	6.58	6.58	6.54	6.25	5.62	4.85	3.72
23.9	6.67	6.90	6.99	6.99	6.94	6.67	5.99	5.15	3.95
21.1	7.25	7.35	7.35	7.52	7.46	7.09	6.41	5.52	4.24
15.6	7.14	8.55	8.55	8.70	8.70	8.26	7.41	6.41	4.93
10	8.02	9.33	9.04	9.49	9.49	9.01	8.10	6.99	5.37
7	8.34	9.83	9.45	9.99	10.00	9.50	8.53	7.36	5.67

Vidalı Soğutma Grubu Kısmi Yük COP değerleri									
KSGS	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%
32.2	3.88	3.50	3.13	2.89	3.76	3.25	2.73	2.47	2.38
29.4	4.27	3.95	3.62	3.44	4.20	3.76	3.34	3.21	3.09
26.7	4.65	4.42	4.18	4.05	4.65	4.31	3.97	3.77	3.64
23.9	5.13	5.05	4.98	4.93	5.18	5.05	4.85	4.59	4.41
21.1	5.59	5.56	5.56	5.62	5.71	5.71	5.59	5.32	5.10
15.6	6.25	6.58	7.04	7.52	6.58	7.04	7.58	7.04	6.80
10	7.13	7.63	8.28	8.88	7.57	8.29	8.99	8.45	8.15
7	7.56	8.20	8.99	9.72	8.09	8.99	9.87	9.27	8.94

Absorpsiyonlu Soğutma Grubu Kısmi Yük COP değerleri									
KSGS	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%
32.2	0.70	0.64	0.79	0.77	0.84	0.84	0.75	0.73	0.00
29.4	0.74	0.76	0.78	0.80	0.89	0.89	0.78	0.76	0.00
26.7	0.77	0.79	0.89	0.82	0.83	0.82	0.81	0.79	0.00
23.9	0.80	0.83	0.85	0.85	0.86	0.90	0.85	0.83	0.00
21.1	0.84	0.86	0.88	0.88	0.90	0.90	0.88	0.86	0.00
18.3	0.90	1.13	0.91	0.91	0.93	0.92	0.91	0.89	0.00

- Soğutma grubu enerji dengesi:

$$\sum_{t=1}^{t=8760} E_{ch(t)} = \sum_{t=1}^{t=8760} \frac{Q_{ch(t)}}{CoP_{ch_(t)}} \tag{4.34}$$

- Absorpsiyonlu soğutma grubu enerji dengesi:

$$\sum_{t=1}^{t=8760} Q_{rh_2(t)} = \sum_{t=1}^{t=8760} \frac{Q_{rc(t)}}{CoP_{abs_(t)}} \tag{4.35}$$

4.3.6.2 Kazanlar

Kazanların enerji dengesi kazan verimi ve yakıt girdisi ile bulunmaktadır.

- Kazan Enerji Dengesi:

$$\sum_{t=1}^{t=8760} F_{b(t)} = \sum_{t=1}^{t=8760} \frac{Q_{b(t)}}{\eta_{b_(t)}} \tag{4.36}$$

4.3.6.3 Soğutma Kuleleri

Soğutma kuleleri kademeli fanlara sahiptir. Fanların elektrik tüketimi anlık toplam soğutma yüküne göre Tablo 4.5'de verilen aralığa göre hesaplanmaktadır.

Tablo 4.5 Soğutma Kulesi Fan Enerji Tüketimi

Soğutma Talebi kW_t	Fan Elektrik Gücü kW_e
> 0	15
< 1000	30
< 2000	45
< 3000	60
< 4000	90
< 5000	105
< 6000	120
< 7000	135
< 8000	150
< 9000	180

- Soğutma kulesi fan enerji tüketimi:

$$\sum_{t=1}^{8760} E_{CT_(t)} = \sum_{t=1}^{8760} CT_{\text{Fan}(t)} \tag{4.37}$$

5
YAKIT PİLLİ BİLEŞİK ISI GÜÇ ÜRETİMİ

Bu bölümde örnek olarak ele alınan ticari binada yakıt pilli bileşik ısı güç üretimi uygulaması, uygulama maliyeti, teknik kısıtlar ve çözümleri değerlendirilecektir. Yakıt pilli bileşik ısı güç üretim sisteminin performansı ve maliyetler Bölüm 4'te detayları açıklanan enerji modeli ile hesaplanacaktır. Bu bölüm ayrıca önerilen enerji modelinin uygulama ayrıntılarını da içerecektir.

5.1 Enerji Modeli Senaryoları

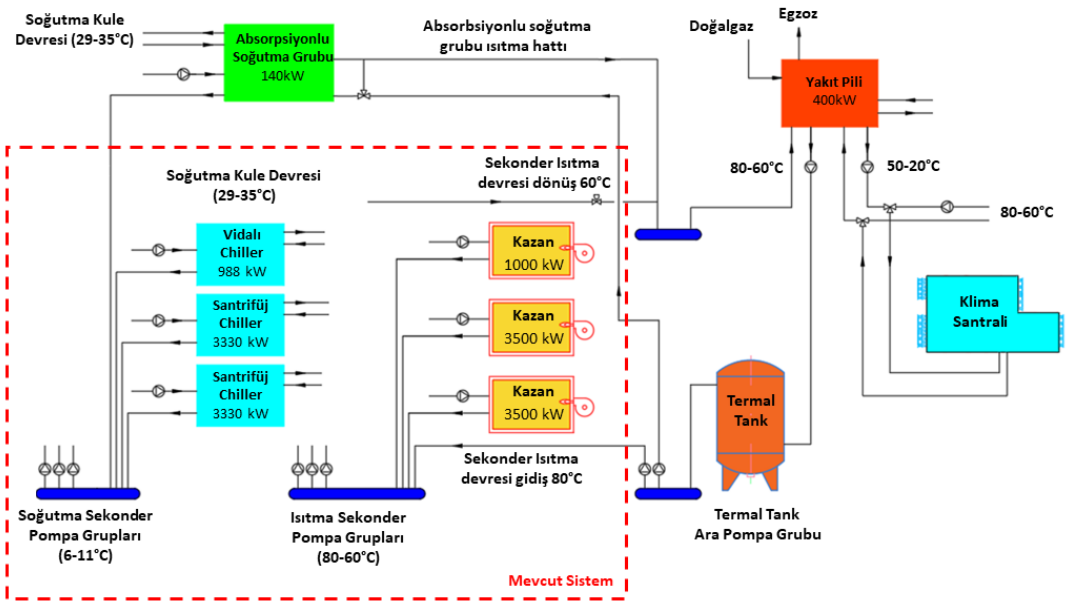
Örnek uygulama olarak incelenen ticari yapıda FAYP tipi yakıt pillerinin kullanımının uygunluğunun değerlendirilebilmesi ilk olarak mevcut durumu temsil eden bir senaryo ortaya çıkarılmıştır. Alternatif senaryoların ısıtma, soğutma ve elektrik talebi bu baz senaryo ile kıyaslanmıştır. Alternatif senaryolar mevcut sisteme 1 – 4 adet arasında 400 kW_e kapasitesinde FAYP tipi yakıt pilinin ilave edildiği seçenekleri içermektedir. Karşılaştırmalar enerji tüketimi, karbon salımındaki azalma miktarları ve ekonomik getiri açısında açısından yapılmıştır.

Tablo 5.1 Enerji modeli senaryoları

Senaryo	İşletme Senaryoları
0	Mevcut konvansiyonel sistem
1	Mevcut sistem + 1 Adet 400 kW_e FAYP + 143 kW_t ABS
2	Mevcut sistem + 2 Adet 400 kW_e FAYP + 285 kW_t ABS
3	Mevcut sistem + 3 Adet 400 kW_e FAYP + 475 kW_t ABS
4	Mevcut sistem + 4 Adet 400 kW_e FAYP + 572 kW_t ABS

Yakıt pili ve absorpsiyonlu soğutma grubu entegrasyonları Şekil 5.1'de verilen şemaya uygun olarak yapılmıştır. Fosforik asit yakıt pili ve absorpsiyonlu soğutma grubunun mevcut sisteme bağlantı noktaları da yine Şekil 5.1 üzerinde gösterilmiştir. Tüm alternatiflerin enerji tüketimi, karbon salımı ve ekonomik

performansı ilerleyen bölümlerde detaylı olarak incelenmiştir. Soğutma grubu mevcut sisteme paralel olarak $6 - 11°C$ su rejiminde çalışmaktadır.



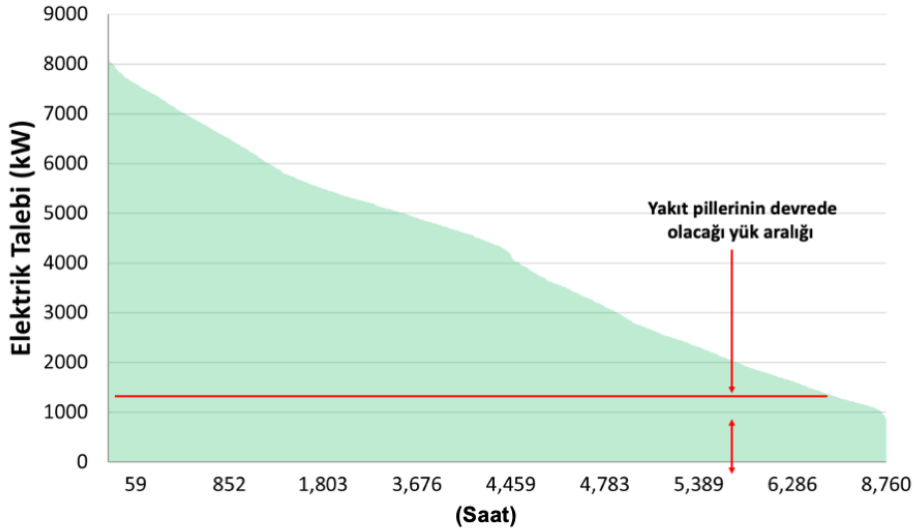
Şekil 5.1 FAYP Yakıt pili akış şeması

5.1.1 Mevcut Konvansiyonel Sistem

Binanın mevcut iklimlendirme sistemi Bölüm 4.1.3'de açıklandığı santrifüj ve vidalı soğutma grupları ile doğalgaz yakıcılı kazanlardan oluşmaktadır. Mevcut iklimlendirme sistemi ve pompa gruplarının genel şematiği Şekil 5.1'de verilmiştir.

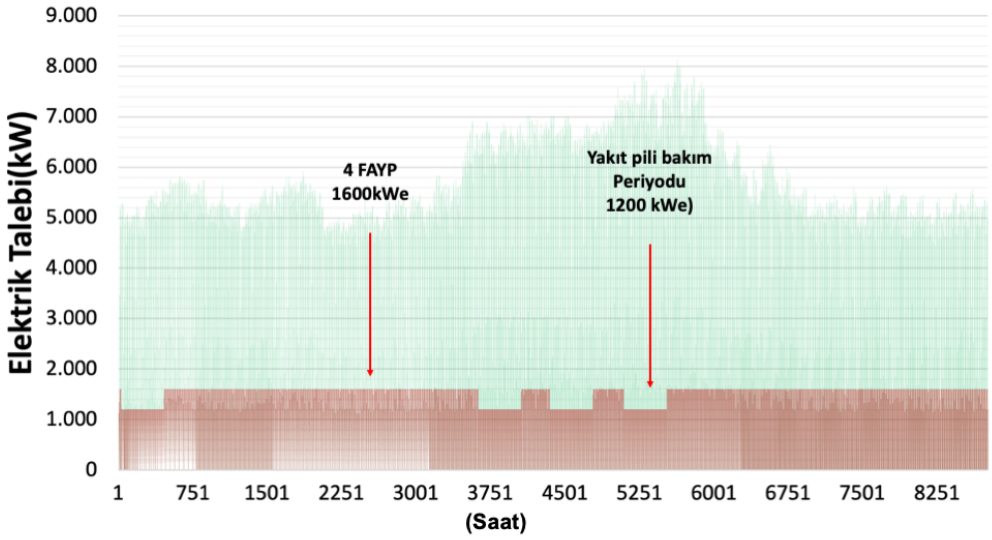
Mevcut sirkülasyon sistemi primer ve sekonder pompa grupları şeklinde planlanmıştır. FAYP yakıt pilinden gelen ısıtma hattı ve absorpsiyonlu soğutma ünitesinden gelen soğutma hattı sisteme sekonder pompa kollektöründen bağlanmaktadır. Kazan su rejimi $80 - 60°C$, soğutma gruplarının su rejimi ise $6 - 11°C$ olarak berlirlenmiştir. Ana ekipmanlar daha önce açıklandığı gibi eş kapasitede boyutlandırılmamıştır. Sistemde kısmi yükler için yaz kazanı vazifesini de gören düşük kapasiteli bir kazan, soğutma tarafında ise 1 adet vidalı soğutma grubu bulunmaktadır.

Konut, AVM ve ofis fonksiyonlarının içeren yapının elektrik enerjisi talebi ise elektrik şebekesinden karşılanmaktadır.Her ne kadar bu çalışmanın konusu dışında olsa da binanın orta gerilim abonesi olması yakıt pilinin elektrik sistemine bağlantısını basitleştirmektedir. Mevcut binada da faturalandırma bina yönetimi tarafından yapılmaktadır. Binanın saatlik ve aylık enerji talebi Bölüm 4.1.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2 Elektrik yük-süre eğrisi

Bina yük süre eğrisi incelendiğinde elektrik talebinin anlık 8000 kW_e seviyesine ulaşabildiği, baz yükün ise 1000 kW_e seviyelerinde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla 1 - 4 adet arasında 400 kW_e arasında yakıt pili seçimi yük süre eğrisine göre anlamlı gözükmektedir. Dört adetten daha fazla yakıt pili kullanımı durumunda bazı yakıt pillerinin çalışma saati olması gerekenin altında kalmaktadır. Saatlik talep ile yük süre eğrisi buna benzer çalışmalarda olduğu gibi bina baz yükünü ve baz yükün toplam ne kadar çalışma saatine karşılık geldiğini anlamak için beraber değerlendirilmiştir.



Şekil 5.3 Saatlik talep - yakıt pili kapasitesi

5.1.2 Yakıt Pili Senaryosu 01

Yakıt pilinin mevcut konvansiyonel sisteme dahil edilmesi bazı pratik problemlerin de giderilmesini gerektirmektedir. Temel problem yakıt pilinden sağlananan atık ısının uygun sıcaklık rejiminde mevcut sistemde kullanımıdır. Yakıt pili Bölüm 3.5.2'de açıklandığı gibi iki farklı sıcaklık derecesinde atık ısı sağlamaktadır. Bu durum atık ısının direkt kullanımını güçleştirmektedir.

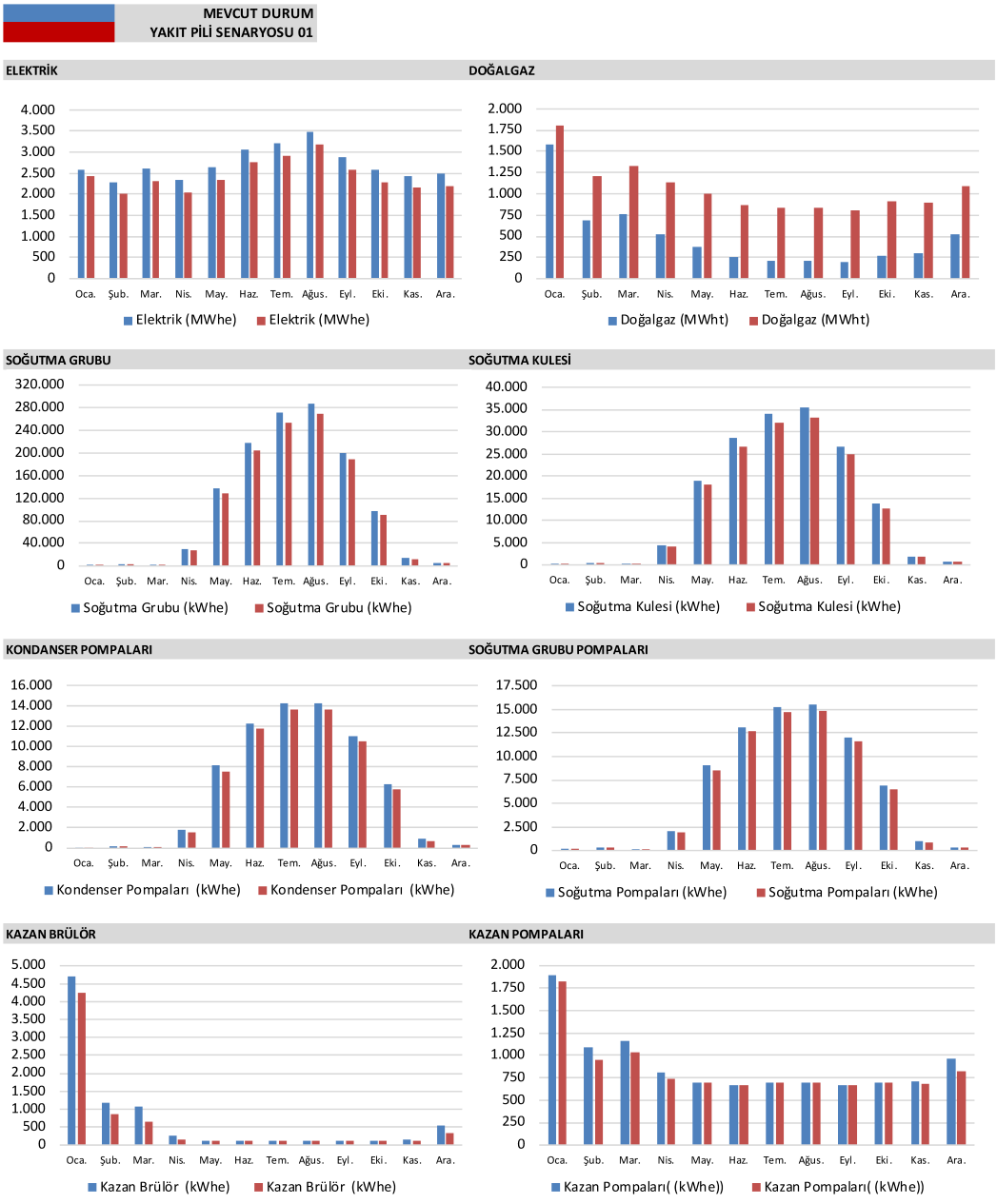
Yakıt pilinden tam kapasitede ısı geri kazanımı yapabilmek için yüksek sıcaklık tarafı direkt olarak ısıtma sistemi veya absorpsiyonlu soğutma grubuna hizmet edecek şekilde düzenlenmiştir. Aynı anda ısıtma veya soğutma talebi olması durumunda atık ısı öncelikli olarak ısıtmada kullanılmaktadır. Isıtma talebinin yetersiz olması durumunda atık ısı absorpsiyonlu soğutma grubuna, soğutma talebi olmaması durumundaysa atmosfere atılmaktadır. Düşük sıcaklık tarafında ise farklı bir düzenleme yapılmıştır. Yapının AVM kısmına hizmet eden bazı klima santralleri incelendiğinde ısıtma bataryalarının %50-75 arasında büyük boyutlandırıldığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla mevcut klima santrali ısıtma bataryaları düşük sıcaklıkta çalışmayı garanti edecek ilave yüzey alanına sahiptir. Bu santraller üç yollu vanalar ile gerektiğinde mevcut sisteme bağlanabilecek şekilde yakıt pili düşük sıcaklık devresinden beslenecektir. Katalog değerlerinden farklı olarak yakıt pilinden sağlanabilecek ısıtma kapasiteleri ve sıcaklıklar aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir.

Tablo 5.2 Yakıt pili bağlantı kapasiteleri - Senaryo 01

Isı Geri Kazanımı	Debi	Giriş Su Sıcaklığı	Çıkış Su Sıcaklığı	Isıtma kapasitesi
	ł/s	$°C$	$°C$	kW_t
Yüksek Sıcaklık	2.27	60	80	190
Düşük Sıcaklık	2,07	20	50	260

Yakıt pili kullanımı durumunda binanın doğalgaz talebi %115,45 artarken, şebekeden elektrik enerjisi talebi %10,53 azalmakta, toplam birincil enerji talebi ise artmaktadır. Yakıt pili sisteminin senelik toplam verimi %58,88, ısıl verimi %20,94 elektriksel verimi ise %37,94 mertesindedir. Toplam verim teorik olarak ulaşılabilecek %80-90 aralığının çok altında kalmış, dolayısıyla birincil enerji tüketimi açısından da anlamlı bir tablo ortaya çıkmamıştır.

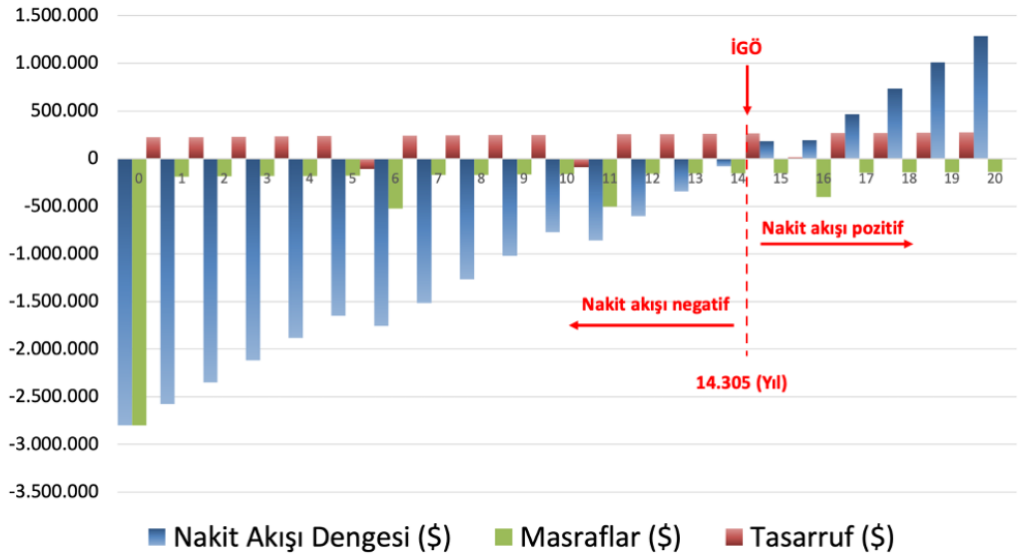
400 kW_e kapasitesinde yakıt pili senaryosunun önerilen enerji modeli yapılan analizine göre Baz Senaryo ve Senaryo 01 enerji tüketimlerinin karşılaştırılmaı Şekil5.4'de verilmiştir. Yakıt pili kullanımıyla toplam doğalgaz tüketimi artmaktadır. Sistem bazında ise elektrik enerjisi tüketimileri kısmi olarak düşmüştür.



Şekil 5.4 Yakıt pili senaryo 01 - Enerji tüketimi

Yakıt pilinin enerji verimliği performansına paralel olarak ekonomik getirisi de Şekil 5.5'de verilen nakit akışı grafiğinde görüldüğü gibi makul değildir. Tüm ekonomik analizler 7000 \$/kW_e kurulu kapasite başına maliyet, %3 iskonto oranı, yirmi yıl proje ömrü için %0,2 USD bazında enflasyon oranı, 0,0145\$/kWh_e doğalgaz, 0,1161 \$/kWh_t elektrik şebeke fiyatı, USD bazında %3,3 elektrik, %0,93 doğalgaz fiyat eskalasyonu, 0,02 \$/kWh_e işletme ve bakım maliyeti maliyeti, 28,29 TL/USD döviz kurulu alınarak yapılmıştır. Bu kriterlere göre İGÖ süresi 14.305 yıl çıkmıştır. Şebeke elektrik fiyatı 0,1161 \$/kWh_e iken yakıt pilinin BİEM 0,1414 \$/kWh_e olarak bulunmuştur. Her 4000 saat çalışma sonrasında 420.000 USD

yakıt hücresi ağır bakım ve yenileme maliyeti nakit akışına ilave edilmiştir. Yakıt pili elektrik üretim makliyeti şebeke elektrik fiyatından %21,79 daha yüksektir. Yakıt pili sistemi karbon salımı açısından değerlendirildiğinde de eşdeğer kg/CO_2 cinsinden karbon salımı baz senaryoya göre sadece %0,09 azalmıştır.



Şekil 5.5 Yakıt pili senaryo 01 - Nakit Akışı

5.1.3 Yakıt Pili Senaryosu 02

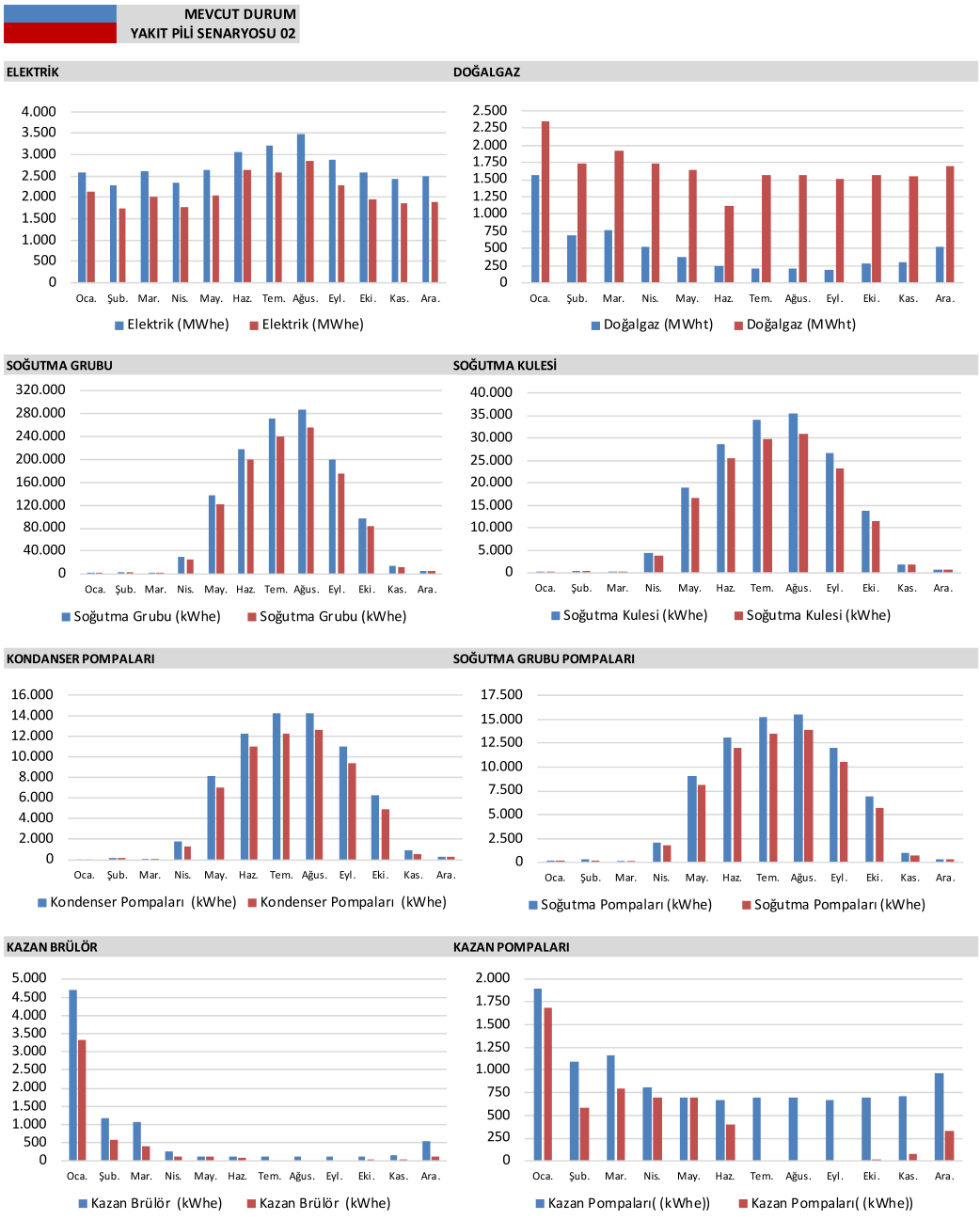
Senaryo 02 sistem kurgusu açısından Senaryo 01 ile tamemen aynıdır. Tek fark yakıt pili sayısıdır. Senaryo 02 toplam 2 adet 400 kW_e yakıt pili içermektedir. Toplam ısıtma kapasitesi arttığından absorpsiyonlu soğutma grubu kapasitesi de bu senaryoda 285 kW_t seçilmiştir.

Tablo 5.3 Yakıt pili bağlantı kapasiteleri- Senaryo 02

Isı Geri Kazanımı	Debi	Giriş Su Sıcaklığı	Çıkış Su Sıcaklığı	Isıtma kapasitesi
	ł/s	$°C$	$°C$	kW_t
Yüksek Sıcaklık	4.54	60	80	380
Düşük Sıcaklık	4,14	20	50	520

400 kW_e kapasitesinde 2 adet yakıt pili kullanımı senaryosunun önerilen enerji modeliyle yapılan analizine göre Baz Senaryo ve Senaryo 02 enerji tüketimlerinin karşılaştırılması Şekil5.6'de verilmiştir. Yakıt pili kullanımıyla toplam doğalgaz tüketimi artmaktadır. Sistem bazında ise elektrik enerjisi tüketimleri düşmüştür. Yakıt pili kullanımı durumunda binanın doğalgaz talebi %238,86 artarken, şebekeden elektrik enerjisi talebi %21,03 azalmakta, toplam birincil enerji talebi

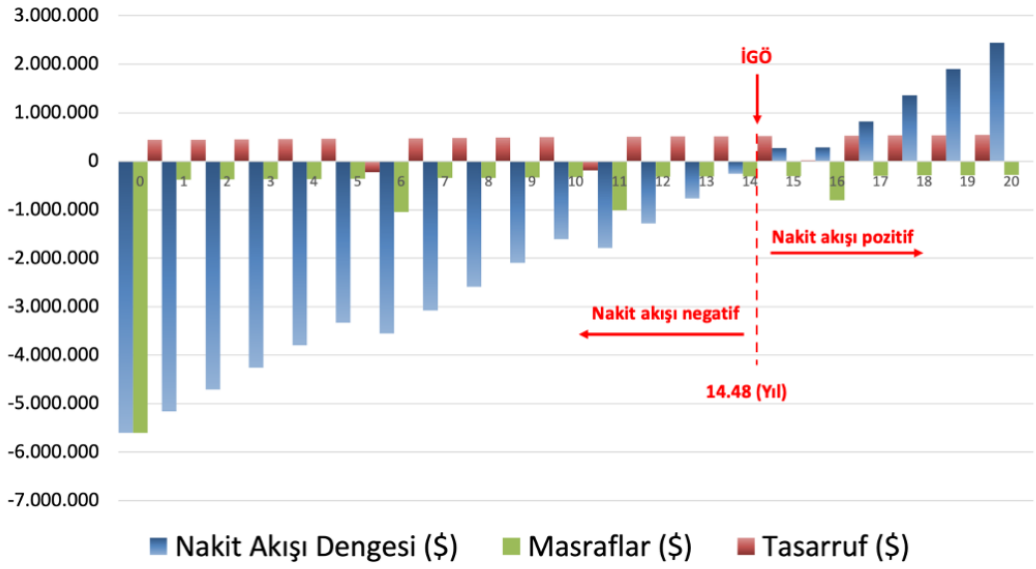
ise artmaktadır. Yakıt pili sisteminin senelik toplam verimi %57,95, ısıl verimi %20,01 elektriksel verimi ise %37,94 mertebesindedir. Toplam verim Senaryo 01'e göre marjinal olarak düşmüştür. Toplam verim yine teorik olarak ulaşılabilecek %80-90 aralığının çok altında kalmış, dolayısıyla birincil enerji tüketimi açısından da anlamlı bir tablo ortaya çıkmamıştır.



Şekil 5.6 Yakıt pili senaryo 02 - Enerji tüketimi

Senaryo 02'nin ekonomik performansı da Şekil 5.7'de verilen nakit akışı grafiğinde görüldüğü gibi istenilen seviyede değildir. İGÖ süresi 14.48 yıl çıkmıştır. Şebeke elektrik fiyatı 0,1161 \$/kWh_e iken yakıt pilinin BİEM 0,1413 \$/kWh_e olarak bulunmuştur. FAYP elektrik üretim makliyeti şebeke elektrik fiyatından %21,70

daha yüksektir. Yakıt pili sistemi karbon salımı açısından da baz senaryoya göre daha kötü bir performans göstermektedir. Eşdeğer kgCO_2 cinsinden karbon salımı %0,46 artmıştır. Senaryo 01'de marjinal olarak düşük çıkan karbon salımı Senaryo 02'de artmıştır.



Şekil 5.7 Yakıt pili senaryo 02 - Nakit Akışı

5.1.4 Yakıt Pili Senaryosu 03

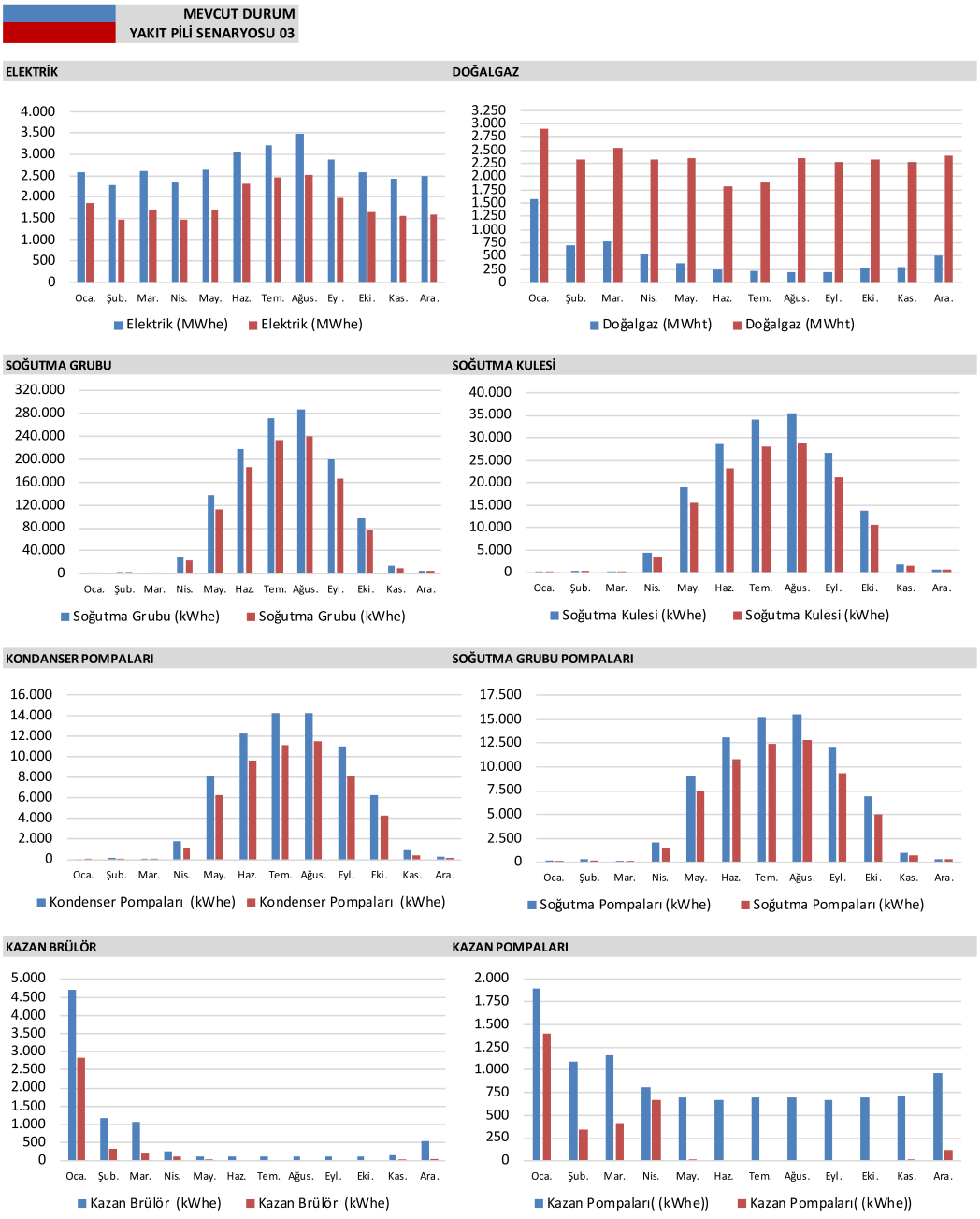
Senaryo 03 sistem kurgusu açısından Senaryo 01 ile tamemen aynıdır. Tek fark yakıt pili sayısıdır. Senaryo 03 toplam 3 adet 400 kW_e yakıt pili içermektedir. Toplam ısıtma kapasitesi arttığından absorpsiyonlu soğutma grubu kapasitesi de bu senaryoda 475 kW_t seçilmiştir.

Tablo 5.4 Yakıt pili bağlantı kapasiteleri- Senaryo 03

Isı Geri Kazanımı	Debi	Giriş Su Sıcaklığı	Çıkış Su Sıcaklığı	Isıtma kapasitesi
	ł/s	$°C$	$°C$	kW_t
Yüksek Sıcaklık	6,81	60	80	570
Düşük Sıcaklık	6,21	20	50	780

400 kW_e kapasitesinde 3 adet yakıt pili kullanımı senaryosunun önerilen enerji modeliyle yapılan analizine göre Baz Senaryo ve Senaryo 03 enerji tüketimlerinin karşılaştırılması Şekil5.8'de verilmiştir. Yakıt pili kullanımıyla toplam doğalgaz tüketimi artmaktadır. Sistem bazında ise elektrik enerjisi tüketimleri düşmüştür. Yakıt pili kullanımı durumunda binanın doğalgaz talebi %371,72 artarken,

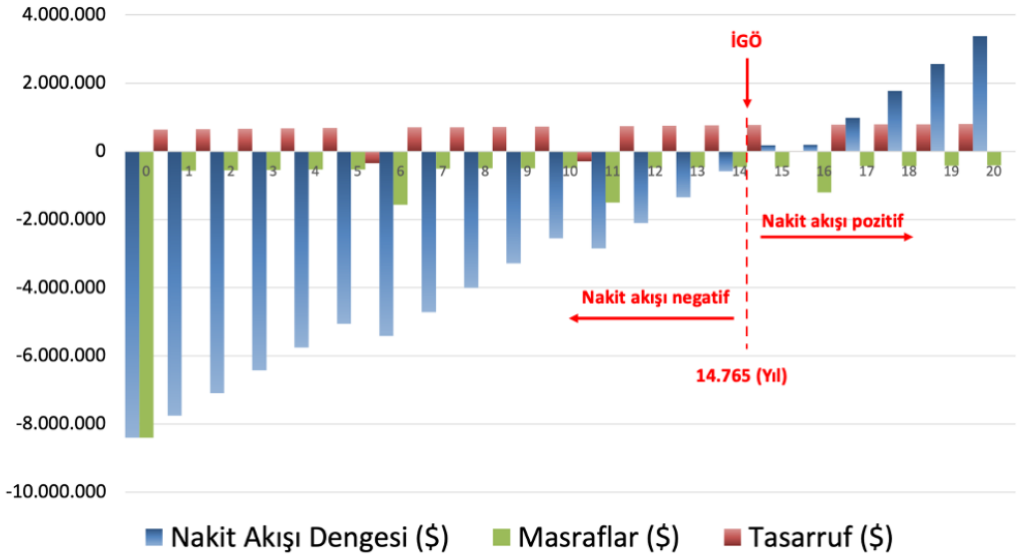
şebekeden elektrik enerjisi talebi %31,42 azalmakta, toplam birincil enerji talebi ise artmaktadır. Yakıt pili sisteminin senelik toplam verimi %56,11 ısıl verimi %18,15 elektriksel verimi ise %37,96 mertebesindedir. Toplam verim Senaryo 01'e göre marjinal olarak düşmüştür. Toplam verim yine teorik olarak ulaşılabilecek %80-90 aralığının çok altında kalmış, dolayısıyla birincil enerji tüketimi açısından da anlamlı bir tablo ortaya çıkmamıştır.



Şekil 5.8 Yakıt pili senaryo 03 - Enerji tüketimi

Senaryo 03'de de yakıt pilinin ekonomik performansı Şekil 5.9'de verilen nakit akışı grafiğinde görüldüğü gibi istenilen seviyede değildir. İGÖ süresi 14.765 yıl çıkmıştır. Şebeke elektrik fiyatı 0,1161 \$/kWh_e iken yakıt pilinin BİEM 0,1416

$/$kWh_e$ olarak bulunmuştur. Yakıt pili elektrik üretim maliyeti şebeke elektrik fiyatından %21,96 daha yüksektir. Yakıt pili sistemi karbon salımı açısından ise baz senaryo ya göre daha kötü bir performans göstermektedir. Eşdeğer kgCO_2 cinsinden karbon salımı baz senaryoya göre %1,87 artmıştır.



Şekil 5.9 Yakıt pili senaryo 03 - Nakit Akışı

5.1.5 Yakıt Pili Senaryosu 04

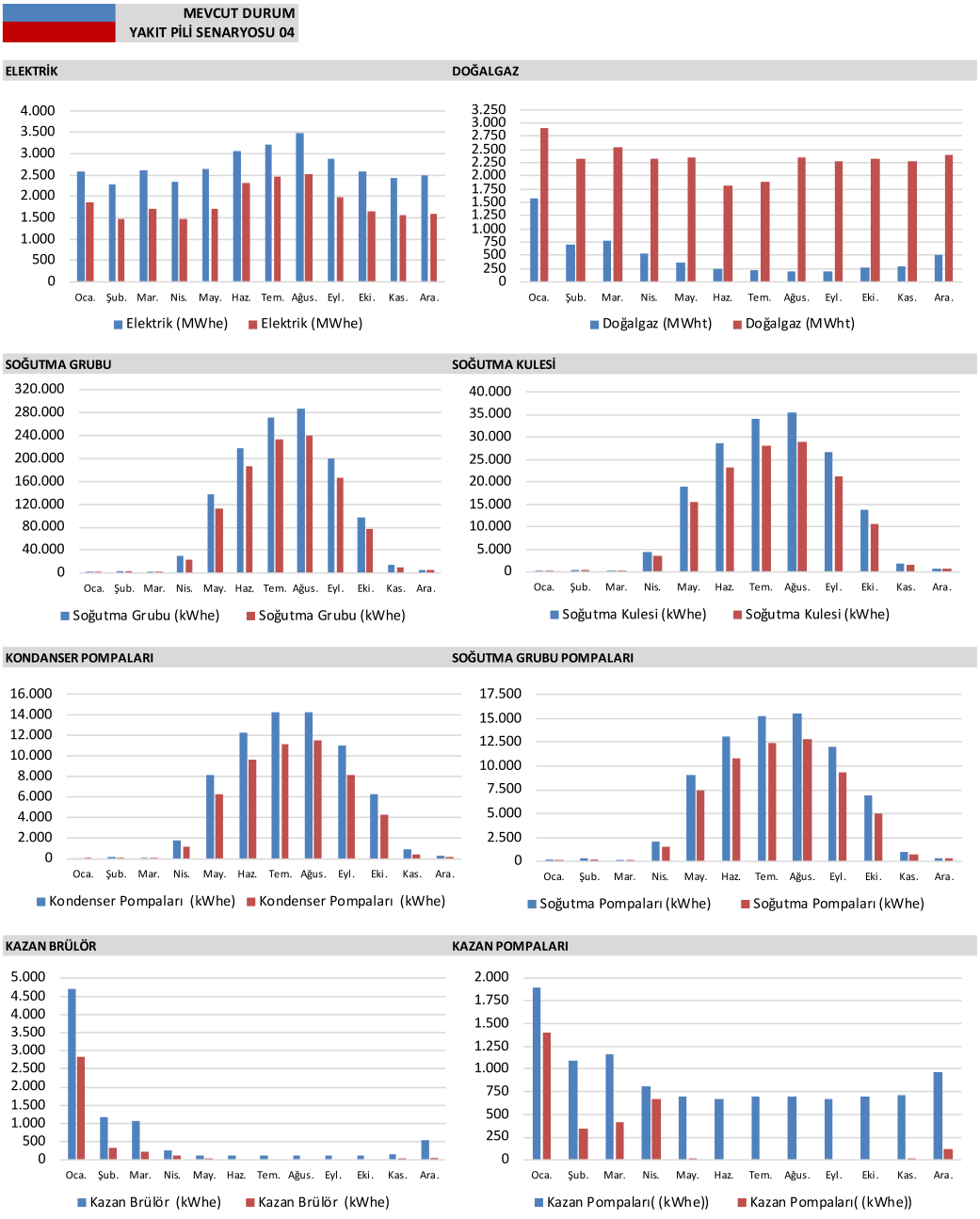
Senaryo 04 sistem kurgusu açısından Senaryo 01 ile tamemen aynıdır. Tek fark yakıt pili sayısıdır. Senaryo 04 toplam 4 adet 400 kW_e yakıt pili içermektedir. Toplam ısıtma kapasitesi arttığından absorpsiyonlu soğutma grubu kapasitesi de bu senaryoda 572kW_t seçilmiştir.

Tablo 5.5 Yakıt pili bağlantı kapasiteleri- Senaryo 04

Isı Geri Kazanımı	Debi	Giriş Su Sıcaklığı	Çıkış Su Sıcaklığı	Isıtma kapasitesi
	ł/s	$°C$	$°C$	kW_t
Yüksek Sıcaklık	9,08	60	80	760
Düşük Sıcaklık	8,28	20	50	1040

400 kW_e kapasitesinde 4 adet yakıt pili kullanımı senaryosunun önerilen enerji modeliyle yapılan analizine göre Baz Senaryo ve Senaryo 04 enerji tüketimlerinin karşılaştırılması Şekil5.10'de verilmiştir. Yakıt pili kullanımıyla toplam doğalgaz tüketimi artmaktadır. Sistem bazında ise elektrik enerjisi tüketimleri düşmüştür. Yakıt pili kullanımı durumunda binanın doğalgaz talebi %485,62 artarken,

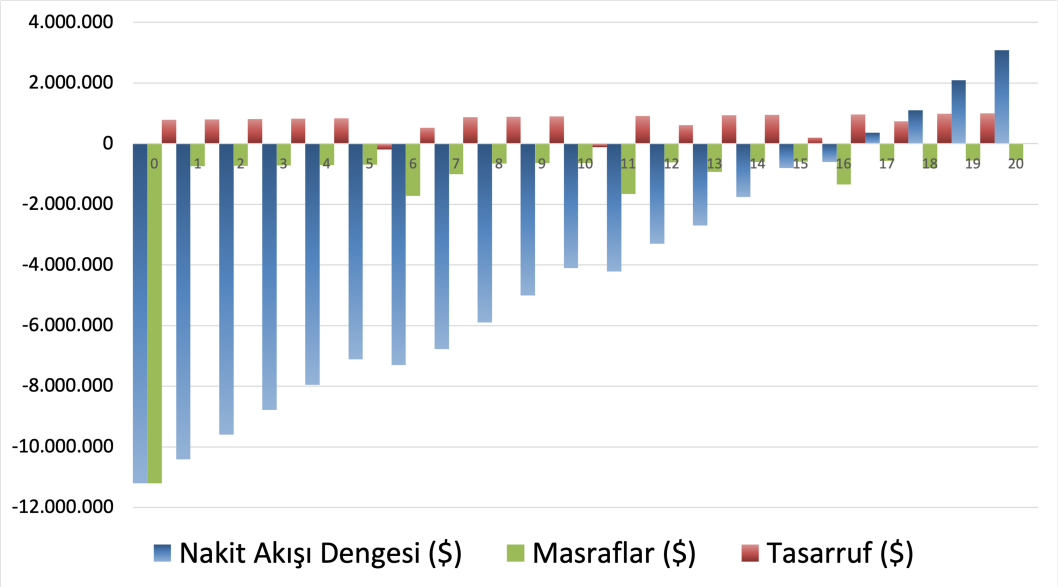
şebekeden elektrik enerjisi talebi %39,92 azalmakta, toplam birincil enerji talebi ise artmaktadır. Yakıt pili sisteminin senelik toplam verimi %54,88 ısıl verimi %16,87 elektriksel verimi ise %38,01 mertebesindedir. Toplam verim Senaryo 01'e göre düşmüştür. Toplam verim yine teorik olarak ulaşılabilecek %80-90 aralığının çok altında kalmış, dolayısıyla birincil enerji tüketimi açısından da anlamlı bir tablo ortaya çıkmamıştır. Senaryo 04'de de yakıt pilinin ekonomik



Şekil 5.10 Yakıt pili senaryo 04 - Enerji tüketimi

performansı Şekil 5.10'de verilen nakit akışı grafiğinde görüldüğü gibi istenilen seviyede değildir. İGÖ süresi 16,625 yıl çıkmıştır. Şebeke elektrik fiyatı 0,1161 $\$/kWh_e$ iken yakıt pilinin BİEM 0,1468 $\$/kWh_e$ olarak bulunmuştur. Yakıt pili

elektrik üretim maliyeti şebeke elektrik fiyatından %26,44 daha yüksektir. BİEM diğer senaryolardan daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi önerilen ekonomik analiz metodunda bileşik ısı güç üretimini dikkate alan düzeltilmiş BİEM metodu kullanılmasıdır. Senaryo 04 ısı geri kazanım oranı daha düşüktür. Bu nedenle BİEM'de diğer senaryolardan daha düşük çıkmıştır. Yakıt pili sistemi karbon salımı açısından ise baz senaryoya göre en kötü performansı göstermektedir. Eşdeğer kgCO_2 cinsinden karbon salımı baz senaryoya göre %3,85 artmıştır.



Şekil 5.11 Yakıt pili senaryo 04 - Nakit Akışı

5.1.6 Yakıt Pili Senaryolarının Değerlendirilmesi

Yakıt pili senaryoları genel olarak değerlendirildiğinde mevcut ilk yatırım maliyeti, elektrik şebekesi emisyon faktörü, elektrik ve doğalgaz fiyatlarıyla FAYP yakıt pillerinin çevresel ve ekonomik kriterler açısından avantajlı olmadığı görülmektedir. FAYP yakıt pillerinin pozitif bir katkı sağlayalabilmesi için toplam verim mevcut %55-58 bandının üzerinde olmalıdır. Mevcut binalarda bunun başarılabilmesi FAYP atık ısısından yararlanılmasını garanti edecek ilave düzenlemelere ihtiyaç vardır. Yeni yapılarda ısıtma sisteminin düşük sıcaklıkta tasarlanması, ısıtmanın ısı pompaları ile desteklenmesi gibi çözümler yakıt pili sistemleri için anlamlı olabilir.

Yakıt pili sistemlerinin ekonomik getirisi doğalgaz ve elektrik fiyatları arasında farkla yakından ilişkilidir. Doğalgaz ve elektrik fiyat farkı açıldıkça mevcut yüksek ilk yatırım maliyetleriyle bile sistem ekonomik olarak avantajlı hale gelelebilmektedir. Karbon salımları açısından da benzer bir ilişki olduğu söylenebilir elektrik şebekesinin yenilenebilir enerji girdisi arttıkça yakıt pilleri

dezavantajlı hale gelmektedir. Elbette hidrojenin doğalgazdan dönüştürülerek değil direkt temin edilmesi durumunda karbon salımı senaryosu tamamen değişmektedir.

Tablo 5.6 Senaryoların Değerlendirilmesi

Sen.	İGÖ	İVO	BİEM	Elek. Talebi	D.gaz Talebi	Top. Verim	Isıl Verim	Elek. Verimi	Karb. Salımı
No	Yıl	%	$\$/kWh_e$	%	%	%	%	%	%
01	14,305	3.75	0,1414	-10,53	+115,45	58,88	20,94	37,94	-0,09
02	14,480	3.58	0,1413	-21,03	+238,86	57,95	20,91	37,94	0,46
03	14,765	3.31	0,1416	-31,42	+371,72	56,11	18,15	37,96	1,87
04	16,625	2.35	0,1468	-39,92	+485,62	54,88	16,87	38,01	3,85

Yakıt pili senaryoları iç verim oranı açısında değerlendirildiğinde Senaryo 01 - 03 için İVO'nun iskonto oranından büyük olduğu görülmektedir. Senaryo 04'te ise nakit akışı pozitif olmasına rağmen İVO iskonto oranından küçük çıkmıştır. Bu durum tipik olarak başlangıçta yapılan masrafların proje ömrü süresince elde edilen getirilere kıyasla çok yüksek olduğu durumlarda ortaya çıkar. Nakit akışı pozitif olmasına rağmen projenin geri dönüş süresi başlangıçta yapılan sermaye masrafını karşılamaktan uzaktır. İlk senaryoda da İVO iskonto oranından büyük çıkmasına rağmen aradaki fark oldukça azdır.

5.1.7 Hassasiyet Analizleri

Bu bölümde şebeke fiyatları, ilk yatırım maliyeti, karbon salımı gibi detaylar üzerinden hassasiyet analizleri yapılarak, FAYP uygulamaları açısından kritik kriterler değerlendirilmiştir.

5.1.7.1 İlk Yatırım Maliyeti Hassasiyeti

Senaryo 01'de belirlenen ekonomik kriterler değiştirilmeksizin sadece ilk yatırım maliyeti değiştirilerek BİEM, İGÖ, BGÖ ve İVO değerleri hesaplanmıştır. BİEM değerlerinin hassasiyeti 7000 $\$/kW_e$ değerine göre bulunan temel analiz sonuçları ile kıyaslanmıştır.

FAYP yatırımı ilk maliyeti açısından oldukça hassastır. 4000 $\$/kW_e$ değerinde BİEM şebeke elektrik fiyatının altına inmektedir. 3000 $\$/kW_e$ değerinin altındaysa ilk yatırım maliyeti makul sürelere inmektedir. 4000 $\$/kW_e$ genel bir sübvansiyon mekanizması planlanması durumunda maliyet eşiği olarak düşünülebilir.

Tablo 5.7 İlk yatırım maliyeti hassasiyeti

Maliyet	İGÖ	BGÖ	İVO	BİEM	Değişim
$\$/kW_e$	Yıl	Yıl	%	$\$/kWh_e$	%
7000	14,305	12,101	3,75	0,1414	0,00
6000	12,224	10,372	6,17	0,1270	10,18
5000	9,480	8,643	8,57	0,1198	-15,27
4000	7,669	6,915	12,25	0,1090	-22,91
3000	5,525	5,186	17,83	0,0982	-30,55
2000	3,504	3,457	28,04	0,0874	-38,18

5.1.7.2 Faiz Hassasiyeti

Senaryo 01'de belirlenen ekonomik kriterler değiştirilmeksizin sadece iskonto oranı değiştirilerek BİEM, İGÖ, BGÖ ve İVO değerleri hesaplanmıştır. BİEM değerlerinin hassasiyeti %3 iskonto değerine göre bulunan temel analiz sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Tablo 5.8 Faiz hassasisyeti

Faiz	İGÖ	BGÖ	İVO	BİEM	Değişim
%	Yıl	Yıl	%	$\$/kWh_e$	%
%3	14,305	12,101	3,75	0,1414	0,00
%6	18,530	12,101	0,81	0,1567	10,82
%6,5	19,500	12,101	0,81	0,1567	12,72

7000 $\$/kW_e$ ilk yatırım değerine göre iskonto oranı %6,5 üzerine çıktığı zamanda İGÖ yakıt pilinin teorik ekonomik ömrü olan 20 yıl üzerine çıkmaktadır.

5.1.7.3 Elektrik ve Doğalgaz Fiyatları Hassasiyeti

Elektrik ve doğalgaz fiyatları arasındaki fark ya da kritik fiyat eşikleri yakıt pili sisteminin ekonomikliği açısından en önemli değişkenlerden birisidir. Kritik Fiyat Eşiği (KF) [29] şebeke elektrik fiyatı E_{g_p}, şebeke doğalgaz fiyatı F_{g_p} ve yakıt pili elektrik üretim verimine göre Denklem 5.1'de verilmiştir.

$$KF = E_{g_p} - \frac{F_{g_p}}{\eta_{fc}} \tag{5.1}$$

1 Temel Senaryo 01 için KF 0,0807'dir. Diğer alternatifler bu değer ile kıyaslanmıştır. KF için 0,0491 - 0,1941 aralığıdır. Bu aralık mevcut fiyat serisinde en yüksek ve en düşük KF değerlerini temsil etmektedir. Tablo 5.9'de değişimler İGÖ değerine göre verilmiştir. Farklı fiyat girişi nakit akışını da değiştirdiğinden

BİEM'e göre sıralama yanıltıcı olmaktadır. Tablodan görüldüğü gibi yakıt pili İGÖ süresi ile KF korelasyonu oldukça yüksektir. KF değeri arttıkça İGO süresi ciddi olarak kısalmaktadır.

Tablo 5.9 Kritik fiyat eşiği hassasiyeti

KF	İGÖ	BGÖ	İVO	BİEM	Değişim
$\$/kWh$	Yıl	Yıl	%	$\$/kW_e$	%
0,0807	14,305	12,101	3,75	0,1414	0,00
0,0491	18,994	17,332	0,73	0,2187	+32,77
0,0823	13,943	11,760	4,12	0,1435	-2,53
0,1109	9,035	8,127	9,280	0,1617	-36,84
0,1552	6,410	5,6441	25,52	0,1623	-55,19
0,1941	4,540	4,451	20,59	0,1627	-68,26

5.1.7.4 Şebeke Emisyon Değeri Hassasiyet

Şebeke emisyon değeri yakıt pilinin karbon emisyonu açısından performansını direkt olarak etkilemektedir. Elektrik şebekesi emisyon değeri eşdeğer 0,4840 kgCO_2/kWh değerinin %25 - 50 altı ve üstünde değişen değerler için yapılan analizler Senaryo 01 karbon salımı değeri ile kıyaslanmıştır. Tablo 5.10'da görüldüğü gibi şebeke emisyon değişen değerleri için karbon salımınındaki azalma miktarı dramatik bir şekilde değişmektedir. Elektrik şebekesinin yenilenebilir enerji payının artacağı öngörülürse, yakıt pillerini doğalgaz ile çalıştırmak; verim değerleri veya ısı geri kazanım imkanı artmadıkça anlamlı olmayabilir.

Tablo 5.10 Şebeke emisyon değeri hassasiyeti

Emisyon Faktörü	Karbon Sal.Azalma	Karbon Sal.Azalma
$kgCO_2/kWh$	%	$kgCO_2$
0,4840	-0,09	-15.115
0,342	+8,5	+787.958
0,363	+2,93	+386.421
0,605	-1,98	-416.652
0,726	-3,27	-818.190

5.1.7.5 İklim Şartlarına Karşı Hassasiyet

Bu bölümde mevcut yakıt pili sisteminin farklı iklim bölgelerinde performansı değerlendirilmiştir. İklim bölgelerinin seçiminde TS 825 Isı Yalıtım Yönetmeliği (2008) baz alınmıştır. Buna göre 1.Bölge Adana, Antalya, İzmir, 2. Bölge Diyarbakır ve İstanbul, 3. Bölge Ankara, 4.Bölge Erzincan, 5.Bölge Erzurum illeri

iklim verileri ve bu minimum yalıtım ihtiyaçları analizlerde kullanılmıştır. Enerji Modeli seçilen ilin yalıtım ihtiyacı ve saatlik iklim verisine göre İstanbul şartlarında analizini yapılan aynı binanın ısıtma ve soğutma talebini güncellemektedir. Analizlerde daha önce Bölüm4.1.4'de belirtildiği gibi EPW formatında iklim verileri kullanılmıştır. Özetle, aynı binanın farklı illerde analizinin yapıldığı kabul edilerek karşılaştırma yapılmıştır.

Tüm senaryolar 1 Adet $400kW_e$ kapasitesinde FAYP yakıt pili içermektedir. Başka bir deyişle Bölüm 5.1.2'de tanımlanan sistem kurgusunun farklı iklim bölgelerinde performansı değerlendirilmiştir. Genel olarak bakıldığında soğuk iklim bölgelerinde FAYP yakıt pilinin daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Toplam verim ve ısıl verim soğuk bölgelerde artmaktadır ancak aynı elektrik talebi, kullanım profili ve sistem sınırları içerisinde ısı talebindeki artışın etkisi sınırlı kalmıştır. Buna rağmen ısı talebi arttıkça yakıt pilinin atık ısının kullanılabilirliğinin de arttığı buna bağlı olarak toplam verimi yüksekliği söylenebilir. Yine soğuk bölgelerde doğalgaz talebindeki artış oranı daha düşük, karbon salımı daha azdır. Tüm bu pozitif görüntüye rağmen yakıt pilinin soğuk iklim bölgelerinde de ekonomik olduğu söylenemez.

Tablo 5.11 İklim şartlarına karşı hassasiyet

Sen.	İGÖ	BİEM	Elektrik Talebi	Doğalgaz Talebi	Toplam Verim	Isıl Verim	Elektrik Verimi	Karbon Salımı
No	Yıl	$\$/kWh_e$	MWh_e	MWh_t	%	%	%	%
IST	14,305	0,1414	-10,53	+115,45	58,88	20,94	37,94	-0,09
ADN	14,198	0,1415	-10,65	+162,79	57,17	19,23	37,94	+0.14
IZMR	14,291	0,1415	-10,58	+165,69	57,54	19,60	37,94	+0.09
ANT	14,272	0,1415	-10,62	+177,80	56,70	18,75	37,94	+0.21
DIY	14,333	0,1414	-10.50	+84,43	59,41	21,47	37,94	-0.14
TRAB	14,230	0,1414	-10,55	+108,04	59,19	21,25	37,94	-0.12
ANK	14,335	0,1413	-10,46	+53,70	60,29	22,35	37,94	-0.24
ERZI	14,312	0,1411	-10,93	+28,55	62,51	24,47	37,94	-0.45
ERZU	14,296	0,1411	-10,39	+23,08	62,68	24,57	37,94	-0.44

Birime ingirgenmiş elektrik maliyetinin en ucuz olduğu iller yine soğuk iklim bölgelerinde olan Erzurum, Erzincan ve Ankara'dır.

6
EKONOMİK MUKAYESE İÇİN ÖNERİLER

Yakıt pili gibi bileşik ısı güç sistemlerinin sistemlerinin veya genel olarak enerji verimliliği uygulamalarının ekonomik mukayesi için endüstri pratiği olarak çoğu zaman basit geri ödeme süresi gibi hızlı sonuç veren yöntemlerin kullanımıdır. İlk yatırım maliyetinin yıl boyunca veya tanımlanan süre boyunca enerji verimliliği uygulamasından elde edilen ekonomik faydaya bölünmesiye bulunan süre tüm karar vericiler için açık bir mukayese kriteridir. Buna karşılık iskontolu geri ödeme süresi, net bugünkü değer hesabı gibi faizin dikkate alındığı yöntemler göreceli olarak karmaşık nakit akışı hesaplarını gerektirir. Basit geri ödeme metodu sistemin geri ödeme süresinin kısa olduğu uygulamalar için anlamlıdır ancak iskontolu geri ödeme süresi hesaplamalara gerçek nakit akışını dahil ettiğinden daha sağlıklıdır. Bu bölümde hassasiyet analizinde incelenen,toplam verim, kritik fiyat eşikleri, birim maliyet gibi kriterleri içeren ve sonuç olarak iskontolu geri ödeme süresini veren genelleştirilmiş ifade önerilmiştir.

6.1 Yöntem

Genelleştirilmiş ifadenin oluşturulması için regresyon analizi metodu kullanılımıştır. Regresyon analizi en az iki adet nicel değişken arasındaki ilişkiyi ölçmek için kullanılan istatistiksel bir analiz metodudur [55]. Bu çalışmada ekonomik mukayese kriterlerini etkileyen değişken sayısı fazla olduğundan çok değişkenli regresyon analizi metodu, sayısal çözüm içinde Mintab[56] yazılımı kullanılmıştır. Minitab genel amaçlı bir veri ve istatistiksel analiz yazılımıdır. Analizlerde öncelikli olarak ilk yatırım maliyetine göre kategorize edilmiş genel ifadeler, ikinci olarak ise belli bir aralıkta geçerli daha genel bir ifade elde edilmeye çalışılmıştır. Genel olarak amaçlanan iskonto edilmiş geri ödeme süresini veren bir ifade bulunmasıdır.

6.2 İskonto Edilmiş Geri Ödeme Süresi İfadeleri

İlk yatırım maliyetine göre kategorize edilmiş iskontolu geri ödeme süresi ifadelerinin elde edilebilmesi için 5000 - 7500 \$/kW_e ilk yatırım maliyeti, 0,491 - 0,1941 \$/kWh kritik fiyat eşiği, %1 - 9 iskonto oranı, %0.2 USD bazında uzun süreli enflasyon (yirmi yıl proje ömrü için) ve her iklim bölgesi en az bir il ile temsil edilecek şekilde veri setleri oluşturulmuştur. ilk yatırım maliyetlerine göre kategorize edilmiş veri seti her bir kategori için an az 50 veri noktası içermektedir. Her bir veri noktası da Tablo 6.1'de verilen verileri içermektedir. Veri seti yakıt pili sisteminin farklı kapasite, iklim koşulları, faiz, elektrik, doğalgaz fiyatlarında ekonomik performansını temsil edecek şekilde toplam 6973 veri noktasından oluşmaktadır.

Tablo 6.1 Veri seti girdileri

Girdiler	Birim
Birim Maliyet	$\$/kW_e$
Kapasite	kW_e
İskonto Oranı	%
Toplam Maliyet	\$
Toplam Verim	%
Isıl Verim	%
Elektrik Verimi	%
BİEM	$\$/kWh_e$
İGÖ	Yıl
BGÖ	Yıl
KF	$\$/kWh$
Tarih	Gün/Ay/Yıl

6.2.1 Çok Değişkenli Regresyon - Kategorize Edilmiş

Çok değişkenli regresyon analizi FAYP yakıt pili sisteminin ekonomik performansını belirleyen çeşitli değişkenler arasında en belirgin olanları seçilerek yapılmıştır. Toplam sistem maliyetini belirleyen kurulu kapasite, iskonto oranı, kritik fiyat eşikleri ve toplam verim regresyon modelininin girdisi olarak kullanılmış ve bu girdiler birim maliyete göre kategorize edilmiştir. Regresyon modelinin sonuç fonksiyonu ise iskontolu geri ödeme süresidir.

Kurulu kapasite toplam ilk yatırım maliyetiyle birlikte hareket eden bir değişkendir. Toplma verim ise binanın genel atık ısı kullanım profilini modele yansıtmaktadır. Maliyetlere göre kategorizasyon regresyona dahil olan terim sayısını azalttığından hassasiyeti arttırmaktadır.Bu ön analizlerle regresyona dahil olan terimlerin iskonto süresi üzerindeki etkisi daha iyi irdelenerek, iskonto süresininin tek bir denklemle

ifade edilmesi amaçlanmıştır.Kritik fiyat eşikleri genel sistem maliyeti içerisinde birim maliyetle birlikte en etkin terimlerden birisidir. Regresyon analizi yardmıyla 5000 - 7500 \$/kWh_e ilk yatırım maliyeti için dört ayrı ifade elde edilmiştir.

Multiple Regression for İGÖ

Model Equations Report

X1: Kapasite X2: İskonto Oran X3: KF X4: Toplam Verim X5: Birim Maliye

Birim Maliyet	Final Equations
5000	İGÖ = -1.28 + 0.004125 X1 + 94.57 X2 - 232.41 X3 + 73.5 X4 + 0.000001 X1^2 + 171.4 X2^2 + 641.07 X3^2 - 64.8 X4^2 + 0.002411 X1*X2 - 0.008765 X1*X3 - 0.00685 X1*X4 - 678.21 X2*X3 + 61.7 X3*X4
6000	İGÖ = 2.34 + 0.004236 X1 + 110.82 X2 - 254.21 X3 + 73.5 X4 + 0.000001 X1^2 + 171.4 X2^2 + 641.07 X3^2 - 64.8 X4^2 + 0.002411 X1*X2 - 0.008765 X1*X3 - 0.00685 X1*X4 - 678.21 X2*X3 + 61.7 X3*X4
7000	İGÖ = 5.00 + 0.004194 X1 + 129.23 X2 - 267.06 X3 + 73.5 X4 + 0.000001 X1^2 + 171.4 X2^2 + 641.07 X3^2 - 64.8 X4^2 + 0.002411 X1*X2 - 0.008765 X1*X3 - 0.00685 X1*X4 - 678.21 X2*X3 + 61.7 X3*X4
7500	İGÖ = 6.42 + 0.004484 X1 + 130.90 X2 - 274.14 X3 + 73.5 X4 + 0.000001 X1^2 + 171.4 X2^2 + 641.07 X3^2 - 64.8 X4^2 + 0.002411 X1*X2 - 0.008765 X1*X3 - 0.00685 X1*X4 - 678.21 X2*X3 + 61.7 X3*X4

Şekil 6.1 Birim maliyete göre kategorize edilmiş İGÖ ifadeleri

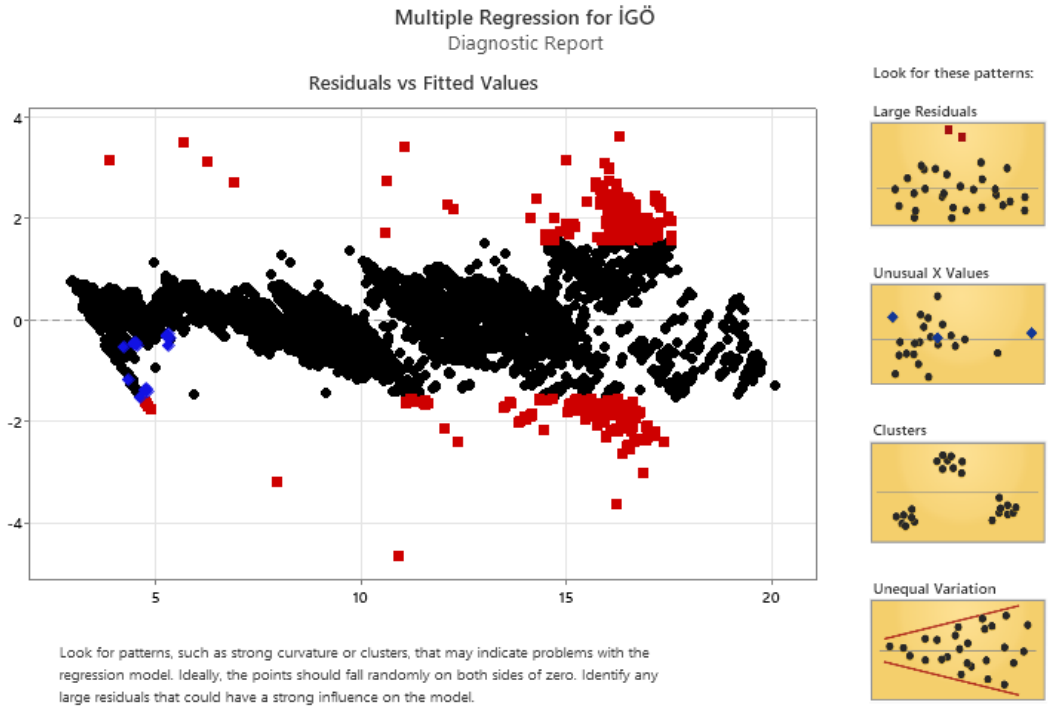
Regresyon analizi yardımıyla elde edilen ifadelerin geçerli olduğu aralık Tablo 6.2'de verilmiştir. Bu aralığın dışında denklemlerin hata payı %10-15 bandının üzerine çıkmaktadır. Değişkenler birbirini etkilediğinden hassasiyet bütünsel değerlendirilmelidir. Örneğin, iskonto oranının yüksek KF değerinin düşük olduğu kombinasyonlarda hata payı daha yüksek olabilir. Kapasite sınırları mevcut model ile doğrulanabilen aralığa göre belirlenmiştir ancak mevcut kapasite aralığı birçok ticari binada baz elektrik yükünü karşılayabilecek kadar yüksektir.

Tablo 6.2 İGÖ İfadeleri gerçerlilik aralığı

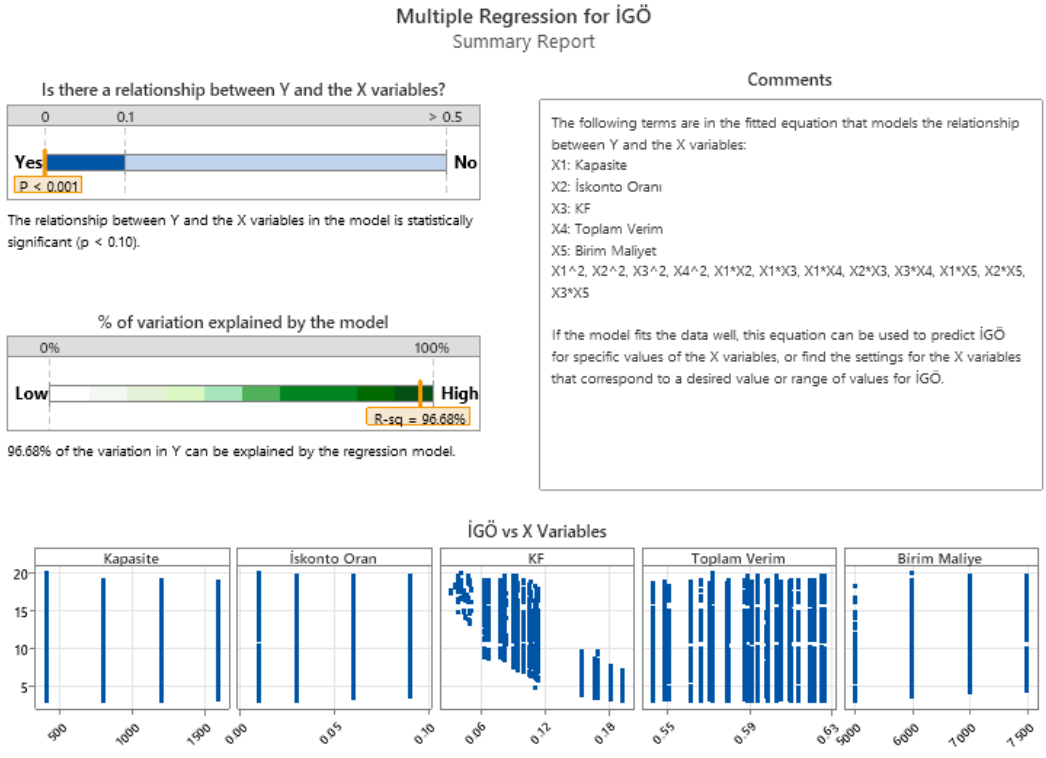
Girdiler	Birim
Kapasite	$400 - 1600\ kW_e$
İskonto Oranı	%1 - 9
Toplam Verim	%40 - 85
KF	0,491 - 0,1941 \$/kWh

Çoklu regresyon analizinin doğruluğunu değerlendirmek için kullanılan temel yöntemlerden birisi Belirleme Katsayısı (R-kare) kullanımıdır. R-kare, bağımlı değişkenin varyansının bağımsız değişkenlerle ne kadar açıklandığını gösteren bir ölçüdür. R değişkeni 0 - arasında değerler alır ve 1'e ne kadar kadar yakınsa, modelin doğruluğu o kadar iyidir.

Şekil 6.2'de veri setinin dağılımı ve residüel değerleri, Şekil 6.3'de ise hassasiyet analizi verilmiştir. R-Kare değeri %96,68'dir. Residüel değerler potansiyel olarak model veya veri seti ile uyumsuz noktaları belirtmektektedir. Veri seti içerisindeki aykırı noktalar modelin doğruluğunu etkileyecek kadar belirgin değildir. Şekil 6.2'de mavi ile gösterilen noktalar uyumsuzlukları kırmızı noktalar ise modelden sapması yüksek noktaları göstermektedir.



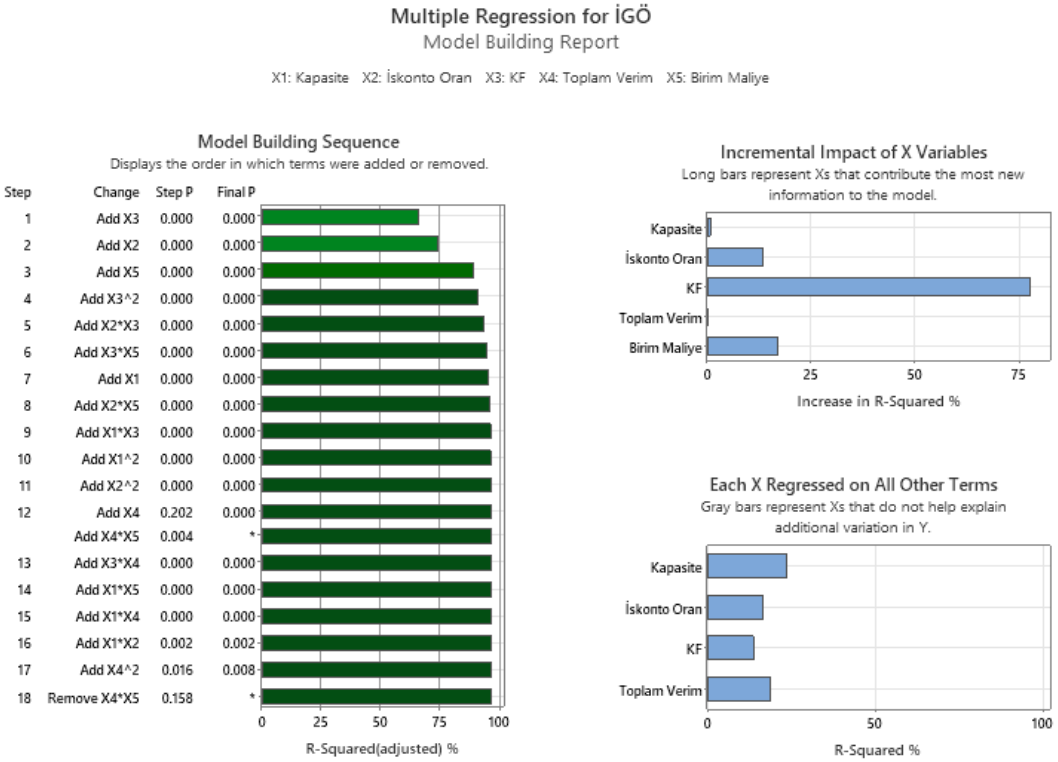
Şekil 6.2 Kategorize edilmiş regresyon modeli veri seti



Şekil 6.3 Regresyon modeli hassasiyet analizi

Düzeltilmiş R-kare, R-kare değerinin hassasiyetini arttırmak için kullanılır. Bu değer, bağımsız değişken sayısını ve örneklem büyüklüğünü dikkate alarak

R-kare'yi düzeltir. Şekil 6.5'de değişkenlerin ağırlığı ve düzeltilmiş R-Kare değerleri verilmiştir.

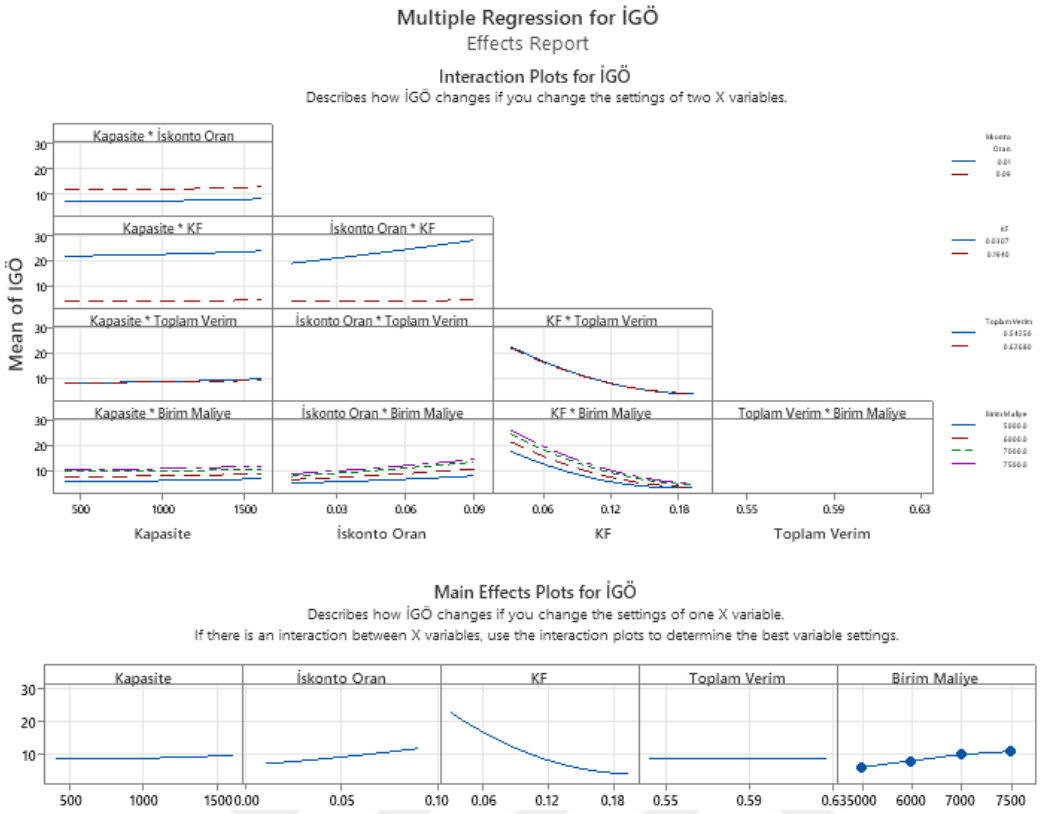


Şekil 6.4 Regresyon modeli terimlerinin ağırlığı

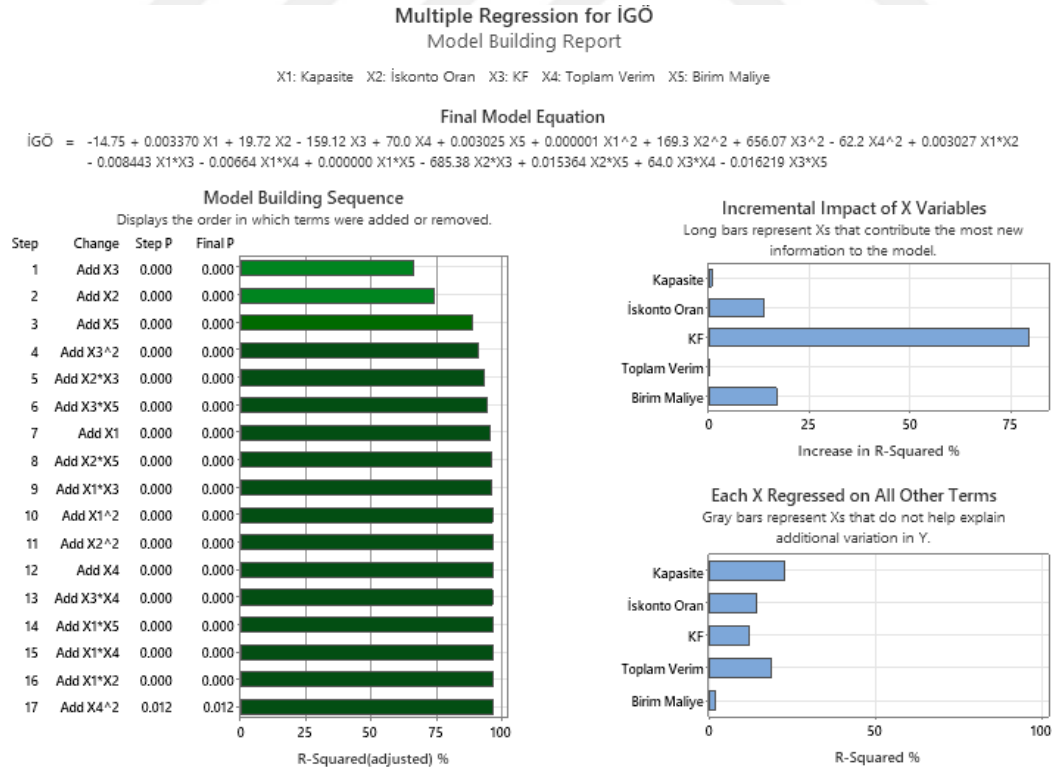
6.2.2 Çok Değişkenli Regresyon - Kategorize Edilmemiş

Birim maliyete göre elde edilen ifadeler geçerlilik aralığında kabul edilebilir hata paylarıyla sonuç vermektedir. İskonto edilmiş geri ödeme süresini verecek daha genel bir ifade elde edebilmek amacıyla çok değişkenli alternatif bir regresyon analizi daha yapılmıştır. Bu analizde de toplam sistem maliyetini belirleyen kurulu kapasite, iskonto oranı, kritik fiyat eşikleri ve toplam verim regresyon modelininin girdisi olarak kullanılmış ancak girdiler birim maliyete göre kategorize edilmemiştir. Birim maliyet de direkt olarak çoklu regresyon modelinin girdisi olarak kullanılmıştır. Regresyon modelinin sonuç fonksiyonu ise yine iskontolu geri ödeme süresidir.

Kurulu kapasite toplam ilk yatırım maliyetiyle birlikte hareket eden bir değişkendir. Toplam verim binanın genel atık ısı kullanım profilini modele yansıtmaktadır. Kritik fiyat eşikleri genel sistem maliyeti içerisinde birim maliyetle birlikte en etkin terimlerden birisidir. Regresyon analizi yardmıyla elde edilen genel ifade ve değişkenlerin ağırlıkları Şekil 6.6'de verilmiştir. Genel iskontolu geri ödeme süresi ifadesinin geçerlilik aralığı 6.3'da verilmiştir.



Şekil 6.5 Regresyon modeli terimlerinin birbirleriyle ilişkisi



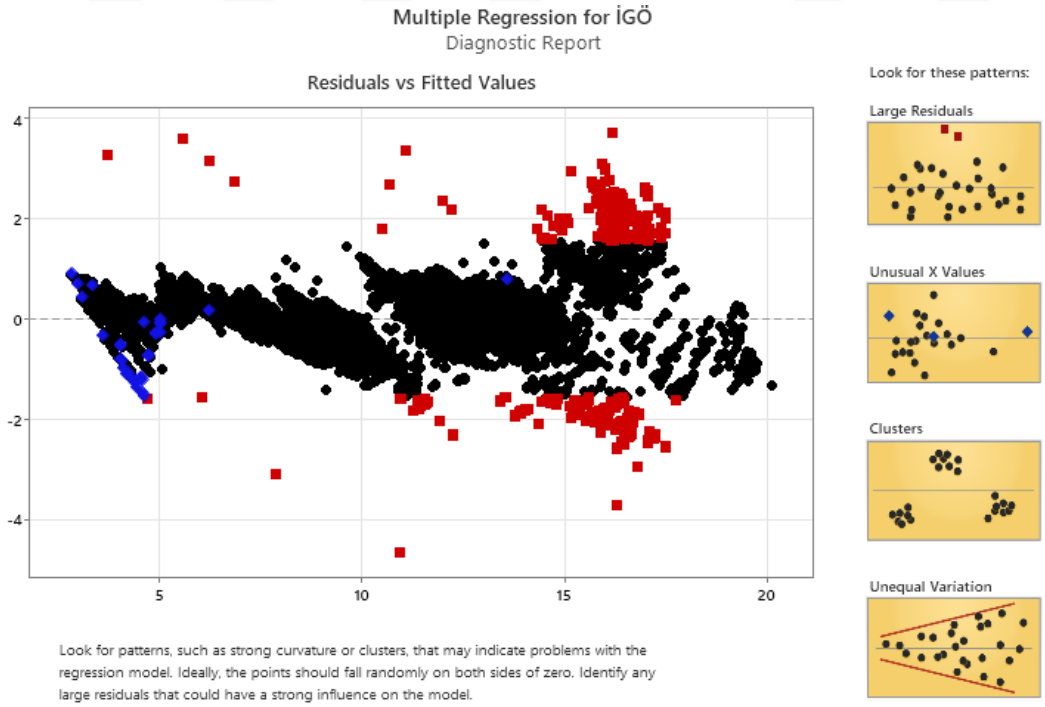
Şekil 6.6 İGÖ Süresi ifadesi ve model değişkenlerinin ağırlığı

Kategorize edilmemiş genel ifade birim maliyetin görece geniş bir aralığında kabul edilebilir sonuç vermesine rağmen kurulu kapasite 2400 kW_e değerinin üzerine çıktığında hata oranı %15 üzerine çıkmaktadır. Kategorize edilmiş ifadelerde olduğu gibi ağırlığı en yüksek olan terim yine elektrik ve gaz fiyatları arasındaki farkın fonksiyonu olan kritik fiyat eşikleridir. Doğalgaz fiyatı ne kadar ucuz, elektrik fiyatı ne kadar pahalıysa yakıt pili o kadar avantajlı olmaktadır. Doğalgazın hidrojen veya başka gazlarla ikame edilmesi durumunda da benzer bir ilişki oluşması beklenir. Değişkenler birbirini etkilediğinden hassasiyet bütünsel değerlendirilmelidir.

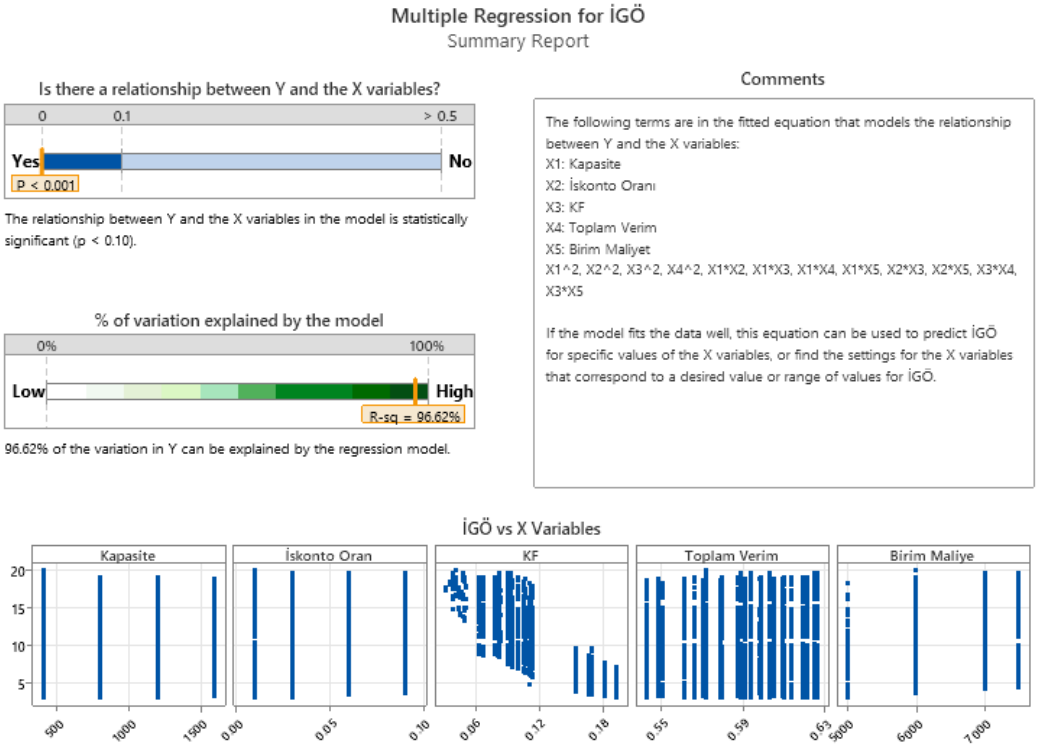
Şekil 6.7'de genel veri seti ve residüel değerlerin dağılımı görülmektedir. Genel iskonto edilmiş geri ödeme süresi ifadesi için R-Kare değeri %96,62 bulunmuş ve Şekil 6.8'de gösterilmiştir.

Tablo 6.3 İGÖ İfadeleri gerçerlilik aralığı

Girdiler	Birim
Birim Maliyet	3000 - 10000 \$/kWh_e
Kapasite	$400 - 1600\ kW_e$
İskonto Oranı	%1 - 9
Toplam Verim	%40 - 85
KF	0491 - 0,1941 \$/kWh



Şekil 6.7 Kategorize edilmemiş regresyon modeli veri seti



Şekil 6.8 Regresyon modeli hassasiyet analizi

6.3 İskontolu Geri Ödeme İfadesi Hassasiyet Analizi

Çok değişkenli regresyon analizleriyle çıkarılan tüm ifadeler için R-Kare değerleri > 0,9 bulunmuştur. Dolayısıyla regresyon analizleriyle bulunun ifadelerin verilerle korelasyonu yüksektir. Ancak bu tek başına yeterli değildir. İfadelerin hassasiyetinin enerji modeli hesaplamaları ile kıyaslanarak kontrol edilmesi gereklidir. Bu amaçla; önerilen enerji modelinden elde edilen İGÖ değerleriyle, regresyon analiziyle bulunan İGÖ ifadesinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır. Tablo 6.4'de birim farklı maliyet ve iskonto oranları için hassiyet analizi sonuçları verilmiştir. iskonto oranı ve ilk yatırım maliyetinin yüksek olduğu kombinasyonlarda iGÖ süresi 20 yılı geçtiğinden enerji modeli sonuç vermemektedir. Modelin ekonomik hesaplama süresi yakıt pilinin ekonomik ömrüne göre belirlenmiştir. Bu nedenle bazı faiz oranı ve maliyet kombinasyonlarına tabloda yer verilmemiştir ki bu değerler zaten ekonomik olarak anlamlı değildir. Tabloda "EM" enerji modeli sonuçlarını, "REG" regresyon analiziyle elde edilen ifadenin sonuçlarını yansıtmaktadır. Kiritik fiyat farkları ile iskonto oranı birlikte değiştirilerek yapılan hassasiyet analizinde regresyon modelinden elde edilen ifadenin enerji modeliyle korelasyonunun yüksek olduğu görülmektedir. İskonto oranının yüksek, kritik fiyat farkının düşük değerlerinde iskontolu geri ödeme süresi 20 yıl değerini aştığından model sonuç vermemektedir. Aynı şekilde regresyon modelinden elde edilen ifadeninde KF 0,1940 değerinin

üzerine çıktığında korelasyon zayıflamaktadır. Birim maliyetin düşük olduğu değeler için yine ifadenin korelasyonu zayıftır. 4000 $\$/kWh_e$ birim maliyetin altında hata payları %25 üzerine çıkabilmektedir. Değişen maliyet ve kapasiteye göre yapılan hassiyet analizlerinde de regresyon analiziyle elde edilen iskontolu geri ödeme süresi ifadesinin enerji modeliyle korelasyonunun yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 6.4 Birim maliyet + iskonto oranı hassasiyeti

Birim Maliyet	Kapasite	İskon.	KF	Toplam Verim	EM	REG	Hata
$\$/kWh_e$	kW_e	%	$\$/kWh$	%	Yıl	Yıl	%
10000	400	1	0,0807	58,88	18,516	17,480	-5,59
9000	400	1	0,0807	58,88	17,064	15,61	-8,54
9000	400	3	0,0807	58,88	19,50	17,87	-8,36
8000	400	1	0,0807	58,88	14,439	13,730	-9,12
8000	400	3	0,0807	58,88	17,258	15,680	-9,12
8000	400	4	0,0807	58,88	18,418	16,710	-9,27
7000	400	1	0,0807	58,88	12,948	11,860	-8,41
7000	400	3	0,0807	58,88	14,305	13,500	-5,64
7000	400	6	0,0807	58,88	18,530	16,209	-12,53
6000	400	1	0,0807	58,88	11,259	19,986	-11,31
6000	400	3	0,0807	58,88	12,224	11,311	-7,47
6000	400	6	0,0807	58,88	14,375	13,553	-5,72
6000	400	8	0,0807	58,88	17,503	15,217	-13,06
5000	400	1	0,0807	58,88	8,748	8,112	-7,26
5000	400	3	0,0807	58,88	9,489	9,125	-3,75
5000	400	6	0,0807	58,88	11,935	10,897	-8,69
5000	400	9	0,0807	58,88	14,393	12,9757	-9,85
5000	400	11	0,0807	58,88	14,393	12,9757	-19,43
4000	400	1	0,0807	58,88	7,183	6,239	-13,14
4000	400	3	0,0807	58,88	7,669	6,938	-9,53
4000	400	6	0,0807	58,88	8,599	8,242	-4,16
4000	400	9	0,0807	58,88	9,903	9,850	-0,54
4000	400	12	0,0807	58,88	12,826	11,763	-8,29
4000	400	15	0,0807	58,88	18,032	13,980	-22,47
3000	400	1	0,0807	58,88	2,397	2,460	+ 2,47
3000	400	3	0,0807	58,88	2,481	1,82	-26,53
3000	400	6	0,0807	58,88	2,615	1,13	-59,96
3000	400	9	0,0807	58,88	2,760	0,73	-73,45
2000	400	1	0,0807	58,88	3,358	2,49	-25,80
2000	400	3	0,0807	58,88	3,3504	3,57	-26,79
2000	400	6	0,0807	58,88	3,749	2,93	-21,82
2000	400	9	0,0807	58,88	4,024	3,60	-10,53

Tablo 6.5 Kritik fiyat farkı + iskonto oranı hassasiyeti

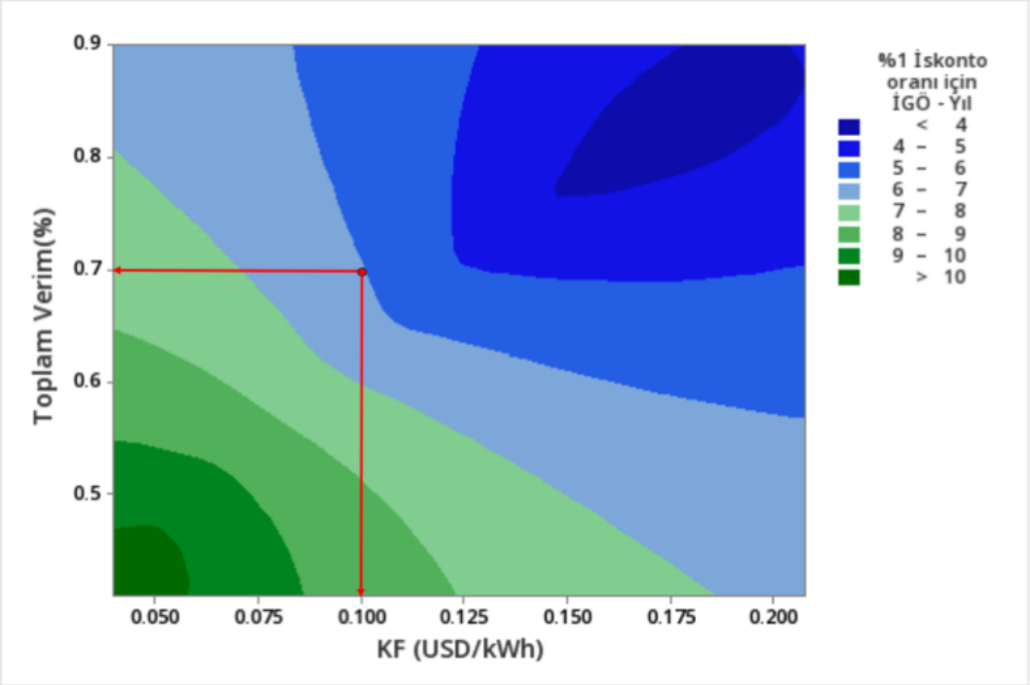
Birim Maliyet	Kapasite	İskon.	KF	Toplam Verim	EM	REG	Hata
$\$/kWh_e$	kW_e	%	$\$/kWh$	%	Yıl	Yıl	%
7000	400	1	0,1940	58,88	4,309	4,240	+4,24
7000	400	1	0,1109	58,88	8,362	6,25	-1,35
7000	400	1	0,0781	58,88	13,090	12,22	-6,63
7000	400	1	0,0807	58,88	12,948	11,86	-8,41
7000	400	3	0,1940	58,88	4,54	4,58	+0,79
7000	400	3	0,1109	58,88	9,035	9,47	+4,85
7000	400	3	0,0781	58,88	14,477	13,90	-4,01
7000	400	3	0,0807	58,88	14,305	13,50	-5,64
7000	400	6	0,1940	58,88	4,937	4,960	+0,35
7000	400	6	0,1109	58,88	11,306	11,56	+2,27
7000	400	6	0,0781	58,88	18,792	16,660	-11,35
7000	400	6	0,0807	58,88	18,530	18,866	-12,53
7000	400	9	0,1940	58,88	5,940	5,64	-5,04
7000	400	9	0,1109	58,88	13,463	13,96	+3,68

Tablo 6.6 Birim Maliyet + kapasite hassasiyeti

Birim Maliyet	Kapasite	İskon.	KF	Toplam Verim	EM	REG	Hata
$\$/kWh_e$	kW_e	%	$\$/kWh$	%	Yıl	Yıl	%
7000	400	3	0,0807	58,88	14,305	13,50	-5,640
7000	800	3	0,0807	58,88	14,480	13,55	-6,39
7000	1200	3	0,0807	58,88	14,765	13,80	-10,99
7000	1600	3	0,0807	58,88	14,765	13,80	-10,99
6000	400	3	0,0807	58,88	12,224	11,310	-4,47
6000	800	3	0,0807	58,88	12,368	11,370	-8,09
6000	1200	3	0,0807	58,88	12,368	11,370	-8,09
6000	1600	3	0,0807	58,88	13,305	12,61	-6,63
5000	400	3	0,0807	58,88	9,480	9,120	-6,63
5000	800	3	0,0807	58,88	9,606	9,180	-4,42
5000	1200	3	0,0807	58,88	9,80	9,620	-1,80
5000	1600	3	0,0807	58,88	11,364	10,42	-8,290
4000	400	3	0,0807	58,88	7,669	6,940	-9,63
4000	800	3	0,0807	58,88	7,774	6,990	-10,04
4000	1200	3	0,0807	58,88	7,943	7,440	-6,38
4000	1600	3	0,0807	58,88	8,565	8,23	-3,86

6.4 Ekonomik Mukayese İçin Grafik Yöntem

Hassasiyet analizlerinin de gösterdiği gibi, Bölüm 6.2.2'de elde edilen iskonto edilmiş geri ödeme süresi ifadesinin pratik bir karar verme yönetimi olarak kullanılabileceği görülmektedir. Şekil6.6'de verilen ifadenin herhangi bir hesaplama gerektirmeden grafik üzerinden uygulanması için alternatif bir yöntem de önerilmiştir. Regresyon analizlerinden görüldüğü gibi geri ödeme süresini etkileyene en önemli faktör kritik fiyat farkı eşikleridir. Yakıt piline reformayon için giren gazın fiyatı düşük, elektrik fiyatı yüksek olduğu takdirde sistem ekonomik olmaktadır. İGÖ, kritik fiyat farkları ve toplam sistem verimine bağlı olarak grafik yöntemle de bulunabilir. Bu amaçla kontur grafiği kullanılmıştır. Kontur grafiği genellikle bir yüzeyin eşit yükseklik veya eşit değerli noktalarını gösteren bir grafik türünü ifade eder [57]. Bu grafik, bir fonksiyonun iki bağımsız değişkeni üzerindeki değerlerini görselleştirmek için kullanılır. Kontur çizgileri, fonksiyonun belirli değer seviyelerini birleştiren çizgilerdir. İGÖ süresi fonksiyonunun grafiği, fonksiyonun belirli değer seviyelerini görsel olarak anlamamıza yardımcı olacak şekilde düzenlenmiştir. Örneğin, Şekil6.9'de KF değeri 0.1 ve toplam verim değeri 0.7 değerlerinin kesiştiği noktada iskonto süresi 6-7 yıl arasında bulunmuştur.

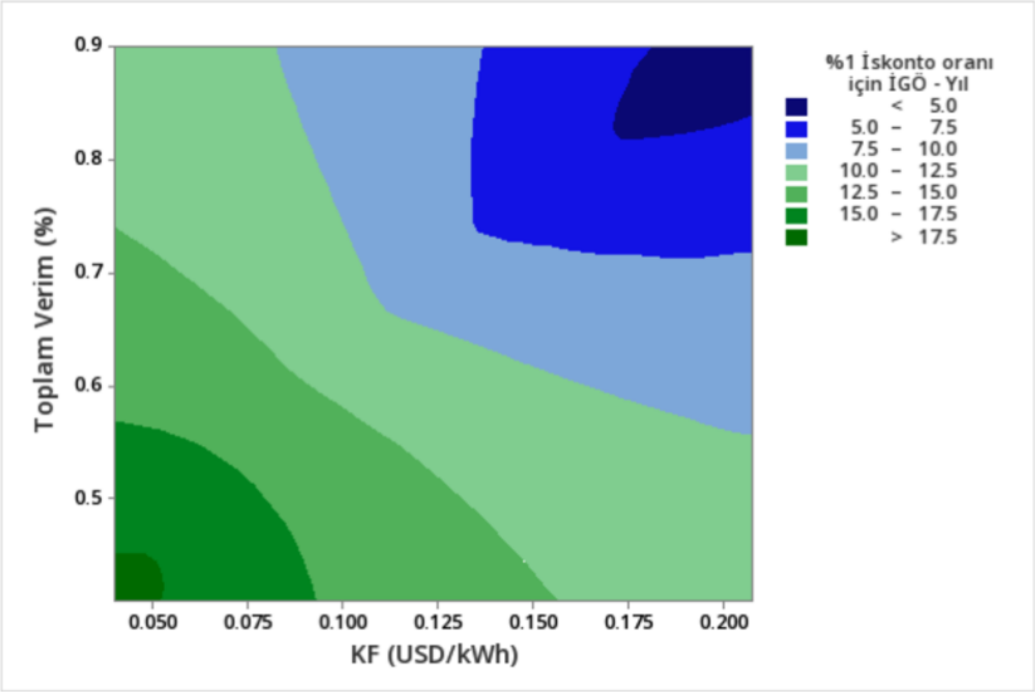


Şekil 6.9 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e 4000 USD/kW_e

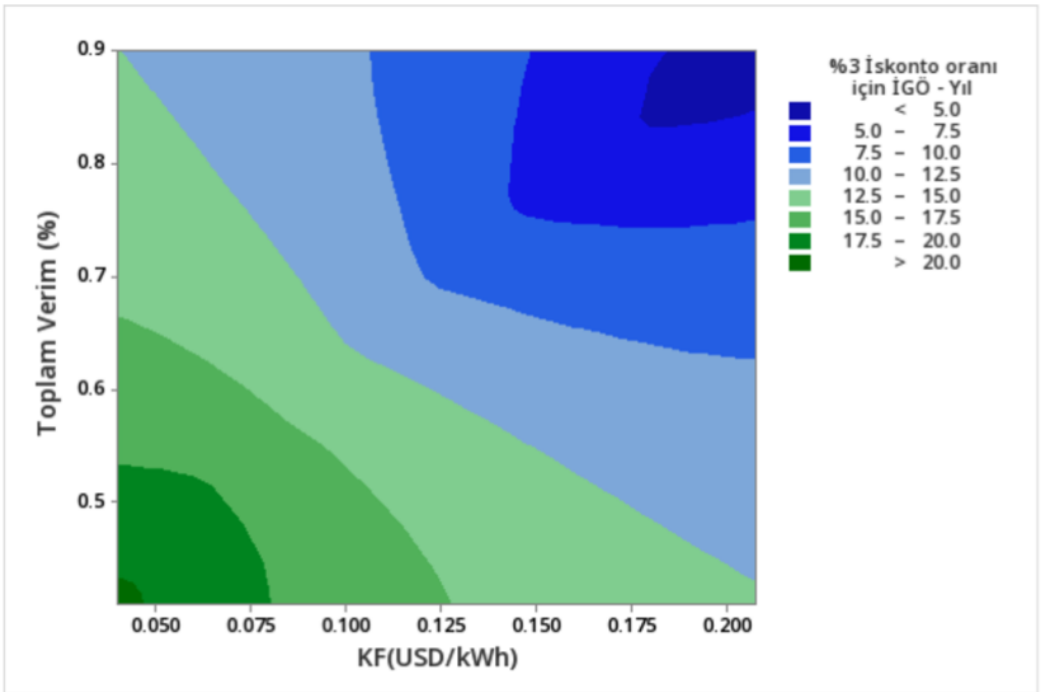
6.5 İskontolu Geri Ödeme Mukayese Grafikleri

Farklı birim maliyet, iskonto oranı ve kapasiteler için mukayese grafikleri aşağıda verilmiştir.

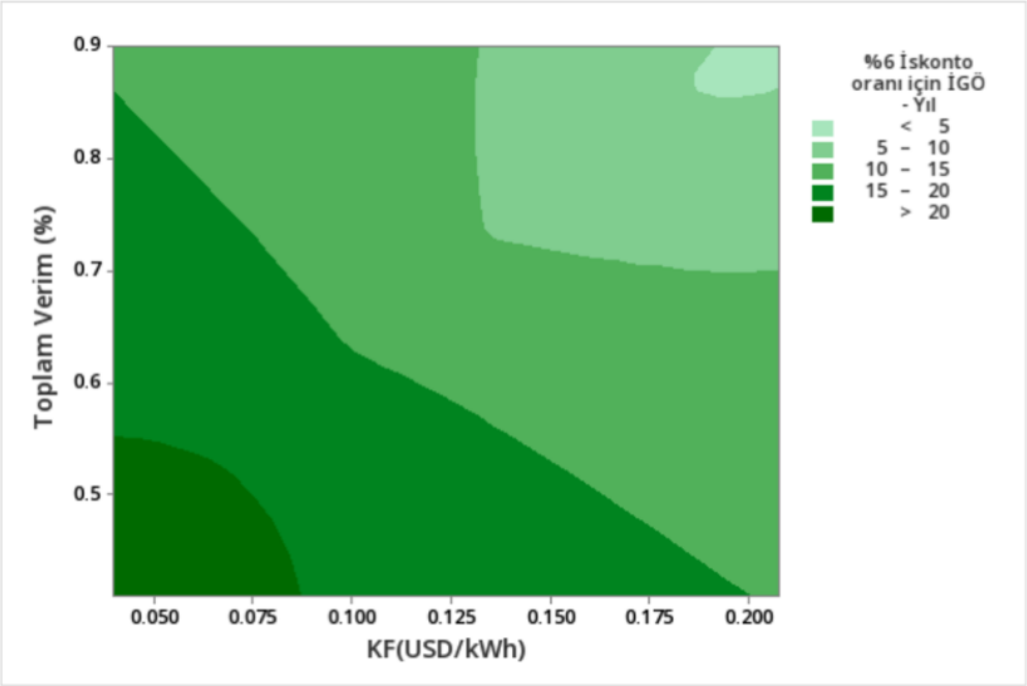
6.5.1 7000 USD/kWe - 400 kWe Kapasite İçin Mukayese Grafikleri



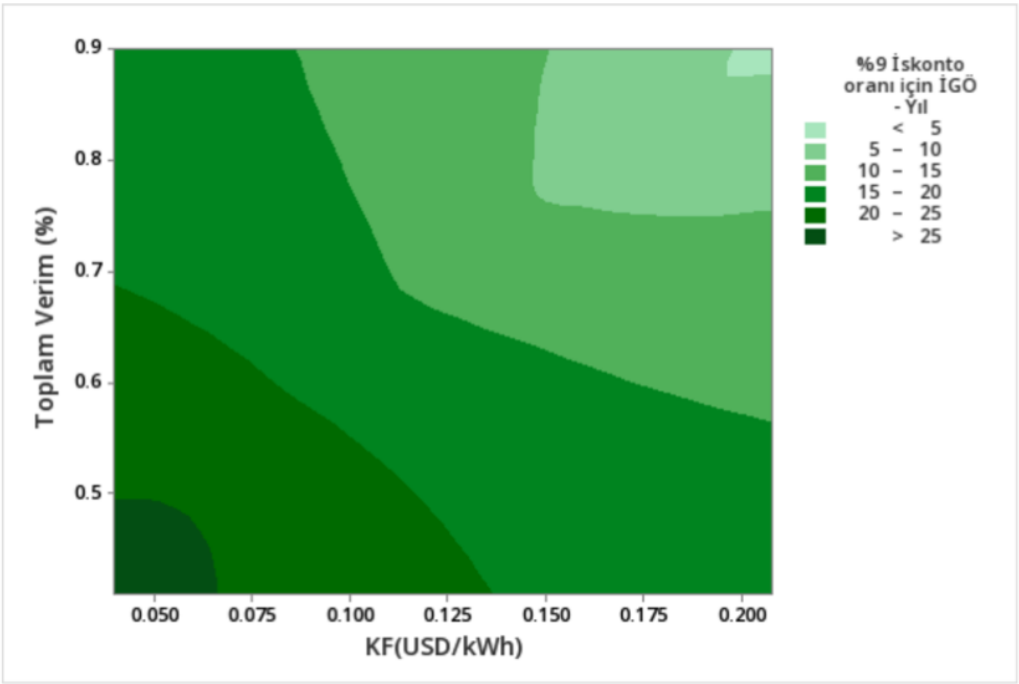
Şekil 6.10 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%1$ İskonto Oranı 7000 USD/kW_e



Şekil 6.11 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%3$ İskonto Oranı 7000 USD/kW_e

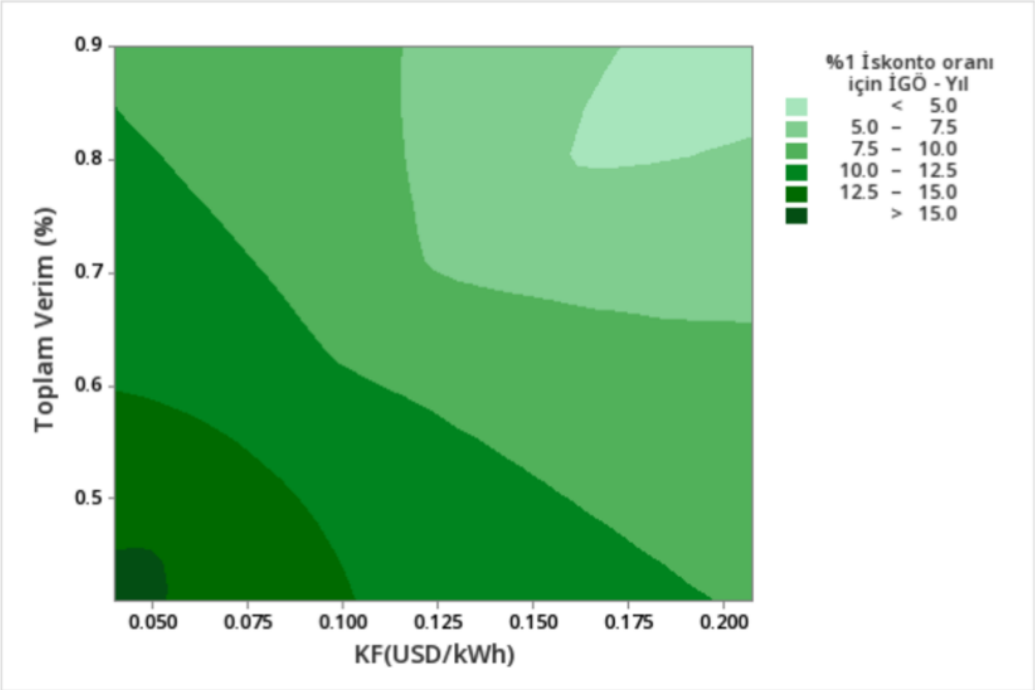


Şekil 6.12 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%6$ İskonto Oranı 7000 USD/kW_e

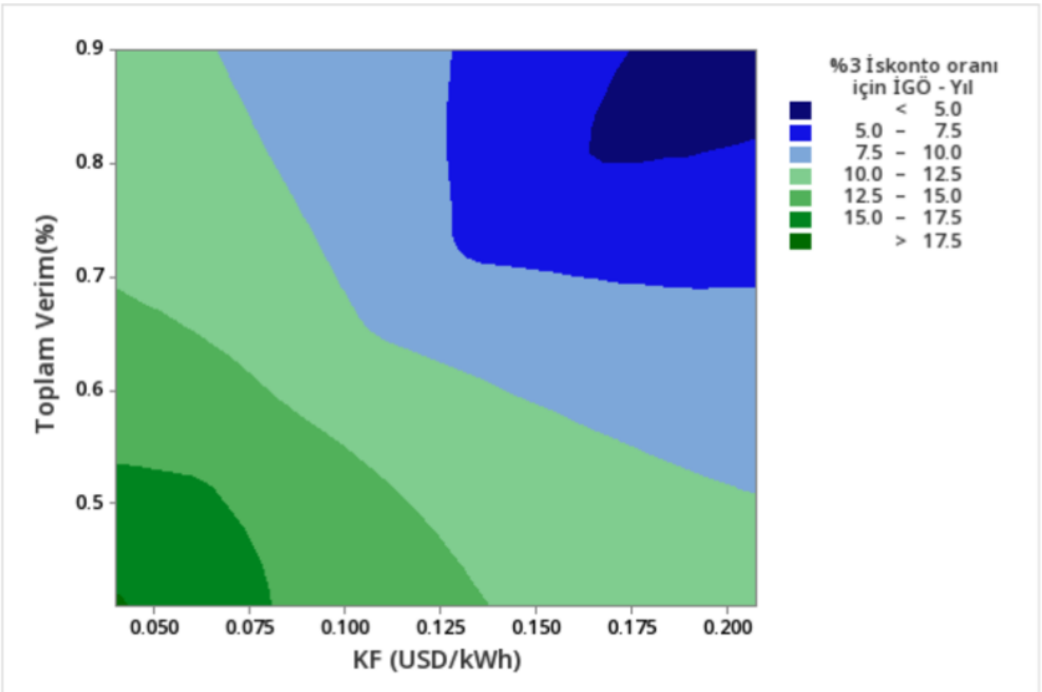


Şekil 6.13 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%9$ İskonto Oranı 7000 USD/kW_e

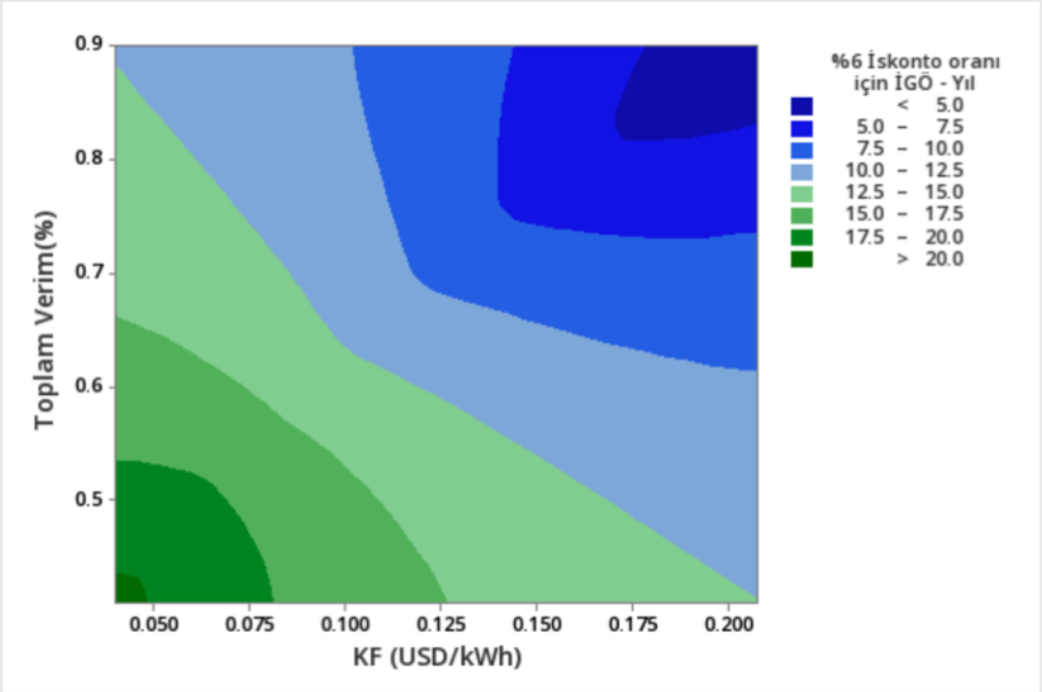
6.5.2 6000 USD/kWe - 400 kWe Kapasite İçin Mukayese Grafikleri



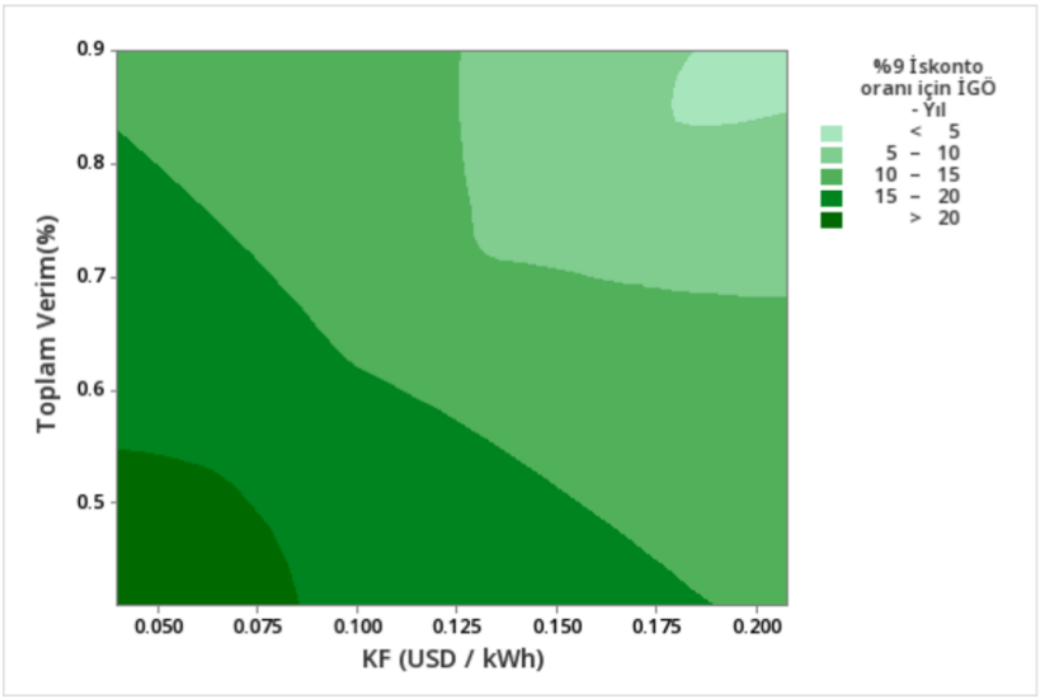
Şekil 6.14 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%1$ İskonto Oranı 6000 USD/kW_e



Şekil 6.15 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%3$ İskonto Oranı 6000 USD/kW_e

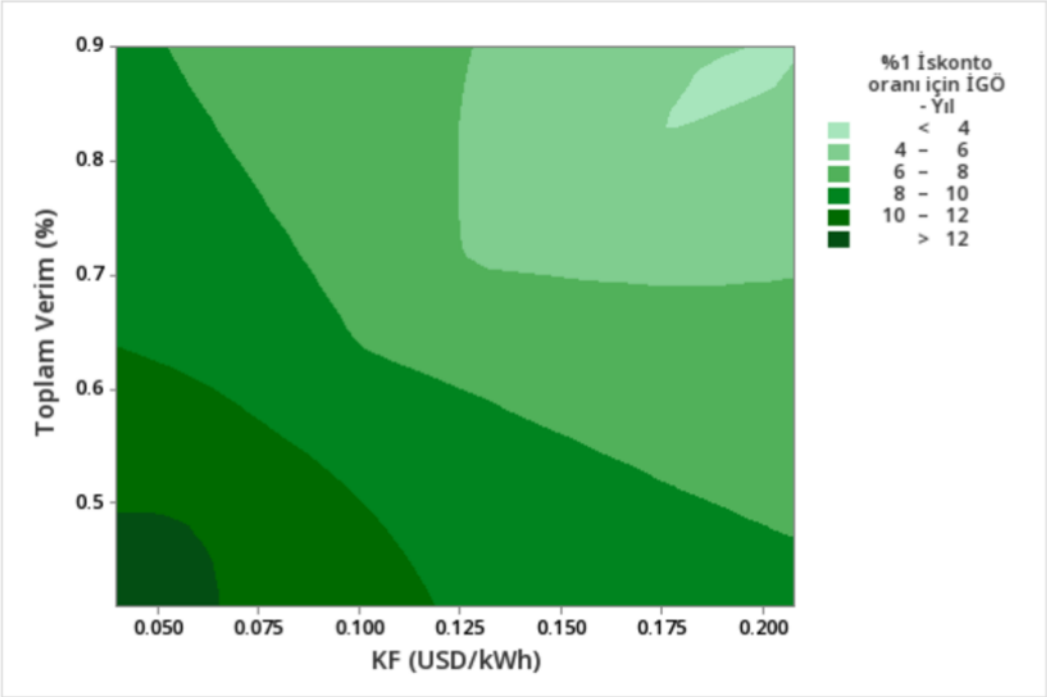


Şekil 6.16 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%6$ İskonto Oranı 6000 USD/kW_e

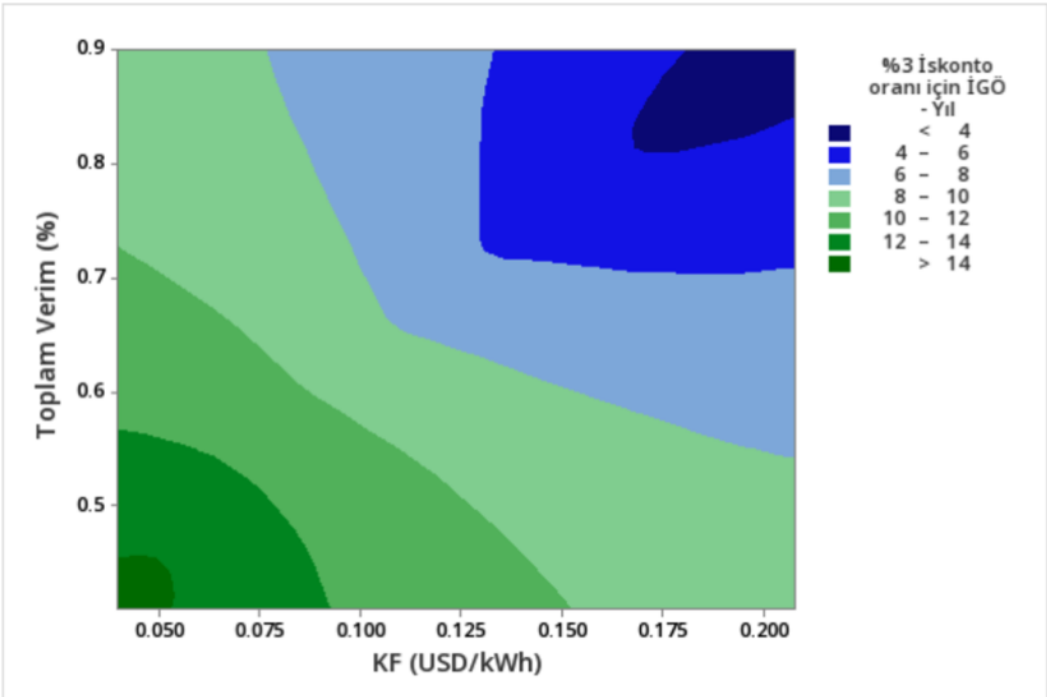


Şekil 6.17 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%9$ İskonto Oranı 6000 USD/kW_e

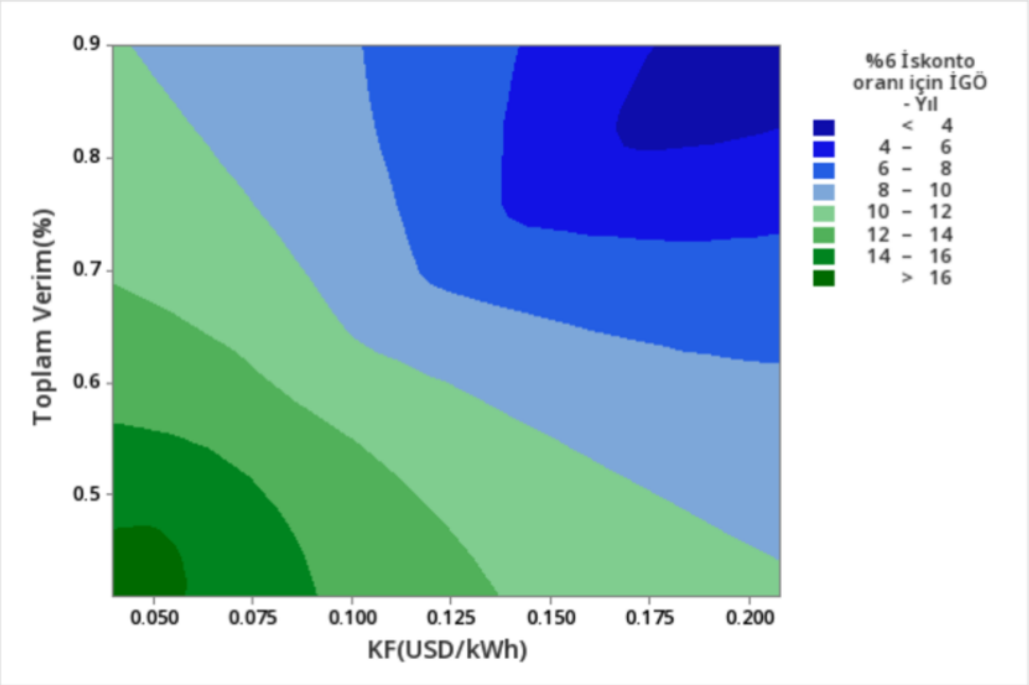
6.5.3 5000 USD/kWe - 400 kWe Kapasite İçin Mukayese Grafikleri



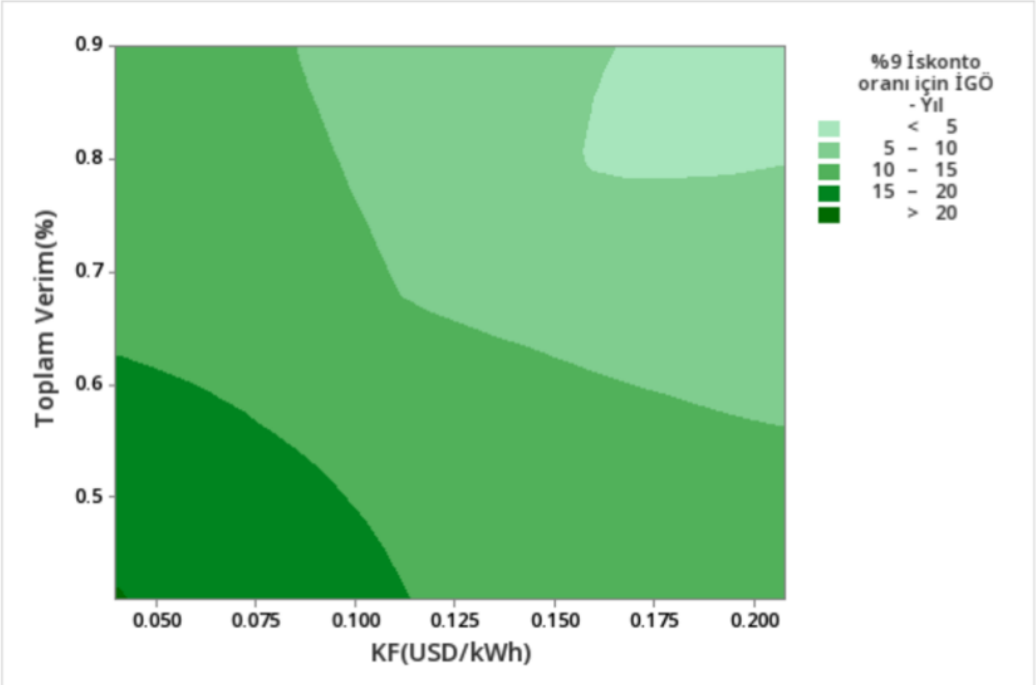
Şekil 6.18 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%1$ İskonto Oranı 5000 USD/kW_e



Şekil 6.19 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%3$ İskonto Oranı 5000 USD/kW_e

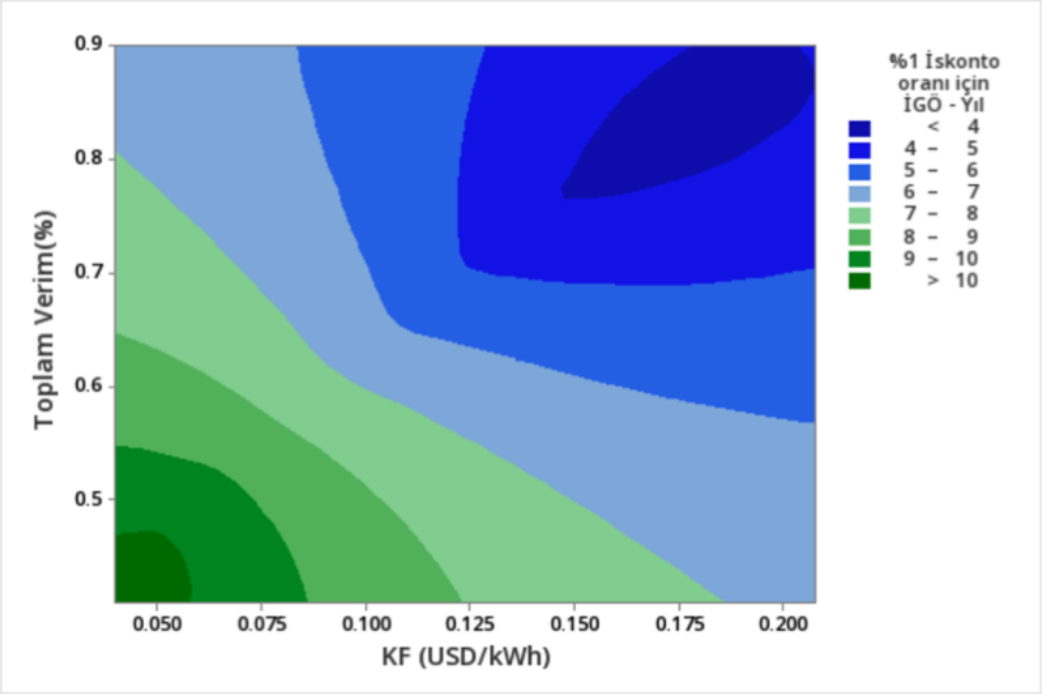


Şekil 6.20 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%6$ İskonto Oranı 5000 USD/kW_e

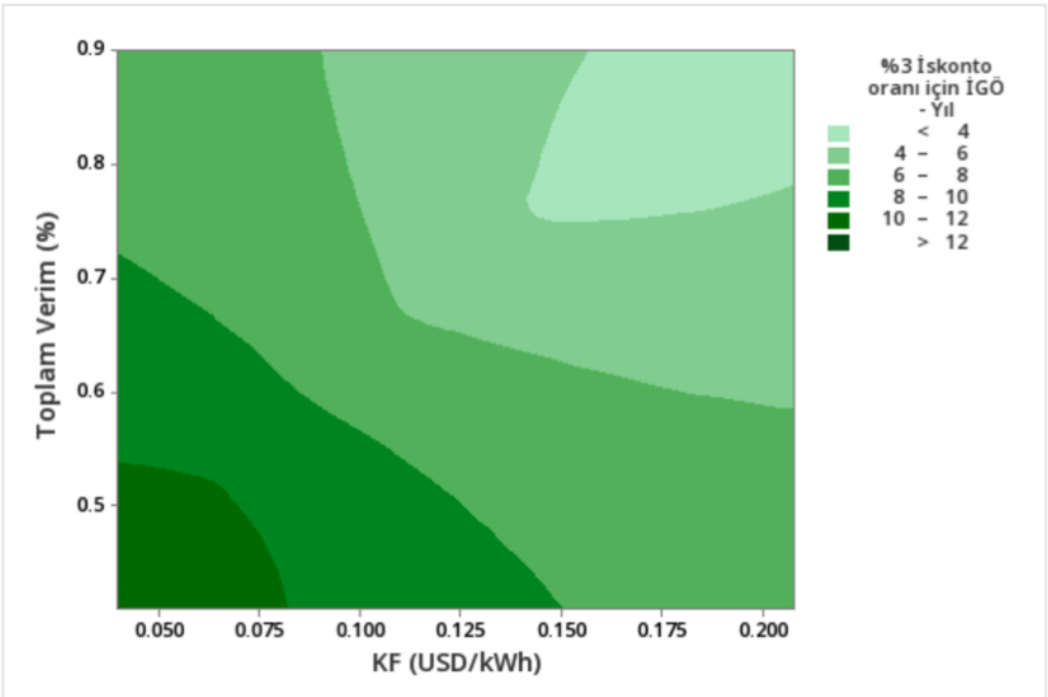


Şekil 6.21 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%9$ İskonto Oranı 5000 USD/kW_e

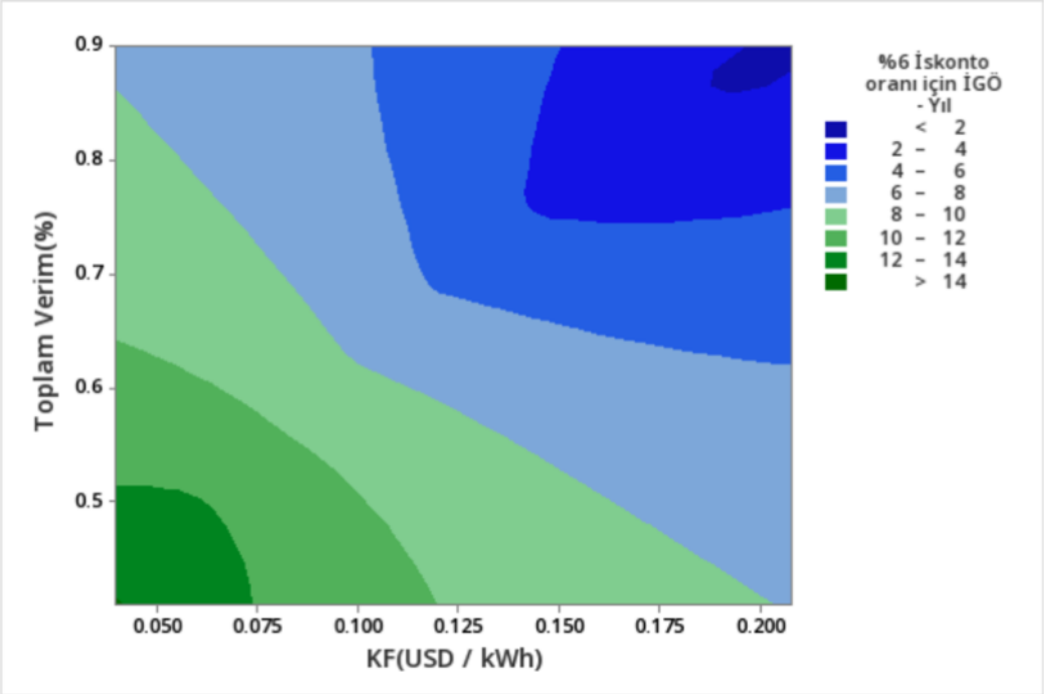
6.5.4 4000 USD/kWe - 400 kWe Kapasite İçin Mukayese Grafikleri



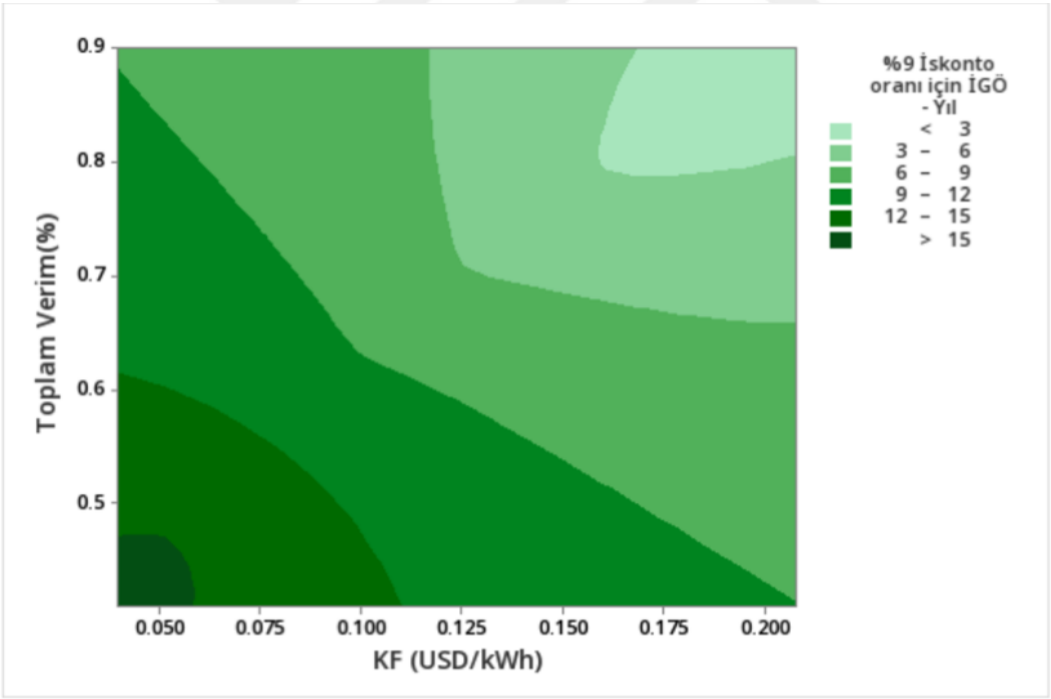
Şekil 6.22 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%1$ İskonto Oranı 4000 USD/kW_e



Şekil 6.23 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%3$ İskonto Oranı 4000 USD/kW_e



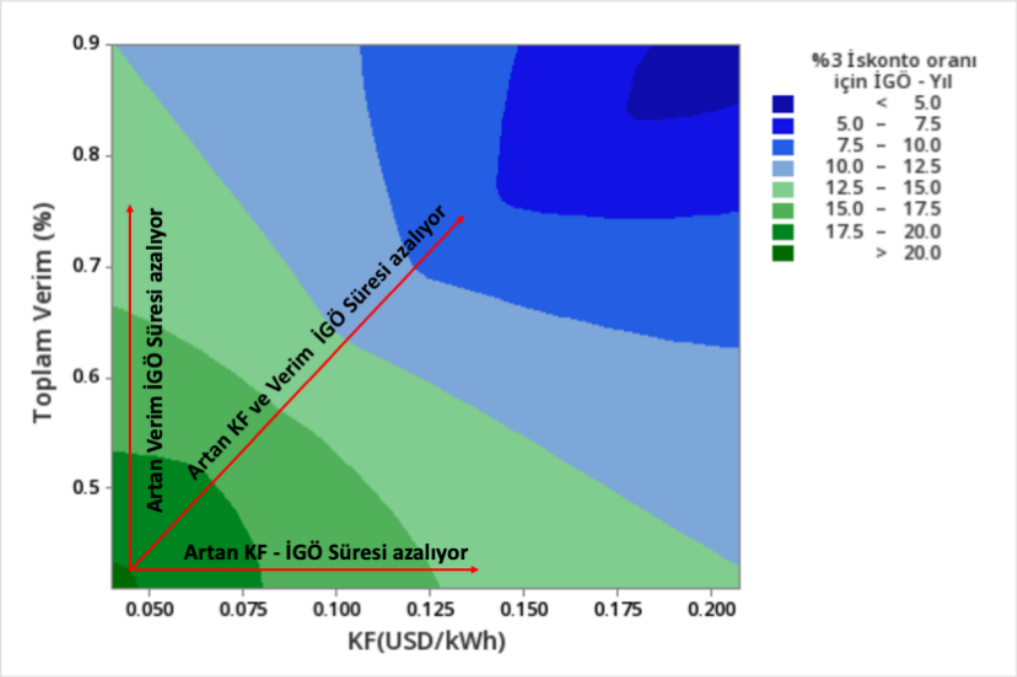
Şekil 6.24 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%6$ İskonto Oranı 4000 USD/kW_e



Şekil 6.25 İGÖ Kontur grafiği - 400 kW_e $\%9$ İskonto Oranı 4000 USD/kW_e

6.5.5 Mukayase Grafiklerinin Değerlendirilmesi

Mukayese grafikleri incelendiğinde kritik fiyat farkları ve toplam verimle ilgili yapılan tespitlerin doğrulandığı görülmektedir. Kritik fiyat farkının yüksek değerlerinde iskontolu geri ödeme süresi dramatik olarak azalmaktadır. Bu yöntem karmaşık ekonomik hesaplamalara girilmeksizin belirtilen şartlar dahilinde geri ödeme süreleri hakkında fikir vermektedir. Verilen KF aralığı son on yıllık fiyat serileri ile tutarlıdır. Son on yılda KF değerinin 0,2'den büyük olduğu bir durum gerçekleşmemiştir. Dolayısıyla burada önerilen grafik yöntem, farklı kapasite aralıkları için oluşturularak detaylı ekonomik analiz öncesi bir ön karar verme aracı olarak kullanılabilir. Örneğin, bu grafikler yeni bir sistem tasarımı için mevcut şebeke fiyatlarıyla 5 yıl İGÖ beklentisi olması durumunda sistemin ulaşması gereken toplam verim değeri veya iskontolu geri ödeme süresi hakkında rahatlıkla fikir verebilmektedir.



Şekil 6.26 İGÖ kontur grafiği değerlendirmesi

7
SONUÇ

7.1 Sonuçlar

Yakıt pili teknolojisinin binalarda kullanımı konusu özellikle son yirmi yılda zaman zaman artan veya azalan bir profilde çeşitli araştırmaların konusu olmuştur. Özellikle 1990'lı yılların ilk yarısında FAYP tipi yakıt pilleriyle başlayan yakıt pillerinin binalarda kullanımıyla ilgili çalışmalar umut verici olsa da maliyetler hala arzu edilen seviyelere inmemiştir. Bugün ise hidrojen ekonomisi tartışmaları yakıt pillerini yine bina uygulamalarında karbon salımının azaltılması anlamında önemli bir tasarım seçeneği haline getirmiştir. Buna rağmen günümüz şartlarında FAYP yakıt pillerinin mevcut ticari binalarda kullanımı ekonomik olarak anlamlı değildir. FAYP yakıt pillerinin karbon salımı açısından daha iyi bir performans ortaya koyması ise bina enerji talep profilleri ve buna uygun bir ısı geri kazanım stratejisiyle mümkün olabilir. Bu çalışmanın genel değerlendirmesini yapmak gerekirse;

- Yakıt pili teknolojisi hala rekabetçi değildir. Sadece birim açısından değerlendirlirse ilk yatırım maliyetlerinin ilk aşama olarak 3000 USD/kW_e, konvansiyonel teknolojilerle anlamlı bir kıyaslama yapabilmek içinse 1500 USD/kW_e seviyesine inmesi gerekmektedir. Bu fiyat aralıkları ölçek ekonomisine ulaşılmadığından yakın gelecekte başarılabilir değildir.

- Yakıt pillerinin mevcut maliyetlerle rekabetçi olması için KF seviyelerinin 0,15 USD/kWh mertebesinin üzerinde olması gerekmektedir. Bu durum ise mevcut şartlarda sürekli yüksek elektrik, düşük doğalgaz fiyatını zorunlu kılmaktadır.

- Ele alınan mevcut ticari yapı projesinde toplam verim hiçbir iklim bölgesinde %65 üzerinde çıkmamıştır. Bu durumda karbon salımı anlamında da FAYP yakıt pillerinin rekabetçi olmasını önlemektedir. Mevcut binalarda ısıtma sistemleri genellikle yüksek sıcaklıkta planlandığından FAYP yakıt

pilleriyle etkin bir ısı geri kazanım stratejisi geliştirilmesi güçleşmektedir. Absorpsiyonlu soğutma için FAYP tarafından sağlanabilen sıcaklıklar düşük, sıcaklığın yükseltilmesi durumundaysa sıcak su debileri yetersiz kalmaktadır.

- FAYP yakıt pillerinin kısmi verimleri genel olarak konvansiyonel kojenerasyon teknolojilerine göre yüksektir. Buna rağmen hidrojenin doğalgazdan reformasyon yoluyla elde edilmesi özellikle FAYP'nin ısı geri kazanımının düşük olduğu veya sadece elektrik üretilen işletme senaryolarında karbon salımını yukarıya çekmektedir. Bu durumumun şebekenin yenilenebilir enerji payı arttıkça yakıt pilleri aleyhine daha da kötüleşmesi, hatta geniş bir hidrojen şebekesinin mevcut olmaması durumunda yakıt pillerini tamamen bir seçenek olmaktan çıkarması muhtemeldir.

- FAYP yakıt pilleri soğuk iklim bölgelerinde daha avantajlı görünmektedir. Aslında bu durum yine yakıt pilinin toplam veriminin artmasıyla ilgilidir. Yakıt pilinden sağlanan atık ısı binanın talep profiline ne kadar yaklaşırsa o kadar verimli olacaktır.

- Bu ve benzeri sistemlerin ekonomik mukayesesi, tekno-ekonomik değerlendirilmesi paranın zaman değeri dikkate alınarak yapılmaktadır. Özellikle fiyatların dinamik olarak değiştiği durumlarda karar vericiler karmaşık ekonomik hesaplardan kaçabilmekte, basit geri dönüş süresine göre ekonomik ömrü içerisinden hızlı fayda sağlayan yöntemlere yönelebilmektedir. Bu amaçla yakıt pili sistemleri için orta ölçekli ticari binalarda kullanılabilecek iki ayrı yöntem önerilmiştir. Özellikle önerilen grafik yöntem ön değerlendirme aşaması için idealdir.

7.2 Öneriler

- Bu çalışma alternatif yakıt pili teknolojileri ile genişletilerek yakıt pillerinin mevcut ticari binalarda kullanımıyla ilgili daha geniş bir perspektif yaratılabilir. Özellikle Katı Oksit Yakıt Pileri bu anlamda değerlendirilebilir bir teknolojidir. FAYP yakıt pillerine kıyasla yüksek verimlerimden dolayı son yıllarda KOYP teknolojisiyle ilgili çalışmaların sayısı artmaktadır.

- Bu çalışmada yenilebilir enerji ve elektroliz destekli hibrit histemler değerlendirilmemiştir. Hidrojen altyapısının mevcut olmadığı ancak hidrojenin yenilenebilir enerjiyle ucuz bir şekilde elde edilebildiği senaryolar yakıt pilleri açısından anlamlı olabilir. Elektroliz sisteminin yenilebilir

enerjiyle çalıştırıldığı bir sistemde yakıt pili baz yükü sağlarken, batarya destekli rüzgar ve fotovoltaik enerji çözümleri değişken yükleri karşılayabilir.

KAYNAKÇA

[1] *International energy agency*. [Online]. Available: https://iea.blob.core.windows.net/assets/42b23c45-78bc-4482-b0f9-eb826ae2da3d/WorldEnergyOutlook2023.pdf (visited on 01/10/2024).

[2] S. Galliers, B. S. Research, I. Association, *Fuel Cell Technology: The Scope for Building Services Applications* (BSRIA guide). BSRIA, 2003, isbn: 9780860226222. [Online]. Available: https://books.google.com.tr/books?id=YIqSAAAACAAJ.

[3] A. Dicks, D. Rand, *Fuel Cell Systems Explained*. Wiley, 2018, isbn: 9781118613528. [Online]. Available: https://books.google.com.tr/books?id=CuhRDwAAQBAJ.

[4] K. Adamson, *Stationary Fuel Cells: An Overview*. Elsevier Science, 2010, isbn: 9780080554709. [Online]. Available: https://books.google.com.tr/books?id=yyyZZ7nitKEC.

[5] W. R. Grove, "On the gas voltaic battery. experiments made with a view of ascertaining the rationale of its action and its application to eudiometry," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 133, pp. 91–112, 1843, issn: 02610523. [Online]. Available: http://www.jstor.org/stable/108377 (visited on 01/15/2024).

[6] D. H. Archer, J. G. Wimer, M. C. Williams, "A phosphoric acid fuel cell cogeneration system retrofit to a large office building," in *IECEC-97 Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (Cat. No. 97CH6203)*, IEEE, vol. 2, 1997, pp. 817–824.

[7] T. Brenscheidt, K. Janowitz, H.-J. Salge, H. Wendt, F. Brammer, "Performance of onsi pc25 pafc cogeneration plant," *International journal of hydrogen energy*, vol. 23, no. 1, pp. 53–56, 1998.

[8] M. Ishizawa, S. Okada, T. Yamashita, "Highly efficient heat recovery system for phosphoric acid fuel cells used for cooling telecommunication equipment," *Journal of Power Sources*, vol. 86, no. 1-2, pp. 294–297, 2000.

[9] A. Lokurlu, T. Grube, B. Höhlein, D. Stolten, "Fuel cells for mobile and stationary applications—cost analysis for combined heat and power stations on the basis of fuel cells," *International journal of hydrogen energy*, vol. 28, no. 7, pp. 703–711, 2003.

[10] H.-Y. Kwak, H.-S. Lee, J.-Y. Jung, J.-S. Jeon, D.-R. Park, "Exergetic and thermoeconomic analysis of a 200-kw phosphoric acid fuel cell plant," *Fuel*, vol. 83, no. 14-15, pp. 2087–2094, 2004.

[11] G. Bizzarri, G. L. Morini, "Greenhouse gas reduction and primary energy savings via adoption of a fuel cell hybrid plant in a hospital," *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, no. 2-3, pp. 383–400, 2004.

[12] N. Sammes, R. Bove, K. Stahl, "Phosphoric acid fuel cells: Fundamentals and applications," *Current opinion in solid state and materials science*, vol. 8, no. 5, pp. 372–378, 2004.

[13] G. Bizzarri, "On the size effect in pafc grid-connected plant," *Applied thermal engineering*, vol. 26, no. 10, pp. 1001–1007, 2006.

[14] G. Bizzarri, G. L. Morini, "New technologies for an effective energy retrofit of hospitals," *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, no. 2-3, pp. 161–169, 2006.

[15] M. A. Darwish, "Building air conditioning system using fuel cell: Case study for kuwait," *Applied thermal engineering*, vol. 27, no. 17-18, pp. 2869–2876, 2007.

[16] H. Ito, "Economic and environmental assessment of phosphoric acid fuel cell-based combined heat and power system for an apartment complex," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 23, pp. 15 449–15 463, 2017.

[17] S. Acha *et al.*, "Fuel cells as combined heat and power systems in commercial buildings: A case study in the food-retail sector," *Energy*, vol. 206, p. 118 046, 2020.

[18] J. Liu, S.-C. Kim, K.-Y. Shin, "Feasibility study and economic analysis of a fuel-cell-based chp system for a comprehensive sports center with an indoor swimming pool," *Energies*, vol. 14, no. 20, p. 6625, 2021.

[19] L. Yuan-Hu, J. Kim, S. Lee, G. Kim, H. Han, "Efficiency improvement of a fuel cell cogeneration plant linked with district heating: Construction of a water condensation latent heat recovery system and analysis of real operational data," *Applied Thermal Engineering*, vol. 201, p. 117 754, 2022.

[20] I. Martínez Reverte, T. Gómez-Navarro, C. Sánchez-Díaz, C. Montagud Montalvá, "Evaluation of alternatives for energy supply from fuel cells in compact cities in the mediterranean climate; case study: City of valencia," *Energies*, vol. 15, no. 12, p. 4502, 2022.

[21] H. Park *et al.*, "Performance evaluation and economic feasibility of a pafc-based multi-energy hub system in south korea," *Energy*, p. 128 055, 2023.

[22] Y. Ma, G. G. Karady, A. Winston III, P. Gilbert, R. Hess, D. Pelley, "Economic feasibility prediction of the commercial fuel cells," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 2, pp. 422–430, 2009.

[23] S. Sevencan, T. Guan, G. Lindbergh, C. Lagergren, P. Alvfors, B. Ridell, "Fuel cell based cogeneration: Comparison of electricity production cost for swedish conditions," *International journal of hydrogen energy*, vol. 38, no. 10, pp. 3858–3864, 2013.

[24] D. Kim, J. Kim, C. Koo, T. Hong, "An economic and environmental assessment model for selecting the optimal implementation strategy of fuel cell systems—a focus on building energy policy," *Energies*, vol. 7, no. 8, pp. 5129–5150, 2014.

[25] S. Sevencan, G. Lindbergh, C. Lagergren, P. Alvfors, "Economic feasibility study of a fuel cell-based combined cooling, heating and power system for a data centre," *Energy and Buildings*, vol. 111, pp. 218–223, 2016.

[26] E. J. Naimaster IV, A. K. Sleiti, "Potential of sofc chp systems for energy-efficient commercial buildings," *Energy and Buildings*, vol. 61, pp. 153–160, 2013.

[27] J. M. P. Chen, M. Ni, "Economic analysis of a solid oxide fuel cell cogeneration/trigeneration system for hotels in hong kong," *Energy and buildings*, vol. 75, pp. 160–169, 2014.

[28] D. McLarty, J. Brouwer, C. Ainscough, "Economic analysis of fuel cell installations at commercial buildings including regional pricing and complementary technologies," *Energy and Buildings*, vol. 113, pp. 112–122, 2016.

[29] F. Accurso *et al.*, "Installation of fuel cell-based cogeneration systems in the commercial and retail sector: Assessment in the framework of the comsos project," *Energy Conversion and Management*, vol. 239, p. 114 202, 2021.

[30] P. Marocco, M. Gandiglio, M. Santarelli, "When sofc-based cogeneration systems become convenient? a cost-optimal analysis," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 8709–8721, 2022.

[31] S. V. Kanuri, S. Motupally, "Phosphoric acid fuel cells for stationary applications," in *Fuel Cells: Selected Entries from the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, Springer, 2012, pp. 369–389.

[32] N. H. Behling, *Fuel cells: current technology challenges and future research needs*. Newnes, 2012.

[33] F. H. Holcomb, M. J. Binder, W. R. Taylor, J. M. Torrey, J. F. Westerman, "Phosphoric acid fuel cells," 2000.

[34] I. Pilatowsky, R. Romero, C. Isaza, S. Gamboa, P. Sebastian, W. Rivera, *Cogeneration Fuel Cell-Sorption Air Conditioning Systems* (Green Energy and Technology). Springer London, 2011, isbn: 9781849960281. [Online]. Available: `https://books.google.com.tr/books?id=56bH4U-nJP0C`.

[35] R. R. Cavagrotti, *Phosphoric acid fuel cell power plants: environmental impacts of commercialization*. University of California, Los Angeles, 1982.

[36] İ. U. Başyazıcı, Ö. Ağra, "Ticari binalarda bileşik ısı güç sistemi olarak yakıt pili uygulaması – alışveriş merkezi örneği," *Tesisat Mühendisliği*, no. 197, 2023, issn: 1300-3399. [Online]. Available: `http://search/yayin/detay/1202115`.

[37] *Purecell model 400*, Product Data Application Guide, UTC Power, 2012.

[38] I. Staffell, "Fuel cells for domestic heat and power: Are they worth it?" Ph.D. dissertation, University of Birmingham, 2010.

[39] J. Warren, S. Das, W. Zhang, "Manufacturing process modeling of 100-400 kwe combined heat and power stationary fuel cell systems," in *International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology*, American Society of Mechanical Engineers, vol. 44823, 2012, pp. 25–34.

[40] R. Remick, D. Wheeler, "Molten carbonate and phosphoric acid stationary fuel cells: Overview and gap analysis," 2010.

[41] E. Martin, D. Papageorgopoulos, "Doe hydrogen and fuel cells program record," *US Departament of Energy, Tech. Rep*, 2015.

[42] K. Darrow, R. Tidball, J. Wang, A. Hampson, "Catalog of chp technologies; 2015," *US Environmental Protection Agency and the US Department of Energy: Washington, DC, USA*, p. 23, 2017.

[43] K. Anderson *et al.*, "The reopt web tool user manual," Technical report, National Renewable Energy Laboratory, Tech. Rep., 2023.

[44] V. Cigolotti, M. Genovese, "Stationary fuel cell applications: Current and future technologies-costs, performances, and potential", advanced fuel cells technology collaboration programme (afc tcp)-international energy agency (iea)," in *Advanced Fuel Cells Technology Collaboration Programme (AFC TCP)-International Energy Agency (IEA),* 2021.

[45] E. Weidner, R. Ortiz Cebolla, J. Davies, "Global deployment of large capacity stationary fuel cells," *Tech. Rep.*, p. 6, 2019.

[46] D. B. Crawley, C. S. Barnaby, "Weather and climate in building performance simulation," *Building performance simulation for design and operation*, pp. 191–220, 2019.

[47] S. Bhattacharyya, *Energy Economics: Concepts, Issues, Markets and Governance*. Springer London, 2011, isbn: 9780857292681. [Online]. Available: https://books.google.com.tr/books?id=PYXE-W78agEC.

[48] J. Aldersey-Williams, T. Rubert, "Levelised cost of energy–a theoretical justification and critical assessment," *Energy policy*, vol. 124, pp. 169–179, 2019.

[49] E. G. Sørhaug, "The potential for fuel cells to provide electricity and heat supply in norwegian buildings," M.S. thesis, NTNU, 2021.

[50] P. Konstantin, M. Konstantin, *Power and Energy Systems: Engineering Economics*. Springer, 2016.

[51] J. Kneifel, P. Lavappa, M. M. L. (U.S.), *Energy Price Indices and Discount Factors for Life-cycle Cost Analysis 2023: Annual Supplement to NIST Handbook 135* (NISTIR; NIST IR; NIST interagency report; NIST internal report). U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2023.

[52] H. I. Henderson Jr, B. Karambakkam, J. Boyer, R. Staudt, "An hourly building simulation model aimed at fuel cell applications," in *International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology*, vol. 42479, 2006, pp. 741–750.

[53] T. Vesanen, K. Klobut, J. Shemeikka, "Implementation of a fuel cell system model into building energy simulation software ida-ice," 2007.

[54] P. De Wilde, *Building performance analysis*. John Wiley & Sons, 2018.

[55] S. Chatterjee, A. S. Hadi, *Regression analysis by example*. John Wiley & Sons, 2013.

[56] A. Alin, "Minitab," *Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics*, vol. 2, no. 6, pp. 723–727, 2010.

[57] D. Hughes-Hallett *et al.*, *Calculus Single and Multivariable*. John Wiley & Sons, Incorporated, 2012, isbn: 9781118562406. [Online]. Available: https://books.google.com.tr/books?id=oT3PkwEACAAJ.

A ENERJİ MODELİ VISUAL BASIC KODLARI

A.1 Yakıt Pili Kısmi Verim Eğrisi Visual Basic Kodu

```
1
2  Attribute VB_Name = "FuelCell"
3  'Module for PAFC related modelling
4
5  Option Explicit
6
7
8  Function PAFC_electrical_output(Building_electrical_load,
       ↪ remaining_electrical_load, no_PAFCs, PAFC_rating,
       ↪ PAFC_switchover_duty)
9
10
11         If Building_electrical_load > (PAFC_rating *
               ↪ no_PAFCs) Then
12
13         Building_electrical_load = (PAFC_rating * no_PAFCs)
14
15         PAFC_electrical_output = Application.Min(
               ↪ remaining_electrical_load, Application.Max((
               ↪ Building_electrical_load / no_PAFCs), (
               ↪ PAFC_rating * PAFC_switchover_duty)))
16
17             If PAFC_electrical_output < 100 Then
18
19             PAFC_electrical_output = 0
20
21             End If
22
23         Else
24
25             PAFC_electrical_output = Application.Min(
                   ↪ remaining_electrical_load, Application.Max
                   ↪ ((Building_electrical_load / no_PAFCs), (
                   ↪ PAFC_rating * PAFC_switchover_duty)))
26
27             If PAFC_electrical_output < 100 Then
28
```

```
            PAFC_electrical_output = 0

            End If

        End If

End Function

Function PAFC_thermal_high_grade(PAFC_electrical_output)

        If PAFC_electrical_output = 0 Then

            PAFC_thermal_high_grade = 0

            Else

                    If PAFC_electrical_output < (225) Then

                    PAFC_thermal_high_grade = 0

                    Else

                    PAFC_thermal_high_grade = 1.03887 * (
                       ↪ PAFC_electrical_output) - 222.602

                    End If

        End If

End Function

Function PAFC_thermal_low_grade(PAFC_electrical_output)

        If PAFC_electrical_output = 0 Then

            PAFC_thermal_low_grade = 0

            Else

                    If PAFC_electrical_output < (225) Then

                    PAFC_thermal_low_grade = 0.60829 * (
                       ↪ PAFC_electrical_output) + 28.536

                    Else

                    PAFC_thermal_low_grade = 0.56897 * (
                       ↪ PAFC_electrical_output) + 34.198


                    End If
```

```
77
78          End If
79
80  End Function
81
82
83  Function PAFC_fuel_input(PAFC_electrical_output)
84
85          If PAFC_electrical_output = 0 Then
86
87              PAFC_fuel_input = 0
88
89              Else
90
91                      If PAFC_electrical_output < (225) Then
92
93                      PAFC_fuel_input = 0.1249 * (
                           ↪ PAFC_electrical_output) + 297.087
94
95                      Else
96
97                      PAFC_fuel_input = 2.9213 * (
                           ↪ PAFC_electrical_output) - 114.322
98
99
100                     End If
101
102         End If
103
104 End Function
105
106
107 Function PAFC_total_heat(PAFC_electrical_output)
108
109         If PAFC_electrical_output = 0 Then
110
111             PAFC_total_heat = 0
112
113             Else
114
115                     If PAFC_electrical_output < (225) Then
116
117                     PAFC_total_heat = 0.61738 * (
                           ↪ PAFC_electrical_output) + 27.26399
118
119                     Else
120
121                     PAFC_total_heat = 1.6117 * (
                           ↪ PAFC_electrical_output) - 195.103
122
123                     End If
```

```
124
125         End If
126
127 End Function
```

A.2 Kazan Kapasite Kontrolü Visual Basic Kodu

```
1
2 'Module for Boiler related modelling
3
4 Option Explicit
5
6 Function boiler_heating_output(Building_heating_load,
    ↪ remaining_heating_load, no_boilers, boiler_rating,
    ↪ boiler_switchover_duty)
7
8     If Building_heating_load > boiler_rating *
        ↪ boiler_switchover_duty Then
9
10        Building_heating_load = boiler_rating *
            ↪ boiler_switchover_duty
11
12        boiler_heating_output = Application.Min(
            ↪ remaining_heating_load, Application.Max((
            ↪ Building_heating_load / no_boilers), (
            ↪ boiler_rating * boiler_switchover_duty)))
13
14    Else
15
16        boiler_heating_output = Application.Min(
            ↪ remaining_heating_load, Application.Max((
            ↪ Building_heating_load / no_boilers), (
            ↪ boiler_rating * boiler_switchover_duty)))
17
18    End If
19
20 End Function
```

A.3 Soğutma Grubu Kapasite Kontrolü Visual Basic Kodu

```
1
2 'Module for Chiller related modelling
3
4 Option Explicit
5
6 Function Delta_T(inlet_temp, outlet_temp)
7
8     Dim max_temp
9     Dim min_temp
10
```

```
    max_temp = Application.Max(inlet_temp, outlet_temp)
    min_temp = Application.Min(inlet_temp, outlet_temp)
    Delta_T = max_temp - min_temp

End Function

Function circulation_flow(Load, Fluid_Heat_Capacity, density
    ↪ , inlet_temp, outlet_temp)

    Dim Delta_Temp

    Delta_Temp = Delta_T(inlet_temp, outlet_temp)

    circulation_flow = Load / Fluid_Heat_Capacity / density
       ↪ / Delta_Temp

End Function


Function chiller_cooling_output(Building_cooling_load,
    ↪ remaining_cooling_load, no_chillers, chiller_rating,
    ↪ chiller_switchover_duty)

    If Building_cooling_load > chiller_rating *
       ↪ chiller_switchover_duty Then

        Building_cooling_load = chiller_rating *
           ↪ chiller_switchover_duty

        chiller_cooling_output = Application.Min(
           ↪ remaining_cooling_load, Application.Max((
           ↪ Building_cooling_load / no_chillers), (
           ↪ chiller_rating * chiller_switchover_duty)))

    Else

        chiller_cooling_output = Application.Min(
           ↪ remaining_cooling_load, Application.Max((
           ↪ Building_cooling_load / no_chillers), (
           ↪ chiller_rating * chiller_switchover_duty)))

    End If

End Function
```

A.4 Isıl Depolama Tankı Visual Basic Kodu

```

'Module for Thermal Storage Modelling
Option Explicit

```

```
Function Thermal_store_energy_content(lower_temp,
    ↪ higher_temp, tank_size, tank_num)

    Dim higher_T
    Dim lower_T
    Dim enthalpy_higherTemp
    Dim enthalpy_lowerTemp
    Dim density_higherTemp
    Dim density_lowerTemp
    Dim energy_content_Water

    higher_T = Application.Max(lower_temp, higher_temp)
    lower_T = Application.Min(lower_temp, higher_temp)

    enthalpy_higherTemp = enthalpy_water(higher_T)
    enthalpy_lowerTemp = enthalpy_water(lower_T)
    density_higherTemp = density_water(higher_T)
    density_lowerTemp = density_water(lower_T)

    energy_content_Water = tank_num * ((density_lowerTemp +
        ↪ density_higherTemp) / 2) * tank_size / 1000 * (
        ↪ enthalpy_higherTemp - enthalpy_lowerTemp)

    Thermal_store_energy_content = energy_content_Water /
        ↪ 3600 'convert kJ to kWh

End Function

Function Thermal_store_balance(energy_in, energy_out,
    ↪ full_energy_content, last_energy_content, Optional
    ↪ time_step = 60, Optional tank_total_surface_area = 0,
    ↪ Optional tank_uValue = 0, Optional mean_temp = 0,
    ↪ Optional ext_temp = 0)

    Dim ratio

    'time_step default 1 hour,
    ratio = time_step / 60

    'optional inputs to factor in tank heat losses
    Thermal_store_balance = Application.Min(Application.Max
        ↪ (0, last_energy_content + (energy_in - energy_out
        ↪ - (tank_uValue * tank_total_surface_area * (
        ↪ mean_temp - ext_temp)) / 1000) * ratio),
        ↪ full_energy_content)

End Function


Function Thermal_store_balance_percent(energy_in, energy_out
    ↪ , full_energy_content, last_energy_content)
```

```
43
44      Dim gauge
45
46      gauge = Thermal_store_balance(energy_in, energy_out,
           ↪ full_energy_content, last_energy_content)
47      Thermal_store_balance_percent = gauge /
           ↪ full_energy_content
48
49  End Function
50
51  Function Thermal_store_status(energy_in, energy_out,
       ↪ full_energy_content, last_energy_content)
52
53      Dim gauge
54
55      gauge = Thermal_store_balance(energy_in, energy_out,
           ↪ full_energy_content, last_energy_content)
56
57      Select Case gauge
58
59          Case Is = full_energy_content
60
61              Thermal_store_status = "Fully Charged"
62
63          Case Is = 0
64
65              Thermal_store_status = "Fully Discharged"
66
67          Case Is < last_energy_content
68
69              Thermal_store_status = "Discharging"
70
71          Case Is > last_energy_content
72
73              Thermal_store_status = "Charging"
74
75          Case Is = last_energy_content
76
77              Thermal_store_status = "No Change"
78
79      End Select
80
81  End Function
82
83  Function Thermal_store_heat_flow(energy_in, energy_out,
       ↪ full_energy_content, last_energy_content)
84
85      Dim gauge
86
87      gauge = Thermal_store_balance(energy_in, energy_out,
           ↪ full_energy_content, last_energy_content)
```

```
88
89      Thermal_store_heat_flow = -(last_energy_content - gauge)
90
91  End Function
```

A.5 İskontolu Geri Ödeme Hesabı Visual Basic Kodu

```
1
2   Option Base 1
3
4   Function payback(series)
5
6   Dim cum_series(1000), adj_series(1000) As Single
        ↪                          ' dimesion of cumulative cash
7
8   Count = 0
9
10  For i = 1 To 1000
        ↪                                                    '
        ↪ Adjustment for entire row
11
12    If i > series.Count Then Exit For
13
14    If WorksheetFunction.IsNumber(series(i)) = True Then
          ↪                    ' Only include numbers in new array
15        Count = Count + 1
16        adj_series(Count) = series(i)
17    End If
18  Next i
19
20  tot_number = Count
21
22  counter = 0
23  For i = 1 To tot_number
        ↪                                          ' loop around
        ↪ cash flows
24
25      If (i = 1) Then cum_series(i) = adj_series(i)
            ↪ ' cumulative cash flow
26
27      counter = counter + 1        ' count if the cash is
            ↪ positive
28      If (i > 1) Then
29          cum_series(i) = cum_series(i - 1) + adj_series(i)
                ↪ ' cumulative cash flow
30      End If
31
32      If (cum_series(i) > 0) Then                          '
            ↪ test when turns to positive
33          GoTo finished:
34      End If
```

```
Next i
i = num

finished:                                                    '
    ↪ compute payback
If ((cum_series(i) - cum_series(i - 1) <> 0)) Then
    factor = -cum_series(i - 1) / (cum_series(i) -
       ↪ cum_series(i - 1))      ' Compute the factor to add
       ↪  to the payback for pct of yr
Else
    factor = 0
End If
If (i < series.Count) Then
    payback = factor + counter - 2
Else
    payback = num
End If

End Function

Function dpayback(d_rate, series)

Dim cum_series(1000), adj_series(1000), dfactor(1000) As
    ↪ Single                          ' dimesion of cumulative
    ↪ cash

Count = 0

For i = 1 To 1000
    ↪                                                        '
    ↪ Adjustment for entire row

  If i > series.Count Then Exit For

  If WorksheetFunction.IsNumber(series(i)) = True Then
     ↪                  ' Only include numbers in new array
     Count = Count + 1
     adj_series(Count) = series(i)
  End If
Next i

tot_number = Count

counter = 0
For i = 1 To tot_number
    ↪                                          ' loop around
    ↪ cash flows

    dfactor(i) = 1 / ((1 + d_rate) ^ counter)

    adj_series(i) = adj_series(i) * dfactor(i)
```

```
76
77      If (i = 1) Then cum_series(i) = adj_series(i)
           ↪ ' cumulative cash flow
78
79      counter = counter + 1        ' count if the cash is
           ↪ positive
80      If (i > 1) Then
81          cum_series(i) = cum_series(i - 1) + adj_series(i)
               ↪ ' cumulative cash flow
82      End If
83
84      If (cum_series(i) > 0) Then                          '
           ↪ test when turns to positive
85          GoTo finished:
86      End If
87  Next i
88  i = num
89
90  finished:                                                '
       ↪ compute payback
91  If ((cum_series(i) - cum_series(i - 1) <> 0)) Then
92      factor = -cum_series(i - 1) / (cum_series(i) -
           ↪ cum_series(i - 1))      ' Compute the factor to add
           ↪  to the payback for pct of yr
93  Else
94      factor = 0
95  End If
96  If (i < series.Count) Then
97      dpayback = factor + counter - 2
98  Else
99      dpayback = num
100 End If
101
102 End Function
103
104
105 Function dpayback_old(d_rate, series)
106
107 ' Dim series As Variant
108 Dim num As Single
109 num = Application.CountA(series)
110 ReDim cum_series(num)
111 ReDim dfactor(num)
112
113 counter = 0
114
115 For i = 1 To num
116
117 If (series(i) > 0) Then counter = counter + 1
118
119  dfactor(i) = 1 / ((1 + d_rate) ^ counter)
```

```
120
121 If (i > 1) Then
122     cum_series(i) = cum_series(i - 1) + series(i) * dfactor(
        ↪ i)
123 End If
124
125 If (i = 1) Then cum_series(i) = series(i)
126
127 If (cum_series(i) > 0) Then
128   GoTo finished:
129 End If
130
131 Next i
132
133 i = num
134
135 finished:
136
137 If ((cum_series(i) - cum_series(i - 1)) <> 0) Then
138     factor = -cum_series(i - 1) / (cum_series(i) -
        ↪ cum_series(i - 1))
139 Else
140     factor = 0
141 End If
142
143 If (i < num) Then
144     dpayback = counter + factor - 1
145 Else
146     dpayback = num + 1
147 End If
148
149 End Function
```

A.6 İklim Verisi Kopyalama Visual Basic Kodu

```
1
2
3 Sub VeriKopyala()
4     Dim TableName As String
5     Dim SourceTable As Range
6     Dim BlankTable As Range
7     Dim ws As Worksheet
8
9     ' Specifty active(worksheet)
10    Set ws = ActiveSheet
11
12    ' Selected city
13    TableName = ws.Range("B1").Value ' Select city in cell
        ↪ A1
14
15    Select Case TableName
```

```
16          Case "ADANA"
17              Set SourceTable = ws.Range("T20:Z8779 ") ' Adana
18          Case "IZMIR"
19              Set SourceTable = ws.Range("AB20:AH8779") '
                    ↪ IZMIR
20          Case "DIYARBAKIR"
21              Set SourceTable = ws.Range("AJ20:AP8779") '
                    ↪ DIYARBAKIR
22          Case "ISTANBUL"
23              Set SourceTable = ws.Range("AR20:AX8779") '
                    ↪ ISTANBUL
24          Case "TRABZON"
25              Set SourceTable = ws.Range("AZ20:BF8779") '
                    ↪ TRABZON
26          Case "ANKARA"
27              Set SourceTable = ws.Range("BH20:BN8779") '
                    ↪ ANKARA
28          Case "ERZINCAN"
29              Set SourceTable = ws.Range("BP20:BV8779") '
                    ↪ ERZINCAN
30          Case "ERZURUM"
31              Set SourceTable = ws.Range("BX20:CD8779") '
                    ↪ ERZURUM
32          Case "ANTALYA"
33              Set SourceTable = ws.Range("CF20:CL8779") '
                    ↪ ANTALYA
34
35          Case Else
36              MsgBox "CITY NOT FOUND."
37              Exit Sub
38      End Select
39
40      Set BlankTable = ws.Range("F20") ' The cell where data
            ↪ will be copied
41
42
43      If Not SourceTable Is Nothing And TableName <> "" Then
44
45          SourceTable.Copy BlankTable
46          MsgBox TableName & "  DATA COPIED"
47      Else
48          MsgBox "TABLE NOT FOUND"
49      End If
50  End Sub
```

B
TİPİK ENERJİ MODELİ ÇIKTILARI

B.1 Enerji Modeli Yakıt Pili Hesap Modülü - Kış İşletmesi

			Bina Enerji Talebi										
Ay	Gün	Saat	Bina Elektrik Talebi	Bina Soğutma Talebi	Bina Isıtma Talebi	Absorpsiyonlu Soğutma Isıtma Talebi	Toplam Yüksek Sıcaklıkta Isı Talebi	AVM Klima Santralleri Isıtma Yükü	Isı Depolama Mevcut Kapasite	Isı Depolama Mevcut Kapasite %	Şarj / Deşarf	Isıl Depolama Deşarj Miktarı
Oca.	1	-	1.138 kW	0 kW	934 kW	0 kW	934 kW	0 kW	394 kWh	34,7%	Desarj Oluyor	-741 kWh
Oca.	1	1	1.138 kW	0 kW	766 kW	0 kW	766 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	-394 kWh
Oca.	1	2	1.118 kW	0 kW	997 kW	0 kW	997 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Oca.	1	3	1.118 kW	0 kW	773 kW	0 kW	773 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Oca.	1	4	1.076 kW	0 kW	727 kW	0 kW	727 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Oca.	1	5	1.076 kW	0 kW	654 kW	0 kW	654 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Oca.	1	6	1.097 kW	0 kW	1.194 kW	0 kW	1.194 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Oca.	1	7	1.242 kW	0 kW	2.829 kW	0 kW	2.829 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Oca.	1	8	1.346 kW	0 kW	3.649 kW	0 kW	3.649 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Oca.	1	9	1.553 kW	0 kW	4.434 kW	0 kW	3.187 kW	1.247 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Oca.	1	10	1.925 kW	0 kW	5.016 kW	0 kW	3.517 kW	1.499 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Oca.	1	11	2.297 kW	0 kW	7.199 kW	0 kW	5.109 kW	2.090 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Oca.	1	12	3.478 kW	0 kW	7.953 kW	0 kW	5.863 kW	2.090 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Oca.	1	13	4.946 kW	0 kW	7.161 kW	0 kW	5.071 kW	2.090 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Oca.	1	14	5.031 kW	0 kW	8.000 kW	0 kW	5.910 kW	2.090 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Oca.	1	15	5.113 kW	0 kW	5.968 kW	0 kW	3.878 kW	2.090 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Oca.	1	16	5.154 kW	0 kW	5.814 kW	0 kW	3.724 kW	2.090 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Oca.	1	17	5.217 kW	0 kW	5.817 kW	0 kW	3.727 kW	2.090 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Oca.	1	18	5.258 kW	0 kW	5.591 kW	0 kW	3.501 kW	2.090 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Oca.	1	19	5.237 kW	0 kW	5.491 kW	0 kW	3.401 kW	2.090 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Oca.	1	20	5.092 kW	0 kW	6.305 kW	0 kW	4.933 kW	1.372 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Oca.	1	21	4.802 kW	0 kW	3.750 kW	0 kW	3.750 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Oca.	1	22	2.443 kW	0 kW	2.160 kW	0 kW	2.160 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Oca.	1	23	1.615 kW	0 kW	824 kW	0 kW	824 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh

Şekil B.1 Tipik kış günü bina enerji talebi

Elektriksel Performans										
Yakıt Pili 1 Anlık Yük	Yakıt Pili 2 Anlık Yük	Yakıt Pili 3 Anlık Yük	Yakıt Pili 4 Anlık Yük	Yakıt Pili Toplam Yük	Çalışan Yakıt Pili Sayısı	Karşılanamayan Elektrik Yükü	Parasitik Yük Yakıt Pili 1	Parasitik Yük Yakıt Pili 2	Parasitik Yük Yakıt Pili 3	Parasitik Yük Yakıt Pili 4
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	738 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	738 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	718 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	718 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	676 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	676 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	697 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	842 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	946 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	1.153 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	1.525 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	1.897 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	3.078 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	4.546 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	4.631 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	4.713 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	4.754 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	4.817 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	4.858 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	4.837 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	4.692 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	4.402 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	2.043 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	1.215 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW

Şekil B.2 Tipik kış günü yakıt pili elektrik üretimi

Yüksek Dereceli Isı Geri Kazanımı					Düşük Dereceli Isı Geri Kazanımı				
Yakıt Pili 1 YD Isı Geri Kazanımı	Yakıt Pili 2 YD Isı Geri Kazanımı	Yakıt Pili 3 YD Isı Geri Kazanımı	Yakıt Pili 4 YD Isı Geri Kazanımı	Toplam Yüksek Dereceli Isı Geri Kazanımı	Yakıt Pili 1 DD Isı Geri Kazanımı	Yakıt Pili 2 DD Isı Geri Kazanımı	Yakıt Pili 3 DD Isı Geri Kazanımı	Yakıt Pili 4 DD Isı Geri Kazanımı	Toplam Düşük Dereceli Isı Geri Kazanımı
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW

Şekil B.3 Tipik kış günü ısı geri kazanım potansiyeli

Doğalgaz Tüketimi				Absorpsiyonlu Soğutma Performansı						
Yakıt Pili 1 Doğalgaz Tüketimi	Yakıt Pili 2 Doğalgaz Tüketimi	Yakıt Pili 3 Doğalgaz Tüketimi	Yakıt Pili 4 Doğalgaz Tüketimi	Toplam Doğalgaz Tüketimi	Absorpsiyonlu Soğutma Yükü	Absorpsiyonlu Soğutma Yükü %	Absorpsiyonlu Soğutma CoP	Absorbet Pompası	Akışkan Pompası	Karşılanamayan Soğutma Yükü
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	0 kW	0%	-	0 kW	0 kW	0 kW

Şekil B.4 Doğal gaz tüketimi ve absorpsiyonlu soğutma performansı

Toplam Isı Geri Kazanımı Performansı								
Absorbet Pompası	Akışkan Pompası	Karşılanamayan Soğutma Yükü	Yüksek Dereceli Isı Geri Kazanımı	Düşük Dereceli Isı geri kazanımı	Karşılanamayan Bina Isıtma Yükü	Isıl Verim	Elektriksel Verim	Toplam Verim	Ziyan Olan Atık Isı
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	0 kW	346 kW	18,3%	37,9%	56,2%	262 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	0 kW	574 kW	18,3%	37,9%	56,2%	262 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	0 kW	804 kW	18,3%	37,9%	56,2%	262 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	0 kW	580 kW	18,3%	37,9%	56,2%	262 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	0 kW	534 kW	18,3%	37,9%	56,2%	262 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	0 kW	461 kW	18,3%	37,9%	56,2%	262 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	0 kW	1.001 kW	18,3%	37,9%	56,2%	262 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	0 kW	2.636 kW	18,3%	37,9%	56,2%	262 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	0 kW	3.456 kW	18,3%	37,9%	56,2%	262 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	3.979 kW	43,1%	37,9%	81,1%	0 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	4.561 kW	43,1%	37,9%	81,1%	0 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	6.745 kW	43,1%	37,9%	81,1%	0 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	7.498 kW	43,1%	37,9%	81,1%	0 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	6.706 kW	43,1%	37,9%	81,1%	0 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	7.545 kW	43,1%	37,9%	81,1%	0 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	5.514 kW	43,1%	37,9%	81,1%	0 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	5.359 kW	43,1%	37,9%	81,1%	0 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	5.363 kW	43,1%	37,9%	81,1%	0 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	5.137 kW	43,1%	37,9%	81,1%	0 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	5.037 kW	43,1%	37,9%	81,1%	0 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	5.850 kW	43,1%	37,9%	81,1%	0 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	0 kW	3.557 kW	18,3%	37,9%	56,2%	262 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	0 kW	1.967 kW	18,3%	37,9%	56,2%	262 kW
0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	0 kW	631 kW	18,3%	37,9%	56,2%	262 kW

Şekil B.5 Tipik kış günü ısı geri kazanım performansı

B.2 Enerji Modeli Yakıt Pili Hesap Modülü - Yaz İşletmesi

			Bina Enerji Talebi									
Ay	Gün	Saat	Bina Elektrik Talebi	Bina Soğutma Talebi	Bina Isıtma Talebi	Absorpsiyonlu Soğutma Isıtma Talebi	Toplam Yüksek Sıcaklıkta Isı Talebi	AVM Klima Santralleri Isıtma Yükü	Isı Depolama Mevcut Kapasite	Isı Depolama Mevcut Kapasite %	Şarj / Deşarf	Isıl Depolama Deşarj Miktarı
Ağus.	213	1	1.675 kW	371 kW	255 kW	173 kW	428 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	2	1.594 kW	290 kW	255 kW	173 kW	428 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	3	1.531 kW	178 kW	255 kW	173 kW	428 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	4	1.347 kW	180 kW	255 kW	173 kW	428 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	5	1.304 kW	149 kW	255 kW	173 kW	428 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	6	1.615 kW	639 kW	255 kW	173 kW	428 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	7	2.545 kW	1.589 kW	255 kW	173 kW	428 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	8	3.250 kW	2.255 kW	255 kW	173 kW	428 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	9	5.011 kW	2.954 kW	255 kW	180 kW	435 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	10	6.666 kW	3.568 kW	255 kW	166 kW	421 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	11	6.790 kW	4.932 kW	255 kW	173 kW	428 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	12	6.790 kW	5.595 kW	255 kW	173 kW	428 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	13	6.893 kW	5.434 kW	255 kW	166 kW	421 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	14	7.224 kW	6.825 kW	255 kW	180 kW	435 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	15	7.409 kW	4.759 kW	255 kW	180 kW	435 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	16	7.267 kW	4.545 kW	255 kW	173 kW	428 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	17	7.037 kW	4.362 kW	255 kW	166 kW	421 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	18	6.913 kW	3.998 kW	255 kW	166 kW	421 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	19	6.749 kW	3.440 kW	255 kW	166 kW	421 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	20	6.562 kW	2.940 kW	255 kW	166 kW	421 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	21	5.817 kW	1.728 kW	255 kW	166 kW	421 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	22	2.959 kW	1.224 kW	255 kW	166 kW	421 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	23	1.905 kW	454 kW	255 kW	173 kW	428 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh
Ağus.	213	-	1.718 kW	438 kW	255 kW	173 kW	428 kW	0 kW	0 kWh	0,0%	Tamamen Bos	0 kWh

Şekil B.6 Tipik yaz günü bina enerji talebi

Elektriksel Performans											
Yakıt Pili 1 Anlık Yük	Yakıt Pili 2 Anlık Yük	Yakıt Pili 3 Anlık Yük	Yakıt Pili 4 Anlık Yük	Yakıt Pili Toplam Yük	Çalışan Yakıt Pili Sayısı	Karşılanamayan Elektrik Yükü	Parasitik Yük Yakıt Pili 1	Parasitik Yük Yakıt Pili 2	Parasitik Yük Yakıt Pili 3	Parasitik Yük Yakıt Pili 4
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	1.275 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	1.194 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	1.131 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	947 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	904 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	1.215 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	2.145 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	2.850 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	4.611 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	6.266 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	6.390 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	6.390 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	6.493 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	6.824 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	7.009 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	6.867 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	6.637 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	6.513 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	6.349 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	6.162 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	5.417 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	2.559 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	1.505 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	400 kW	1	1.318 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW

Şekil B.7 Tipik yaz günü yakıt pili elektrik üretimi

Yüksek Dereceli Isı Geri Kazanımı					Düşük Dereceli Isı Geri Kazanımı				
Yakıt Pili 1 YD Isı Geri Kazanımı	Yakıt Pili 2 YD Isı Geri Kazanımı	Yakıt Pili 3 YD Isı Geri Kazanımı	Yakıt Pili 4 YD Isı Geri Kazanımı	Toplam Yüksek Dereceli Isı Geri Kazanımı	Yakıt Pili 1 DD Isı Geri Kazanımı	Yakıt Pili 2 DD Isı Geri Kazanımı	Yakıt Pili 3 DD Isı Geri Kazanımı	Yakıt Pili 4 DD Isı Geri Kazanımı	Toplam Düşük Dereceli Isı Geri Kazanımı
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW
193 kW	0 kW	0 kW	0 kW	193 kW	262 kW	0 kW	0 kW	0 kW	262 kW

Şekil B.8 Tipik yaz günü ısı geri kazanımı potansiyeli

Doğalgaz Tüketimi				Absorpsiyonlu Soğutma Performansı						
Yakıt Pili 1 Doğalgaz Tüketimi	Yakıt Pili 2 Doğalgaz Tüketimi	Yakıt Pili 3 Doğalgaz Tüketimi	Yakıt Pili 4 Doğalgaz Tüketimi	Toplam Doğalgaz Tüketimi	Absorpsiyonlu Soğutma Yükü	Absorpsiyonlu Soğutma Yükü %	Absorpsiyonlu Soğutma CoP	Absorbet Pompası	Akışkan Pompası	Karşılanamayan Soğutma Yükü
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,8264	2 kW	1 kW	228 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,8264	2 kW	1 kW	147 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,8264	2 kW	1 kW	36 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,8264	2 kW	1 kW	37 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,8264	2 kW	1 kW	6 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,8264	2 kW	1 kW	497 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,8264	2 kW	1 kW	1.447 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,8264	2 kW	1 kW	2.112 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,7937	2 kW	1 kW	2.811 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,8576	2 kW	1 kW	3.425 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,8264	2 kW	1 kW	4.790 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,8264	2 kW	1 kW	5.453 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,8576	2 kW	1 kW	5.291 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,7937	2 kW	1 kW	6.682 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,7937	2 kW	1 kW	4.616 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,8264	2 kW	1 kW	4.402 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,8576	2 kW	1 kW	4.220 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,8576	2 kW	1 kW	3.855 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,8576	2 kW	1 kW	3.298 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,8576	2 kW	1 kW	2.797 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,8576	2 kW	1 kW	1.585 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,8576	2 kW	1 kW	1.081 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,8264	2 kW	1 kW	311 kW
1.054 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1.054 kW	143 kW	100%	0,8264	2 kW	1 kW	296 kW

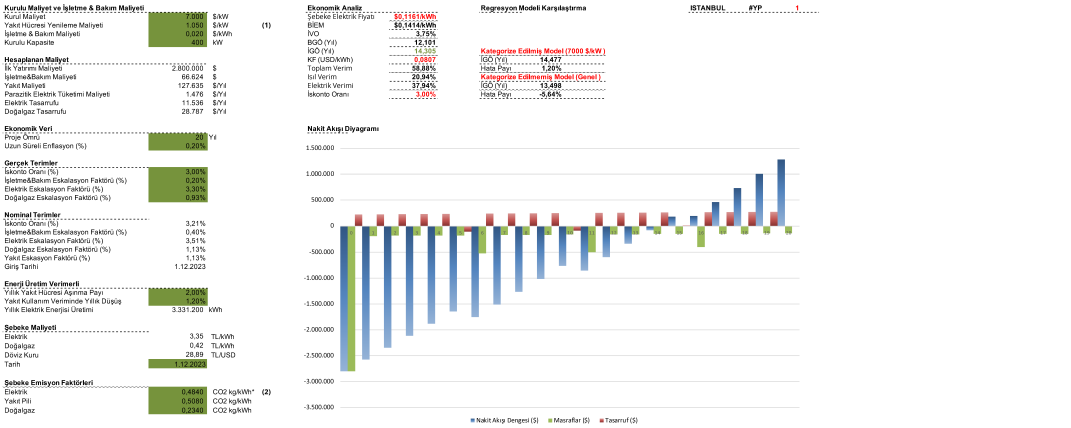
Şekil B.9 Doğal gaz tüketimi ve absorpsiyonlu soğutma performansı

Toplam Isı Geri Kazanımı Performansı									
Absorbet Pompası	Akışkan Pompası	Karşılanamayan Soğutma Yükü	Yüksek Dereceli Isı Geri Kazanımı	Düşük Dereceli Isı geri kazanımı	Karşılanamayan Bina Isıtma Yükü	Isıl Verim	Elektriksel Verim	Toplam Verim	Ziyan Olan Atık Isı
2 kW	1 kW	228 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	147 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	36 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	37 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	6 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	497 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	1.447 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	2.112 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	2.811 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	3.425 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	4.790 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	5.453 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	5.291 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	6.682 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	4.616 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	4.402 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	4.220 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	3.855 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	3.298 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	2.797 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	1.585 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	1.081 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	311 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**
2 kW	1 kW	296 kW	193 kW	0 kW	**62 kW**	18,3%	37,9%	56,2%	**262 kW**

Şekil B.10 Tipik yaz günü ısı geri kazanım performansı

C
TİPİK EKONOMİK ANALİZ ÇIKTILARI

C.1 Yakıt Pilli Senaryo 01 Ekonomik Analiz Çıktısı



Kurulu Maliyet ve İşletme & Bakım Maliyeti

Kurul Maliyet	2.000	$/kW	
Yakıt Hücresi Yenileme Maliyeti	1.050	$/kW	(1)
İşletme & Bakım Maliyeti	0.020	$/kWh	
Kurulu Kapasite	400	kW	

Hesaplanan Maliyet

İlk Yatırım Maliyeti	2.800.000	$
İşletme&Bakım Maliyeti	66.624	$
Yakıt Maliyeti	127.635	$/Yıl
Parazitik Elektrik Tüketimi Maliyeti	1.476	$/Yıl
Elektrik Tasarrufu	11.536	$/Yıl
Doğalgaz Tasarrufu	28.787	$/Yıl

Ekonomik Veri

Proje Ömrü	20	Yıl
Uzun Süreli Enflasyon (%)	0.20%	

Gerçek Terimler

İskonto Oranı (%)	3.05%
İşletme&Bakım Eskalasyon Faktörü (%)	0.20%
Elektrik Eskalasyon Faktörü (%)	3.30%
Doğalgaz Eskalasyon Faktörü (%)	0.93%

Nominal Terimler

İskonto Oranı (%)	3,21%
İşletme&Bakım Eskalasyon Faktörü (%)	0,40%
Elektrik Eskalasyon Faktörü (%)	3,51%
Doğalgaz Eskalasyon Faktörü (%)	1,13%
Yakıt Eskasyon Faktörü (%)	1,13%
Giriş Tarihi	1.12.2023

Enerji Üretim Verimerli

Yıllık Yakıt Hücresi Aşınma Payı	2.00%	
Yakıt Kullanım Verimında Yıllık Düşüş	1.20%	
Yıllık Elektrik Enerjisi Üretimi	3.331.200	kWh

Şebeke Maliyeti

Elektrik	3,35	TL/kWh
Doğalgaz	0,42	TL/kWh
Döviz Kuru	28,89	TL/USD
Tarih	1.12.2023	

Şebeke Emisyon Faktörleri

Elektrik	0.4640	CO2 kg/kWh*	(2)
Yakıt Pili	0.5080	CO2 kg/kWh	
Doğalgaz	0.2340	CO2 kg/kWh	

Ekonomik Analiz

Şebeke Elektrik Fiyatı	$0,1161/kWh
BİEM	$0,1414/kWh
IVO	3,75%
BGO (Yıl)	12,101
İGÖ (Yıl)	14,305
KF (USD/kWh)	0,0807
Toplam Verim	58,88%
Isıl Verim	20,94%
Elektrik Verimi	37,94%
İskonto Oranı	3,05%

Regresyon Modeli Karşılaştırma — ISTANBUL — #YP 1

Kategorize Edilmiş Model (7000 $/kW)	
İGÖ (Yıl)	14,477
Hata Payı	1,20%
Kategorize Edilmemiş Model (Genel)	
İGÖ (Yıl)	13,498
Hata Payı	5,64%

Nakit Akışı Diyagramı

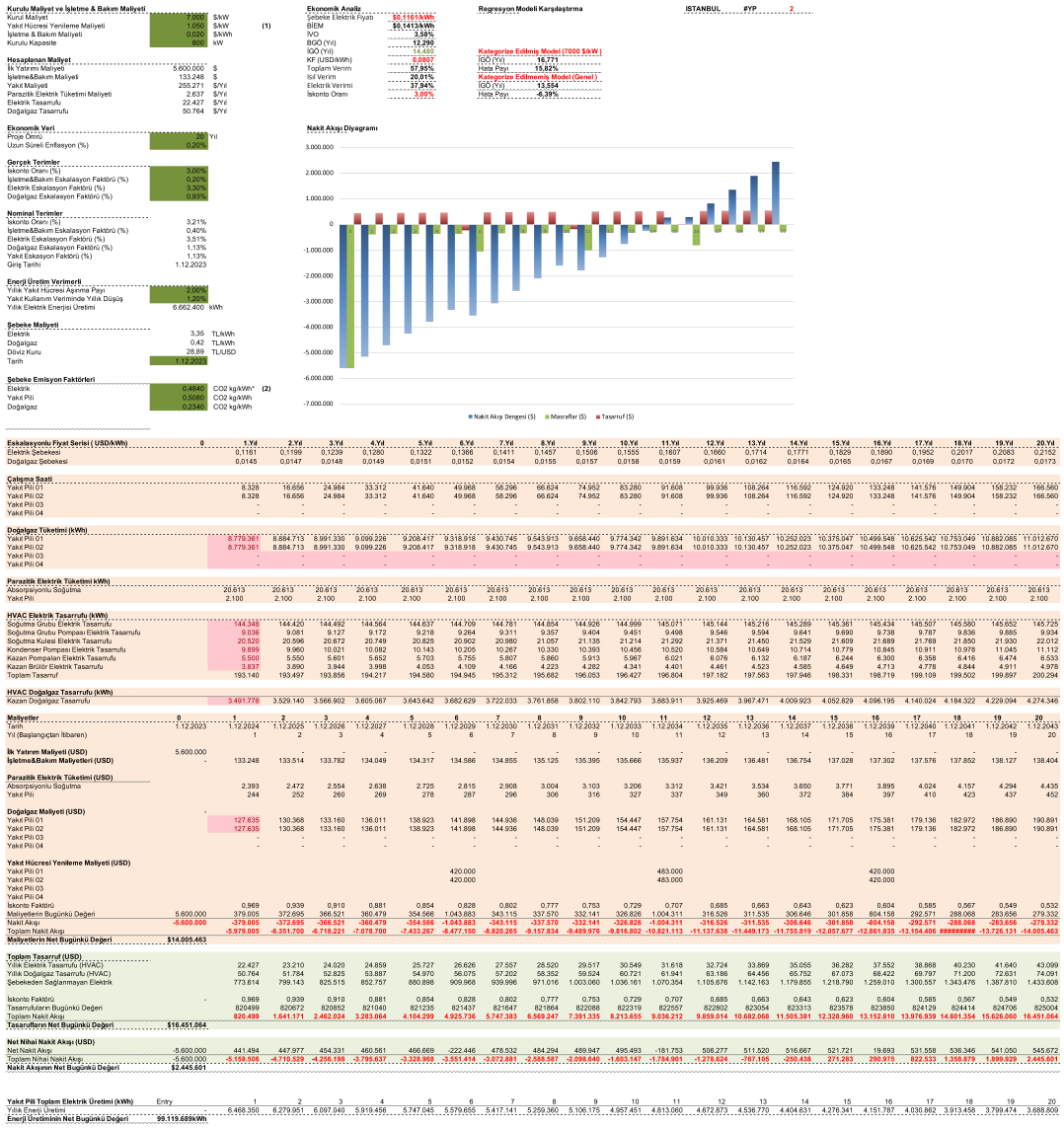
Eskalasyonlu Fiyat Serisi (USD/kWh)	0	1.Yıl	2.Yıl	3.Yıl	4.Yıl	5.Yıl	6.Yıl	7.Yıl	8.Yıl	9.Yıl	10.Yıl	11.Yıl	12.Yıl	13.Yıl	14.Yıl	15.Yıl	16.Yıl	17.Yıl	18.Yıl	19.Yıl	20.Yıl
Elektrik Şebekesi		0,1161	0,1199	0,1238	0,1280	0,1322	0,1366	0,1411	0,1457	0,1506	0,1555	0,1607	0,1660	0,1714	0,1771	0,1829	0,1890	0,1952	0,2017	0,2083	0,2152
Doğalgaz Şebekesi		0,0145	0,0147	0,0148	0,0149	0,0151	0,0152	0,0154	0,0155	0,0157	0,0158	0,0159	0,0161	0,0162	0,0164	0,0165	0,0167	0,0169	0,0170	0,0172	0,0173
Çalışma Saati																					
Yakıt Pili 01		8.328	16.656	24.984	33.312	41.640	49.968	58.296	66.624	74.952	83.280	91.608	99.936	108.264	116.592	124.920	133.248	141.576	149.904	158.232	166.560
Yakıt Pili 02		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yakıt Pili 03		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yakıt Pili 04		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Doğalgaz Tüketimi (kWh)																					
Yakıt Pili 01		8.779.361	8.884.713	8.991.330	9.099.226	9.208.417	9.318.918	9.430.745	9.543.913	9.658.440	9.774.342	9.891.634	10.010.333	10.130.457	10.252.023	10.375.047	10.499.548	10.625.542	10.753.049	10.882.085	11.012.670
Yakıt Pili 02		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yakıt Pili 03		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yakıt Pili 04		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Parazitik Elektrik Tüketimi kWh)																					
Absorpsiyonlu Soğutma		10.761	10.761	10.761	10.761	10.761	10.761	10.761	10.761	10.761	10.761	10.761	10.761	10.761	10.761	10.761	10.761	10.761	10.761	10.761	10.761
Yakıt Pili		1.950	1.950	1.950	1.950	1.950	1.950	1.950	1.950	1.950	1.950	1.950	1.950	1.950	1.950	1.950	1.950	1.950	1.950	1.950	1.950
HVAC Elektrik Tasarrufu (kWh)																					
Soğutma Grubu Elektrik Tasarrufu		79.755	79.795	79.834	79.874	79.914	79.954	79.994	80.034	80.074	80.114	80.154	80.194	80.235	80.275	80.315	80.355	80.395	80.435	80.476	80.516
Soğutma Grubu Pompası Elektrik Tasarrufu		3.591	3.609	3.627	3.645	3.663	3.681	3.700	3.718	3.737	3.756	3.774	3.793	3.812	3.831	3.850	3.870	3.889	3.908	3.928	3.948
Soğutma Kulesi Elektrik Tasarrufu		9.930	9.967	10.004	10.041	10.078	10.115	10.152	10.190	10.228	10.266	10.304	10.342	10.380	10.418	10.457	10.496	10.534	10.573	10.613	10.652
Kondenser Pompası Elektrik Tasarrufu		3.922	3.946	3.970	3.994	4.019	4.043	4.068	4.093	4.118	4.143	4.168	4.193	4.219	4.245	4.271	4.297	4.323	4.349	4.376	4.402
Kazan Pompası Elektrik Tasarrufu		577	582	588	593	598	604	609	615	620	626	632	637	643	649	655	661	667	673	679	685
Kazan Brülör Elektrik Tasarrufu		1.576	1.598	1.620	1.643	1.665	1.688	1.712	1.735	1.759	1.783	1.808	1.833	1.858	1.884	1.910	1.936	1.963	1.990	2.018	2.045
Toplam Tasarruf		99.351	99.496	99.643	99.790	99.937	100.086	100.235	100.385	100.536	100.688	100.840	100.993	101.147	101.302	101.458	101.614	101.771	101.930	102.089	102.248
HVAC Doğalgaz Tasarrufu (kWh)																					
Kazan Doğalgaz Tasarrufu		1.980.075	2.001.262	2.022.676	2.044.318	2.066.193	2.088.301	2.110.646	2.133.230	2.156.055	2.179.125	2.202.442	2.226.008	2.249.826	2.273.899	2.298.230	2.322.821	2.347.675	2.372.795	2.398.184	2.423.845

Maliyetler	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tarih		1.12.2024	1.12.2025	1.12.2026	1.12.2027	1.12.2028	1.12.2029	1.12.2030	1.12.2031	1.12.2032	1.12.2033	1.12.2034	1.12.2035	1.12.2036	1.12.2037	1.12.2038	1.12.2039	1.12.2040	1.12.2041	1.12.2042	1.12.2043
Yıl (Başlangıçtan İtibaren)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
İlk Yatırım Maliyeti (USD)	2.800.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
İşletme&Bakım Maliyetleri (USD)	-	66.624	66.757	66.891	67.025	67.159	67.293	67.427	67.562	67.697	67.833	67.969	68.104	68.241	68.377	68.514	68.651	68.788	68.926	69.064	69.202
Parazitik Elektrik Tüketimi (USD)																					
Absorpsiyonlu Soğutma		1.250	1.291	1.333	1.377	1.423	1.470	1.518	1.568	1.620	1.674	1.729	1.786	1.845	1.906	1.969	2.034	2.101	2.170	2.242	2.316
Yakıt Pili		226	234	242	250	258	266	275	284	294	303	313	324	334	345	357	368	381	393	406	420
Doğalgaz Maliyeti (USD)	-																				
Yakıt Pili 01		127.635	130.368	133.160	136.011	138.923	141.898	144.936	148.039	151.209	154.447	157.754	161.131	164.581	168.105	171.705	175.381	179.136	182.972	186.890	190.891
Yakıt Pili 02		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yakıt Pili 03		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yakıt Pili 04		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yakıt Hücresi Yenileme Maliyeti (USD)																					
Yakıt Pili 01							420.000					483.000					420.000				
Yakıt Pili 02																					
Yakıt Pili 03																					
Yakıt Pili 04																					
İskonto Faktörü		0,969	0,939	0,910	0,881	0,854	0,828	0,802	0,777	0,753	0,729	0,707	0,685	0,663	0,643	0,623	0,604	0,585	0,567	0,549	0,532
Maliyetlerin Bugünkü Değeri	2.800.000	189.655	186.500	183.413	180.392	177.436	522.095	171.711	168.938	166.224	163.567	502.309	158.417	155.921	153.477	151.083	402.233	146.440	144.189	141.983	139.821
Nakit Akışı	-2.800.000	-189.655	-186.500	-183.413	-180.392	-177.436	-522.095	-171.711	-168.938	-166.224	-163.567	-502.309	-158.417	-155.921	-153.477	-151.083	-402.233	-146.440	-144.189	-141.983	-139.821
Toplam Nakit Akışı		-2.989.655	-3.176.155	-3.359.568	-3.539.961	-3.717.397	-4.239.492	-4.411.202	-4.580.141	-4.746.365	-4.909.932	-5.412.241	-5.570.658	-5.726.579	-5.880.056	-6.031.140	-6.433.373	-6.579.813	-6.724.002	-6.865.985	-7.005.807
Maliyetlerin Net Bugünkü Değeri	**$7.005.807**																				
Toplam Tasarruf (USD)																					
Yıllık Elektrik Tasarrufu (HVAC)		11.536	11.934	12.346	12.773	13.214	13.670	14.142	14.631	15.136	15.659	16.201	16.761	17.340	17.940	18.560	19.202	19.867	20.554	21.266	22.002
Yıllık Doğalgaz Tasarrufu (HVAC)		28.787	29.365	29.955	30.557	31.172	31.798	32.437	33.089	33.754	34.433	35.125	35.831	36.551	37.286	38.035	38.800	39.580	40.375	41.187	42.014
Şebekeden Sağlanmayan Elektrik		386.807	399.572	412.757	426.378	440.449	454.984	469.998	485.508	501.530	518.080	535.177	552.838	571.082	589.927	609.395	629.505	650.279	671.738	693.905	716.804
İskonto Faktörü	-	0,969	0,939	0,910	0,881	0,854	0,828	0,802	0,777	0,753	0,729	0,707	0,685	0,663	0,643	0,623	0,604	0,585	0,567	0,549	0,532
Tasarrufların Bugünkü Değeri		413861	413908	413955	414008	414065	414126	414191	414261	414334	414411	414491	414576	414664	414757	414852	414952	415055	415162	415272	415386
Toplam Nakit Akışı		**413.861**	**827.769**	**1.241.723**	**1.655.730**	**2.069.796**	**2.483.922**	**2.898.113**	**3.312.374**	**3.726.707**	**4.141.118**	**4.555.609**	**4.970.185**	**5.384.850**	**5.799.606**	**6.214.459**	**6.629.411**	**7.044.466**	**7.459.628**	**7.874.900**	**8.290.286**
Tasarrufların Net Bugünkü Değeri	**$8.290.286**																				
Net Nihai Nakit Akışı (USD)																					
Net Nakit Akışı	-2.800.000	224.206	227.406	230.542	233.616	236.629	-107.968	242.481	245.322	248.109	250.844	-87.818	256.159	258.743	261.279	263.769	12.719	268.615	270.973	273.289	275.565
Toplam Nihai Nakit Akışı	-2.800.000	-2.575.794	-2.348.388	-2.117.846	-1.884.230	-1.647.601	-1.755.570	-1.513.089	-1.267.767	-1.019.657	-768.814	-856.632	-600.472	-341.729	-80.450	183.319	196.038	464.653	735.626	1.008.915	1.284.480
Nakit Akışının Net Bugünkü Değeri	**$1.284.480**																				

Yakıt Pili Toplam Elektrik Üretimi (kWh)	Entry	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Yıllık Enerji Üretimi		3.234.175	3.139.975	3.048.520	2.959.728	2.873.522	2.789.826	2.708.570	2.629.680	2.553.087	2.478.726	2.406.530	2.336.437	2.268.385	2.202.316	2.138.171	2.075.894	2.015.431	1.956.729	1.899.737	1.844.405
Enerji Üretiminin Net Bugünkü Değeri	**49.559.844kWh**																				

Şekil C.1 Yakıt Pili Senaryo 01 Ekonomik Analiz Çıktısı

C.2 Yakıt Pilli Senaryo 02 Ekonomik Analiz Çıktısı



Kurulu Maliyet ve İşletme & Bakım Maliyeti		
Kurul Maliyet	1.000	$/kW
Yakıt Hücresi Yenileme Maliyeti	1.050	$/kW (1)
İşletme & Bakım Maliyeti	0,020	$/kWh
Kurulu Kapasite	800	kW

Hesaplanan Maliyet		
İlk Yatırım Maliyeti	5.600.000	$
İşletme&Bakım Maliyeti	133.248	$
Yakıt Maliyeti	255.271	$/Yıl
Parazitik Elektrik Tüketimi Maliyeti	2.637	$/Yıl
Elektrik Tasarrufu	22.427	$/Yıl
Doğalgaz Tasarrufu	50.764	$/Yıl

Ekonomik Veri		
Proje Ömrü	20	Yıl
Uzun Süreli Enflasyon (%)	0,20%	

Gerçek Terimler	
İskonto Oranı (%)	3,00%
İşletme&Bakım Eskalasyon Faktörü (%)	0,20%
Elektrik Eskalasyon Faktörü (%)	3,30%
Doğalgaz Eskalasyon Faktörü (%)	0,93%

Nominal Terimler	
İskonto Oranı (%)	3,21%
İşletme&Bakım Eskalasyon Faktörü (%)	0,40%
Elektrik Eskalasyon Faktörü (%)	3,51%
Doğalgaz Eskalasyon Faktörü (%)	1,13%
Yakıt Eskasyon Faktörü (%)	1,13%
Giriş Tarihi	1.12.2023

Enerji Üretim Verimerli		
Yıllık Yakıt Hücresi Aşınma Payı	2,00%	
Yakıt Kullanım Verriminde Yıllık Düşüş	1,20%	
Yıllık Elektrik Enerjisi Üretimi	6.662.400	kWh

Şebeke Maliyeti		
Elektrik	3,35	TL/kWh
Doğalgaz	0,42	TL/kWh
Döviz Kuru	28,89	TL/USD
Tarih	1.12.2023	

Şebeke Emisyon Faktörleri		
Elektrik	0,4840	CO2 kg/kWh* (2)
Yakıt Pili	0,5080	CO2 kg/kWh
Doğalgaz	0,2340	CO2 kg/kWh

Ekonomik Analiz	
Şebeke Elektrik Fiyatı	$0,1161/kWh
BIEM	$0,1413/kWh
IVO	3,98%
BGO (Yıl)	12.290
IGO (Yıl)	14.400
KF (USD/kWh)	0,0007
Toplam Verim	57,95%
Isıl Verim	20,01%
Elektrik Verimi	37,94%
İskonto Oranı	3,00%

Regresyon Modelli Karşılaştırma	
Kategorize Edilmiş Model (7000 $/kW)	
İGO (Yıl)	16.771
Hata Payı	15,82%
Kategorize Edilmemiş Model (Genel)	
İGO (Yıl)	13.554
Hata Payı	-6,39%

ISTANBUL	#YP	2

Nakit Akışı Diyagramı

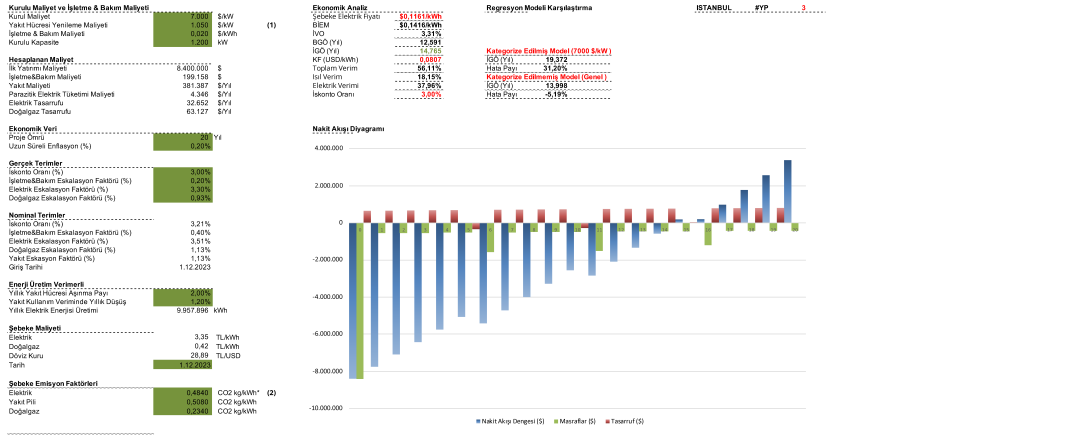
Eskalasyonlu Fiyat Serisi (USD/kWh)	0	1.Yıl	2.Yıl	3.Yıl	4.Yıl	5.Yıl	6.Yıl	7.Yıl	8.Yıl	9.Yıl	10.Yıl	11.Yıl	12.Yıl	13.Yıl	14.Yıl	15.Yıl	16.Yıl	17.Yıl	18.Yıl	19.Yıl	20.Yıl
Elektrik Şebekesi		0,1161	0,1199	0,1239	0,1280	0,1322	0,1366	0,1411	0,1457	0,1506	0,1555	0,1607	0,1660	0,1714	0,1771	0,1829	0,1890	0,1952	0,2017	0,2083	0,2152
Doğalgaz Şebekesi		0,0145	0,0147	0,0148	0,0149	0,0151	0,0152	0,0154	0,0155	0,0157	0,0158	0,0159	0,0161	0,0162	0,0164	0,0165	0,0167	0,0169	0,0170	0,0172	0,0173
Çalışma Saati																					
Yakıt Pili 01		8.328	16.656	24.984	33.312	41.640	49.968	58.296	66.624	74.952	83.280	91.608	99.936	108.264	116.592	124.920	133.248	141.576	149.904	158.232	166.560
Yakıt Pili 02		8.328	16.656	24.984	33.312	41.640	49.968	58.296	66.624	74.952	83.280	91.608	99.936	108.264	116.592	124.920	133.248	141.576	149.904	158.232	166.560
Yakıt Pili 03		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yakıt Pili 04		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Doğalgaz Tüketimi (kWh)																					
Yakıt Pili 01		8.779.361	8.884.713	8.991.330	9.099.226	9.208.417	9.318.918	9.430.745	9.543.913	9.658.440	9.774.342	9.891.634	10.010.333	10.130.457	10.252.023	10.375.047	10.499.548	10.625.542	10.753.049	10.882.085	11.012.670
Yakıt Pili 02		8.779.361	8.884.713	8.991.330	9.099.226	9.208.417	9.318.918	9.430.745	9.543.913	9.658.440	9.774.342	9.891.634	10.010.333	10.130.457	10.252.023	10.375.047	10.499.548	10.625.542	10.753.049	10.882.085	11.012.670
Yakıt Pili 03		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yakıt Pili 04		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Parazitik Elektrik Tüketimi kWh)																					
Absorpsiyonlu Soğutma		20.613	20.613	20.613	20.613	20.613	20.613	20.613	20.613	20.613	20.613	20.613	20.613	20.613	20.613	20.613	20.613	20.613	20.613	20.613	20.613
Yakıt Pili		2.100	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100
HVAC Elektrik Tasarrufu (kWh)																					
Soğutma Grubu Elektrik Tasarrufu		144.348	144.420	144.492	144.564	144.637	144.709	144.781	144.854	144.926	144.999	145.071	145.144	145.216	145.289	145.361	145.434	145.507	145.580	145.652	145.725
Soğutma Grubu Pompası Elektrik Tasarrufu		9.036	9.081	9.127	9.172	9.218	9.264	9.311	9.357	9.404	9.451	9.498	9.546	9.594	9.641	9.690	9.738	9.787	9.836	9.885	9.934
Soğutma Kulesi Elektrik Tasarrufu		20.520	20.596	20.672	20.749	20.825	20.902	20.980	21.057	21.135	21.214	21.292	21.371	21.450	21.529	21.609	21.689	21.769	21.850	21.930	22.012
Kondenser Pompası Elektrik Tasarrufu		9.899	9.960	10.021	10.082	10.143	10.205	10.267	10.330	10.393	10.456	10.520	10.584	10.649	10.714	10.779	10.845	10.911	10.978	11.045	11.112
Kazan Pompaları Elektrik Tasarrufu		5.500	5.550	5.601	5.652	5.703	5.755	5.807	5.860	5.913	5.967	6.021	6.076	6.132	6.187	6.244	6.300	6.358	6.416	6.474	6.533
Kazan Brülör Elektrik Tasarrufu		3.837	3.890	3.944	3.998	4.053	4.109	4.166	4.223	4.282	4.341	4.401	4.461	4.523	4.585	4.649	4.713	4.778	4.844	4.911	4.978
Toplam Tasarruf		193.140	193.497	193.856	194.217	194.580	194.945	195.312	195.682	196.053	196.427	196.804	197.182	197.563	197.946	198.331	198.719	199.109	199.502	199.897	200.294
HVAC Doğalgaz Tasarrufu (kWh)																					
Kazan Doğalgaz Tasarrufu		-3.491.778	3.529.140	3.566.902	3.605.067	3.643.642	3.682.629	3.722.033	3.761.856	3.802.110	3.842.793	3.883.911	3.925.469	3.967.471	4.009.923	4.052.829	4.096.195	4.140.024	4.184.322	4.229.094	4.274.346

Maliyetler	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tarih	1.12.2023	1.12.2024	1.12.2025	1.12.2026	1.12.2027	1.12.2028	1.12.2029	1.12.2030	1.12.2031	1.12.2032	1.12.2033	1.12.2034	1.12.2035	1.12.2036	1.12.2037	1.12.2038	1.12.2039	1.12.2040	1.12.2041	1.12.2042	1.12.2043
Yıl (Başlangıçtan İtibaren)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
İlk Yatırım Maliyeti (USD)	5.600.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
İşletme&Bakım Maliyetleri (USD)	-	133.248	133.514	133.782	134.049	134.317	134.586	134.855	135.125	135.395	135.666	135.937	136.209	136.481	136.754	137.028	137.302	137.576	137.852	138.127	138.404
Parazitik Elektrik Tüketimi (USD)																					
Absorpsiyonlu Soğutma		2.393	2.472	2.554	2.638	2.725	2.815	2.908	3.004	3.103	3.206	3.312	3.421	3.534	3.650	3.771	3.895	4.024	4.157	4.294	4.435
Yakıt Pili		244	252	260	269	278	287	296	306	316	327	337	349	360	372	384	397	410	423	437	452
Doğalgaz Maliyeti (USD)	-																				
Yakıt Pili 01		127.635	130.368	133.160	136.011	138.923	141.898	144.936	148.039	151.209	154.447	157.754	161.131	164.581	168.105	171.705	175.381	179.136	182.972	186.890	190.891
Yakıt Pili 02		127.635	130.368	133.160	136.011	138.923	141.898	144.936	148.039	151.209	154.447	157.754	161.131	164.581	168.105	171.705	175.381	179.136	182.972	186.890	190.891
Yakıt Pili 03		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yakıt Pili 04		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yakıt Hücresi Yenileme Maliyeti (USD)																					
Yakıt Pili 01							420.000					483.000					420.000				
Yakıt Pili 02							420.000					483.000					420.000				
Yakıt Pili 03																					
Yakıt Pili 04																					
İskonto Faktörü		0,969	0,939	0,910	0,881	0,854	0,828	0,802	0,777	0,753	0,729	0,707	0,685	0,663	0,643	0,623	0,604	0,585	0,567	0,549	0,532
Maliyetlerin Bugünkü Değeri	5.600.000	379.005	372.695	366.521	360.479	354.566	1.043.883	343.115	337.570	332.141	326.826	1.004.311	316.526	311.535	306.646	301.858	804.158	292.571	288.068	283.656	279.332
Nakit Akışı	-5.600.000	-379.005	-372.695	-366.521	-360.479	-354.566	-1.043.883	-343.115	-337.570	-332.141	-326.826	-1.004.311	-316.526	-311.535	-306.646	-301.858	-804.158	-292.571	-288.068	-283.656	-279.332
Toplam Nakit Akışı		-5.979.005	-6.351.700	-6.718.221	-7.078.700	-7.433.267	-8.477.150	-8.820.265	-9.157.834	-9.489.975	-9.816.802	-10.821.113	-11.137.638	-11.449.173	-11.755.819	-12.057.677	-12.861.835	-13.154.406	#########	-13.726.131	-14.005.463
Maliyetlerin Net Bugünkü Değeri	**$14.005.463**																				
Toplam Tasarruf (USD)																					
Yıllık Elektrik Tasarrufu (HVAC)		22.427	23.210	24.020	24.859	25.727	26.626	27.557	28.520	29.517	30.549	31.618	32.724	33.869	35.055	36.282	37.552	38.868	40.230	41.640	43.099
Yıllık Doğalgaz Tasarrufu (HVAC)		50.764	51.784	52.825	53.887	54.970	56.075	57.202	58.352	59.524	60.721	61.941	63.186	64.456	65.752	67.073	68.422	69.797	71.200	72.631	74.091
Şebekeden Sağlanmayan Elektrik		773.614	799.143	825.515	852.757	880.898	909.968	939.996	971.016	1.003.060	1.036.161	1.070.354	1.105.676	1.142.163	1.179.855	1.218.790	1.259.010	1.300.557	1.343.476	1.387.810	1.433.608
İskonto Faktörü	-	0,969	0,939	0,910	0,881	0,854	0,828	0,802	0,777	0,753	0,729	0,707	0,685	0,663	0,643	0,623	0,604	0,585	0,567	0,549	0,532
Tasarrufların Bugünkü Değeri		820499	820672	820852	821040	821235	821437	821647	821864	822088	822319	822557	822802	823054	823313	823578	823850	824129	824414	824706	825004
Toplam Nakit Akışı		820.499	1.641.171	2.462.024	3.283.064	4.104.299	4.925.736	5.747.383	6.569.247	7.391.335	8.213.655	9.036.212	9.859.014	10.682.068	11.505.381	12.328.960	13.152.810	13.976.939	14.801.354	15.626.060	16.451.064
Tasarrufların Net Bugünkü Değeri	**$16.451.064**																				
Net Nihai Nakit Akışı (USD)																					
Net Nakit Akışı	-5.600.000	441.494	447.977	454.331	460.561	466.669	-222.446	478.532	484.294	489.947	495.493	-181.753	506.277	511.520	516.667	521.721	19.693	531.558	536.346	541.050	545.672
Toplam Nihai Nakit Akışı	-5.600.000	-5.158.506	-4.710.529	-4.256.198	-3.795.637	-3.328.968	-3.551.414	-3.072.881	-2.588.587	-2.098.640	-1.602.147	-1.784.901	-1.278.624	-767.105	-250.438	271.283	290.975	822.533	1.358.879	1.899.929	2.445.601
Nakit Akışının Net Bugünkü Değeri	**$2.445.601**																				

Yakıt Pili Toplam Elektrik Üretimi (kWh)	Entry	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Yıllık Enerji Üretimi	-	6.468.350	6.279.951	6.097.040	5.919.456	5.747.045	5.579.655	5.417.141	5.259.360	5.106.175	4.957.451	4.813.060	4.672.873	4.536.770	4.404.631	4.276.341	4.151.787	4.030.862	3.913.458	3.799.474	3.688.809
Enerji Üretiminin Net Bugünkü Değeri	**99.119.689kWh**																				

Şekil C.2 Yakıt Pili Senaryo 02 Ekonomik Analiz Çıktısı

C.3 Yakıt Pilli Senaryo 03 Ekonomik Analiz Çıktısı



Kurulu Maliyet ve İşletme & Bakım Maliyeti

Kurulu Maliyet	1.000	$/kW	
Yakıt Hücresi Yenileme Maliyeti	1.000	$/kW	(1)
İşletme & Bakım Maliyeti	0.020	$/kWh	
Kurulu Kapasite	1.200	kW	

Hesaplanan Maliyet

İlk Yatırım Maliyeti	8.400.000	$
İşletme&Bakım Maliyeti	199.158	$
Yakıt Maliyeti	381.387	$/Yıl
Parazitik Elektrik Tüketimi Maliyeti	4.346	$/Yıl
Elektrik Tasarrufu	32.652	$/Yıl
Doğalgaz Tasarrufu	63.127	$/Yıl

Ekonomik Veri

Proje Ömrü	20	Yıl
Uzun Süreli Enflasyon (%)	0,20%	

Gerçek Terimler

İskonto Oranı (%)	3,00%
İşletme&Bakım Eskalasyon Faktörü (%)	0,20%
Elektrik Eskalasyon Faktörü (%)	3,30%
Doğalgaz Eskalasyon Faktörü (%)	0,93%

Nominal Terimler

İskonto Oranı (%)	3,21%
İşletme&Bakım Eskalasyon Faktörü (%)	0,40%
Elektrik Eskalasyon Faktörü (%)	3,51%
Doğalgaz Eskalasyon Faktörü (%)	1,13%
Yakıt Eskasyon Faktörü (%)	1,13%
Giriş Tarihi	1.12.2023

Enerji Üretim Verimerli

Yıllık Yakıt Hücresi Aşırma Payı	2,00%	
Yakıt Kullanım Verimlinde Yıllık Düşüş	1,20%	
Yıllık Elektrik Enerjisi Üretimi	9.957.896	kWh

Şebeke Maliyeti

Elektrik	3,35	TL/kWh
Doğalgaz	0,42	TL/kWh
Döviz Kuru	28,89	TL/USD
Tarih	1.12.2023	

Şebeke Emisyon Faktörleri

Elektrik	0,4840	CO2 kg/kWh*	(2)
Yakıt Pili	0,5080	CO2 kg/kWh	
Doğalgaz	0,2340	CO2 kg/kWh	

Ekonomik Analiz

Şebeke Elektrik Fiyatı	$0,1161/kWh
BİEM	$0,1416/kWh
İVO	3,31%
BGÖ (Yıl)	12.591
İGÖ (Yıl)	14.765
KF (USD/kWh)	0,0897
Toplam Verim	56,11%
Isıl Verim	18,15%
Elektrik Verimi	37,96%
İskonto Oranı	3,00%

Regresyon Modeli Karşılaştırma

ISTANBUL #YP 3

Kategorize Edilmiş Model (7000 $/kW)

İGÖ (Yıl)	19.372
Hata Payı	31,20%

Kategorize Edilmemiş Model (Genel)

İGÖ (Yıl)	13.998
Hata Payı	5,19%

Nakit Akışı Diyagramı

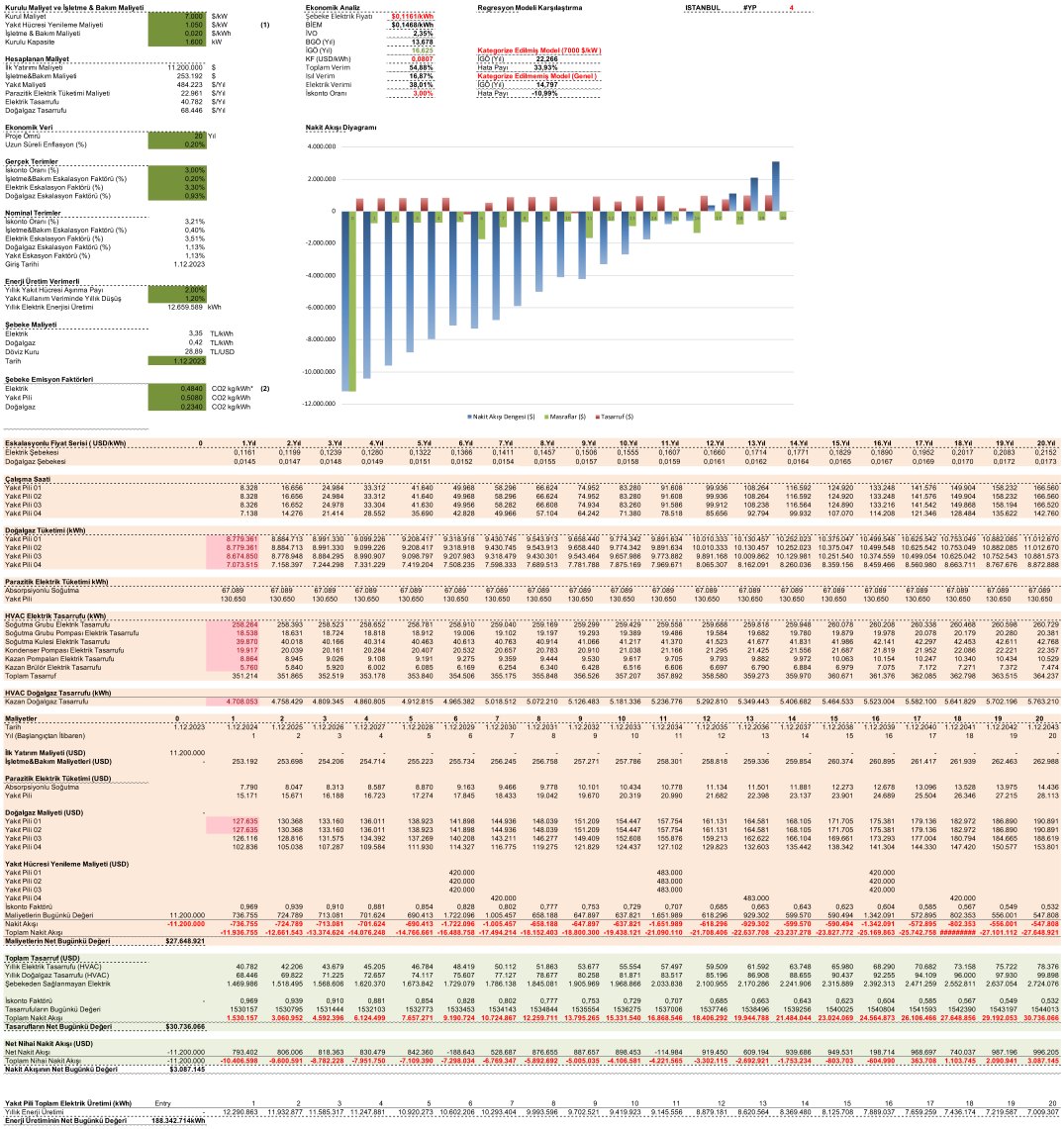
Eskalasyonlu Fiyat Serisi (USD/kWh)	0	1.Yıl	2.Yıl	3.Yıl	4.Yıl	5.Yıl	6.Yıl	7.Yıl	8.Yıl	9.Yıl	10.Yıl	11.Yıl	12.Yıl	13.Yıl	14.Yıl	15.Yıl	16.Yıl	17.Yıl	18.Yıl	19.Yıl	20.Yıl
Elektrik Şebekesi		0,1161	0,1199	0,1239	0,1280	0,1322	0,1366	0,1411	0,1457	0,1506	0,1555	0,1607	0,1660	0,1714	0,1771	0,1829	0,1890	0,1952	0,2017	0,2083	0,2152
Doğalgaz Şebekesi		0,0145	0,0147	0,0148	0,0149	0,0151	0,0152	0,0154	0,0155	0,0157	0,0158	0,0159	0,0161	0,0162	0,0164	0,0165	0,0167	0,0169	0,0170	0,0172	0,0173
Çalışma Saati																					
Yakıt Pili 01		8.328	16.656	24.984	33.312	41.640	49.968	58.296	66.624	74.952	83.280	91.608	99.936	108.264	116.592	124.920	133.248	141.576	149.904	158.232	166.560
Yakıt Pili 02		8.328	16.656	24.984	33.312	41.640	49.968	58.296	66.624	74.952	83.280	91.608	99.936	108.264	116.592	124.920	133.248	141.576	149.904	158.232	166.560
Yakıt Pili 03		8.326	16.652	24.978	33.304	41.630	49.956	58.282	66.608	74.934	83.260	91.586	99.912	108.238	116.564	124.890	133.216	141.542	149.868	158.194	166.520
Yakıt Pili 04		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Doğalgaz Tüketimi (kWh)																					
Yakıt Pili 01		8.779.361	8.884.713	8.991.330	9.099.226	9.208.417	9.318.918	9.430.745	9.543.913	9.658.440	9.774.342	9.891.634	10.010.333	10.130.457	10.252.023	10.375.047	10.499.548	10.625.542	10.753.049	10.882.085	11.012.670
Yakıt Pili 02		8.779.361	8.884.713	8.991.330	9.099.226	9.208.417	9.318.918	9.430.745	9.543.913	9.658.440	9.774.342	9.891.634	10.010.333	10.130.457	10.252.023	10.375.047	10.499.548	10.625.542	10.753.049	10.882.085	11.012.670
Yakıt Pili 03		8.674.850	8.778.948	8.884.295	8.990.907	9.098.797	9.207.983	9.318.479	9.430.301	9.543.464	9.657.986	9.773.882	9.891.168	10.009.862	10.129.981	10.251.540	10.374.559	10.499.054	10.625.042	10.752.543	10.881.573
Yakıt Pili 04		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Parazitik Elektrik Tüketimi kWh)																					
Absorpsiyonlu Soğutma		35.179	35.179	35.179	35.179	35.179	35.179	35.179	35.179	35.179	35.179	35.179	35.179	35.179	35.179	35.179	35.179	35.179	35.179	35.179	35.179
Yakıt Pili		2.250	2.250	2.250	2.250	2.250	2.250	2.250	2.250	2.250	2.250	2.250	2.250	2.250	2.250	2.250	2.250	2.250	2.250	2.250	2.250
HVAC Elektrik Tasarrufu (kWh)																					
Soğutma Grubu Elektrik Tasarrufu		205.450	205.553	205.656	205.759	205.862	205.964	206.067	206.170	206.274	206.377	206.480	206.583	206.686	206.790	206.893	206.997	207.100	207.204	207.307	207.411
Soğutma Grubu Pompası Elektrik Tasarrufu		15.030	15.105	15.181	15.256	15.333	15.409	15.486	15.564	15.642	15.720	15.798	15.877	15.957	16.037	16.117	16.197	16.278	16.360	16.442	16.524
Soğutma Kulesi Elektrik Tasarrufu		31.470	31.586	31.703	31.821	31.938	32.057	32.175	32.294	32.414	32.534	32.654	32.775	32.896	33.018	33.140	33.263	33.386	33.509	33.633	33.758
Kondenser Pompası Elektrik Tasarrufu		16.444	16.544	16.645	16.747	16.849	16.952	17.055	17.159	17.264	17.369	17.475	17.582	17.689	17.797	17.905	18.015	18.124	18.235	18.346	18.458
Kazan Pompaları Elektrik Tasarrufu		7.812	7.883	7.955	8.027	8.100	8.174	8.248	8.323	8.399	8.475	8.553	8.630	8.709	8.788	8.868	8.949	9.030	9.112	9.195	9.279
Kazan Brülör Elektrik Tasarrufu		4.993	5.062	5.132	5.203	5.274	5.347	5.421	5.496	5.572	5.649	5.727	5.806	5.886	5.967	6.049	6.133	6.217	6.303	6.390	6.478
Toplam Tasarruf		281.199	281.734	282.271	282.812	283.356	283.903	284.453	285.007	285.563	286.123	286.686	287.253	287.823	288.396	288.973	289.553	290.136	290.723	291.314	291.908
HVAC Doğalgaz Tasarrufu (kWh)																					
Kazan Doğalgaz Tasarrufu		-4.342.200	4.388.662	4.435.621	4.483.082	4.531.051	4.579.533	4.628.534	4.678.059	4.728.114	4.778.705	4.829.837	4.881.517	4.933.749	4.986.540	5.039.896	5.093.823	5.148.327	5.203.414	5.259.090	5.315.363

Maliyetler	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tarih	1.12.2023	1.12.2024	1.12.2025	1.12.2026	1.12.2027	1.12.2028	1.12.2029	1.12.2030	1.12.2031	1.12.2032	1.12.2033	1.12.2034	1.12.2035	1.12.2036	1.12.2037	1.12.2038	1.12.2039	1.12.2040	1.12.2041	1.12.2042	1.12.2043
Yıl (Başlangıçtan İtibaren)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
İlk Yatırım Maliyeti (USD)	8.400.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
İşletme&Bakım Maliyetleri (USD)	-	199.158	199.556	199.955	200.355	200.756	201.157	201.560	201.963	202.367	202.772	203.177	203.583	203.991	204.399	204.807	205.217	205.627	206.039	206.451	206.864
Parazitik Elektrik Tüketimi (USD)																					
Absorpsiyonlu Soğutma		4.085	4.220	4.359	4.503	4.651	4.805	4.963	5.127	5.296	5.471	5.652	5.838	6.031	6.230	6.436	6.648	6.867	7.094	7.328	7.570
Yakıt Pili		261	270	279	288	297	307	317	328	339	350	361	373	386	398	412	425	439	454	469	484
Doğalgaz Maliyeti (USD)	-																				
Yakıt Pili 01		127.635	130.368	133.160	136.011	138.923	141.898	144.936	148.039	151.209	154.447	157.754	161.131	164.581	168.105	171.705	175.381	179.136	182.972	186.890	190.891
Yakıt Pili 02		127.635	130.368	133.160	136.011	138.923	141.898	144.936	148.039	151.209	154.447	157.754	161.131	164.581	168.105	171.705	175.381	179.136	182.972	186.890	190.891
Yakıt Pili 03		126.116	128.816	131.575	134.392	137.269	140.208	143.211	146.277	149.409	152.608	155.876	159.213	162.622	166.104	169.661	173.293	177.004	180.794	184.665	188.619
Yakıt Pili 04		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yakıt Hücresi Yenileme Maliyeti (USD)																					
Yakıt Pili 01							420.000					483.000					420.000				
Yakıt Pili 02							420.000					483.000					420.000				
Yakıt Pili 03							420.000					483.000					420.000				
Yakıt Pili 04																					
İskonto Faktörü		0,969	0,939	0,910	0,881	0,854	0,828	0,802	0,777	0,753	0,729	0,707	0,685	0,663	0,643	0,623	0,604	0,585	0,567	0,549	0,532
Maliyetlerin Bugünkü Değeri	8.400.000	566.722	557.292	548.066	539.037	530.202	1.564.210	513.089	504.804	496.692	488.749	1.505.006	473.357	465.899	458.594	451.439	1.204.916	437.562	430.834	424.241	417.780
Nakit Akışı	-8.400.000	-566.722	-557.292	-548.066	-539.037	-530.202	-1.564.210	-513.089	-504.804	-496.692	-488.749	-1.505.006	-473.357	-465.899	-458.594	-451.439	-1.204.916	-437.562	-430.834	-424.241	-417.780
Toplam Nakit Akışı		-8.966.722	-9.524.014	-10.072.080	-10.611.118	-11.141.320	-12.705.529	-13.218.619	-13.723.422	-14.220.114	-14.708.863	-16.213.869	-16.687.226	-17.153.125	-17.611.719	-18.063.158	-19.268.073	-19.705.636	#########	-20.560.710	-20.978.490
Maliyetlerin Net Bugünkü Değeri	$20.978.490																				
Toplam Tasarruf (USD)																					
Yıllık Elektrik Tasarrufu (HVAC)		32.652	33.793	34.975	36.199	37.465	38.776	40.133	41.539	42.993	44.499	46.058	47.672	49.343	51.072	52.863	54.717	56.637	58.624	60.682	62.812
Yıllık Doğalgaz Tasarrufu (HVAC)		63.127	64.396	65.691	67.011	68.358	69.732	71.133	72.563	74.022	75.509	77.027	78.575	80.155	81.766	83.409	85.086	86.796	88.540	90.320	92.135
Şebekeden Sağlanmayan Elektrik		1.156.275	1.194.432	1.233.848	1.274.565	1.316.626	1.360.075	1.404.957	1.451.321	1.499.214	1.548.689	1.599.795	1.652.588	1.707.124	1.763.459	1.821.653	1.881.768	1.943.866	2.008.014	2.074.278	2.142.729
İskonto Faktörü	-	0,969	0,939	0,910	0,881	0,854	0,828	0,802	0,777	0,753	0,729	0,707	0,685	0,663	0,643	0,623	0,604	0,585	0,567	0,549	0,532
Tasarrufların Bugünkü Değeri		1213160	1213561	1213971	1214391	1214820	1215259	1215707	1216164	1216630	1217105	1217589	1218082	1218583	1219094	1219613	1220140	1220676	1221221	1221774	1222334
Toplam Nakit Akışı		1.213.160	2.426.722	3.640.693	4.855.084	6.069.904	7.285.163	8.500.869	9.717.033	10.933.663	12.150.767	13.368.356	14.586.438	15.805.022	17.024.115	18.243.728	19.463.869	20.684.545	21.905.766	23.127.539	24.349.874
Tasarrufların Net Bugünkü Değeri	$24.349.874																				
Net Nihai Nakit Akışı (USD)																					
Net Nakit Akışı	-8.400.000	646.439	656.269	665.905	675.354	684.618	-348.951	702.617	711.360	719.938	728.355	-287.417	744.725	752.685	760.500	768.174	15.225	783.114	790.387	797.533	804.555
Toplam Nihai Nakit Akışı	-8.400.000	-7.753.561	-7.097.291	-6.431.386	-5.756.034	-5.071.416	-5.420.366	-4.717.749	-4.006.389	-3.286.451	-2.558.096	-2.845.513	-2.100.788	-1.348.103	-587.603	180.571	195.795	978.910	1.769.297	2.566.829	3.371.384
Nakit Akışının Net Bugünkü Değeri	$3.371.384																				

Yakıt Pili Toplam Elektrik Üretimi (kWh)	Entry	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Yıllık Enerji Üretimi	-	9.667.860	9.386.272	9.112.886	8.847.462	8.589.769	8.339.581	8.096.681	7.860.855	7.631.898	7.409.610	7.193.796	6.984.268	6.780.843	6.583.342	6.391.595	6.205.432	6.024.691	5.849.215	5.678.849	5.513.446
Enerji Üretiminin Net Bugünkü Değeri	148.148.350kWh																				

Şekil C.3 Yakıt Pili Senaryo 03 Ekonomik Analiz Çıktısı

C.4 Yakıt Pilli Senaryo 04 Ekonomik Analiz Çıktısı



Kurulu Maliyet ve İşletme & Bakım Maliyeti

Kurul Maliyet	7.000	$/kW	
Yakıt Hücresi Yenileme Maliyeti	1.050	$/kW	(1)
İşletme & Bakım Maliyeti	0.020	$/kWh	
Kurulu Kapasite	1.600	kW	

Hesaplanan Maliyet

İlk Yatırım Maliyeti	11.200.000	$
İşletme&Bakım Maliyeti	253.192	$
Yakıt Maliyeti	484.223	$/Yıl
Parazitik Elektrik Tüketimi Maliyeti	22.961	$/Yıl
Elektrik Tasarrufu	40.782	$/Yıl
Doğalgaz Tasarrufu	68.446	$/Yıl

Ekonomik Veri

Proje Ömrü	20	Yıl
Uzun Süreli Enflasyon (%)	0.20%	

Gerçek Terimler

İskonto Oranı (%)	3.00%
İşletme&Bakım Eskalasyon Faktörü (%)	0.20%
Elektrik Eskalasyon Faktörü (%)	3.30%
Doğalgaz Eskalasyon Faktörü (%)	0.93%

Nominal Terimler

İskonto Oranı (%)	3,21%
İşletme&Bakım Eskalasyon Faktörü (%)	0,40%
Elektrik Eskalasyon Faktörü (%)	3,51%
Doğalgaz Eskalasyon Faktörü (%)	1,13%
Yakıt Eskasyon Faktörü (%)	1,13%
Giriş Tarihi	1.12.2023

Enerji Üretim Verimerli

Yıllık Yakıt Hücresi Ayrımla Payı	1.00%	
Yakıt Kullanım Verimlinde Yıllık Düşüş	1.20%	
Yıllık Elektrik Enerjisi Üretimi	12.659.589	kWh

Şebeke Maliyeti

Elektrik	3,35	TL/kWh
Doğalgaz	0,42	TL/kWh
Döviz Kuru	28,89	TL/USD
Tarih	1.12.2023	

Şebeke Emisyon Faktörleri

Elektrik	0,4840	CO2 kg/kWh*	(2)
Yakıt Pili	0,5080	CO2 kg/kWh	
Doğalgaz	0,2340	CO2 kg/kWh	

Ekonomik Analiz

Şebeke Elektrik Fiyatı	$0,1161/kWh
BİEM	$0,1468/kWh
İVO	2,35%
BGÖ (Yıl)	13.678
İGÖ (Yıl)	16.625
KF (USD/kWh)	0,0807
Toplam Verim	54,88%
Isıl Verim	16,87%
Elektrik Verimi	38,01%
İskonto Oranı	3,00%

Regresyon Modeli Karşılaştırma

Kategorize Edilmiş Model (7000 $/kW)

İGÖ (Yıl)	22.266
Hata Payı	33,93%

Kategorize Edilmemiş Model (Genel)

İGÖ (Yıl)	14.797
Hata Payı	10,99%

İSTANBUL İYP 4

Nakit Akışı Diyagramı

Eskalasyonlu Fiyat Serisi (USD/kWh)	0	1.Yıl	2.Yıl	3.Yıl	4.Yıl	5.Yıl	6.Yıl	7.Yıl	8.Yıl	9.Yıl	10.Yıl	11.Yıl	12.Yıl	13.Yıl	14.Yıl	15.Yıl	16.Yıl	17.Yıl	18.Yıl	19.Yıl	20.Yıl
Elektrik Şebekesi		0,1161	0,1199	0,1239	0,1280	0,1322	0,1366	0,1411	0,1457	0,1506	0,1555	0,1607	0,1660	0,1714	0,1771	0,1829	0,1890	0,1952	0,2017	0,2083	0,2152
Doğalgaz Şebekesi		0,0145	0,0147	0,0148	0,0149	0,0151	0,0152	0,0154	0,0155	0,0157	0,0158	0,0159	0,0161	0,0162	0,0164	0,0165	0,0167	0,0169	0,0170	0,0172	0,0173
Çalışma Saati																					
Yakıt Pili 01		8.328	16.656	24.984	33.312	41.640	49.968	58.296	66.624	74.952	83.280	91.608	99.936	108.264	116.592	124.920	133.248	141.576	149.904	158.232	166.560
Yakıt Pili 02		8.328	16.656	24.984	33.312	41.640	49.968	58.296	66.624	74.952	83.280	91.608	99.936	108.264	116.592	124.920	133.248	141.576	149.904	158.232	166.560
Yakıt Pili 03		8.326	16.652	24.978	33.304	41.630	49.956	58.282	66.608	74.934	83.260	91.586	99.912	108.238	116.564	124.890	133.216	141.542	149.868	158.194	166.520
Yakıt Pili 04		7.138	14.276	21.414	28.552	35.690	42.828	49.966	57.104	64.242	71.380	78.518	85.656	92.794	99.932	107.070	114.208	121.346	128.484	135.622	142.760
Doğalgaz Tüketimi (kWh)																					
Yakıt Pili 01		8.779.361	8.884.715	8.991.330	9.099.226	9.208.417	9.318.918	9.430.745	9.543.913	9.658.440	9.774.342	9.891.634	10.010.333	10.130.457	10.252.023	10.375.047	10.499.548	10.625.542	10.753.049	10.882.085	11.012.670
Yakıt Pili 02		8.779.361	8.884.713	8.991.330	9.099.226	9.208.417	9.318.918	9.430.745	9.543.913	9.658.440	9.774.342	9.891.634	10.010.333	10.130.457	10.252.023	10.375.047	10.499.548	10.625.542	10.753.049	10.882.085	11.012.670
Yakıt Pili 03		8.674.650	8.778.948	8.884.295	8.990.907	9.098.797	9.207.983	9.318.479	9.430.301	9.543.464	9.657.986	9.773.882	9.891.168	10.009.862	10.129.981	10.251.540	10.374.559	10.499.054	10.625.042	10.752.543	10.881.573
Yakıt Pili 04		7.073.515	7.158.397	7.244.298	7.331.229	7.419.204	7.508.235	7.598.333	7.689.513	7.781.788	7.875.169	7.969.671	8.065.307	8.162.091	8.260.036	8.359.156	8.459.466	8.560.980	8.663.711	8.767.676	8.872.888
Parazitik Elektrik Tüketimi kWh)																					
Absorpsiyonlu Soğutma		67.089	67.089	67.089	67.089	67.089	67.089	67.089	67.089	67.089	67.089	67.089	67.089	67.089	67.089	67.089	67.089	67.089	67.089	67.089	67.089
Yakıt Pili		130.650	130.650	130.650	130.650	130.650	130.650	130.650	130.650	130.650	130.650	130.650	130.650	130.650	130.650	130.650	130.650	130.650	130.650	130.650	130.650
HVAC Elektrik Tasarrufu (kWh)																					
Soğutma Grubu Elektrik Tasarrufu		258.264	258.393	258.523	258.652	258.781	258.910	259.040	259.169	259.299	259.429	259.558	259.688	259.818	259.948	260.078	260.208	260.338	260.468	260.598	260.729
Soğutma Grubu Pompası Elektrik Tasarrufu		18.538	18.631	18.724	18.818	18.912	19.006	19.102	19.197	19.293	19.389	19.486	19.584	19.682	19.780	19.879	19.978	20.078	20.179	20.280	20.381
Soğutma Kulesi Elektrik Tasarrufu		39.870	40.018	40.166	40.314	40.463	40.613	40.763	40.914	41.066	41.217	41.370	41.523	41.677	41.831	41.986	42.141	42.297	42.453	42.611	42.768
Kondenser Pompası Elektrik Tasarrufu		19.917	20.039	20.161	20.284	20.407	20.532	20.657	20.783	20.910	21.038	21.166	21.295	21.425	21.556	21.687	21.819	21.952	22.086	22.221	22.357
Kazan Pompaları Elektrik Tasarrufu		8.864	8.945	9.026	9.108	9.191	9.275	9.359	9.444	9.530	9.617	9.705	9.793	9.882	9.972	10.063	10.154	10.247	10.340	10.434	10.529
Kazan Brülör Elektrik Tasarrufu		5.760	5.840	5.920	6.002	6.085	6.169	6.254	6.340	6.428	6.516	6.606	6.697	6.790	6.884	6.979	7.075	7.172	7.271	7.372	7.474
Toplam Tasarruf		351.214	351.865	352.519	353.178	353.840	354.506	355.175	355.848	356.526	357.207	357.892	358.580	359.273	359.970	360.671	361.376	362.085	362.798	363.515	364.237
HVAC Doğalgaz Tasarrufu (kWh)																					
Kazan Doğalgaz Tasarrufu		4.708.053	4.758.429	4.809.345	4.860.805	4.912.815	4.965.382	5.018.512	5.072.210	5.126.483	5.181.336	5.236.776	5.292.810	5.349.443	5.406.682	5.464.533	5.523.004	5.582.100	5.641.829	5.702.196	5.763.210

Maliyetler	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tarih	1.12.2023	1.12.2024	1.12.2025	1.12.2026	1.12.2027	1.12.2028	1.12.2029	1.12.2030	1.12.2031	1.12.2032	1.12.2033	1.12.2034	1.12.2035	1.12.2036	1.12.2037	1.12.2038	1.12.2039	1.12.2040	1.12.2041	1.12.2042	1.12.2043
Yıl (Başlangıçtan İtibaren)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
İlk Yatırım Maliyeti (USD)	11.200.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
İşletme&Bakım Maliyetleri (USD)	-	253.192	253.698	254.206	254.714	255.223	255.734	256.245	256.758	257.271	257.786	258.301	258.818	259.336	259.854	260.374	260.895	261.417	261.939	262.463	262.988
Parazitik Elektrik Tüketimi (USD)																					
Absorpsiyonlu Soğutma		7.790	8.047	8.313	8.587	8.870	9.163	9.466	9.778	10.101	10.434	10.778	11.134	11.501	11.881	12.273	12.678	13.096	13.528	13.975	14.436
Yakıt Pili		15.171	15.671	16.188	16.723	17.274	17.845	18.433	19.042	19.670	20.319	20.990	21.682	22.398	23.137	23.901	24.689	25.504	26.346	27.215	28.113
Doğalgaz Maliyeti (USD)	-																				
Yakıt Pili 01		127.635	130.368	133.160	136.011	138.923	141.898	144.936	148.039	151.209	154.447	157.754	161.131	164.581	168.105	171.705	175.381	179.136	182.972	186.890	190.891
Yakıt Pili 02		127.635	130.368	133.160	136.011	138.923	141.898	144.936	148.039	151.209	154.447	157.754	161.131	164.581	168.105	171.705	175.381	179.136	182.972	186.890	190.891
Yakıt Pili 03		126.116	128.816	131.575	134.392	137.269	140.208	143.211	146.277	149.409	152.608	155.876	159.213	162.622	166.104	169.661	173.293	177.004	180.794	184.665	188.619
Yakıt Pili 04		102.836	105.038	107.287	109.584	111.930	114.327	116.775	119.275	121.829	124.437	127.102	129.823	132.603	135.442	138.342	141.304	144.330	147.420	150.577	153.801
Yakıt Hücresi Yenileme Maliyeti (USD)																					
Yakıt Pili 01							420.000					483.000					420.000				
Yakıt Pili 02							420.000					483.000					420.000				
Yakıt Pili 03							420.000					483.000					420.000				
Yakıt Pili 04								420.000						483.000					420.000		
İskonto Faktörü		0,969	0,939	0,910	0,881	0,854	0,828	0,802	0,777	0,753	0,729	0,707	0,685	0,663	0,643	0,623	0,604	0,585	0,567	0,549	0,532
Maliyetlerin Bugünkü Değeri	11.200.000	736.755	724.789	713.081	701.624	690.413	1.722.096	1.005.457	658.188	647.897	637.821	1.651.989	618.296	929.302	599.570	590.494	1.342.091	572.895	802.353	556.001	547.808
Nakit Akışı	-11.200.000	-736.755	-724.789	-713.081	-701.624	-690.413	-1.722.096	-1.005.457	-658.188	-647.897	-637.821	-1.651.989	-618.296	-929.302	-599.570	-590.494	-1.342.091	-572.895	-802.353	-556.001	-547.808
Toplam Nakit Akışı		-11.936.755	-12.661.543	-13.374.624	-14.076.248	-14.766.661	-16.488.758	-17.494.214	-18.152.403	-18.800.300	-19.438.121	-21.090.110	-21.708.406	-22.637.708	-23.237.278	-23.827.772	-25.169.863	-25.742.758	#########	-27.101.112	-27.648.921
Maliyetlerin Net Bugünkü Değeri	**$27.648.921**																				
Toplam Tasarruf (USD)																					
Yıllık Elektrik Tasarrufu (HVAC)		40.782	42.206	43.679	45.205	46.784	48.419	50.112	51.863	53.677	55.554	57.497	59.509	61.592	63.748	65.980	68.290	70.682	73.158	75.722	78.376
Yıllık Doğalgaz Tasarrufu (HVAC)		68.446	69.822	71.225	72.657	74.117	75.607	77.127	78.677	80.258	81.871	83.517	85.196	86.908	88.655	90.437	92.255	94.109	96.000	97.930	99.898
Şebekeden Sağlanmayan Elektrik		1.469.986	1.518.495	1.568.606	1.620.370	1.673.842	1.729.079	1.786.138	1.845.081	1.905.969	1.968.866	2.033.838	2.100.955	2.170.286	2.241.906	2.315.889	2.392.313	2.471.259	2.552.811	2.637.054	2.724.076
İskonto Faktörü	-	0,969	0,939	0,910	0,881	0,854	0,828	0,802	0,777	0,753	0,729	0,707	0,685	0,663	0,643	0,623	0,604	0,585	0,567	0,549	0,532
Tasarrufların Bugünkü Değeri		1530157	1530795	1531444	1532103	1532773	1533453	1534143	1534844	1535554	1536275	1537006	1537746	1538496	1539256	1540025	1540804	1541593	1542390	1543197	1544013
Toplam Nakit Akışı		1.530.157	3.060.952	4.592.396	6.124.499	7.657.271	9.190.724	10.724.867	12.259.711	13.795.265	15.331.540	16.868.546	18.406.292	19.944.788	21.484.044	23.024.069	24.564.873	26.106.466	27.648.856	29.192.053	30.736.066
Tasarrufların Net Bugünkü Değeri	**$30.736.066**																				
Net Nihai Nakit Akışı (USD)																					
Net Nakit Akışı	-11.200.000	793.402	806.006	818.363	830.479	842.360	-188.643	528.687	876.655	887.657	898.453	-114.984	919.450	609.194	939.686	949.531	198.714	968.697	740.037	987.196	996.205
Toplam Nihai Nakit Akışı	-11.200.000	-10.406.598	-9.600.591	-8.782.228	-7.951.750	-7.109.390	-7.298.034	-6.769.347	-5.892.692	-5.005.035	-4.106.581	-4.221.565	-3.302.115	-2.692.921	-1.753.234	-803.703	-604.990	363.708	1.103.745	2.099.941	3.087.145
Nakit Akışının Net Bugünkü Değeri	**$3.087.145**																				

Yakıt Pili Toplam Elektrik Üretimi (kWh)	Entry	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Yıllık Enerji Üretimi		12.290.863	11.932.877	11.585.317	11.247.881	10.920.273	10.602.206	10.293.404	9.993.596	9.702.521	9.419.923	9.145.556	8.879.181	8.620.564	8.369.480	8.125.708	7.889.037	7.659.259	7.436.174	7.219.587	7.009.307
Enerji Üretiminin Net Bugünkü Değeri	**188.342.714kWh**																				

Şekil C.4 Yakıt Pili Senaryo 04 Ekonomik Analiz Çıktısı

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makale

1. İ.U.Başyazıcı, Ö. Ağra, "Ticari binalarda bileşik ısı güç sistemi olarak yakıt pili uygulaması - alışveriş merkezi örneği," Tesisat Mühendisliği,vol.197,pp.45-48, 2023

Konferans Bildirisi

1. İ.U.Başyazıcı, Ö. Ağra, "Bileşik ısı güç sistemi olarak bir alışveriş merkezinden yakıt pili uygulaması," 15.Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi,vol.2, pp.771-781, 2023