

T.C.
ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ GÜNEŞ ENERJİSİ VE HİDROJEN
ENERJİSİNE DAYALI HİBRİT ELEKTRİK/SICAK SU ÜRETİM
SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Gamze SOYTÜRK

Danışman
Prof. Dr. Önder KIZILKAN

II: Danışman
Doç. Dr. Mehmet Akif EZAN

ISPARTA - 2023



© 2023 [Gamze SOYTÜRK]

ETİK BEYANI

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak ve bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın hazırladığım bu tez çalışmasında;

Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

19/01/2023

Gamze SOYTÜRK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Önemi	6
1.2. Tezin Kapsamı	7
1.3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları	9
1.3.1. Güneş enerjisi.....	9
1.3.1.1. Fotovoltaik/termal sistemler.....	10
1.3.1.2. Güneş enerjili su ısıtma sistemleri	11
1.3.2. Hidrojen enerjisi.....	12
1.3.2.1. Hidrojen üretim yöntemleri.....	14
1.3.2.1.1. Fosil yakıtlardan hidrojen üretimi.....	15
1.3.2.1.2. Suyun elektrolizi ile hidrojen üretimi	16
1.3.2.1.3. Termokimyasal yöntemler ile hidrojen üretimi.....	20
1.3.2.1.4. Fotoliz ile hidrojen üretimi.....	20
1.3.3. Yenilenebilir enerji kaynakları için enerji depolama sistemleri	21
1.3.3.1. Bataryalarda enerji depolama.....	22
1.3.3.2. Hidrojenin depolanması	23
1.3.3.2.1. Sıkıştırılmış gaz olarak depolama	24
1.3.3.2.2. Sıvı olarak depolama.....	24
1.3.3.2.3. Metal hidrit esaslı depolama	25
1.3.3.2.4. Karbon nanotüplerde depolama	27
1.3.3.2.5. Cam mikro kürelerde depolama	28
1.3.3.2.6. Mağaralarda depolama	28
1.3.4. Hidrojenden elektrik enerjisi üretimi	28
2. KAYNAK ÖZETLERİ	32
3. MATERYAL VE YÖNTEM	44
3.1. Meteorolojik Verilerin ve Elektrik Tüketiminin Belirlenmesi.....	44
3.2. Hibrit Sistemin Tasarlanması.....	54
3.3. Hibrit Sistem Bileşenlerinin Matematiksel Modellemesi	55
3.3.1. PV/T modellemesi.....	56
3.3.2. Sıcak su depolama tankı modellemesi	67
3.3.3. Batarya modellemesi.....	80
3.3.4. PEM elektrolizör modellemesi.....	81
3.3.5. Hidrojen depolama tankı	83
3.3.6. PEM yakıt pili modellemesi.....	83
3.4. Enerji Yönetim Stratejisi.....	86
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	91
4.1. PV/T Panellerin Dinamik Analiz Sonuçları	94
4.2. Bataryaların Dinamik Analiz Sonuçları	105
4.3. PEM Elektrolizörün Dinamik Analiz Sonuçları	111

4.4. PEM Yakıt Pilinin Dinamik Analiz Sonuçları	117
4.5. Sistem Bileşenlerinin Güçlerinin Karşılaştırılması	120
4.6. Sıcak Su Depolama Tankı Dinamik Analiz Sonuçları	126
4.7. Yardımcı Isıtıcı Gücü Dinamik Analiz Sonuçları	132
4.8. PV/T Panellerin ve Sistemin Verimi	137
4.9. Ekonomik Analiz Sonuçları	139
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	144
KAYNAKLAR	147
ÖZGEÇMİŞ	159



ÖZET

Doktora Tezi

ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ GÜNEŞ ENERJİSİ VE HİDROJEN ENERJİSİNE DAYALI HİBRİT ELEKTRİK/SICAK SU ÜRETİM SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Gamze SOYTÜRK

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Önder KIZILKAN

II. Danışman: Doç. Dr. Mehmet Akif EZAN

Bu tez çalışmasında İzmir ilinde şebekeden bağımsız bir evin elektrik ve sıcak su ihtiyacının karşılanması amaçlanmıştır. Bu amaçla öncelikle 300 m² taban alanına sahip 5 kişilik bir ailenin yaşadığı iki katlı bir ev tasarlanmıştır. Dinamik analizlerin yürütülmesi ve sistem bileşenlerinin modellenmesi amacıyla İzmir iline ait meteorolojik veriler elde edilmiştir. Bir yıl boyunca kesintisiz olarak elektrik ve sıcak su ihtiyacının karşılanması amacıyla güneş-hidrojen enerjisine dayalı hibrit bir sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan sistem temel olarak, PV/T panel, batarya, PEM elektrolizör, hidrojen depolama tankı, PEM yakıt pili ve sıcak su depolama tankından oluşmaktadır. Tasarlanan sistemin her bir bileşeni için MATLAB ortamında 0-D matematiksel modeller oluşturulmuş, oluşturulan matematiksel modeller literatürde bulunan mevcut çalışmalar ile doğrulanmıştır. Modelleme ve doğrulama çalışmaları tamamlanan sistem elemanlarının birbirine entegrasyonu için enerji yönetim stratejisi geliştirilmiştir. Geliştirilen enerji yönetim stratejisine göre bir yıl boyunca kesintisiz olarak elektrik ve sıcak su sağlamak amacıyla sistem bileşenlerinin minimum kapasiteleri/sayıları belirlenmiştir. Yapılan dinamik analiz sonuçlarına göre 139 adet PV/T panel, 110 adet batarya, 13 adet PEM-FC ve 126 kg kapasiteli hidrojen depolama tankı (30 adet) kullanılması durumunda evin elektrik ihtiyacı bir yıl boyunca kesintisiz olarak karşılanmaktadır. Evin sıcak su ihtiyacı ise sıcak su depolama tankı ile karşılanmaktadır. Sıcak su depolama tankı ile sıcak su ihtiyacının karşılanamadığı durumlarda depolama tankı çıkışında bulunan yardımcı ısıtıcı ile sıcak su ihtiyacı karşılanmaktadır. Bu tez çalışmasında sıcak su ihtiyacını karşılamak amacıyla 132 litre hacminde sıcak su depolama tankı ve maksimum kapasitesi 4.13 kW olan yardımcı ısıtıcı kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: PV/T, Batarya, PEM elektrolizör, PEM yakıt pili, Enerji yönetim stratejisi

2023, 162 sayfa

ABSTRACT

Ph.D.Thesis

MODELING AND ANALYSIS OF HYBRID OFF-GRID ELECTRIC/HOT WATER GENERATION SYSTEM BASED ON SOLAR AND HYDROGEN ENERGY

Gamze SOYTÜRK

**Isparta University of Applied Sciences
The Institute of Graduate Education
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Önder KIZILKAN

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Akif EZAN

In this thesis, it is aimed to meet the electricity and hot water needs of a house off-grid of the mains in İzmir. For this purpose, first, a two-floored house with a 300 m² floor area and a with a family of 5 people is designed. Meteorological data of İzmir province are obtained to carry out dynamic analyzes and model system components. A hybrid system based on solar-hydrogen energy has been designed to meet the electricity and hot water needs continually for a year. The designed system basically consists of PV/T panel, battery, PEM electrolyzer, hydrogen storage tank, PEM fuel cell and hot water storage tank. For each component of the designed system, 0-D mathematical models are established in the MATLAB environment, and the mathematical models created are verified with the existing studies in the literature. An energy management strategy has been developed for the integration of the system elements whose modeling and verification studies have been completed. According to the developed energy management strategy, the minimum capacities/numbers of the system components have been determined to provide electricity and hot water uninterruptedly for one year. Based on the results of the dynamic analysis, if 139 PV/T panels, 110 batteries, 13 PEM-FC and 126 kg capacity hydrogen storage tanks (30) are used, the electricity need of the house is met uninterruptedly for one year. The hot water need of the house is supplied by the hot water storage tank. In cases where the need for hot water cannot be met with the hot water storage tank, the hot water need is met with the auxiliary heater located at the outlet of the storage tank. In this thesis, a 132-liter hot water storage tank and a backup heater with a maximum capacity of 4.13 kW are used to meet the hot water need.

Key Words: PV/T, Battery, PEM electrolyzer, PEM fuel cell, Energy management strategy.

2023, 162 pages

TEŞEKKÜR

2014 yılında başladığım akademik hayatımda öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyduğum, hiçbir görüşme teklifimi geri çevirmeden gecesiyle gündüzüyle büyük fedakarlıklarla beni yetiştiren, hayattaki en büyük şanslarımdan biri olan, sadece akademik olarak değil manevi olarak da desteklerini esirgemeyen, değerini kelimelere sığdıramadığım çok kıymetli hocam Prof. Dr. Önder KIZILKAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Akademik hayatımda ufkumda yeni çıgırlar açan, her hafta uzaktan görüşmelerle beni yönlendiren, en zor günlerimde yardımına yetişen, bugünlere gelmemde çok büyük katkıları olan ikinci danışmanım çok değerli hocam Doç. Dr. Mehmet Akif EZAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hem proje yürütücümüz hem de TİK üyemiz olan çok değerli hocam Prof. Dr. Can Özgür ÇOLPAN'a beni çalışma grubuna dahil ettiği, yönlendirmeleriyle desteklediği için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ve tabii ki en büyük teşekkür canım eşim Mustafa SOYTÜRK'e ve biricik kızım, gözümün nuru, gönlümün ışığı Reyyan Esma'ma...Siz olmasanız bu zorlu sürecin üstesinden gelemezdik. Sabrınız için, yaptığınız tüm fedakarlıklar için ne kadar teşekkür etsem azdır... Varlığınız için sonsuz şükürler olsun...

Annemden kalan en büyük mirasım Canım Abim'e bu süreçteki desteklerinden dolayı sonsuz sevgilerimi sunarım...

Babalarım, ikinci annem olan kayınvalideme, dualarıyla hep yanımda olan arkadaşlarıma desteklerinden dolayı sonsuz sevgilerimi sunarım.

Tezimin gerçekleşmesinde 220N405 numaralı proje ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Bu güzel günleri görmek isteyen ve ama göremeyen Canım Annem'e bu tezi hediye ediyorum.

Seni çok özliyorum Canım Annem...

Gamze SOYTÜRK
ISPARTA, 2023

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Birincil enerji kaynaklarının tüketiminin yıllara göre değişimi.....	2
Şekil 1.2. Farklı enerji kaynaklarına göre CO ₂ emisyon miktarı	3
Şekil 1.3. Sektörlere göre Türkiye’de elektrik tüketimi.....	4
Şekil 1.4. Ülkemizin yıllık güneşlenme haritası	10
Şekil 1.5. PV/T panel sistem elemanları	11
Şekil 1.6. Kapalı döngü güneş enerjili su ısıtma sistemleri	12
Şekil 1.7. Hidrojen kullanım amaçları	13
Şekil 1.8. Hidrojen üretim metotları ve verimleri	14
Şekil 1.9. Hidrojen enerjisi renklerinin hidrojen üretim metotlarına göre değişimi ..	15
Şekil 1.10. Alkali elektrolizör çalışma prensibi	17
Şekil 1.11. PEM elektrolizörün çalışma prensibi.....	18
Şekil 1.12. Suyun elektrolizi	19
Şekil 1.13. Fotoliz ile hidrojen üretimi	21
Şekil 1.14. Enerji depolama yöntemleri	22
Şekil 1.15. Hidrit oluşumu	26
Şekil 1.16. Absorpsiyon ve desorpsiyon sırasında denge basıncının değişimi.....	27
Şekil 1.17. Yakıt pilinin yapısı ve çalışma prensibi.....	29
Şekil 3.1. Şebekeden bağımsız kurulacak evin üç boyutlu gösterimi	45
Şekil 3.2. Evin birinci katının planı	46
Şekil 3.3. Evin ikinci katının planı.....	47
Şekil 3.4. İzmir için yıllık meteorolojik değerler	49
Şekil 3.5. Elektriksel yük profili	50
Şekil 3.6. Yıllık elektrik tüketimin dağılımı	51
Şekil 3.7. Elektrik enerjisi ihtiyacının aylara göre değişimi	51
Şekil 3.8. Toplam elektrik enerjisi ihtiyacının mevsimlere göre değişimi	52
Şekil 3.9. Isıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacının aylara göre değişimi.....	53
Şekil 3.10. Seçilen günler için sıcak su kullanım profili.....	54
Şekil 3.11. Hibrit sistem şematik gösterimi	55
Şekil 3.12. PV/T panel şematik gösterimi ve termal direnç ağı.....	57
Şekil 3.13. $\frac{\dot{m}_{HTF} c_{pHTF}}{A_{PV/T} U_{LF}}$ değerinin bir fonksiyonu olarak panel akış faktörünün F'' değişimi	65
Şekil 3.14. $\Delta T/I_{güneş}$ oranına ve kütleli debiye bağlı PV/T termal verim değişimleri eğrisi	66
Şekil 3.15. $\Delta T/I_{güneş}$ oranına ve kütleli debiye bağlı PV/T elektriksel verim değişimleri eğrisi	66
Şekil 3.16. Sıcak su depolama tankı şematik gösterimi	67
Şekil 3.17. Helisel borulu ısı değiştiricisinin fiziksel boyutları	68
Şekil 3.18. Toplam ısı kayıp katsayısının değişime göre ($U_{kayıp} = 10-25 \text{ W/m}^2\text{K}$) tankın sıcaklığının zamanla değişimi ($U_{HX} = 300 \text{ W/m}^2\text{K}$)	73
Şekil 3.19. Toplam ısı kayıp katsayısının değişime göre ($U_{kayıp} = 10-25 \text{ W/m}^2\text{K}$) tankın sıcaklığının zamanla değişimi ($U_{HX} = 400 \text{ W/m}^2\text{K}$)	74
Şekil 3.20. Toplam ısı kayıp katsayısının değişime göre ($U_{kayıp} = 10-25 \text{ W/m}^2\text{K}$) tankın sıcaklığının zamanla değişimi ($U_{HX} = 500 \text{ W/m}^2\text{K}$)	75

Şekil 3.21. Isı değiştiricisinin toplam ısı transfer katsayısının değişime göre ($U_{HX} = 200-500 \text{ W/m}^2\text{K}$) tankın sıcaklığının zamanla değişimi ($U_{kayıp} = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$)	75
Şekil 3.22. Isı değiştiricisinin toplam ısı transfer katsayısının değişime göre ($U_{HX} = 200-500 \text{ W/m}^2\text{K}$) tankın sıcaklığının zamanla değişimi ($U_{kayıp} = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$)	76
Şekil 3.23. Isı değiştiricisinin toplam ısı transfer katsayısının değişime göre ($U_{HX} = 200-500 \text{ W/m}^2\text{K}$) tankın sıcaklığının zamanla değişimi ($U_{kayıp} = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$)	77
Şekil 3.24. Isı değiştiricisinin toplam ısı transfer katsayısının değişime göre ($U_{HX} = 200-500 \text{ W/m}^2\text{K}$) tankın sıcaklığının zamanla değişimi ($U_{kayıp} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$)	78
Şekil 3.25. PEM elektrolizör polarizasyon eğrisi.....	82
Şekil 3.26. H1000XP modeli için güç- hidrojen yakıt tüketimi ilişkisi	84
Şekil 3.27. H1000XP modeli için güç-verim ilişkisi	85
Şekil 3.28. Hibrit sistem için enerji yönetim stratejisi	90
Şekil 4.1. Sistemin çalıştığı bölgeler.....	92
Şekil 4.2. PV/T panellerin toplam enerjisinin aylara ve mevsimlere göre değişimi..	96
Şekil 4.3. PV/T panellerin ürettiği toplam gücün yıllık değişimi	97
Şekil 4.4. PV/T gücü ve elektriksel yükün aylık ve mevsimlik ortalama değerleri...	98
Şekil 4.5. PV/T yüzey sıcaklığının yıllık değişimi	99
Şekil 4.6. Isı transfer akışkanının giriş ve çıkış sıcaklığının yıllık değişimi	100
Şekil 4.7. Yılın ilk altı ayı için PV/T gücü, toplam elektriksel yük ve net gücün değişimi.....	101
Şekil 4.8. Yılın son altı için PV/T gücü, toplam elektriksel yük ve net gücün değişimi	102
Şekil 4.9. 15 Ocak günü için net gücün, toplam yükün ve PV/T gücünün değişimi.....	103
Şekil 4.10. 15 Nisan günü için net gücün, toplam yükün ve PV/T gücünün değişimi	104
Şekil 4.11. 15 Temmuz günü için net gücün, toplam yükün ve PV/T gücünün değişimi	104
Şekil 4.12. 15 Ekim için net gücün, toplam yükün ve PV/T gücünün değişimi	105
Şekil 4.13. Bataryaların şarjının ve enerjisinin yıl boyunca değişimi.....	107
Şekil 4.14. Seçilen dört ay için bataryaların şarj durumu	108
Şekil 4.15. 15 Ocak günü için bataryaların şarj durumunun değişimi	109
Şekil 4.16. 15 Nisan günü için bataryaların şarj durumunun değişimi	109
Şekil 4.17. 15 Temmuz günü için bataryaların şarj durumunun değişimi	110
Şekil 4.18. 15 Ekim günü için bataryaların şarj durumunun değişimi.....	110
Şekil 4.19. PEM elektrolizör gücünün yıllık değişimi	111
Şekil 4.20. Maksimum PEM elektrolizör gücünün aylara ve mevsimlere göre değişimi	113
Şekil 4.21. Hidrojenin kütleel debisinin yıllık değişimi	114
Şekil 4.22. Seçilen dört ay için hidrojenin kütleel debisi	115
Şekil 4.23. Hidrojen üretiminin aylara göre değişimi	116
Şekil 4.24. Hidrojen üretiminin mevsimlere göre değişimi	117

Şekil 4.25. Aktif PEM-FC sayısı ve toplam PEM-FC gücünün aylara göre değişimi	118
Şekil 4.26. Tankta depolanan hidrojen kütleinin değişimi	120
Şekil 4.27. 15 Ocak günü için güç üretim-tüketiminin ve bataryaların şarj durumunun değişimi.....	121
Şekil 4.28. 15 Ocak günü için güç üretim-tüketiminin ve hidrojen üretiminin değişimi	122
Şekil 4.29. 15 Nisan günü için güç üretim-tüketiminin ve bataryaların şarj durumunun değişimi.....	122
Şekil 4.30. 15 Nisan günü için güç üretim-tüketiminin ve hidrojen üretiminin değişimi	123
Şekil 4.31. 15 Temmuz günü için güç üretim-tüketiminin ve bataryaların şarj durumunun değişimi.....	123
Şekil 4.32. 15 Temmuz günü için güç üretim-tüketiminin ve hidrojen üretiminin değişimi	124
Şekil 4.33. 15 Ekim günü için güç üretim-tüketiminin ve bataryaların şarj durumunun değişimi.....	124
Şekil 4.34. 15 Ekim günü için güç üretim-tüketiminin ve hidrojen üretiminin değişimi	125
Şekil 4.35. 15 Aralık günü için güç üretim-tüketiminin ve bataryaların şarj durumunun değişimi.....	125
Şekil 4.36. 15 Aralık günü için güç üretim-tüketiminin ve hidrojen üretiminin değişimi	126
Şekil 4.37. Tank sıcaklığının yıllık değişimi	127
Şekil 4.38. Ocak ayında tank sıcaklığının değişimi	128
Şekil 4.39. 15 Ocak gününde tank sıcaklığının değişimi	128
Şekil 4.40. Nisan ayında tank sıcaklığının değişimi	129
Şekil 4.41. 15 Nisan gününde tank sıcaklığının değişimi	129
Şekil 4.42. Temmuz ayında tank sıcaklığının değişimi	130
Şekil 4.43. 15 Temmuz gününde tank sıcaklığının değişimi	130
Şekil 4.44. Ekim ayında tank sıcaklığının değişimi	131
Şekil 4.45. 15 Ekim gününde tank sıcaklığının değişimi.....	131
Şekil 4.46. Yardımcı ısıtıcı gücünün yıllık değişimi.....	132
Şekil 4.47. Ocak ayında yardımcı ısıtıcı gücünün değişimi.....	133
Şekil 4.48. 15 Ocak gününde yardımcı ısıtıcı gücünün değişimi.....	133
Şekil 4.49. Nisan ayında yardımcı ısıtıcı gücünün değişimi.....	134
Şekil 4.50. 15 Nisan gününde yardımcı ısıtıcı gücünün değişimi.....	134
Şekil 4.51. Temmuz ayında yardımcı ısıtıcı gücünün değişimi	135
Şekil 4.52. 15 Temmuz gününde yardımcı ısıtıcı gücünün değişimi	135
Şekil 4.53. Ekim ayında yardımcı ısıtıcı gücünün değişimi.....	136
Şekil 4.54. 15 Ekim gününde yardımcı ısıtıcı gücünün değişimi	136
Şekil 4.55. PV/T panellerin veriminin aylara göre değişimi.....	138
Şekil 4.56. PV/T panellerin ve sistemin yıllık verimi.....	139
Şekil 4.57. Sistem bileşenlerinin toplam maliyetlerinin dağılımı	143

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1.Hidrojenin bazı fiziksel özellikleri.....	13
Çizelge 1.2. Elektrolizör çeşitleri.....	16
Çizelge 1.3. Gibbs serbest enerjisi hesabında kullanılan değerler	20
Çizelge 1.4. Farklı tipteki metal hidrit çeşitleri.....	25
Çizelge 1.5. Yakıt pili çeşitleri ve özellikleri.....	31
Çizelge 3.1. Birinci kat termal bölgelerin detayları	46
Çizelge 3.2.İkinci kat termal bölgelerin detayları	47
Çizelge 3.3.Termal bölge yapılarının detayları.....	48
Çizelge 3.4. PV/T panelin özellikleri.....	58
Çizelge 3.5.Termofiziksel özellik denkleminin katsayıları.....	59
Çizelge 3.6. Depolama tankının ve ısı değiştiricisinin geometrik özellikleri	68
Çizelge 3.7.İsı değiştiricisinin temel geometrik özellikleri	71
Çizelge 3.8. Literatürde bulunan çalışmalardaki toplam ısı transfer katsayısı	72
Çizelge 3.9. Literatür bulunan çalışmalardaki toplam ısı kayıp katsayısı.....	72
Çizelge 3.10. Batarya özellikleri.....	80
Çizelge 3.11. PEM elektrolizör özellikleri.....	82
Çizelge 3.12. Hidrojen depolama tankı özellikleri.....	83
Çizelge 4.1. Hibrit sistemin temel bileşenleri ve özellikleri	94
Çizelge 4.2. Sistem bileşenlerinin ilk yatırım maliyeti	141
Çizelge 4.3. Sistem bileşenlerinin toplam maliyeti.....	142

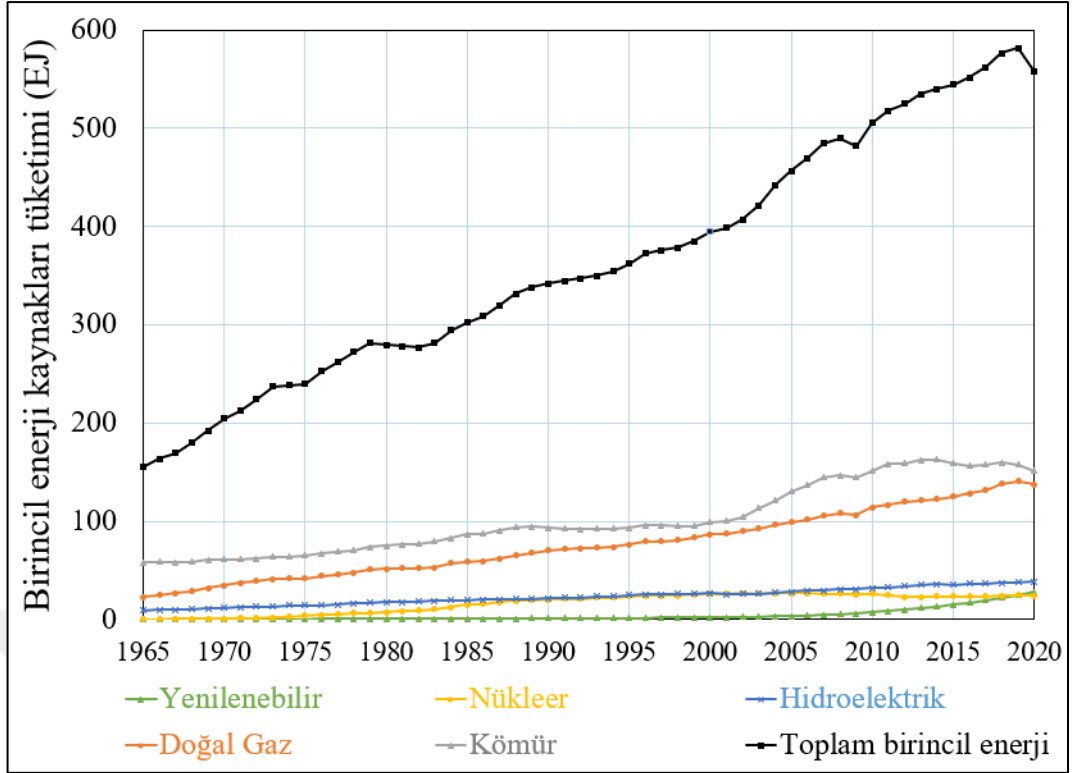
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Alan (m^2)
c_p	Özgül ısı (kJ/kgK)
C	Maliyet (\$)
CO_2	Karbondioksit
db	Düz boru
dt	Zaman adımı (s)
D	Çap (m)
E	Enerji (J)
EES	Engineering Equation Solver
f	Şarj/deşarj verimliliği
F	Faraday sabiti (Coulomb/mol)
FDM	Faz değiştiren madde
F_R	Panel ısı kazanç faktörü
F'	Panel verim faktörü
G	Gibbs serbest enerjisi (kJ/mol)
Gr	Grashof sayısı
h	Özgül entalpi (kJ/kg), Isı taşınım katsayısı (W/m^2K)
H	Yükseklik (m)
HTF	Isı transfer akışkanı (Heat transfer fluid)
HX	Isı değiştiricisi
H_2	Hidrojen
I	Güneş ışıması (W/m^2)
i	Akım yoğunluğu (A/cm^2)
j_h	Colburn faktörü
k	Termal iletkenlik (W/mK)
komp	Kompresör
ks	Kullanım suyu
L	Uzunluk (m)
m	Kütle (kg)
$\dot{m}$	Kütleli debi (kg/s)
M	Molekül ağırlığı (kg/mol)
MH	Metal hidrit
N	Sayı
Nu	Nusselt number (hD_i/k)
o	Dış çap
P	Basınç (kPa), Güç (W)
p	Isı değiştiricisi hatvesi (m)
PEM-El	Proton elektrolit membranlı elektrolizör
PEM-FC	Proton değişim membranlı yakıt hücresi
PF	Paketleme faktörü
Pr	Prandtl number ($c_p\mu/k$)
PV	Fotovoltaik
PV/T	Fotovoltaik/Termal
$\dot{Q}$	Isı transfer hızı (W)
R	Yarıçap (m)
Re	Reynolds number ($\rho V D_i/\mu$)
ref	Referans
s	Özgül entalpi (kJ/kgK)

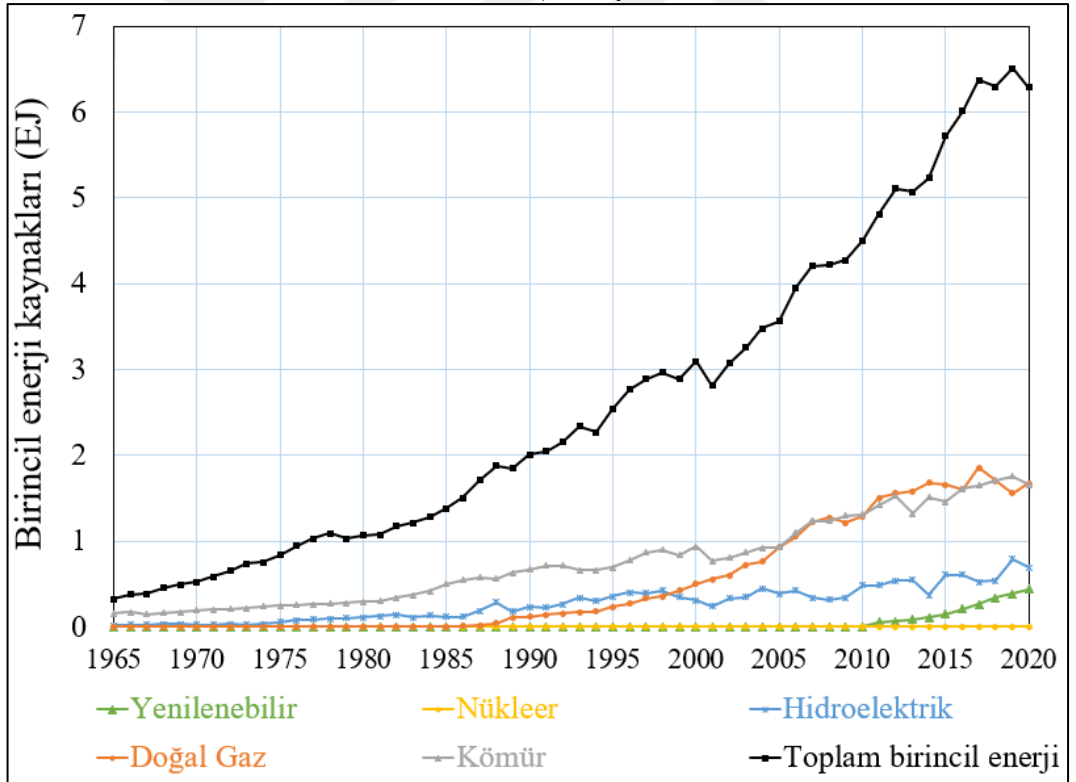
t	Zaman (s)
T	Sıcaklık (°C)
U	Toplam ısı transfer katsayısı (W/m ² K)
V	Voltaj (V)
Vol	Hacim (m ³)
W	Genişlik (m)
0-D	Sıfır boyut
α	Soğurganlık katsayısı
β	Sıcaklık güç katsayısı (1/K)
ε	Yayıcılık katsayısı
τ	Geçirgenlik katsayısı
λ	Kalınlık (m)
η	Verim
μ	Dinamik viskozite (kg/ms)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
Δ	Fark

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun artması ve sanayileşme ile birlikte enerji ihtiyacının artması fosil yakıtlara olan talebin de hızla artmasına sebep olmaktadır. Dünya’da ve Türkiye’de birincil enerji kaynaklarının tüketiminin yakıt türüne göre değişimi Şekil 1.1’de gösterilmektedir. 1965 yılından bu yana fosil bazlı (petrol, kömür ve doğal gaz) üretilen enerji, sürekli artan enerji talebini karşılamaktadır. Şekilden de anlaşılağı üzere özellikle 2000’li yılların sonundan itibaren yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimindeki payı önemli ölçüde artmasına rağmen, bu artış artan enerji talebini karşılayamamakta ve fosil kaynaklı enerji üretimi de artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları ile enerji arzı dünyadaki toplam enerji talebinin %4.96’sı iken, Türkiye’de bu oranın %6.33 olduğu belirtilmektedir (Anonim, 2021a).



a) Dünya

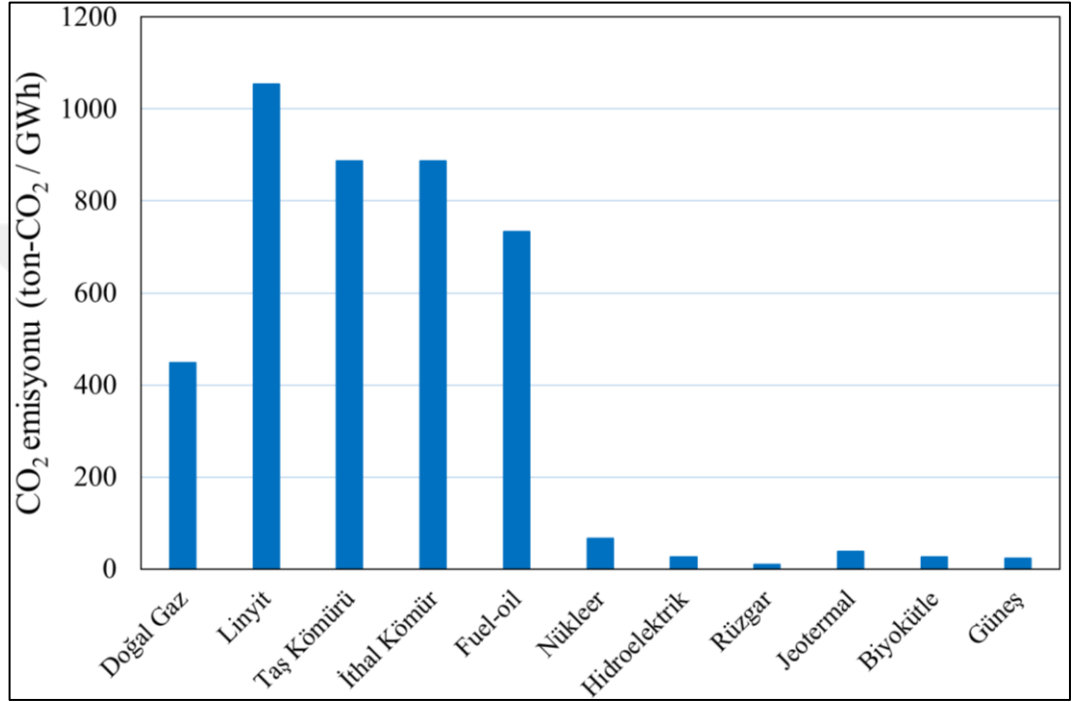


b) Türkiye

Şekil 1.1. Birincil enerji kaynaklarının tüketiminin yıllara göre değişimi (Anonim, 2021a)

Enerji üretim yöntemlerinin küresel iklim değişikliği üzerinde farklı etkileri vardır. Bunlardan biri, enerji üretim sürecinde Dünya atmosferine salınan CO₂ miktarıdır.

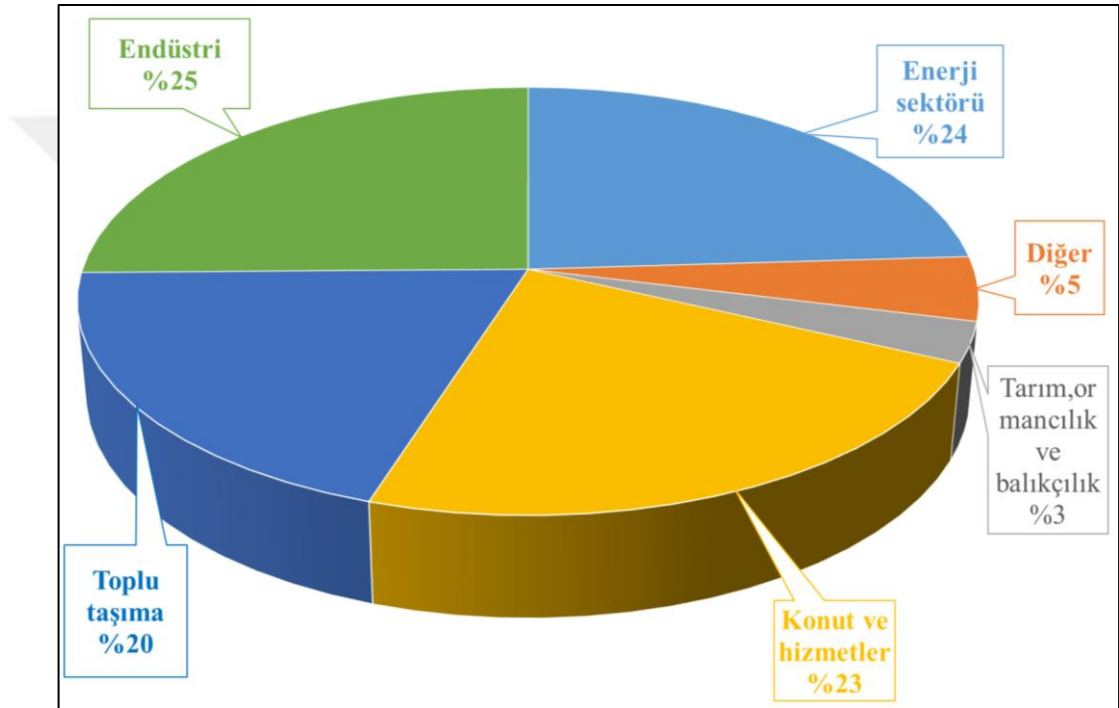
Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'ne (IPCC, 2014) göre, fosil yakıtı dayalı enerji üretimindeki artış, CO₂ emisyon miktarındaki artışla doğrudan ilişkilidir ve bu durum küresel iklim değişikliği sorununun önde gelen nedenlerinden biridir (IPCC, 2014). Farklı enerji üretim kaynakları tarafından üretilen CO₂ emisyon miktarı Şekil 1.2'de sunulmaktadır. Şekilden de anlaşıldığı gibi fosil yakıtlı kaynakların CO₂ emisyonundaki payı oldukça fazladır.



Şekil 1.2. Farklı enerji kaynaklarına göre CO₂ emisyon miktarı (Dulkadiroğlu, 2018)

Fosil yakıt kullanımının sonucu olarak hava kirliliği, küresel ısınma, sera gazı salınımı, asit yağmurları gibi önemli çevresel sorunlar ortaya çıkmaktadır (Bayrak, 2014). Fosil veya biyokütle bazlı enerji üretim yöntemlerinin, yenilenebilir enerji kaynaklarına göre doğaya 5 ila 75 kat daha fazla zarar verdiği gözlemlenebilmektedir (IPCC, 2014). Ayrıca, insan kaynaklı CO₂ emisyonlarının dörtte üçünün enerji üretimi için fosil yakıtların yakılmasından kaynaklandığı düşünüldüğünde, ana odak, birim enerji başına daha az CO₂ emisyonuna neden olan yenilikçi enerji üretim teknolojileri olmalıdır. Ek olarak, fosil yakıt kaynaklarının hızla tükenmesi ve sınırlı olması, uzun dönemli sürdürülebilir gelişme oluşturabilecek alternatif enerji kaynakları arayışını meydana getirmektedir.

2018 verilerine göre Türkiye’de kullanılan elektriğin enerji tüketiminde sektör bazlı değişimi Şekil 1.3’te gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi tüketilen enerjinin %23.02’si konut ve hizmetler alanında kullanılmaktadır. Bu kullanımın detayları incelendiğinde, elektriğin %22’sinin konutların sıcak su ihtiyacı için, %48’inin konut ısıtması ihtiyacı için tüketildiği ve toplam elektriğin %70’inin konforlu koşullarda yaşamak için kullanıldığı görülmektedir. Bu durumda bu ihtiyaçlara yönelik devasa elektrik tüketim oranları, uygun yenilenebilir enerji kaynağı sistemlerinin yerli uygulama alanlarına entegrasyonu ile yüksek tasarruf imkanı oluşturmaktadır.



Şekil 1.3. Sektörlere göre Türkiye’de elektrik tüketimi (IEA, 2021)

Yenilenebilir (alternatif) enerji kaynakları; ekonomik, güvenilir, çevre dostu ,sürdürülebilir enerji temini sağlayan enerji sistemleridir (Hepbaşlı, 2008). Bu bağlamda, sürdürülebilir enerji sistemlerinin sağlanması için yenilenebilir enerji kaynaklarının en verimli şekilde kullanılması gerekmektedir (Shaahid vd., 2007; Kornelakis, 2010).

Fosil enerji kaynaklarından farklı olarak yenilenebilir enerji kaynakları, yenilenebilir potansiyeline sahip, diğer enerji kaynaklarıyla birlikte entegre sistemler oluşturabilen kaynaklardır (Bayrak, 2014). Yenilenebilir enerji türleri içerisinde rüzgâr enerjisi,

güneş enerjisi, jeotermal, biyokütle hidroelektrik, gibi enerji kaynaklarının kullanımının birçok avantajı bulunmaktadır.

Bunun yanı sıra özellikle güneş ve rüzgar enerjisi iklimsel ve meteorolojik koşullara bağımlılıktan dolayı kesintili, süreksiz ve dalgalı bir karakteristiğe sahiptir (Erdoğan, 2012). Bundan dolayı bu kaynakların verimli kullanımı için üretilen enerjinin depolanması gerekmektedir. Bu kaynaklardan üretilen elektrik enerjisi miktarı, bu kaynakların karakteristiklerinden dolayı mevsimlik, aylık, saatlik olarak değişmektedir. Bu sebeplerden dolayı bir enerji taşıyıcısının yada bir depolama ortamının varlığına ihtiyaç duyulmaktadır (Yılancı, 2008).

21. Yüzyılın sosyo-ekonomik yapılanması, yeni enerji teknolojileri kapsamında taşınabilir bir enerji kaynağı olan hidrojen enerjisinin önemini ortaya çıkarmaktadır (Kayfeci, 2011). Geleceğin enerjisi olan hidrojen enerjisi, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilebilmekte ve farklı yöntemlerle depolanabilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimde kullanılmasında meydana gelen en önemli sorun meteorolojik durumlar ve süreksizlikten kaynaklanan üretim aksaklıklarıdır. Bu aksaklıkların giderilmesi ve enerjisinin bulunduğu bölgeden farklı bir bölgeye transfer edilmesinde enerji taşıyıcısı olan hidrojen önemli rol oynamaktadır (Yılancı, 2008).

Gerek yenilenebilir enerji kaynaklarının gerekse hidrojen enerjisinin tek başına kullanılması, sistem boyutlarını ve maliyetini artırmakta, üretilen güç ile yük talebi arasında uyumsuzlukların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır (Zhou vd., 2010, Yang vd., 2007). Bu nedenle iki yada daha fazla enerji kaynağının binaların, ısıtma, soğutma yada elektrik ihtiyaçlarını karşılamak için bir arada kullanıldığı hibrit (birleşik, kombine) sistemlerin kullanımı yaygınlaşmaktadır (Altun, 2021). Bu sistemlerin amacı, kaynaklardan birinin yokluğunda veya azalmasında sistemin enerji ihtiyacını karşılamak ve sistemin sürekliliğini sağlamaktır (Ceylan, 2020). Bu sistemler, uygulama bölgesine göre, şebekeden bağımsız (off-grid) ve şebekeye bağlı (on-grid) olarak kullanılmaktadır (Altun, 2021). Şebekeye bağlı sistemlerde, yenilenebilir enerji kaynakları ile yük talebi karşılanmakta, yük talebinin karşılanamadığı durumlarda ihtiyaç duyulan enerji şebekeden sağlanmaktadır. Bunun yanı sıra yük talebinin düşük olduğu zamanlarda (örneğin gece saatleri) ihtiyaç duyulandan fazla güç üretildiğinde,

fazla enerji şebekeye önceden belirlenmiş birim fiyattan satılmaktadır. Kırsal alanlarda elektrik şebekesinin olmaması ve bu bölgelere elektrik enerjisinin taşınmasının oldukça maliyetli olmasından dolayı bu bölgelerde alternatif çözüm arayışları söz konusu olmuştur. Şebekeden bağımsız hibrit sistemler bu tür bölgelerin elektriksel ihtiyaçlarını karşılamak üzere en çok umut vaat eden çözümlerden biri konumundadır. Şebekeden bağımsız bu tür uygulamalarda hem yük hem de sıcak su talebinin karşılanması için fotovoltaiik/termal sistemler, batarya, elektrolizör, hidrojen depolama ünitesi, yakıt hücresi kombinasyonundan oluşan sistemler kullanılmaktadır (Erdoğan, 2012).

1.1. Tezin Amacı ve Önemi

Giderek artan çevresel problemler ve fosil kaynaklı yakıtların hızla tükenmesi, yenilenebilir ve temiz enerji kaynakları ile ilgili çalışmalara büyük bir ivme kazandırmıştır. İklimsel ve meteorolojik değişiklikler, alternatif enerji kaynakları ile üretilen gücün, talep edilen güç ihtiyacına karşılık gelememesi durumunu ortaya çıkarmaktadır. Bu kaynakların süresiz ve değişken yapılarından kaynaklanan sorunları çözmek ve sıfır karbon emisyonuna ulaşmak için enerji sistemlerinin revize edilmesi gerekmektedir. Bu noktada rüzgar, güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının hibrit olarak kullanılması ile birlikte sorunlar çözülebilmektedir. Dünyada kullanımı giderek artan hibrit sistemler, geleceğin yakıtı olarak tanımlanan hidrojen üretiminin temel enerji kaynağı olup temiz ve süreklilik gösteren bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Yeşil enerji taşıyıcısı olan hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen fazla elektrik için çekici bir depolama seçeneğidir. Ayrıca, özellikle elektrik erişimi olmayan şebekeden bağımsız uygulamalarda kesintisiz güç elde etmek için güneş-hidrojen enerjisinden oluşan hibrit sistemlerinin kullanımı önemli hale gelmektedir. Bu tez çalışmasında tasarlanan şebekeden bağımsız hibrit sistemin elektriğe erişimin olmadığı ya da maliyetli olduğu yerlerde alternatif ve ekonomik bir çözüm olacağı düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasının temel amaçları;

- Güneş enerjisi kaynaklı hidrojen üretim ünitesi içeren hibrit enerji sisteminin tasarlanması,

- Tasarlanan hibrit enerji sistemi ile kırsal alandaki şebekeden bağımsız bir konutun elektrik ve sıcak su ihtiyacının karşılanması,
- Sistem düzeyinde bir model oluşturmak amacıyla her bir sistem bileşeninin karakteristiklerinin belirlenmesi ve matematiksel modellerinin oluşturulması,
- Hem hava koşullarındaki hem de yük talebindeki (elektrik ve sıcak su) değişiklikleri göz önüne alarak hibrit sistem dinamik analizlerinin yapılması,
- Belirlenen enerji yönetim stratejisine göre modellenen bileşenlerin sisteme entegrasyonunun yapılması ve sonuçların yorumlanmasıdır.

Bu tez çalışmasında; son kullanıcının yük talebini karşılamak, kesintisiz güç ve sıcak su sağlamak amacıyla şebekeden bağımsız hibrit sistemin kırsal alanlarda uygulanabilirliğinin araştırılması hedeflenmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, şebekeden bağımsız uygulamalar için güneş ve hidrojen enerjisini içeren sistemlerde elektrik ve sıcak su ihtiyacının bir arada karşılandığı çalışmalara rastlanılmamıştır. Bu çalışmanın literatürdeki çalışmalardan farkı; hem yıllık meteorolojik hem de yük talebindeki (güç, ısıtma, soğutma, sıcak su) değişiklikleri dikkate alarak tasarım parametrelerinin hibrit sistem analizi için seçilmiş olmasıdır. Hibrit sistem analizi için sistem bileşenlerinin her birinin modellenmesi yapılarak belirlenen enerji yönetim stratejisine göre sisteme entegrasyonu sağlanacaktır.

1.2. Tezin Kapsamı

Tez çalışması, altı bölümden oluşmaktadır. Tezin ilk bölümü olan “Giriş” bölümünde Dünyada ve Türkiye’de birincil enerji tüketiminin yakıt türüne göre değişimi gösterilmiş, artan enerji talebi ile fosil kaynaklı enerji üretiminin de arttığı ifade edilmiştir. Fosil yakıt kullanımının neden olduğu CO₂ emisyonları ve bu sorunu çözmek için alternatif enerji kaynaklarının gerekliliği hakkında bilgiler verilmiştir. Alternatif enerji kaynaklarının kendi içinde bazı dezavantajları bulunmasından dolayı enerji depolamanın ve bu noktada geleceğin enerjisi olan hidrojen enerjisinin önemi vurgulanmıştır. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynakları ile hidrojen enerjisinin birlikte kullanıldığı hibrit sistem adı verilen sistemler hakkında bilgiler verilmiştir. Bu sistemlerin özellikle elektrik erişiminin hiç olmadığı ya da yetersiz olduğu şebekeden bağımsız uygulamalardaki kullanımı ele alınmıştır. “Giriş” bölümündeki amaç tezin

amacı ve motivasyonu hakkında temel bilgiler vermek olduğundan “Tezin Amacı ve Önemi” bu bölümde yer almaktadır.

İkinci bölümde, yenilebilir enerji kaynakları içerisinde en çok kullanılan güneş enerjisi ve güneş enerjisi uygulamaları (fotovoltaik/termal sistemler ve güneş enerjili su ısıtma sistemleri) hakkında genel bilgiler verilmiştir. Ayrıca geleceğin enerjisi olan hidrojen enerjisi, hidrojen üretim yöntemleri, hidrojen enerjisinin depolanması ve hidrojen gazından elektrik elde etmek amacıyla kullanılan yakıt pilleri hakkında genel bilgiler sunulmuştur.

Şebekeden bağımsız uygulamalarda hem elektrik ihtiyacının hem de sıcak su ihtiyacının karşılandığı sistemlerin literatür araştırması “Kaynak Özetleri” kısmı olan üçüncü kısımda yer almaktadır. Bu bölümde hibrit sistemlerin bileşen modellemesi, simülasyonları, doğrulama çalışmaları ile ilgili literatürde bulunan deneysel ve teorik çalışmalar incelenmiştir. Ayrıca bu tez çalışmasının literatürde bulunan mevcut çalışmalardan farkı ortaya konulmuştur.

Dördüncü bölümde hibrit sistemin tanıtımı, modelleme için gerekli verilerin toplanması (bina yüklerinin ve meteorolojik verilerin belirlenmesi), her bir sistem elemanın (PV/T (Fotovoltaik/Termal), sıcak su depolama tankı, batarya, PEM-El (Proton Elektrolit Membranlı Elektrolizör), hidrojen depolama tankı, PEM-FC (Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili) matematiksel modellemeleri ve doğrulama çalışmaları yer almaktadır. Ayrıca bu bölümde enerji yönetimi hakkında genel bilgiler verilmiş ve hibrit sistem için enerji yönetim stratejisi geliştirilmiştir.

Beşinci bölüm olan “Bulgular ve Tartışma” kısmında ise hibrit sistem ile ilgili günlük, aylık ve yıllık olarak yapılan dinamik analiz sonuçlarına yer verilmiştir. Ayrıca sistemin yıllık verimi ve ekonomik analiz sonuçları bu bölümde yer almaktadır.

Tezin son bölümü olan “Sonuç ve Öneriler” kısmında tez çalışması ile ilgili genel sonuçlar özetlenmiş ve tez çalışması ile ilgili tavsiyelerde bulunulmuştur.

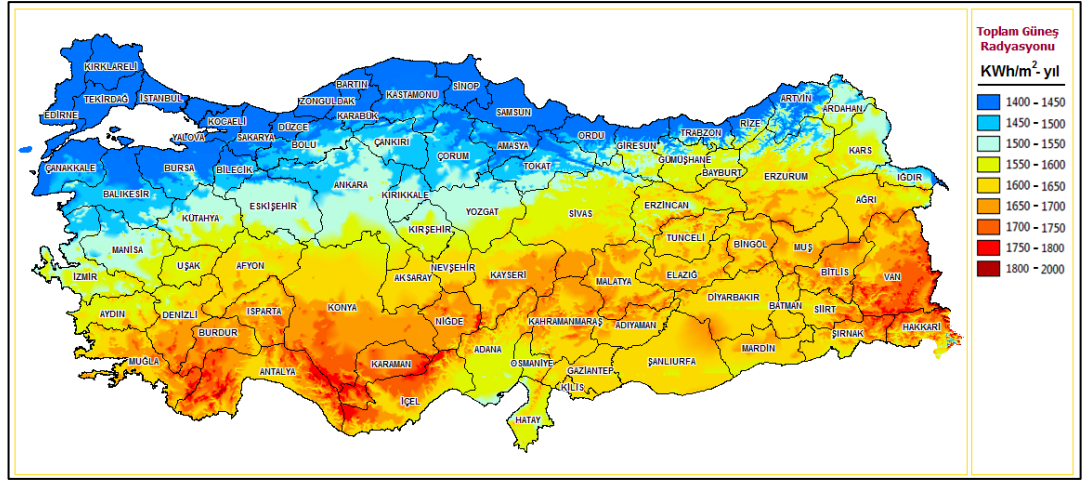
1.3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir diğ er bir adıyla alternatif enerji kaynakları tükenmeyen ve yenilenebilme potansiyeline sahip kaynaklardır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının temiz ve çevreci kaynaklar olmasından dolayı bu kaynaklardan enerji üretimi ülkemizde ve dünyada hızla artmaktadır. Güneş, rüzgâr gibi yaygın olarak kullanılan enerji kaynaklarının yanı sıra farklı uygulamalarda kullanılan hidrojen, biyokütle, hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynakları da bulunmaktadır. Bu bölümde tez kapsamında dikkate alınacak olan güneş ve hidrojen enerji tanıtılmaktadır. Bahsi geçen yenilenebilir enerji kaynaklarını verimli bir şekilde kullanmak için önemli noktalardan olan enerji depolama sistemleri de bu bölümde incelenmektedir. Ayrıca tezin temel amaçlarından biri olan Materyal ve Metot bölümünde yer alan hibrit sistem bileşenlerinin modelleme çalışmaları için gerekli olan teorik altyapı bu bölümde oluşturulmaktadır.

1.3.1. Güneş enerjisi

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yaygın olarak kullanılan güneş enerjisi, artan enerji ihtiyacını karşılamak için son yıllarda giderek önem kazanmıştır. Güneş enerjisi tükenmeyen, temiz,  evre dostu, kükürt, karbon ve gaz salınımı yapmayan bedava bir enerji kaynağıdır. Güneş, nükleer yakıtlar dışında yeryüzünde kullanılan tüm yakıtlar için temel enerji kaynağıdır. I erisinde devamlı olarak hidrojen gazının helyuma  evrildiğı reaksiyonlar oluşmakta, oluşan kütlesel fark ısıll enerjiye dönüşerek yayılmakta ve bu enerjinin küçük bir bölümü dünyaya ulaşmaktadır. Atmosferdeki karbondioksit, ozon ve su buharı gibi gazların güneş ışınımını absorbe etmeleri sebebiyle yeryüzüne ulaşabilen güneş ışığı düşük değerlerde olmaktadır.

şekil 1.4'te görüldüğü gibi ülkemiz oldukça zengin bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Bu enerjiyi değerlendirmek için yeni teknolojiler gelişmekte ve bu alandaki çalışmalar her geçen gün artmaktadır.



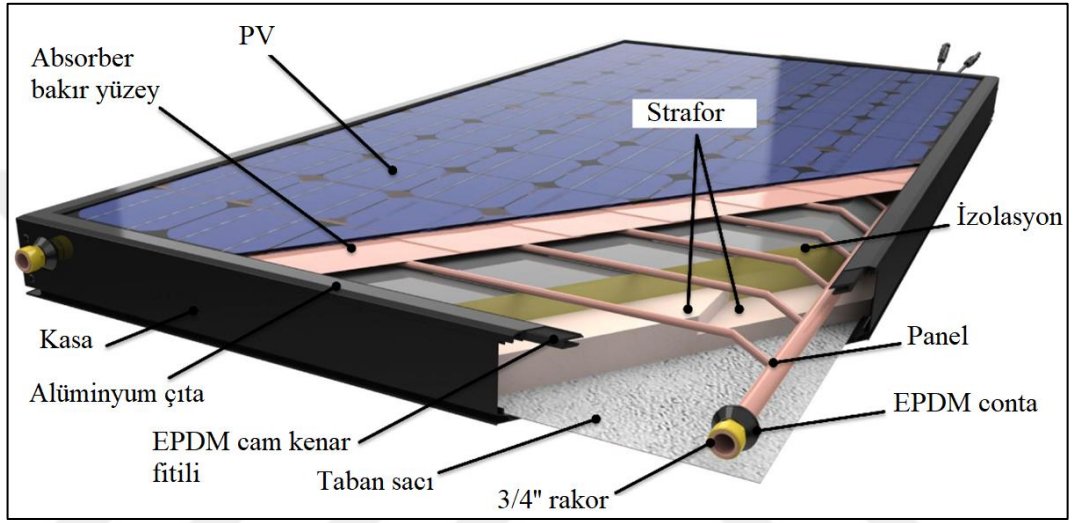
Şekil 1.4. Ülkemizin yıllık güneşlenme haritası (GEPA, 2022)

Güneş enerjisi temel olarak ısı enerjisi ve elektrik enerjisi olmak üzere iki farklı amaç için kullanılmaktadır. Bu amaçlar için farklı teknolojiler kullanılırken her geçen gün bu teknolojilerin verimleri artmaktadır. Güneş enerjisinin ısı enerjisiye dönüşümü güneş kolektörleri ile gerçekleştirilmektedir (Soytürk, 2018). Güneş enerjisinden doğrudan elektrik enerjisine elde etmek amacıyla ise fotovoltaik teknolojiler yaygın olarak kullanılmaktadır (Kazemain, 2020).

1.3.1.1. Fotovoltaik/termal sistemler

Güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etmek amacıyla kullanılan fotovoltaik (PV) sistemler ile güneş enerjisinin yalnızca %15-20'si elektriğe dönüştürülebilmekte, kalan enerji ise ısı enerjisiye çevrilmektedir. Bu ısı enerjisi, PV cihazı tarafından kolaylıkla absorbe edilebilmekte ve çalışma sıcaklığının 80°C'ye kadar çıkmasına neden olmaktadır (Ma vd., 2015). PV güneş panelinin sıcaklığı, güneş radyasyonu arttıkça her santigrat derece için yaklaşık %0.2-0.5 azalmaktadır (Babayan vd., 2019). Bu sorun, büyük miktarda ısınin doğal veya indüklenmiş bir sıvı sirkülasyon sistemi ile çekilmesiyle azaltılabilir. Entegre PV modülleri ve ısı tahliye cihazları içeren PV/T hibrit enerji sistemleri, aynı anda elektrik ve termal enerji sağlayarak PV sistemleri için verimli bir alternatif oluşturmuşlardır (Gül ve Akyüz, 2020). Güneş enerjisi sistemlerindeki yenilikçi teknolojilerin sonucu olan Şekil 1.5'te görülen PV/T sistemleri, ısı toplayıcılar ve fotovoltaik hücrelerin birleştirilerek düşük sıcaklıkta termal ve elektrik enerjisi üretimine imkân sağlarlar. Bu sistemlerde güneş radyasyonunun bir kısmı, yutucu yüzeyi ile temasta bulunan fotovoltaik hücreler

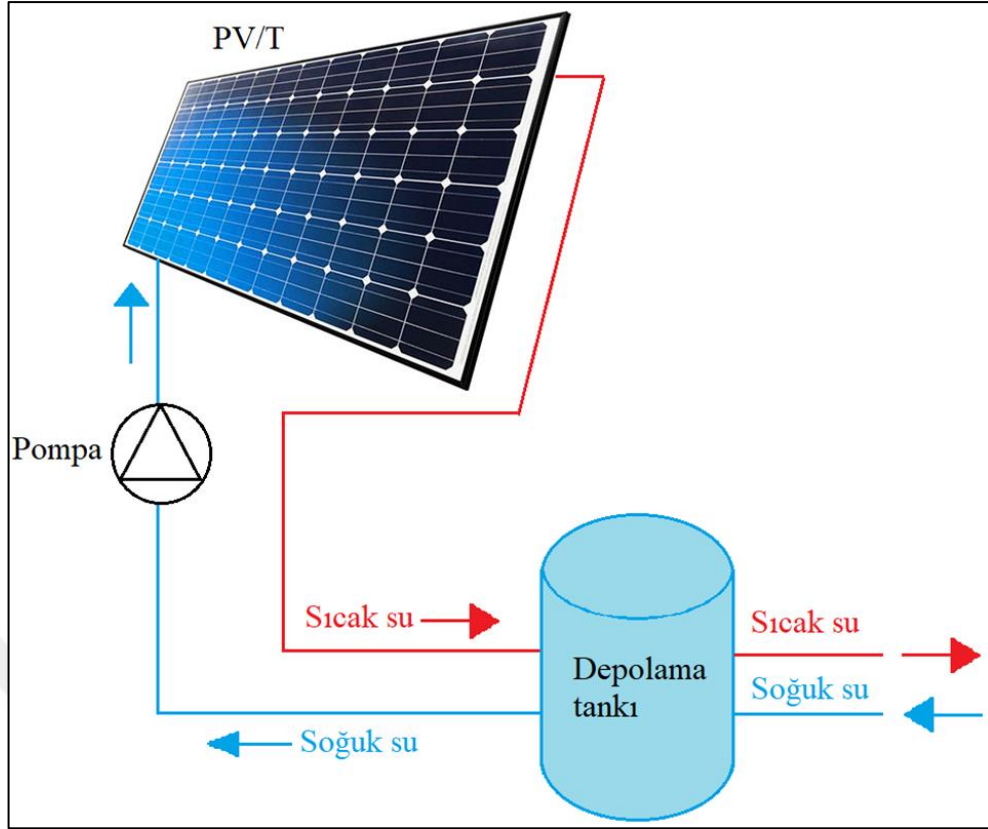
tarafından elektrik enerjisine dönüştürülmekte ve fotovoltaik hücrelerde oluşan fazla ısı enerjisi termal sistemin girişi kabul edilmektedir. Sistemin çalışması sırasında ısı taşıyıcısı, bu ısıyı yutucu hücrelerden ve yüzeyden uzaklaştırmaktadır. Böylece hücreler soğutulurak ısı enerjisi elde edilmekte ve panel verimi artmaktadır (Sachit vd., 2018). PV/T sistemlerinde, hava, su ve kimyasal akışkanlar gibi farklı soğutucu akışkanlar kullanılabilir. Ayrıca panellerin fiziksel tasarıma göre, düz plaka tipi, konsantre veya bina entegre tipi PV/T sistemleri bulunmaktadır (Zulkepli vd., 2016).



Şekil 1.5. PV/T panel sistem elemanları (Anonim, 2021b)

1.3.1.2. Güneş enerjili su ısıtma sistemleri

Güneş enerjili su ısıtma sistemleri, kolektörlerin yüzey sıcaklığının yaklaşık 100°C'ye yükselmesi ve üretilen sıcak su nedeniyle, evsel ve endüstriyel sıcak su temini için etkili ve kullanımı kolay güneş enerjisi tasarımlarından biridir. Güneş enerjili su ısıtma sistemleri fosil yakıtların tüketimini azalttığından, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına doğrudan etkisi nedeniyle daha temiz bir çevreye katkıda bulunmaktadır. Özellikle donma olasılığının olduğu yerlerde Şekil 1.6'da gösterildiği gibi kapalı devre güneş enerjili su ısıtma sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Alayi, 2021).



Şekil 1.6. Kapalı döngü güneş enerjili su ısıtma sistemleri (Alayi, 2021)

Bu sistemlerde, kolektörlerden gelen sıcak akışkandaki ısıyı kullanım suyuna aktaran bir ısı eşanjörü kullanılmaktadır. Güneş enerjisiyle ısıtılan su, güneşli dönemlerden gelen ısıyı birkaç güne kadar güneşli olmayan dönemlerde kullanım için depolanmasına izin veren bir sıcak su depolama tankında tutulur. Yıl boyunca tüm sıcak su ihtiyacını karşılayacak şekilde tasarlanmayan güneş enerjisi sistemlerinde, sıcak su deposunda bulunan konvansiyonel gazlı veya elektrikli su ısıtıcısı, suyun sıcaklığının istenilen seviyede tutulmasına yardımcı olmaktadır. Kapalı devre sistemlerinde güneş kolektörlerindeki akışkan, kullanım sıcak suyundan tamamen ayrı kalmaktadır.

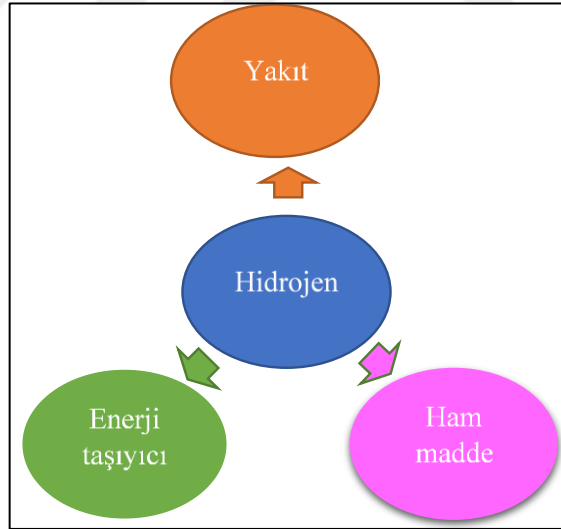
1.3.2. Hidrojen enerjisi

Hidrojen, 1500’lü yıllarda keşfedilmiş 1700’lü yıllarda yanabilme özelliğinin farkına varılmış, bir elektron ve bir protondan meydana gelen, yeryüzünde en kolay ve en bol bulunan element çeşididir (Yıllancı, 2008). Kararsız bir yapıya sahip olması ve kimyasal olarak aktif olması gibi özelliklerinden dolayı dünyada serbest halde bulunmamakta, farklı bileşiklerin içerisinde yer almaktadır. Hidrokarbon olarak

bilinen organik bileşiklerin yapısında da farklı sayılarda hidrojen atomu yer almaktadır. Saydam, tatsız, kokusuz, renksiz bir element olan hidrojen doğada bulunan en hafif gazdır. Çizelge 1.1’de bazı fiziksel özellikleri verilen hidrojen, havadan 14.4 kat daha hafif, tamamen zehirsiz bir gaz olup 101.325 kPa basınçta -252.87°C’de sıvı hale gelmektedir. Hidrojen, bilinen bütün yakıtlar içerisinde birim başına 120.7 kJ/kg ile en yüksek enerji içeriğine sahip elementtir (Bektaş, 2021). Ayrıca Şekil 1.7’de görüldüğü gibi hidrojen enerji taşıyıcısı, yakıt, diğer alternatif yakıtlar ve kimyasal maddeler için hammadde olarak da kullanılmaktadır.

Çizelge 1.1.Hidrojenin bazı fiziksel özellikleri (Bektaş, 2021)

Özellik	Değer
Maddenin hali	Renksiz, kokusuz
Yoğunluk (0°C’de)	0.0899 kg/m ³
Erime noktası	-259.14°C
Kaynama noktası	-252.87°C
Özgül ısısı	14.304 kJ/kgK
Buharlaşma ısısı	0.447 MJ/kg
Difüzyon katsayısı	0.61 m ² /s



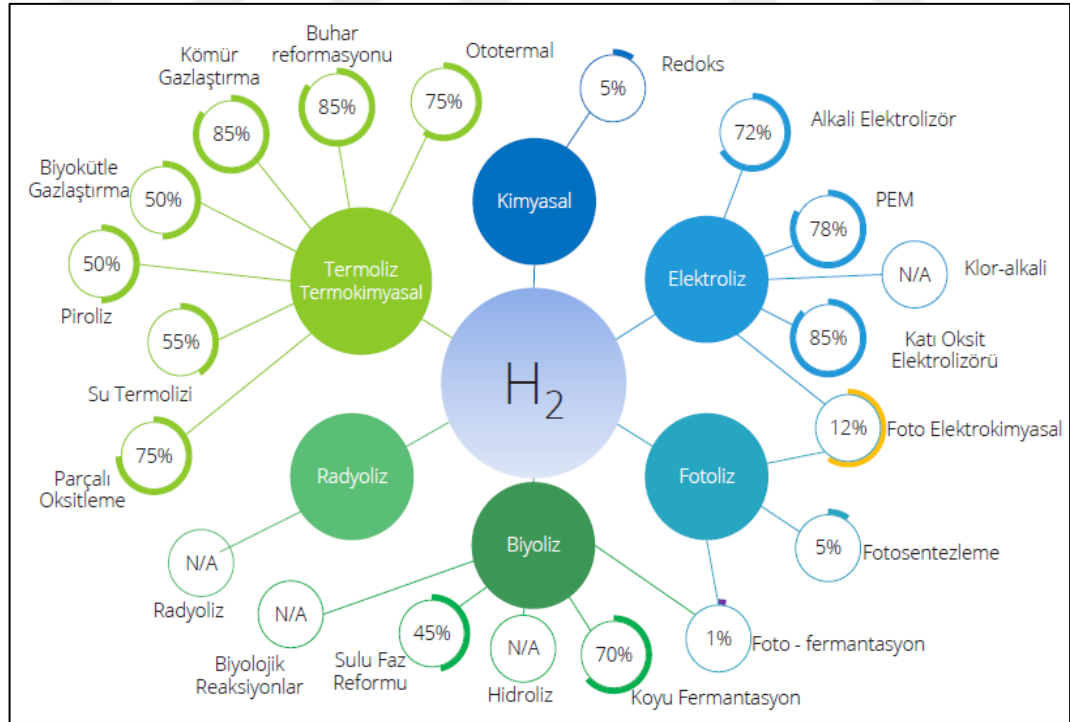
Şekil 1.7. Hidrojen kullanım amaçları (Dinçer, 2021)

Hidrojen enerjisi, hidrojenin saf halde ayrıştırılmasının sonucu olarak moleküllerinden ortaya çıkan kimyasal bir enerjidir. Hidrojen enerjisi, çeşitli metotlarla elektriksel ve ısısal biçimlere dönüştürülebilmektedir. Ayrıştırılması sonucu su buharı veya su oluştuğu için, temiz, zararsız, yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Hidrojen enerjisi

sanayi, taşımacılık, mobil uygulamalar, petrol üretimi, uzay roketleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Bektaş, 2021).

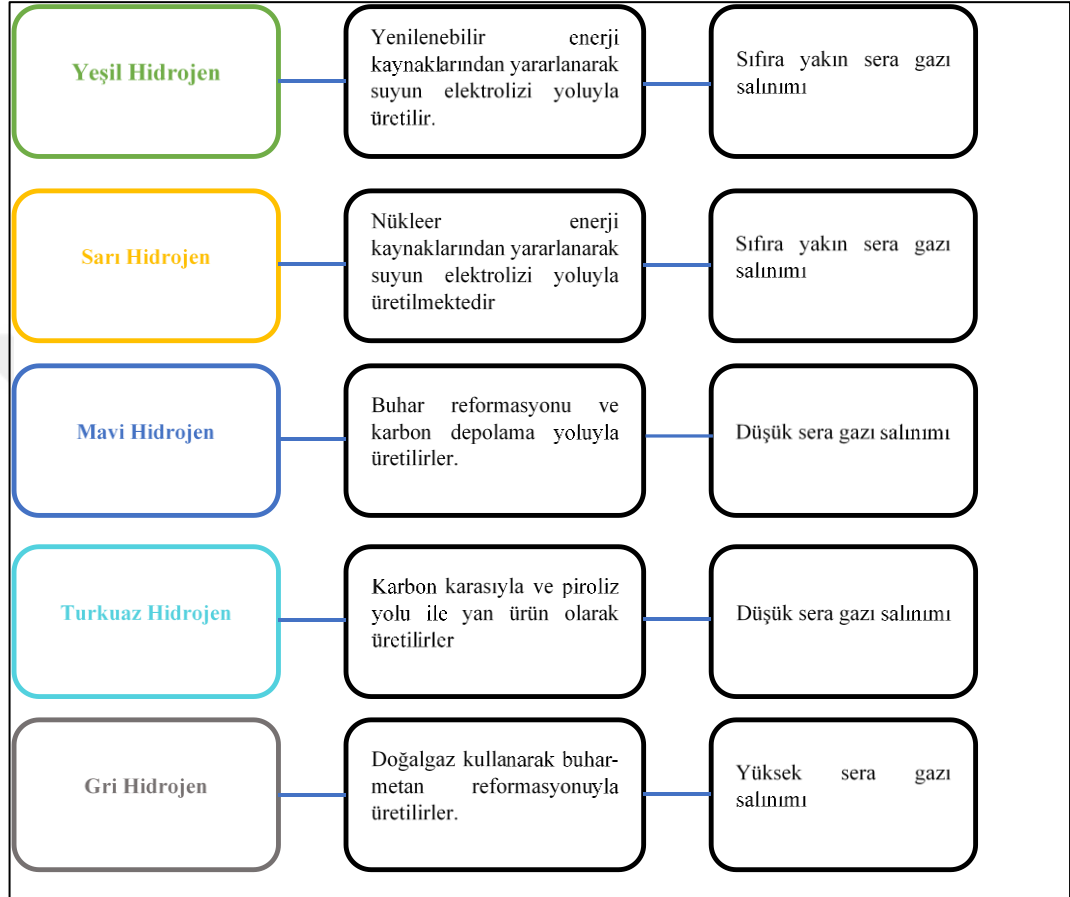
1.3.2.1. Hidrojen üretim yöntemleri

Doğal bir yakıt kaynağı olmayan hidrojen, birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak (su, nükleer, biyokütle, hidrokarbon gibi) üretilen temiz bir enerji taşıyıcısıdır. Şekil 1.8’de görüldüğü gibi birçok hidrojen üretim yöntemi bulunmaktadır. Hidrojen, buhar reformasyonu adı verilen yöntemle hidrokarbon yakıt ile yüksek sıcaklıkta reaksiyona girerek ısı işlemleriyle üretilmektedir. Diğer bir hidrojen üretim yöntemi ise suyun doğru akım kullanılarak hidrojen ve oksijene ayrıştırıldığı elektroliz yöntemidir. Mikro alg veya bakteri gibi mikroorganizmalar bitkisel ürünleri tüketerek biyolojik reaksiyonlar aracılığıyla hidrojen üretebilmektedirler. Ayrıca, güneş ışığından yararlanarak foto elektrokimyasal, fotovoltaiik odaklı elektroliz, foto-biyolojik ve termo-kimyasal yöntemlerle de hidrojen üretimi sağlanmaktadır.



Şekil 1.8. Hidrojen üretim metotları ve verimleri (Oruç ve Dinçer, 2021)

Şekil 1.9’da görüldüğü gibi farklı hidrojen üretim yöntemlerine göre hidrojen enerjisini renk kodlarıyla sınıflandırmak mümkündür. Ayrıca hidrojen üretimini sırasında oluşabilecek sera gazı salınımı da bu renk kodlamasında dikkate alınmaktadır (Bektaş, 2021).



Şekil 1.9. Hidrojen enerjisi renklerinin hidrojen üretim metotlarına göre değişimi (Scita vd., 2020)

1.3.2.1.1. Fosil yakıtlardan hidrojen üretimi

Günümüzde kullanılan hidrojenin önemli bir kısmı doğal gaz, kömür, fosil yakıtlar veya petrol ürünlerinden elde edilmektedir. Bunların içerisinde en çok kullanılan metotlar, buhar demir işlemi, doğal gazın katalitik buhar reformasyonu, kömürün gazlaştırılması ve petrolün oksidasyonu biçimindedir. Bu yöntemlerden başka, temel hedefi hidrojen üretimi olmanın yanı sıra farklı sanayi malzemelerinin imalatı esnasında ikincil ürün olarak hidrojen elde edilen metotlar da bulunmaktadır. Bunlar; kok fırınlarında kömürden kok üretimi, margarin sanayinde kimyasal hidro-jenerasyon

işlemleri, klor-alkaliden klor üretimi, ham petrolün rafineri işleminde hafif gazların üretimi gibi yöntemlerdir (Yılancı, 2008).

1.3.2.1.2. Suyun elektrolizi ile hidrojen üretimi

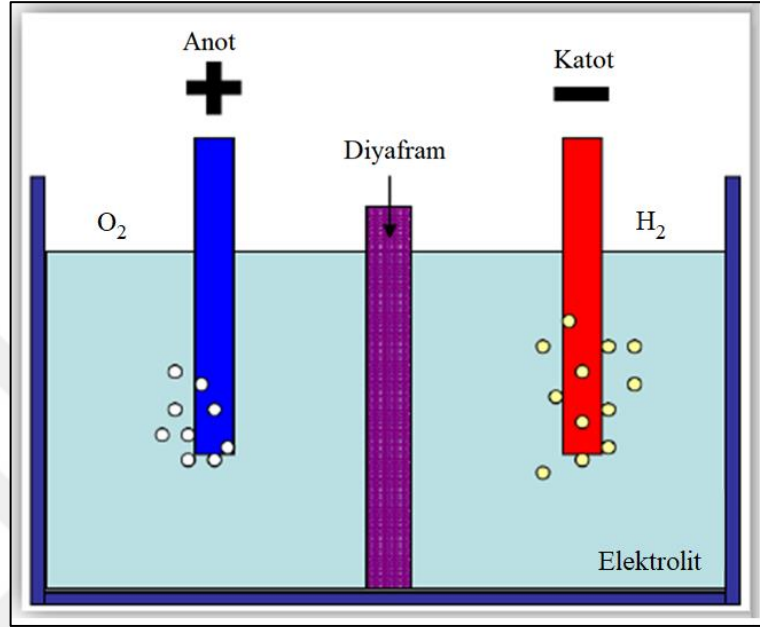
Doğru akım ile suyun hidrojen ve oksijen elementlerine ayrıştırılması işlemine elektroliz adı verilmektedir. Elektro-kimyasal hidrojen üretim yöntemi olarak da bilinen elektroliz yöntemi, teknolojik olarak oldukça ilerlemiş en yaygın hidrojen üretim metodudur. Elektroliz işlemi elektrolizör olarak bilinen kısımlarda gerçekleşir. Elektrolizörler elektrik akımı ile suyu hidrojene ve oksijene ayıran cihazlardır. Elektrolizörler yakıt pilleri gibi bir elektrolitik sıvı ile ayrılmış iki elektrottan (katot, anot) oluşurlar. Elektrolizörler, elektrolitin sıvı ya da katı olması durumuna göre farklı tiplere ayrılırlar. Sıvı elektrolitler genel olarak alkali elektrolizörlerde kullanılırken, katı elektrolitler çoğunlukla PEM elektrolizörlerde ve katı-oksit elektrolizörlerde kullanılmaktadır (Genç, 2013). Çizelge 1.2’de yaygın olarak kullanılan elektrolizör çeşitleri bulunmaktadır.

Çizelge 1.2. Elektrolizör çeşitleri (Aksakal, 2007)

Elektrolizör tipi	Katot malzemesi	Anot malzemesi	Ayırıcı ortam	Elektrolit	Çalışma sıcaklığı (°C)
Alkali elektrolizör	Nikel ya da çelik	Nikel	Asbest	%25-35 KOH (Su-Potasyum Hidroksit)	50-60
PEM elektrolizör	Pilatin, İridyum, Rutenyum kaplama	Pilatin kaplama	Proton geçirgen zar	Proton geçirgen zar	70-90
Katı-oksit elektrolizör	Nikel içeren zirkonyum	Pilatin	-	Katı seramik elektrolit	800-1000

Çizelge 1.2’de belirtilen elektrolizör çeşitlerinden yaygın olarak kullanılanlar alkali elektrolizör ve PEM elektrolizörlerdir. Şekil 1.10’da görülen alkali elektrolizörler, farklı saflaştırma işlemlerinin ardından %99 saflıkta hidrojen elde edebilen ve elde edilen hidrojeni yakıt pili uygulamalarında (yüksek saflıkta hidrojen gerektiren) kullanmaya imkân veren elektrolizör çeşididir. Hidrojen elde etme verimi %80 civarında olup, elektrolit olarak %25-35 potasyum hidroksit kullanılmaktadırlar. Bu

elektrolizörler düşük akım yoğunluklarında çalışabildikleri için yüksek verimleri ile önemli bir avantaja sahipken sıvı elektrolit kullanılması nedeniyle yüksek sıcaklıklarda korozyon oluşturma gibi dezavantaja sahiptirler. Bu nedenle çalışma ömürleri oldukça azdır (Grigoriev vd., 2006).



Şekil 1.10. Alkali elektrolizör çalışma prensibi (Genç, 2013)

Alkali elektrolizörlerde gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir (Fernandez ve Cano, 2013):

Katot reaksiyonu:



Anot reaksiyonu:

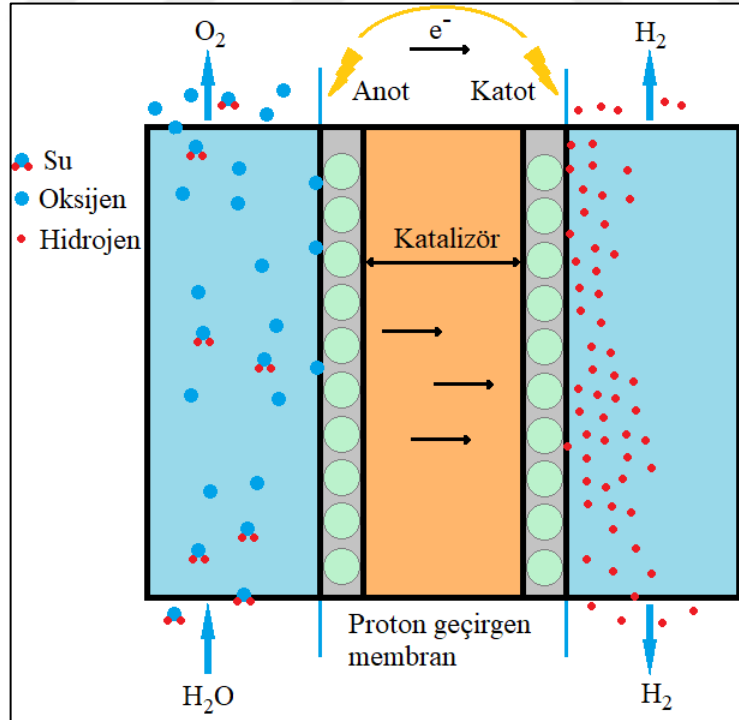


Toplam reaksiyon:



PEM elektrolizörler ise ilk kez GEMINI uzay gemisi isimli projenin bir bölümünde kullanılmak üzere geliştirilmişlerdir. Alkali elektrolizörlerden farklı olarak PEM elektrolizörlerde sıvı elektrolit yerine iyon geçirgen ince bir zardan meydana gelen katı elektrolit kullanılmaktadır. Bu zar yapısı çoğunlukla nasyon maddesinden oluşmaktadır. Ayrıca PEM elektrolizörler alkali elektrolizörlerden farklı olarak daha değişken akım yoğunluklarında çalışabildikleri için alternatif enerji kaynaklarına kolaylıkla entegre edilebilirler (Tsutomu ve Yoshinori, 2004).

Şekil 1.11’de görüldüğü üzere proton geçirgen membran adı verilen seçici geçirgen yapı sayesinde hidrojen iyonları anot tarafından katot tarafına doğru yol alarak, dış devrede anottan katota doğru hareket eden elektronlarla birleşir. Daha sonra anotta oluşan oksijen gazı katotta oluşan hidrojen gazından ayrıştırılır (Genç, 2013).



Şekil 1.11. PEM elektrolizörün çalışma prensibi (Genç, 2018)

PEM elektrolizörde gerçekleşen reaksiyonlar:

Anot reaksiyonu:



Katot reaksiyonu:

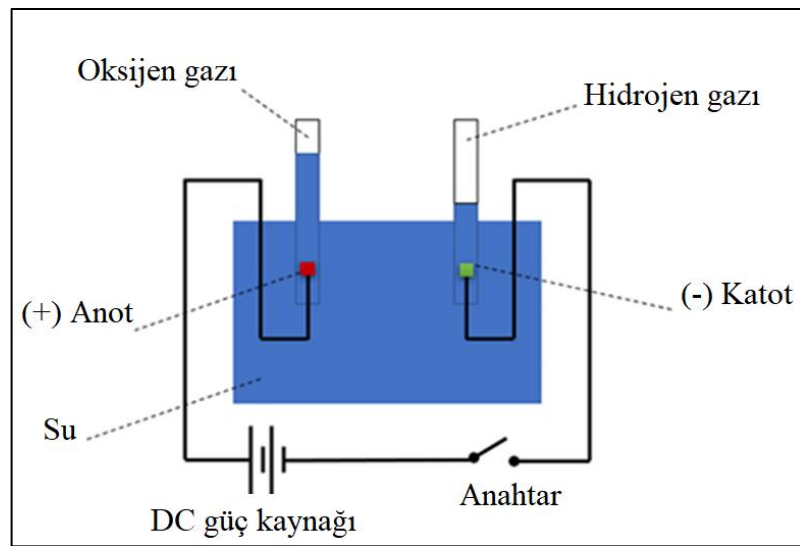


Toplam reaksiyon:



şeklindedir.

Elektroliz işleminde elektrotlara doğru akım uygulanmakta ve elektrolitik sıvı yardımı ile pozitif elektrottan (anot) negatif elektrota (katot) akımı iletmektedir. Şekil 1.12’de görüldüğü gibi elektroliz işlemi sonucunda elektrolit içindeki su, oksijen ve hidrojen elementlerine ayrıştırılmaktadır.



Şekil 1.12. Suyun elektrolizi (Bektaş, 2021)

Elektroliz işleminin gerçekleşmesi için gereken en düşük voltaj Denklem (1.7) ile aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$V = \frac{\Delta G}{nF} = 1.229V \quad (1.7)$$

Burada, ΔG (kJ/mol) Gibbs serbest enerjisini, F (Coulomb/mol) Faraday sabitini, n ise elektron sayısını temsil etmektedir. Gibbs serbest enerjisi Çizelge 1.3'te görülen değerler kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\Delta G = \left[\left(h_{H_2} + \frac{1}{2} h_{O_2} \right) - h_{H_2O(s)} \right] - T \left[\left(s_{H_2} + \frac{1}{2} s_{O_2} \right) - s_{H_2O(s)} \right] \quad (1.8)$$

Burada, h_{H_2O} , h_{H_2} , h_{O_2} (kJ/kg) sırasıyla suyun, hidrojenin ve oksijenin entalpilerini, s_{H_2O} , s_{H_2} , s_{O_2} (kJ/kgK) entropilerini, T (K) ise sıcaklığı ifade etmektedir.

Çizelge 1.3. Gibbs serbest enerjisi hesabında kullanılan değerler (Spiegel, 2008)

$h_{H_2(g)}$ (kJ/kg)	$h_{O_2(g)}$ (kJ/kg)	$h_{H_2O(s)}$ (kJ/kg)	$s_{H_2(g)}$ (kJ/kgK)	$s_{O_2(g)}$ (kJ/kgK)	$s_{H_2O(s)}$ (kJ/kgK)
0	0	285 826	130.68	205.14	69.92

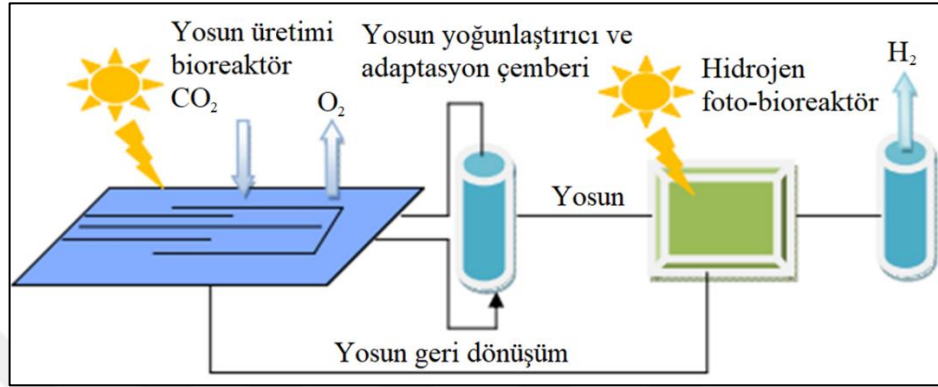
1.3.2.1.3. Termokimyasal yöntemler ile hidrojen üretimi

Isı enerjisi kullanılarak suyun yaklaşık 3 500 K gibi yüksek sıcaklıklarda kimyasal reaksiyonlar sonucu oksijene ve hidrojene dönüştürülmesi yöntemidir. Bu yöntemle hidrojen eldesi ısı enerjisi gerektiren saf termokimyasal hidrojen üretim çevrimleri ve elektrik enerjisi gerektiren hibrit termokimyasal hidrojen çevrimler olmak üzere iki temel başlık altında toplanabilir (Dinçer, 2021). Termokimyasal yöntemle hidrojen üretimde toplam verim %50 civarındadır (Yiğit, 2013).

1.3.2.1.4. Fotoliz ile hidrojen üretimi

Enerji kaynağı olarak güneş ışığını kullanarak sudan hidrojen elde etmek amacıyla kullanılan yöntemle fotoliz adı verilmektedir. Şekil 1.13'te fotoliz yöntemi kullanarak

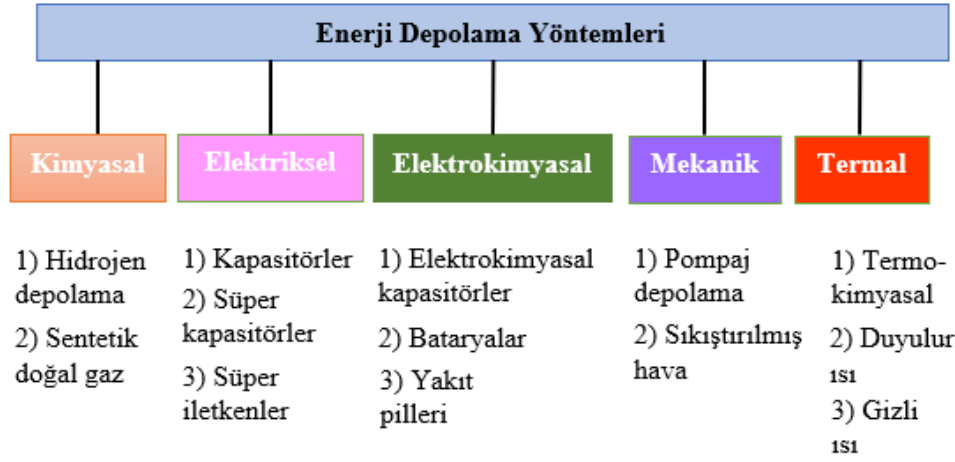
hidrojen üretmek amacıyla tasarlanan örnek bir sistem görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi sistem, yosun ve mikroorganizmaları ışığa maruz bırakarak çabuk büyümeleri sağlamak için bioreaktör, yosun yoğunlaştırıcı ve adaptasyon çemberi ve hidrojen üretimi için kullanılan hidrojen foto-bioreaktörden oluşmaktadır. Sistemde gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda hidrojen üretimi gerçekleşmektedir.



Şekil 1.13. Fotoliz ile hidrojen üretimi (Özışık, 2012)

1.3.3. Yenilenebilir enerji kaynakları için enerji depolama sistemleri

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi yenilenebilir enerji kaynakları doğaları gereği meteorolojik koşullara bağlı, kesintili, süreksiz ve dalgalı enerji kaynaklarıdır. Bu kaynaklardan elde edilen enerji, saatlik, günlük, mevsimlik olarak sürekli değişkenlik göstermektedir. Bu değişkenlik, özellikle şebekeden bağımsız uygulamalarda, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin talep edilen enerjiyi karşılayamamasına neden olmaktadır. Bu noktada, özellikle güneş ve rüzgâr enerjisi gibi alternatif ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına bağlı sistemlerin verimli bir şekilde kullanılması için depolama sistemlerinin önemi ortaya çıkmaktadır. Enerji depolama sistemleri birincil enerji kaynaklarının yetersiz olduğu veya mevcut olmadığı durumlarda yük talebini karşılamak amacıyla kullanılır. Enerji depolama sistemleri özellikle şebekeden bağımsız uygulamalarda kesintisiz yük talebini karşılamak için oldukça büyük bir öneme sahiptir. Bununla birlikte enerji depolama sistemlerinin kullanılmasıyla birlikte sistem verimi artmakta ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırmasından dolayı sera gazı emisyonları azalmaktadır (Kocaman, 2015). Şekil 1.14'te görüldüğü gibi termal, elektriksel, mekanik, kimyasal, manyetik, biyolojik enerji depolama gibi farklı enerji depolama yöntemleri bulunmaktadır.



Şekil 1.14. Enerji depolama yöntemleri (Dinçer ve Ezan, 2018)

1.3.3.1. Bataryalarda enerji depolama

Enerji depolama yöntemlerinden biri olan elektrokimyasal enerji depolama sistemlerinde elektriksel bir giriş-çıkış söz konusudur (Erdoğan, 2012). Elektrik enerjisinin kimyasal formda depolanması denilince ilk olarak bataryalar akla gelmektedir. Bataryalar elektriksel enerjiyi doğrudan ve tamamen kimyasal forma dönüştürerek depolayan elektrokimyasal cihazlar olup elektronik cihazlar, saatler, kameralar, hesap makineleri, ısıtma cihazları, kablosuz telefonlar, oyuncaklar gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir. Günümüzde ticari olarak nikel-metal hidrit, sodyum-sülfür, sodyum-nikel klorit gibi batarya çeşitleri olmasına karşın en sık kullanılan batarya çeşitleri, lityum-iyon ve kurşun-asit bataryalardır (Altun, 2021).

Lityum-iyon bataryalar, batarya teknolojileri içerisinde yaygın olarak kullanılan gelişmiş bir enerji depolama teknolojisidir. Bu bataryalar, %100'e yakın bir enerji depolama verimliliğine sahip olmanın yanı sıra hücre başına yaklaşık 4 V enerji yoğunluğu ile bataryalar arasında en yüksek enerji yoğunluğuna sahip batarya çeşididir. Küçük boyutları ile birçok elektronik aletin içinde bulunmalarının yanında, aşırı ve düzensiz şarj edilmeleri durumunda yapılarında kalıcı hasarlar oluşma, düşük çevrim ömrü, sıcaklık değişimlerinden fazlasıyla etkilenme ve yapılarında kullanılan malzemelerin zor bulunması gibi dezavantajları bulunmaktadır (Yiğit, 2017).

Kurşun-asit bataryalar ise, batarya teknolojileri içerisinde kullanılan en eski yöntemlerden biri olup ilk yatırım maliyetinin düşük olması, bakımının kolay olması gibi özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bunun yanı sıra çevrim

ömürlerinin ve enerji yoğunluklarının düşük olması, yapısında çevreye zararlı maddelerin bulunması gibi dezavantajları bulunmaktadır.

Batarya teknolojilerinin tamamına bakıldığında sıcaklık değişimlerinin olumsuz etkileri, aşırı şarj ve deşarj ile düzensiz şarj olması durumunda zarar görmeleri, kullanılmadığı zamanlarda bile şarj miktarlarının azalması, ani yük değişimlerine hemen cevap vermede yavaş kalmaları gibi sebeplerden dolayı yenilebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin uzun süreli depolanması için bu teknolojiler uygun görülmemektedirler. Yenilebilir enerji kaynaklarına entegre edilen bataryalarda enerji ancak kısa süreli depolanarak, enerji talebinin az olduğu zamanlarda kullanılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları ile bataryaların sorunsuz çalışabilmeleri için, ani deşarj isteklerine hızlı cevap verme, meteorolojik koşullardan etkilenmeme ve en önemlisi uzun süreli depolama ömrüne sahip olması gerekmektedir. Ancak mevcut batarya teknolojileri ile uzun süreli depolama yapmak mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, hidrojen gazının enerji taşıyıcısı ve depolayıcısı olarak kullanılması, şebekeden bağımsız hibrit sistemlerde yenilenebilir kaynakları için oldukça uygun bir seçenek olarak görülmektedir. Hidrojenin, şarj-deşarj konusunda neredeyse problemsiz olması, sızıntı durumunda yoğunluğunun az olması nedeniyle atmosferin en üstüne çıkarak ortamı terk etmesi ve en önemlisi oldukça uzun depolama ömrünün olması gibi avantajları bulunmaktadır (Yiğit, 2017).

1.3.3.2. Hidrojenin depolanması

Hidrojen gazının en önemli özelliklerden biri de depolanabilir olmasıdır. Fakat bilinen en hafif gaz olması sebebiyle depolanmasında birtakım sorunlar ortaya çıkmaktadır. Geleceğin enerjisi olan hidrojenin günümüzde yaygın olarak kullanımı için depolanmasında etkin ve verimli metotların geliştirilmesi gerekmektedir. Hidrojen sıkıştırılarak gaz halinde ya da çok düşük sıcaklıklara soğutulup sıvılaştırılarak sıvı halde, fiziksel olarak karbon nanotüplerde, kimyasal olarak da metal hidrit tanklarında katı halde depolanabilmektedir. Bu metotlar içerisinde en etkili yöntem, uygun çalışma ortamları, yüksek depolama kapasiteleri, düşük basınçta çalışmaları ve daha güvenli olmaları nedeniyle metal hidrit tanklarında depolama yöntemidir (Barkhordarian, 2006). Hidrojen ile enerji depolama, bataryalar ile karşılaştırıldığında, depolama amaçları için ideal sayılabilecek bir enerji taşıyıcısıdır. Çünkü, enerjinin hidrojen

formunda depolanması sırasında düşük seviyelerde enerji bozulmaları gerçekleşirken, bataryalarda zaman ilerledikçe enerji sızdırma eğilimleri oluşmaktadır. Eğer enerjinin birkaç günden fazla bir süre depolanması gerekiyorsa, batarya içinde depolanan enerjinin bir kısmı sızıntılar nedeniyle kaybedilebilir. Buna karşın enerji, hidrojen formunda neredeyse sıfır sızıntıyla uzun süreler boyunca depolanabilir (Waegel vd., 2006).

1.3.3.2.1. Sıkıştırılmış gaz olarak depolama

Hidrojen depolama yöntemleri arasında en çok bilinen yöntem, sıkıştırılmış gaz olarak tanklarda depolama yöntemidir. Hidrojen, genellikle 200-250 bar basınç altında 50 litre hacminde silindirik tanklarda depolanırken bu basınç değeri 600-700 bar'a kadar yükselebilmektedir. Hafif bir gaz olmasından dolayı hidrojenin hacimsel enerji yoğunluğu oldukça düşüktür. Diğer taraftan yüksek basınç nedeniyle hidrojen depolama tankları ağır olmaktadır. Bu durum, hidrojen gazından alınacak verimi düşürmektedir. Uygulamada basınçlı tank malzemesi olarak genellikle alüminyum alaşımlar ve ostenitik çelik kullanılmaktadır (Kayfeci, 2011).

1.3.3.2.2. Sıvı olarak depolama

Diğer hidrojen depolama yöntemi ise, sıvılaştırılmış hidrojen depolama yöntemidir. Sıkıştırılmış gaz halinde hidrojen depolama yöntemi ile karşılaştırıldığında bu yöntemde daha yüksek hacimsel yoğunluk elde edilirken, depolama tankı basıncı sıkıştırılmış hidrojen depolama tankı basıncına göre çok daha küçüktür. Sıvı halde hidrojen 71 kg/m³ yoğunluğa sahiptir. Hidrojeni sıvı hale getirip depolayabilmek için -253°C'ye soğutmak gerekmektedir. Günümüz teknolojisiyle hidrojeni -253°C'ye soğutup depolamak oldukça maliyetlidir. Ayrıca depolama tankı ile sıvı hidrojenin ağırlık oranı yaklaşık %26'dır. Sıvı hidrojen günümüzde yüksek enerjili nükleer fizik uygulamalarında ve uzay teknolojisinde kullanılmaktadır (Koşar, 2021).

1.3.3.2.3. Metal hidrit esaslı depolama

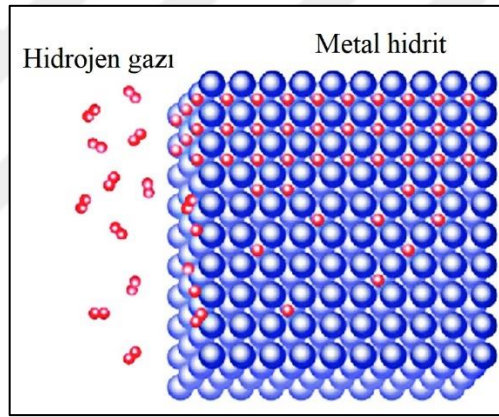
Element veya alaşımların hidrojen gazı ile girdiği reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan bileşiklere hidrit (hidrat) denilmektedir. Hidrojen gazı kimyasal olarak ara metallerde, alaşımlarda ve metallerde hidrit şeklinde depolanabilmektedir. Metal hidritlerin hidrojen depolamada tercih edilmesinin en önemli sebebi; yapısal bozukluğa uğramadan çok kere şarj-deşarj olabilmeleri, yüksek basınçlı kaplara olan ihtiyacı ortadan kaldırmalarıdır. Bununla birlikte, büyük miktarlarda hidrojen absorbe edebilen metal hidritler, hidrojen depolamak için oldukça elverişli bir metot olmasına karşılık metal hidrit sistemleri ağır ve pahalı sistemlerdir. Çizelge 1.4'te farklı tipteki metal hidritlerin genel özellikleri verilmiştir. Metal hidrit tanklarında ağırlıkça yaklaşık %7 oranında hidrojen depolanabilmektedir. Örneğin; $\text{LaNi}_5\text{H}_{6.7}$ öne çıkan metal hidrit çeşidi olmakla birlikte 50°C 'de %1.4 oranında hidrojen depolayabilmektedir. Metal hidritleri tekrar doldurmak için sıkıştırılmış gaz ve sıvı olarak depolamaya göre daha az enerji gerekmektedir. Ayrıca bu tanklarda yakıtın dışarıya aktarılması için enerji harcanmakta ve bu enerji yakıt pillerinden karşılanabilmektedir (Kayfeci, 2011). Metal hidrit tankların hidrojen adsorpsiyon ve desorpsiyon süreçlerini hızlandırmak için su banyosu kullanılmaktadır (Yılcı, 2008).

Çizelge 1.4. Farklı tipteki metal hidrit çeşitleri (Uçar, 2007)

Alaşım	Hidrojen depolama kapasitesi (%)	Desorpsiyon basıncı (bar)	Desorpsiyon sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)	Reaksiyon ısısı (kJ/mol)
MgH_2	7.6	1	290	-74.5
$\text{Fe}_{0.8}\text{Ni}_{0.2}\text{TiH}_6$	5.5	1	80	----
Mg_2NiH_4	3.6	1	250	-64.5
$\text{Ti}_{0.9}\text{Zr}_{0.1}\text{Mn}_{0.15}\text{V}_{0.2}\text{Cr}_{0.4}\text{H}_3$	2.1	9	20	-29.3
$\text{Ti}_{0.98}\text{Zr}_{0.02}\text{V}_{0.45}\text{Fe}_{0.10}\text{Cr}_{0.05}\text{Mn}_{1.5}\text{H}_{3.4}$	2.1	10	24	----
$\text{TiFeH}_{1.9}$	1.8	10	50	-23
$\text{TiFe}_{0.85}\text{Mn}_{0.15}\text{H}_{1.9}$	1.8	5	40	----
$\text{TiMn}_{1.5}\text{H}_{2.47}$	1.8	7	20	-28.5
$\text{Ti}_{0.8}\text{Zr}_{0.2}\text{Cr}_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{H}_3$	1.8	5	20	-28.9
$\text{Ti}_{0.8}\text{Zr}_{0.2}\text{Mn}_{1.8}\text{Mo}_{0.2}\text{H}_{3.0}$	1.7	----	20	-7
$\text{MmNi}_{4.5}\text{Mn}_{0.5}\text{H}_{6.6}$	1.5	----	50	-4.2
$\text{LaNi}_5\text{H}_{6.7}$	1.4	----	50	-7.2

Metal hidrit sistemlerinin performansı, seçilen metal hidrit malzemesinin termofiziksel özelliklerine büyük ölçüde bağlıdır. Reaksiyonda kullanılacak metal hidritlerin hidrojen tutma kapasitesinin, ısı iletkenliğinin ve reaksiyon hızının yüksek olması istenmektedir.

Hidritleme (absorpsiyon), Şekil 1.15'te görüldüğü gibi hidrojen gazının metal kafesler arasında bulunan boşluklara dağılarak hapsolması işlemidir. Denklem (1.9) ile ifade edilen hidritleşme reaksiyonu, ekzotermik olup yüksek miktarlarda ısı açığa çıkmaktadır (Kayfeci, 2011). Bu ısının metal hidritten uzaklaştırılması için ısı boruları ya da faz FDM'ler (faz değiştiren madde) kullanılmaktadır. Metal hidritlerin ısıtılarak yani endotermik bir proses ile hidrojen gazını serbest bırakması işlemine ise de-hidritleme (desorpsiyon) adı verilmektedir.



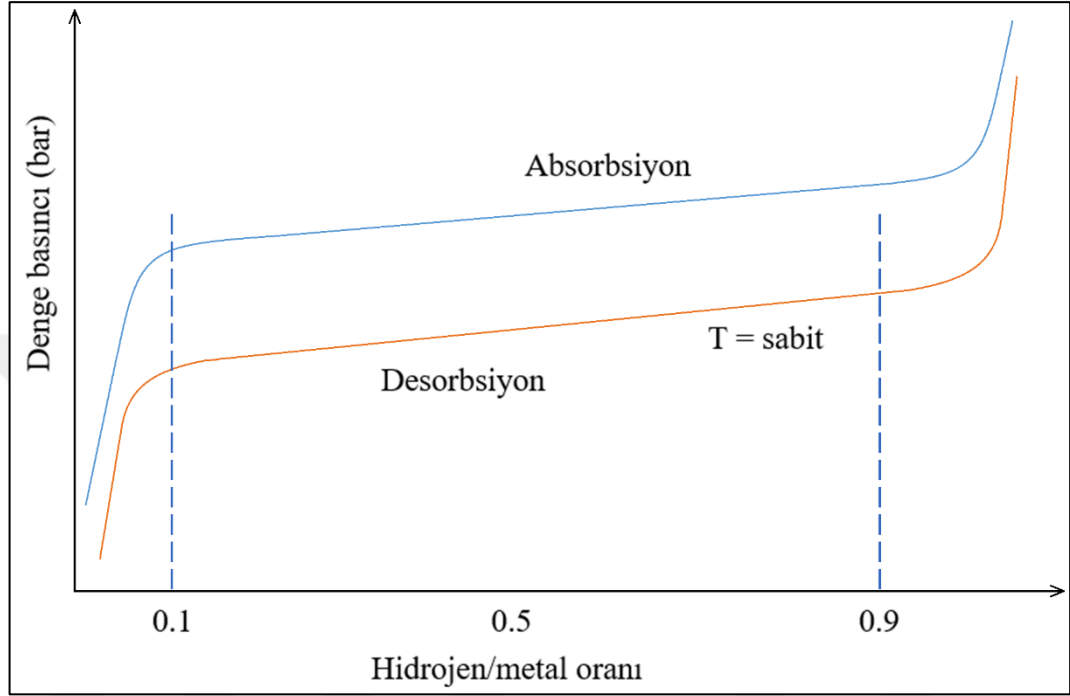
Şekil 1.15. Hidrit oluşumu (Dimanta vd., 2019)



Burada M , hidrojen ile tepkimeye giren metali, Q ekzotermik reaksiyon sırasında oluşan ısıyı ifade etmektedir.

Metal hidrit sistemlerindeki hidritleme ve de-hidritleme proseslerindeki en önemli parametre denge basıncıdır. Şekil 1.16'da görüldüğü gibi absorpsiyon ve desorpsiyon reaksiyonları sırasındaki denge basınçları birbirinden farklı olmakla birlikte, sistem basıncı denge basıncından büyük olduğu durumlarda hidritleme, sistem basıncı denge basıncından küçük olduğu durumlarda ise de-hidritleme reaksiyonları

gerçekleşmektedir. Her metal hidrit malzemesi için farklı denge basıncı eğrileri olmakla beraber, denge basıncı metal hidrit malzemesinin sıcaklığının bir fonksiyonudur. Ayrıca, denge basıncı metal hidrit malzemesinin kinetik ve termofiziksel özelliklerine, hidrojen/metal konsantrasyon oranına bağlıdır.



Şekil 1.16. Absorpsiyon ve desorpsiyon sırasında denge basıncının değişimi (Elmas, 2016)

1.3.3.2.4. Karbon nanotüplerde depolama

Karbon, küçük gözenekli parçacıklar haline getirilebilmesi ve karbon atomları ile gaz molekülleri arasında meydana gelen çekim kuvvetleri sebebiyle hidrojen depolamak için elverişli maddelerden biridir. Yenilikçi hidrojen depolama tekniklerinden biri olan karbon nanotüplerde hidrojen depolama birçok üstünlüğe sahiptir. Örneğin, nanotüplerde elastiklik modülü çelikten yaklaşık beş kat daha fazladır. Ayrıca tüpün yapısına bağlı olarak bazıları yarı iletken bazıları da iletken olarak davranırlar. Bu özelliklerinden dolayı nanotüp kullanarak elektronik cihazları mikro ve nano boyutlara indirebilmek mümkündür (Kayfeci, 2011). Hidrojen, nanotüplerin içerisinde fiziksel veya kimyasal yöntemlerle depolanabilmektedir (Gülcan, 2011).

1.3.3.2.5. Cam mikro kürelerde depolama

Bu depolama yönteminde, cidar kalınlıkları yaklaşık 1 μm , dış çapları 25 ile 500 μm arasında değişen camdan meydana gelen küreler kullanılmaktadır. Bu küreler yüksek sıcaklık ($\sim 200\text{-}400^\circ\text{C}$) ve yüksek basınç altında hidrojen ile doldurulmaktadır (Kayfeci, 2011). Yüksek sıcaklıktan dolayı cam cidarı geçirgen hale gelerek cama hidrojen atomlarının girmesi sağlanmaktadır. Camların soğutulmasıyla hidrojen atomları içeride hapsolür. Cam kürelerde depolanan hidrojen, camların kırılması veya ısıtılması ile tekrar kazanılabilir. Cam kürelerin depolama kapasitesi 200-490 bar basınç altında yaklaşık %5-6 dolaylarındadır (Anonim, 2021c).

1.3.3.2.6. Mağaralarda depolama

Hidrojeni depolamanın en ekonomik yöntemi; yeraltında, doğal gaz veya petrol rezervuarlarında depolama yöntemidir. Bu yönteme kıyasla maliyeti nispeten yüksek olan diğer bir depolama yöntemi ise, hidrojeni maden ocaklarındaki mağaralarda saklama yöntemidir. Örneğin Almanya'nın Kiel şehrinde 1971'den bu yana yerin 1 330 m derinliğindeki bir mağarada hidrojen gazı depolanmaktadır. Bununla birlikte mağaralarda depolanan hidrojenin yılda yaklaşık %1-3'ü arası, sızıntılar sebebiyle kaybolmaktadır (Kayfeci, 2011).

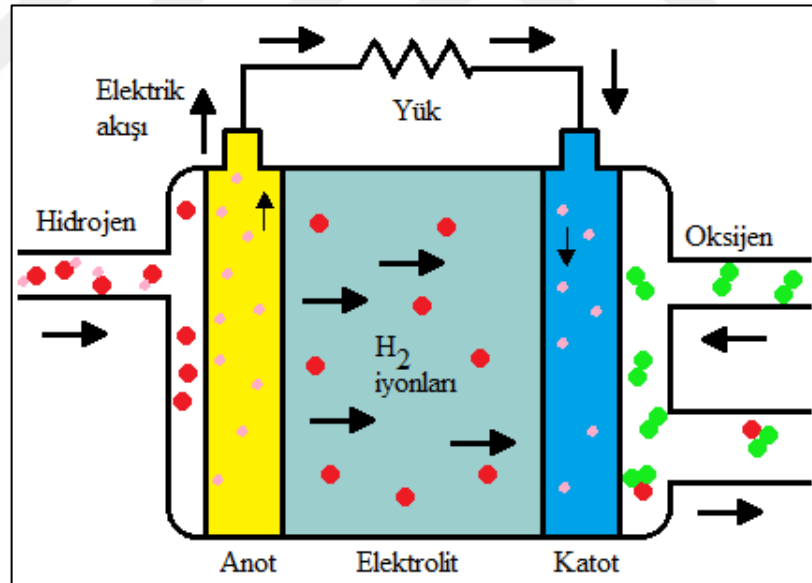
1.3.4. Hidrojenden elektrik enerjisi üretimi

Çeşitli yöntemlerle ve dönüşümlerle elde edilen hidrojen enerjisi, yakıt pili teknolojisinde yakıt olarak kullanılarak elektrik enerjisi elde edilmektedir. Yakıt pili teknolojisi, hidrojenden elektrik enerjisi elde etmek amacıyla ortaya çıkan ve gün geçtikçe gelişen verimli bir enerji dönüşüm teknolojisidir. Bu teknolojisinde hidrojen verimli bir şekilde kullanılarak farklı güçlerde elektrik üretimi sağlanmaktadır.

Yakıt pilleri, yenilenebilir enerji kaynaklı hibrit sistemlerde depolanan veya belirli yöntemlerle üretilen hidrojeni kullanarak elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Kısacası yakıt pilleri, hidrojen gazı ile havadaki oksijen gazını birleştirerek elektrik ve ısı enerjisine çeviren, çevre dostu, yüksek verimli elektrokimyasal dönüştürücülerdir

(Erdoğan, 2012). Ayrıca yakıt pilleri, sessiz çalışmaları, hareketli parça içermemeleri, boyutlarının küçük olması ve atık ısılarının tekrar kullanılabilir olması gibi özellikleriyle ön plana çıkmaktadır (Tevfik, 2017). Yakıt pilleri ve bataryalar yapısal olarak birbirlerine benzemekle birlikte, bataryaların aksine yakıt pilleri enerji girişi olduğu sürece enerji üretebilmekte ve şarja ihtiyaç duymamaktadır (Erdoğan, 2012).

Şekil 1.17’de görüldüğü gibi tipik bir yakıt pili pozitif yüklü elektrot (katot), negatif yüklü elektrot (anot) ve elektrolit membran tabakasından meydana gelmektedir. Yakıt pillerinde, hidrojen anot bölümünde yükseltgenirken oksijen ise katot bölümünde indirgenerek reaksiyonlar gerçekleşmektedir. Katot bölümündeki oksijen, elektronlar ve protonlarla reaksiyona girerek su oluşturmakta ve bu reaksiyon sonucunda bir miktar ısı enerjisi açığa çıkmaktadır. Protonlar, elektrolit membran boyunca anottan katoda doğru gitmekte, elektronlar ise dış devre üzerinden katoda taşınmaktadır. İletken materyallere çekilen elektronlar gerektiğinde yüke giderken, elektrokimyasal reaksiyonları hızlandırmak amacıyla katot ve anotta katalizörler bulunmaktadır.



Şekil 1.17. Yakıt pilinin yapısı ve çalışma prensibi (Yılmaz vd., 2017)

Yakıt pillerinde anotta ve katotta gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlara ilişkin kimyasal denklemler Denklem (1.10)-Denklem (1-13)’de görülmektedir (Spiegel, 2008):

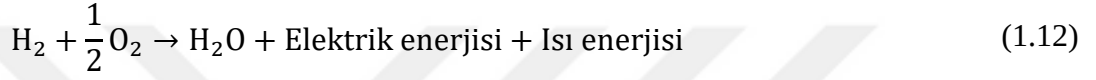
Anot reaksiyonu:



Katot reaksiyonu:



Toplam reaksiyon:



Günümüzde askeri uygulamalar, uzay araçları, ulaşım, taşımacılık, telekomünikasyon, elektrik üretim santralleri gibi farklı alanlarda kullanılan birçok yakıt pili çeşidi bulunmaktadır. En çok kullanılan yakıt pili çeşitleri ve özellikleri Çizelge 1.5'te gösterilmektedir.

Çizelge 1.5. Yakıt pili çeşitleri ve özellikleri (Bayrak, 2014)

Yakıt Pili	Elektrolit	Çalışma sıcaklığı	Katalizör	Anot gazı	Katot gazı	Verim
PEM-FC	Katı polimer membran	80°C	Platinyum	Hidrojen	Hava ya da saf oksijen	%35-60
Alkalın FC	Potasyum Hidroksit	65°C-220°C	Platinyum	Hidrojen	Saf oksijen	%50-70
Katı Oksit FC	Y ₂ O ₃ içeren zirkonya	600°C-1 000°C	Perovskites	Hidrojen, metan	Havadan oksijen	%45-60
Erimiş Karbonlu FC	Sıvı erimiş karbonatlar	650°C	Nikel	Hidrojen, metan	Havadan oksijen	%40-55
Fosforik Asit FC	Sıvı fosforik asit	150°C-220°C	Platinyum	Hidrojen	Havadan oksijen	%35-50

Yakıt pilleri çeşitleri içerisinde proton değişim membranlı yakıt pilleri, güç yoğunluğunun yüksek olması, yüksek çevrim ömrü, düşük sıcaklıklarda çalışabilme gibi avantajlarından dolayı düşük güç gereksinimi olan uygulamalardan şebekeden bağımsız büyük çaplı uygulamalara kadar birçok alanda geniş kullanım yelpazesine sahiptir. PEM yakıt pillerinin diğer yakıt pillerine göre başlıca avantajları şu şekilde sıralanabilir (Erdoğan, 2012):

- Yüksek güç ve akım yoğunluğuna sahiptir.
- Diğer yakıt pillerine göre elektrolit yapısı daha güvenilir olup hızlı çalışırlar.
- Kimyasal reaksiyona giren maddelerde oluşan basınç farklılığına karşı dayanımları daha yüksektir.
- Diğer yakıt pillerine oranla daha düşük sıcaklıklarda çalışabilirler.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Sera gazlarının olumsuz etkileri ve fosil yakıtların tükenmesi ile ilgili endişeler yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini ortaya koymaktadır. Güneş enerjisinin, enerji ihtiyacının büyük bir bölümünü karşılayabilme potansiyelinin olması, bol ve bedava bir kaynak olması gibi özelliklerinden dolayı güneş enerjisine olan talep her geçen gün artmaktadır. Bununla birlikte güneş enerjisinin kesintili bir yapıya sahip olmasından dolayı kesintisiz enerji talebini karşılamak için hibrit sistemlerin etkin bir şekilde kullanılmasına ve enerji depolamaya ihtiyaç vardır. Hibrit olarak tasarlanan fotovoltaiik – elektrolizör – yakıt hücresi – hidrojen depolama sistemleri zorlukların üstesinden gelmek için temiz, güvenilir ve hızlı çözümler olarak kabul edilmektedir.

Şebekeden bağımsız yenilenebilir enerji çözümleri, modern enerji hizmetlerine erişimi zamanında ve çevresel olarak sürdürülebilir bir şekilde genişletmek için temel bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır (Anonim, 2021d). Herhangi bir günde evler için şebekeden bağımsız güneş enerjisi sistemlerinin çeşitli faydaları bulunmaktadır. Şebekeden bağımsız güneş enerjisi sistemlerinin tasarımı, güneşten gelen ışığı evler için eksiksiz ve kullanılabilir bir enerjiye dönüştürmeyi sağlamakta, temiz bir enerji kaynağına sahip olunmasına yardımcı olmaktadır. Şebekeden bağımsız hibrit sistemlerin diğer avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Anonim, 2022a).

- Sera gazı emisyonlarını ve karbon ayak izini en aza indirirler.
- Elektrik maliyetlerinden tasarruf edilmesini sağlarlar.
- Bu sistemler evler için yedek güç kaynağı olarak kullanılırlar ve enerji depolama görevi görürler.

Literatürde, şebekeden bağımsız yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı hibrit sistemlere odaklanan çok sayıda çalışma bulunmaktadır.

Santarelli vd. (2004), hidrojenle birlikte farklı yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı hibrit bir sistem modellemiştir. Rüzgâr türbini, fotovoltaiik paneller ve mikro hidrolik türbin ile hidrojenin yakıt pillerinde kullanılması durumları için İtalya’da şebekeden bağımsız bir konutun elektrik ihtiyacının karşılanmasını incelemiştir. Sistemin boyutlandırılmasını üç farklı enerji kaynağı için yaparak,

sistemin kapasitesini ve ilk yatırım maliyetlerini simülasyon kodlarını kullanarak hesaplamışlardır.

Herrando vd. (2014), Londra’da bulunan bir evin bir yıl boyunca elektrik/sıcak su ihtiyacını karşılamak ve toplam CO₂ emisyonunu en aza indirmek amacıyla PV/T ünitesi, sıcak su depolama tankı ve yardımcı ısıtıcıdan oluşan hibrit bir sistem tasarlamışlardır. Tasarlanan sistem ile değişen güneş ışınlamı ve yük taleplerini dikkate alarak en iyi performans gösteren konfigürasyonları ve çalışma koşullarını/stratejilerini belirlemişlerdir. Ayrıca PV/T ünitesinin çeşitli tasarım parametrelerini değiştirerek bunların sistemin genel performansı üzerine etkilerini incelemişlerdir. 20 L/saat debi ile bir yıl boyunca toplam elektrik talebinin %51’inin ve toplam sıcak su talebinin %36’sının hibrit PV/T sistemi ile karşılanabileceği sonucuna varmışlardır. Ek olarak, tasarlanan PV/T sisteminin 20 yıllık kullanım ömrü boyunca 16 tona kadar CO₂ tasarrufu elde edebileceğini belirlemişlerdir.

Alnejaili vd. (2015), fotovoltaik panel, yakıt hücresi, elektrolizör, batarya ve süperkapasitör içeren şebekeden bağımsız hibrit sistem için enerji yönetim stratejisi önermişlerdir. Önerilen enerji yönetim stratejisi ile sistem içindeki enerji akışını kontrol etmeyi amaçlamışlar ve her bir güç kaynağı ile paylaşılan yük miktarına karar vermişlerdir. Sistem kontrolünü, merkezi güç akışı kontrolörü ve sistemin enerji dengesine göre farklı yükleri kontrol eden yerel bir yük kontrolörü ile gerçekleştirmişlerdir. Hibrit güç sistemini, MATLAB/Simulink yazılımında matematiksel modeller oluşturarak simülasyon yoluyla test etmişlerdir. Dinamik kontrolörlerin performansını ve yönetim stratejisinin etkinliğini değerlendirmek için simülasyonları kısa ve uzun süreli periyotlarla gerçekleştirmişlerdir. Uzun süreli simülasyon için Batna şehrinde bulunan bir evin gerçek elektriksel yük profilini kullanmışlardır. Simülasyon verileri ile önerilen kontrol stratejisinin sistemin güvenilirliğini arttırdığı ve enerji dengesini iyileştirdiği sonucuna varmışlardır.

Cano vd. (2016), Meksiko şehrindeki gerçek hava durumu verilerini kullanarak PV, PEM-El, PEM-FC ve depolama tankından oluşan enerji dönüşüm sistemini boyutlandırmak, analiz etmek ve fizibilitesini değerlendirmek için matematiksel bir model sunmuşlardır. Sistem bileşenlerinin enerji dengesini kurarak alt sistemlerin verimlerini hesaplamışlardır. Hibrit sistem tarafından üretilen fazla enerjinin

kullanılarak sistem veriminin artırılmasına yönelik iyileştirmeler önermişlerdir. Ayrıca bu sistemin Meksika'daki bir evin elektriğini bir-iki gün boyunca karşılayabilecek küçük ve güvenilir bir elektrik yedekleme sistemi olarak kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Devrim ve Bilir (2016), Ankara ili İncek bölgesinde bulunan ortalama 150 m²'lik bir evin elektrik ihtiyacını karşılamak için fotovoltaiik güneş panelleri, küçük ölçekli rüzgâr türbini, elektrolizör ve proton değişim membranlı yakıt hücresinden oluşan hibrit bir sistem modellemişlerdir. İncelenen evin günlük enerji ihtiyacını tüm yıl boyunca 5 kWh sabit değer olarak almışlardır. Atılım Üniversitesi kampüsünde kurulu bir istasyondan toplanan rüzgâr hızı verileri ve Ankara için güneş radyasyon değerleri dikkate alınarak farklı fotovoltaiik panel alanı değerleri için hibrit sistemin aylık elektrik üretimini hesaplamışlardır. Analiz sonuçlarında, 3 kW kapasiteli rüzgâr türbini ile 17.97 m² yüzey alanına sahip fotovoltaiik panellerin kullanılması gerektiğini ve PEM yakıt pili için gereken hidrojen üretimini sağlamak için elektrolizörün 5 saat çalışmasının yeterli olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca tasarlanan sistem ile kasım ayı hariç tüm yıl boyunca evin elektrik ihtiyacı karşılanmıştır.

Khalid vd. (2016), Kanada'da bulunan bir evin elektrik talebini karşılamak için güneş ve rüzgâr enerjisi kaynaklı iki farklı entegre sistemin performanslarını incelemek amacıyla enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Bu sistemler tarafından üretilen fazla elektriği suyun elektrolizi yoluyla hidrojen üretimi için kullanmışlardır. Rüzgâr hızı, ortam sıcaklığı ve güneş ışıınımı gibi bazı önemli parametrelerin sistemlerin enerjitik ve ekserjitik verim üzerindeki etkilerini araştırmak için kapsamlı bir parametrik çalışma yürütmüşlerdir. Bu sistemlerin maliyet değerlendirmelerini ve seviyelendirilmiş elektrik maliyetlerini hesaplamış, önerilen sistemleri bu parametrelere göre optimize etmişlerdir. Toplam enerji ve ekserji verimlerini sırasıyla %20.7, %21 ve seviyelendirilmiş elektrik maliyetini 0.387 \$/kWh olarak hesaplamışlardır.

Özden ve Tari (2016), Ankara'da bulunan Keçiören Eğitim ve Araştırma Hastanesi acil servisi için (acil elektrik kesintilerine alternatif bir çözüm üretmek amacıyla) güneş-hidrojen bazlı hibrit yenilenebilir enerji sistemini TRNSYS yazılım programını kullanarak sayısal simülasyonlarla incelemeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla, tüm

bileşenleri içeren (fotovoltaik paneller, proton değişim membranlı yakıt hücreleri, PEM bazlı elektrolizörler, hidrojen depolama ünitesi) hibrit sistem modeli oluşturmuş ve sistemin genel performansını, acil durum kesintisi sırasında bir yıl boyunca hidrojen döngüsünün enerji ve ekserji verimleri üzerinden hesaplamışlardır. Hibrit sistemin enerji ve ekserji verimlerini sırasıyla %4.06 ve %4.25 olarak hesaplamışlardır. Ayrıca, seviyelendirilmiş elektrik maliyeti (LCE) bazında 25 yıllık proje ömrü için ekonomik analiz yapmışlar ve LCE 0.626 \$/kWh olarak hesaplamışlardır.

Amo vd. (2017), İspanya’da bir evin sıcak su ihtiyacını karşılamak amacıyla hibrit güneş enerjisi sistemi tasarlamışlardır. Elektrikli araçlar için bir şarj sistemi de dâhil olmak üzere her konut için ayrı ayrı sıcak su ve binanın ortak tüketimi için güç sağlayan hibrit güneş enerjisi santralinin tasarımını yapmışlardır. Daha sonra bir mühendislik firması tarafından geliştirilen ve üretilen PV/T panelini ve tüm sistemi TRNSYS yazılım programında simüle etmişlerdir. Tasarlanan sistemi doğrulamak amacıyla Zaragoza’da (İspanya), bir apartman bloğunda yer alan 4.14 kW kurulu elektriksel güce ve 20.5 kW termal kapasiteye sahip sistemi kullanmışlardır. Tasarlanan modelin, tüm sistemin ısı ve elektrik üretimi ile veriminin %6.5’ten daha düşük bir hata ile hesaplanmasına olanak sağladığı sonucuna varmışlardır.

Singh vd. (2017), Hindistan’da bulunan şebekeden bağımsız uygulamalar için yakıt hücresi/PV hibrit yenilenebilir enerji sistemi için tekno-ekonomik araştırma yürütmüşlerdir. Elde ettikleri sonuçlar, hidrojen depolama tankı/elektrolizör/yakıt hücresinin, güneş enerjisi mevcut olmadığında veya yeterli olmadığında seçtikleri binanın enerji talebini karşılayabileceğini göstermiştir.

Tiar vd. (2017), şebekeden bağımsız küçük ölçekli bir PV/yakıt hücresi sisteminin performansını incelemişler, maksimum PV gücünün elde edilmesine olanak tanıyan bulanık mantık denetleyicisi geliştirmişlerdir. Ayrıca bazı kontrol algoritmaları uygulayarak fotovoltaik modül ve yakıt hücresi enerjisini kullanabilen akıllı bir hibrit sistem yapmayı amaçlamışlardır. Önerilen denetim algoritması ile, sistemin yük talebine, gaz seviyesine ve PV kullanılabilirliğine göre farklı kontrol stratejileri geliştirmişlerdir. Algoritmaların etkinliğini test etmek için belirli bir yük profili ile deneysel sonuçlar elde ederek sonuçları yorumlamışlardır.

Assaf ve Shabani (2018), Avustralya’da şebekeden bağımsız bir evin elektrik ve sıcak su ihtiyacını karşılamak için güneş-hidrojen sistemine ait yakıt hücresi ısısı ile entegre güneş enerjisi sıcak su sisteminin deneysel kurulumunu yapmışlardır. Deneysel sonuçlar, bu sistemin hane halkının sıcak su ihtiyacını kış aylarında 24 saatlik temsili bir günde %91, ilkbaharda temsili bir günde %97 ve yaz aylarında temsili bir günde %100 karşılayabildiğini göstermiştir. Yakıt hücresinden geri kazanılan ısı ile kolektör tarafından kazanılan ısıнын tamamlayıcı olduğunu deneysel olarak bulmuş ve yakıt hücresi ısısından yüksek oranda yararlanmışlardır. Ayrıca sistemin, ısıtma, soğutma, sıcak su ve güç talepleri için uzak ve bağımsız uygulamalarda etkin bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Khosravi vd. (2018), şebekeden bağımsız uygulamalar için güneş/rüzgâr enerjisi, hidrojen üretim ünitesi ve yakıt hücresinden oluşan hibrit sistemin boyutlandırmasını, enerji, ekserji ve ekonomik analizlerini yapmışlardır. Analiz sonuçlarında sistemin enerji ve ekserji verimlerini sırasıyla %12 ve %16 olarak hesaplamışlardır. Sistemin ekonomik analiz sonuçlarında, enerji depolama maliyetinin toplam ilk yatırım maliyetinin %50’sini oluşturduğunu tespit etmişlerdir.

Ramesh vd. (2018), şebekeden bağımsız uygulamalar için hibrit sistemin performansını incelemişlerdir. Güç kaynağının gündüz ve gece sürekliliğini sağlamak için, PV güneş panelleri ve yakıt hücresinden oluşan hibrit bir sistem önermişler ve enerji yönetim stratejisi geliştirerek talep edilen yüke sürekli besleme sağlamışlardır. Bu enerji yönetim stratejisiyle, PV/yakıt hücresi, gündüz ve gece DC bağlantısından sürekli besleme alarak yüke elektrik enerjisi sağlamıştır. Ayrıca analizlerinde tüm sistemi modellemiş ve MATLAB/Simulink ortamında sistemin performansını incelemişlerdir.

Sorgulu ve Dinçer (2018), konut uygulamalarında kullanılmak üzere elektriksel güç, ısıtma ve soğutma sağlamak amacıyla güneş/rüzgar enerjisi sistemlerini elektrolizör, yakıt hücresi ve absorpsiyonlu soğutma sistemleri ile entegre etmişlerdir. Entegre sistemleri termodinamik açıdan analiz edip, performanslarını değerlendirmişlerdir. Ayrıca güneş ışınımı yoğunluğu, giriş sıcaklığı ve rüzgar hızının sistem performansı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Mevcut sistemin verimli, çevre dostu ve dolayısıyla sürdürülebilir bir sistem olduğu sonucuna varmışlardır.

Babayan vd. (2019), hidrojen yakıt dolum istasyonunda hidrojen üretimi için FDM ve PEM elektrolizörü ile entegre edilmiş yeni bir PV/T sistemi önermişlerdir. Enerji ve ekserji denge denklemlerine dayalı olarak, farklı tipteki PV/T ve FDM setlerinin termal ve elektriksel performansları üzerindeki etkilerini analiz etmek için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Sistem bileşenlerinin sıcaklıklarındaki, üretilen elektrikteki, hidrojen üretimindeki değişimleri, enerji/ekserji miktarlarını ve zaman içindeki verimlerini farklı parametreler için incelemişlerdir. PV/T tipinin sistemin en önemli parametrelerinden biri olduğu, FDM kullanımının elektriksel, termal ve ekserji verimlerini iyileştirdiği sonucuna varmışlardır.

Behzadi vd. (2019), soğutma eldesi ve hidrojen üretimi için PV/T, PEM-El ve termoelektrik jeneratörden oluşan entegre bir sistem önermişlerdir. Önerilen sistemi kapsamlı bir şekilde incelemiş, bu sistemi geleneksel kojenerasyon sistemi ile enerji, ekserji ve eksergoekonomik yönden karşılaştırmışlardır. Ana tasarım parametrelerinin sistemin ekserji verimliliği, net iş, toplam maliyet oranı ve hidrojen üretimi üzerindeki etkisini incelemek için detaylı bir parametrik çalışma yürütmüşlerdir. Ayrıca, MATLAB yazılım programını kullanarak, önerilen modeli optimize etmiş, optimal tasarım parametrelerini belirlemek için genetik algoritmaya dayalı çok amaçlı optimizasyon yöntemi uygulamışlardır. Ekserji ve eksergoekonomik analizlerinde, PV/T'nin en yüksek ekserji yıkım hızına ve soğutma setinin en düşük eksergoekonomik faktöre sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca önerilen sistemin ekserji verimini ve toplam maliyet oranını sırasıyla %12.01 ve 0.1762 \$/h olarak hesaplamışlardır.

Budak ve Devrim (2019), su ve metanol elektrolizine dayalı PV, elektrolizör ve PEM yakıt pilinden oluşan hibrit sistemi İzmir'in güneş ışıyım değerlerini kullanarak karşılaştırmalı olarak analiz etmişler. Metanol ve su elektrolizörlerini bir evin enerji ihtiyacını karşılayan 1.2 kW gücünde PEM yakıt pilinin hidrojen talebini karşılamak üzere tasarlamışlardır. Metanol elektrolizör kullanımının su elektrolizör kullanımından yaklaşık %27 daha fazla hidrojen üretebileceği sonucuna varmışlardır. Ayrıca su ve metanol elektrolizöre dayalı hibrit sistemin seviyelendirilmiş enerji maliyet analizini yapmışlar ve maliyeti sırasıyla 0.912 \$/kWh ve 0.54 \$/kWh olarak hesaplamışlardır. Metanol bazlı hibrit sistemin ev uygulamalarında kendi kendini idame ettirmek için uygun bir seçenek olduğunu belirlemişlerdir.

Jafari vd. (2019), şebekeden bağımsız uygulamalar için elektrik ihtiyacını ve kullanım sıcak suyunu karşılamak için PV/T, yakıt hücresi ve bir batarya ile entegre güneş-hidrojen enerjili sistemin kapsamlı termo-ekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca her bir bileşenin ve tüm sistemin performansını değerlendirmek için termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarını kullanmışlardır. Sistemin ekonomik değerlendirmesini yaparken o günün maliyetini dikkate almış ve sistem performansını maliyet parametresine göre optimize etmişlerdir. Sistemin genel veriminin %9 ve seviyelendirilmiş elektrik maliyetinin 0.286 \$/kWh olduğu sonucuna varmışlardır.

Marefati ve Mehrpooya (2019), fotovoltaiik güneş sistemi, proton değişim membranlı yakıt hücresi ve termoelektrik cihaza dayalı yeni bir polijenerasyon sistemi önermişler ve sistem modellemesini MATLAB yazılım programını kullanarak yapmışlardır. Hibrit sistemi İran'daki dört farklı şehir için (Tebriiz, İsfahan, Şiraz ve Bandar Abbas) elektrik, ısıtma ve soğutma ihtiyacını karşılayabilmek amacıyla kurgulamışlardır. Isıtma ve soğutma ihtiyacını sırasıyla proton değişim membranlı yakıt hücresi ve termoelektrik soğutucu ile karşılamışlardır. Ayrıca termoelektrik soğutucu için gerekli elektriksel gücü, termoelektrik jeneratörden sağlamışlardır. Hibrit sistemin elektriksel verimini ve yakıt hücresi verimini sırasıyla %53.3 ve %40.97 olarak hesaplamışlardır. Dört farklı şehir için yapılan analizlere göre ihtiyaç duyulan ortalama güneş modülü sayısını sırasıyla 62, 48, 46 ve 46 olarak belirlemişlerdir. Ayrıca Şiraz şehrinin, yıllık ortalama en yüksek hidrojen üretim potansiyeline sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

Natarajan vd. (2019), elektriğe erişimin zor olduğu uzak bölgelerde kesintisiz güç elde etmek amacıyla fotovoltaiik sistem ve PEM yakıt pilinden oluşan hibrit bir sistem tasarlamışlardır. Bu amaçla 6 kW gücünde yakıt pilinin ve 1 kW gücünde PV hücresinin modellemesini ve simülasyonunu MATLAB/Simulink ortamında ayrı ayrı yaparak karakteristik eğriler elde etmişlerdir. Ayrıca geliştirilen hibrit modelin tamamının analizlerini yaparak literatürde bulunan mevcut çalışmalarla doğrulamışlardır. Tasarlanan hibrit sistemin elektriğe erişimin zor olduğu uzak bölgelerde kullanışlı olduğu sonucuna varmışlardır.

Samy vd. (2019), Mısır'ın şebekeden bağımsız kentsel bölgelerinde elektrik ihtiyacını karşılamayı amaçlamışlardır. Bu amaçla PV/yakıt hücresinden oluşan hibrit sistemin bileşenlerini modellemişler ve tekno-ekonomik fizibilite çalışmasını

gerçekleştirmişlerdir. Optimum PV panel sayısını/yakıt hücresi/elektrolizör/depolama tankı boyutunu tahmin etmek için yakın zamanlı meta sezgisel optimizasyon yöntemini önermişlerdir. Ayrıca PEM yakıt pili, elektrolizör, hidrojen depolama tankları ve PV güç sisteminin başlangıç maliyetlerindeki değişimin, seviyelendirilmiş enerji maliyeti üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Analiz sonuçlarına göre optimum sistem konfigürasyonu için 27 PV panele ihtiyaç duyulduğu tespit etmişlerdir. Ayrıca sistemin 0.334 \$/kWh seviyelendirilmiş enerji maliyetine sahip olduğunu belirlemişlerdir.

Barbu vd. (2020), basit bir PV/T panelinde ve sıcak su depolama tankına bağlı PV/T sisteminde sıcaklık etkileşimlerini incelemişler ve çeşitli termal özelliklerin elektriksel verim üzerindeki etkisini incelemek için parametrik analizler yapmışlardır. PV/T sisteminin modelini TRNSYS yazılım programında oluşturmuşlar ve tank boyutu, akışkanın tank çıkışındaki debisi, tüketici talep eğrisi gibi parametrelerin sistem performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sistemin termal ve elektriksel gücünün anlık değişiminin, PV/T panelin girişindeki sıcaklığın bir fonksiyonu olduğunu belirlemişler ve en yüksek elektriksel verimin, en yüksek tüketici talebi sırasında gerçekleştiği sonucuna varmışlardır.

Boulmırharj vd. (2020), binaların elektrik ve termal enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla fotovoltaiik sistem, elektrolizör ve PEM yakıt pilinden oluşan hibrit bir sistem tasarlamışlardır. Geliştirilen modellerin doğruluğunu göstermek ve sistem performansını değerlendirmek amacıyla öncelikle kısa süreli periyotlarla çeşitli simülasyonlar ve deneyler yapmışlardır. Simülasyon verileri ve deneysel sonuçlar ile, geliştirilen modellerin sistem performansını doğru analiz ettiğini göstermişler, doğrulanan modelleri daha sonra uzun süreli simülasyonlar için kullanmışlardır. Sistemin elektriksel verimini yaklaşık %32, toplam verimini %64.5 olarak hesaplamışlardır.

Ghenai vd. (2020), şebekeden bağımsız hibrit fotovoltaiik/yakıt pili güç sistemi tasarlamak amacıyla modelleme, simülasyon ve optimizasyon yaklaşımına dayalı bir tekno-ekonomik analiz yapmışlardır. Bu çalışmada, çöl bölgesindeki bir yerleşim topluluğunun (150 ev) elektrik yükünü karşılamak için şebekeden bağımsız hibrit yenilenebilir enerji sisteminin tasarımını optimize etmiş ve kontrol stratejileri

geliştirmişlerdir. Güneş panellerinde sıcaklık ve toz birikiminin çöl bölgesindeki hibrit güç sisteminin tasarımı ve performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Simülasyon sonuçlarına göre hidrojen üretimi için elektrolizör ile entegre edilmiş PV ve yakıt hücresi bulunan ve çevrim şarj dağıtım kontrol stratejisini kullanan dağıtılmış güç üretim sisteminin en iyi performansı sunduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca elektrolizör ve hidrojen depolama sistemi ile entegre PV ve yakıt hücresi kullanan dağıtılmış güç üretiminin 4500 kWh/gün'lük enerji talebini karşılayabileceği ve sistemin 145 \$/MWh'lik seviyelendirilmiş enerji maliyetiyle ekonomik olarak uygun ve çevre dostu olduğu sonucuna varmışlardır.

León vd. (2020), Paraguay'ın batı bölgesinde yenilenebilir bir enerji kaynağı ve hidrojen depolama sistemi kullanan otonom bir sodyum hipoklorit tesisini teknik ve ekonomik olarak analiz etmişlerdir. Sistemin ön sonuçlarında, gün içinde depolanan hidrojenin hipoklorit üretimini %31'e kadar artırabildiğini ve PV'nin fazla enerjisinin tesis yakınındaki şebekeden bağımsız bir topluluğun enerji talebini karşılayabileceğini göstermişlerdir. Ayrıca, tesisin yatırım getirisinin 7 yıl olduğu sonucuna varmışlardır.

Nguyen ve Shabani (2020), güneş-hidrojen enerjisi kaynaklı hibrit enerji sisteminde faz değişim malzemesi kullanan metal hidrit tankının termal modelini önermişlerdir. Önerilen yenilikçi termal yönetim sistemini güneydoğu Avustralya'da şebekeden bağımsız bir evin yük talebini karşılamak için bir vaka çalışması kullanarak modellemişlerdir. FDM'nin fiziksel özelliklerinin (termal iletkenlik) metal hidrit tankının şarj ve deşarj işlemleri sırasında performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Ayrıca sistemdeki elektrolizör ve yakıt pilinin performans profillerini en uygun şekilde boyutlandırmak ve tahmin etmek için HOMER Pro yazılımında güneş-hidrojen sistemini simüle etmişlerdir. Farklı çalışma koşulları altında önerilen termal yönetim çözümünün metal hidrit tankının dinamik davranışının anlaşılmasına yardımcı olduğu sonucuna varmışlardır.

Temiz ve Javani (2020), Ege Bölgesi'ndeki küçük bir topluluğun elektrik enerjisi talebini karşılamak amacıyla DC yük ve gölge rezervuarı sağlayan yüzer PV/yakıt hücresi sisteminin tasarımını ve modellemesini yapmışlardır. Yüzen PV'nin 3 010 m² gölgeleme alanı sağlayarak su kaynaklarından buharlaşma yoluyla su kaybını azalttığı sonucuna varmışlardır. Entegre sistem ile herhangi bir şebeke bağlantısı veya fosil

yakıt kullanımı olmaksızın elektrik ihtiyacının %99.43'ünü karşılamışlar, seviyelendirilmiş elektrik maliyeti 0.6124 \$/kWh olarak hesaplamışlardır.

Zhang vd. (2020), rüzgâr türbini, PV, PEM-El, PEM-FC, hidrojen depolama tankı ve batarya içeren hibrit enerji sistemini, yeterli hidrojen eldesi ve güvenilir bir güç kaynağı sağlamak amacıyla deneysel olarak incelemişlerdir. Sistemde bulunan her bir bileşenin çalışma özelliklerini bir yazılım simülasyonu yerine deneysel olarak test edip, analizleri gerçekleştirmişlerdir. Yenilenebilir enerjinin belirsizliği ve yükün dalgalanması nedeniyle, sekiz farklı çalışma senaryosu (çalışma durumları, şarj durumu, hidrojen depolama seviyesi gibi) kurgulayarak hibrit sistemin performansını kapsamlı bir şekilde değerlendirmişlerdir. Deneyler yoluyla hibrit sistem için önerilen çalışma stratejisinin etkili ve kararlı olduğu sonucuna varmışlardır.

Ceylan ve Devrim (2021), Şanlıurfa'da bulunan bir seraya elektrik ve ısı sağlamak için Fotovoltaik/Elektrolizör/Proton Değişim Membranlı Yakıt Pilinden oluşan hibrit yenilenebilir enerji sisteminin tasarımını ve optimizasyonunu MATLAB/Simulink ortamında araştırmışlardır. Güneş enerjisinin yeterli olmadığı durumlarda, PEM yakıt pilinin çalışması için gereken hidrojeni, hidrojen depolama tanklarından karşılamış ve enerjinin sürekliliğini sağlamışlardır. 3 kW gücünde PEM yakıt pilinin hidrojen talebini karşılayacak şekilde elektrolizör tasarlamışlardır. PEM yakıt pili tabanlı hibrit sistemin %48 elektrik ve %45 termal verime sahip olduğunu sonucuna varmışlardır. Ayrıca önerilen hibrit sistem için elde edilen optimizasyon sonuçlarına göre seviyelendirilmiş enerji maliyetini 0.117 \$/kWh olarak hesaplamışlardır. Önerilen PV/Elektrolizör/PEM-FC hibrit güç sisteminin bağımsız uygulamalarda kesintisiz güç sağlamak için uygulanabilir bir seçenek olduğu sonucuna varmışlardır.

De ve Ganguly (2021), çift etkili absorpsiyonlu soğutma sistemine dayalı soğuk hava deposunu şebekeden bağımsız bir şekilde çalıştırmak için güneş-hidrojen enerjisi destekli hibrit güç sistemi tasarlamışlardır. Tasarlanan hibrit sistemin matematiksel modelini geliştirmişler ve literatürde mevcut olan referans çalışmalara göre doğrulamışlardır. Sistemi enerji, ekonomik ve çevresel açılardan analiz etmişlerdir. Soğuk hava deposu tesisinin kurum içi güç gereksinimlerini karşıladıktan sonra acil durumda yükü desteklemek için kullanılabilecek 2.17 MWh fazla enerji üretebileceğini hesaplamışlardır. Ayrıca, güç sisteminin karbondioksit salınımı

potansiyelinin yaklaşık 350 ton olduğu ve bunun da yıllık 5 067\$'lık karbon vergisinden tasarruf sağlayabileceği sonucuna varmışlardır. Yaklaşık yedi yıllık tahmini geri ödeme süresi ile entegre sistemin ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu tespit etmişlerdir.

Pal ve Mukherjee (2021), kuzeydoğu Hindistan eyaletlerinde son kullanıcının yük talebini karşılamak için şebekeden bağımsız fotovoltaik/yakıt hücresi tabanlı hibrit enerji sistemi tasarlamışlardır. Hidrojen bazlı PV/FC enerji sisteminin optimal boyutlandırmasını HOMER yazılım programında yapmış ve ayrıntılı olarak tekno-ekonomik fizibilite analizini gerçekleştirmişlerdir. Yük talebini karşılamak için 110–120 kW PV dizisi, 10-15 kW FC, 30–60 kW elektrolizör, 40–60 kg hidrojen tankı kapasitesi ve 15 kW dönüştürücü kullanılması gerektiği sonucuna varmışlardır. Yıl boyunca elektrolizör tarafından üretilen net hidrojen miktarını 1 538-1 856 kg/yıl olarak hesaplamış, önerilen optimal PV/FC sistemi ile yıl boyunca son kullanıcının yük talebini karşıladığını belirlemişlerdir.

Sacedón vd. (2021), İspanyada yaşayan bir ailenin yük talebini karşılamak amacıyla şebekeden bağımsız fotovoltaik/anyon değişim membranlı su elektrolizöründen oluşan hibrit bir sistem tasarlamışlardır. İlk adım olarak PV-SYST 7.0 yazılımını kullanarak fotovoltaik panel seçimini yapmışlar, daha sonra elektrolizör ile fotovoltaik panelin akım-potansiyel eğrilerini birleştirerek hidrojen üretimini hesaplamışlardır. Güneş enerjisinin olmadığı durumlarda üretilen hidrojeni kullanmak için bir yakıt hücresi seçmişlerdir. Tüm sistemi, yılın en soğuk ayı olarak bilinen ocak ayı için tasarlamışlardır. Tasarlanan fotovoltaik/hidrojen sisteminin, şebekeden bağımsız uygulamalar için uygun bir seçenek olduğu sonucuna varmışlardır.

Nguyen ve Shabani (2022), güneydoğu Avustralya'da yaklaşık 3.8 MWh/yıl elektrik talebi olan şebekeden bağımsız bir evin enerji ihtiyacını karşılamak için faz değişim malzemesi kullanan metal hidrit tankına sahip güneş-hidrojen sistemini incelemişlerdir. Termodinamiğin enerji ve ekserji verimlerini belirlemek amacıyla MATLAB'da matematiksel model geliştirmişlerdir. Fotovoltaik panel, elektrolizör, yakıt hücresi ve tüm sistemin ekserji verimlerini sırasıyla %6.5, %88, %50.6 ve %3.74 olarak hesaplamışlardır. Ayrıca, FDM tabanlı termal yönetim düzenlemesi ile MH (metal hidrit) hidrojen depolama ünitesi üzerinde ayrıntılı entropi üretimi hesabı ve

ekserji analizi yapmışlardır. MH hidrojen depolama ünitesinin yıllık entropi üretiminin, ekserji yıkımının ve ekserji verimliliğinin sırasıyla 173 Wh/K, 51.5 kWh ve %98.8 olduğu sonucuna varmışlardır.

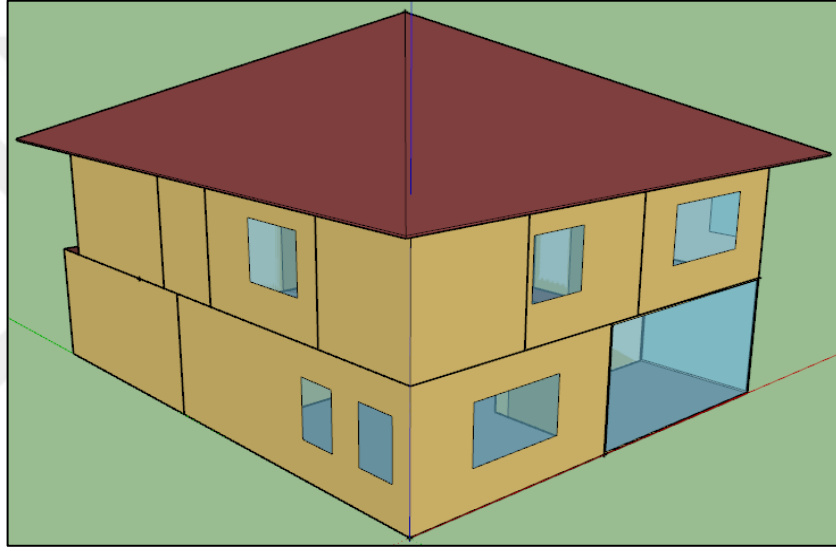
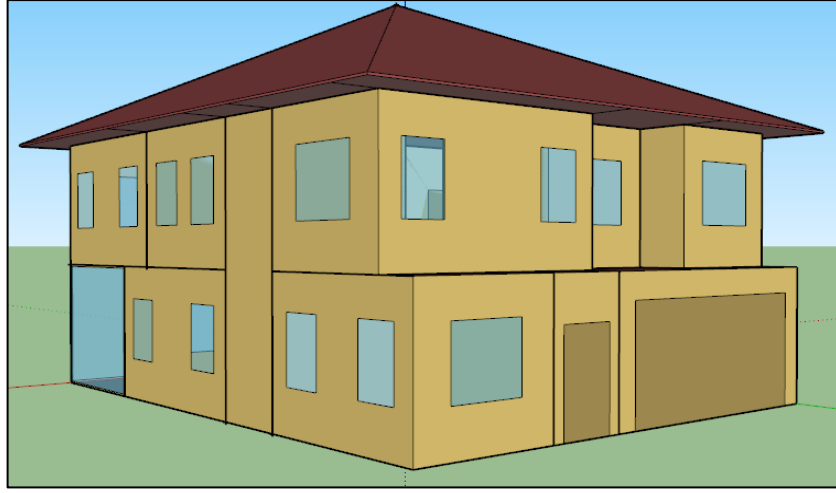
Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde hibrit sistemi oluşturan her bir bileşen için matematiksel modeller oluşturup hem elektrik hem de sıcak su ihtiyacının karşılandığı çalışmalara rastlanılmamıştır. Bu nedenle bu tez çalışmasının hem matematiksel modelleme çalışmaları hem de hibrit sistem analizleri için literatüre katkı sağlayabileceği düşünülmektedir. Ayrıca bu tez çalışmasında hibrit sistem için enerji yönetim stratejisi geliştirilerek dinamik analizler yürütülecektir. Bu bağlamda farklı enerji yönetim stratejileri geliştirilerek dinamik analizlerin yürütülmesi ile literatüre faydalı olabileceği düşünülmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında İzmir ilinde şebekeden bağımsız iki katlı evin elektrik ve sıcak su ihtiyacının karşılanması amaçlanmaktadır. Bu amaçla öncelikle 5 kişilik bir ailenin yaşadığı evin yıllık elektrik ve sıcak su ihtiyacı hesaplanacaktır. Daha sonra dinamik analizleri yürütmek amacıyla İzmir iline ait yıllık güneş ışıınımı, rüzgâr hızı, çevre sıcaklığı gibi meteorolojik veriler elde edilecektir. Tasarlanan ev için bir yıl boyunca kesintisiz olarak elektrik ve sıcak su ihtiyacının karşılanması amacıyla güneş-hidrojen enerjisine dayalı hibrit bir sistem tasarlanacaktır. Sistemi oluşturan her bir bileşen için MATLAB ortamında 0-D (sıfır boyutlu) matematiksel modeller oluşturulacaktır. Oluşturulan matematiksel modeller literatürde bulunan mevcut çalışmalar ile doğrulanacaktır. Modelleme ve doğrulama çalışmaları tamamlanan bileşenlerin birbirine entegrasyonu için enerji yönetim stratejisi belirlenecektir. Belirlenen enerji yönetim stratejine göre günlük, aylık, mevsimlik ve yıllık bazda dinamik analizler yapılacaktır.

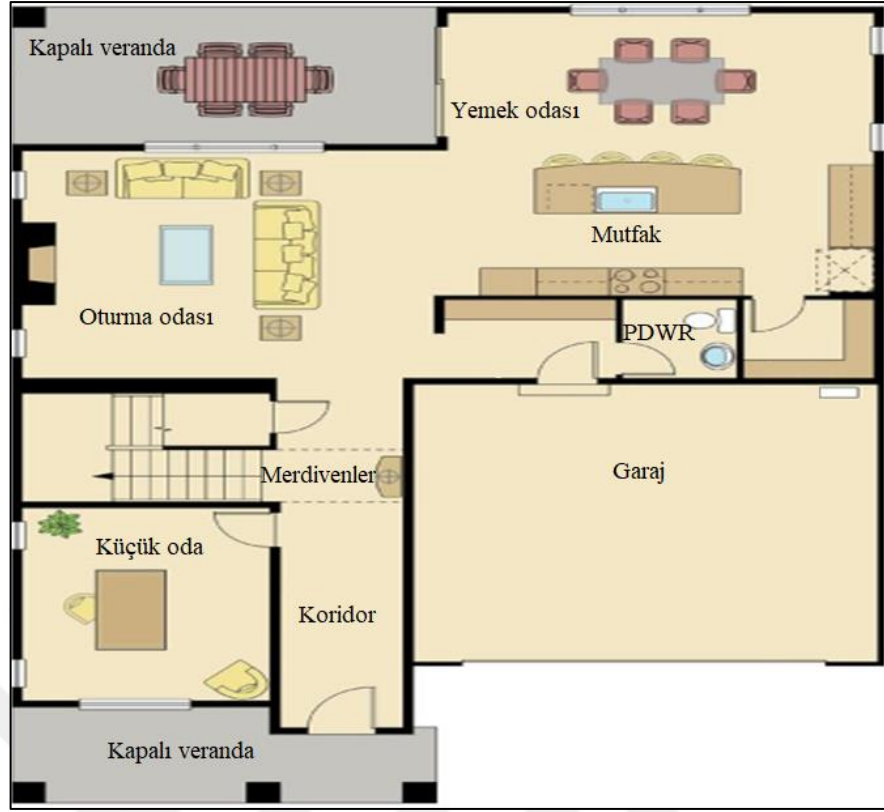
3.1. Meteorolojik Verilerin ve Elektrik Tüketiminin Belirlenmesi

Şebekeden bağımsız olarak İzmir ilinde kurulacak ev üç boyutlu olarak Sketcup'ta (Anonim, 2022b) modellenmiştir (Şekil 3.1). Modellenen ev iki katlı olup 300 m² taban alanına sahiptir ve 16 termal bölgeden oluşmaktadır. Tasarlanan evin diğer geometrik özellikleri (örneğin; kat planı, yön ve pencere-duvar oranı gibi) ve iç yükler (örneğin., kişi sayısı, aydınlatma ve gereçler) Yoon vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada tartışıldığı gibi benzer bir yaklaşımla seçilmiştir.



Şekil 3.1. Şebekeden bağımsız kurulacak evin üç boyutlu gösterimi

Tasarlanan evin birinci katının planı Şekil 3.2’de, birinci kata ait termal bölge detayları ise Çizelge 4.1’de görülmektedir. Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi evin birinci katında oturma odası/yemek odası/mutfak (71.33 m^2), koridor (11.23 m^2), veranda (19.4 m^2), küçük bir oda (14.3 m^2), garaj (38.73 m^2) ve engelli tuvaleti (4.57 m^2) bulunmaktadır.

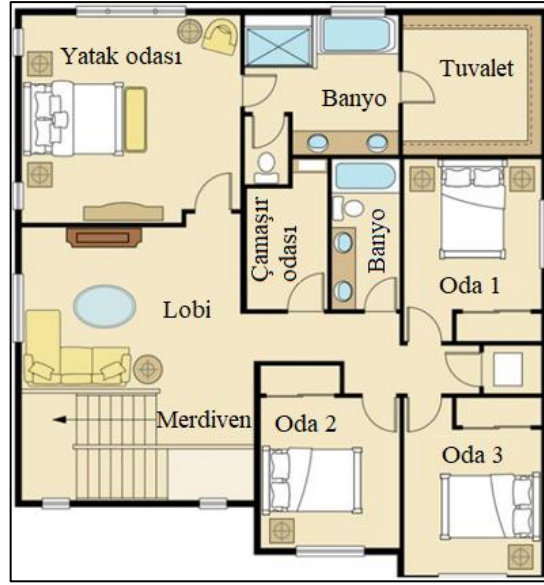


Şekil 3.2. Evin birinci katının planı

Çizelge 3.1. Birinci kat termal bölgelerin detayları

Alan adı	Alan (m ²)
Oturma odası / Yemek odası / Mutfak	71.33
Koridor	11.23
Veranda	19.4
Küçük oda	14.3
Garaj	38.73
PWDR (Engelli tuvaleti)	4.57

Tasarlanan evin ikinci katının planı Şekil 3.3'te, ikinci kata ait termal bölge detayları ise Çizelge 3.2'de görülmektedir. Çizelge 3.2'de görüldüğü gibi evin ikinci katında lobi (58.84 m²), oda 1 (13.88 m²), oda 2 (8.72 m²), oda 3 (12.19 m²), yatak odası (22.3 m²), çamaşır odası (5 m²), banyo (10.44 m²), tuvalet (8.38 m²), banyo (5.52 m²) ve merdivenler (6.03 m²) bulunmaktadır.



Şekil 3.3. Evin ikinci katının planı

Çizelge 3.2. İkinci kat termal bölgelerin detayları

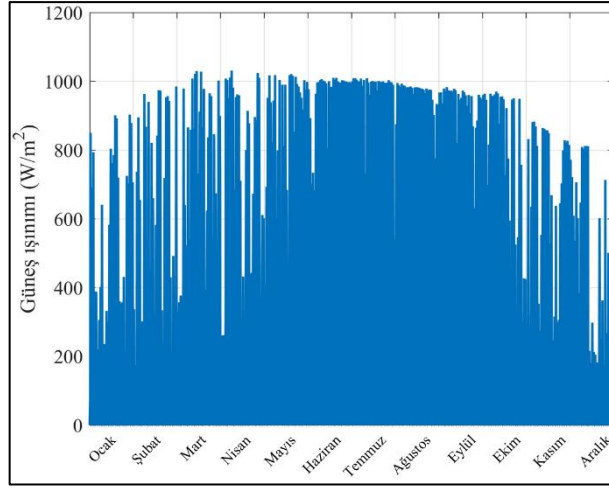
Alan adı	Alan (m ²)
Lobi	58.84
Oda 1	13.88
Oda 2	8.72
Oda 3	12.19
Yatak odası	22.3
Çamaşır odası	5
Banyo	10.44
Tuvalet	8.38
Banyo	5.52
Merdivenler	6.03

Yaz ve kış mevsim şartlarına göre evin ısı kaybını/kazancını hesaplamak amacıyla kullanılan yapı malzemelerinin türü, kalınlığı, termal iletkenliği, yoğunluğu ve özgül ısısı Çizelge 3.3'te görülmektedir. Çizelgede görülen verilerden yararlanarak evin ısıtma ve soğutma yükü hesaplanmıştır.

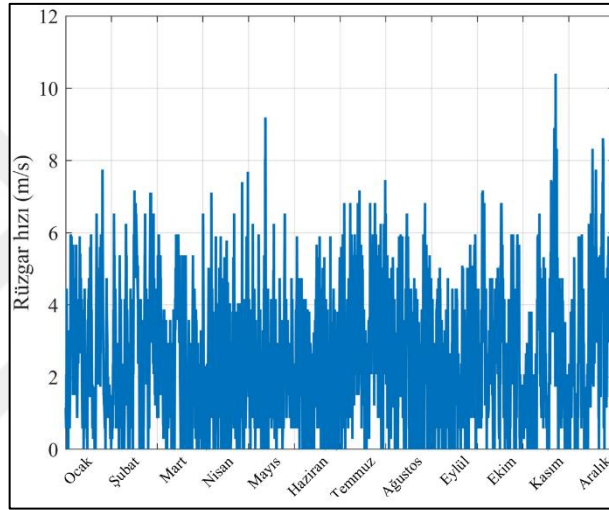
Çizelge 3.3.Termal bölge yapılarının detayları

Ad	Kalınlık (m)	Termal iletkenlik (W/mK)	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül ısı (J/kgK)
Tuğla	0.1	0.27	1 000	800
Seramik	0.01	0.16	820	324
Odun	0.1	0.15	608	1 630
HW beton	0.1	0.71	2 000	710
LW beton	0.07	0.55	1 570	710
Alçı	0.01	0.43	970	950
Betonarme	2	2.5	2 500	840
Çatı izolasyonu	0.1	0.1	350	1 130
Çatı malzemesi	0.05	0.7	1 500	800
Traverten	0.04	1.6	2 600	1 000
Hava boşluğu	-	-	-	0.024
Fiberglas	0.02	0.04	700	-

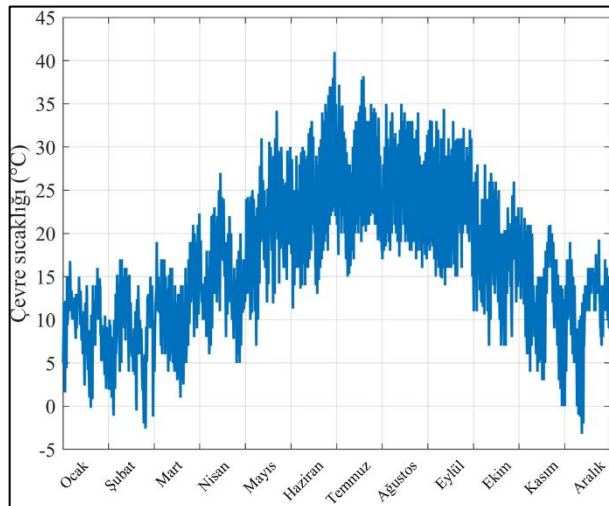
Bu tez çalışmasında yıllık dinamik analizler yapmak ve bileşen bazında matematiksel modeller oluşturmak amacıyla İzmir iline ait meteorolojik verilerin belirlenmesi gerekir. Bu amaçla OpenStudio yazılım programının EnergyPlus (Anonim, 2022c) veri tabanı kullanılarak, İzmir iline ait güneş ışıınımı, çevre sıcaklığı ve rüzgâr hızı değişimleri elde edilmiştir. Elde edilen verilerin aylık değişimi Şekil 3.4’te görülmektedir.



a) Güneş ışıması



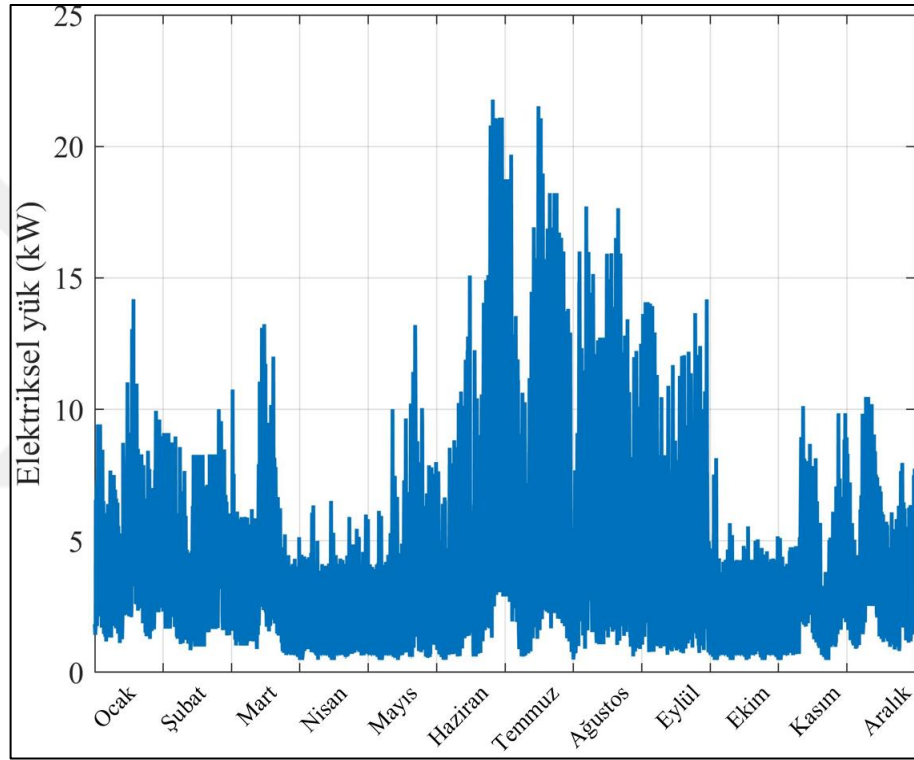
b) Rüzgâr hızı



c) Çevre sıcaklığı

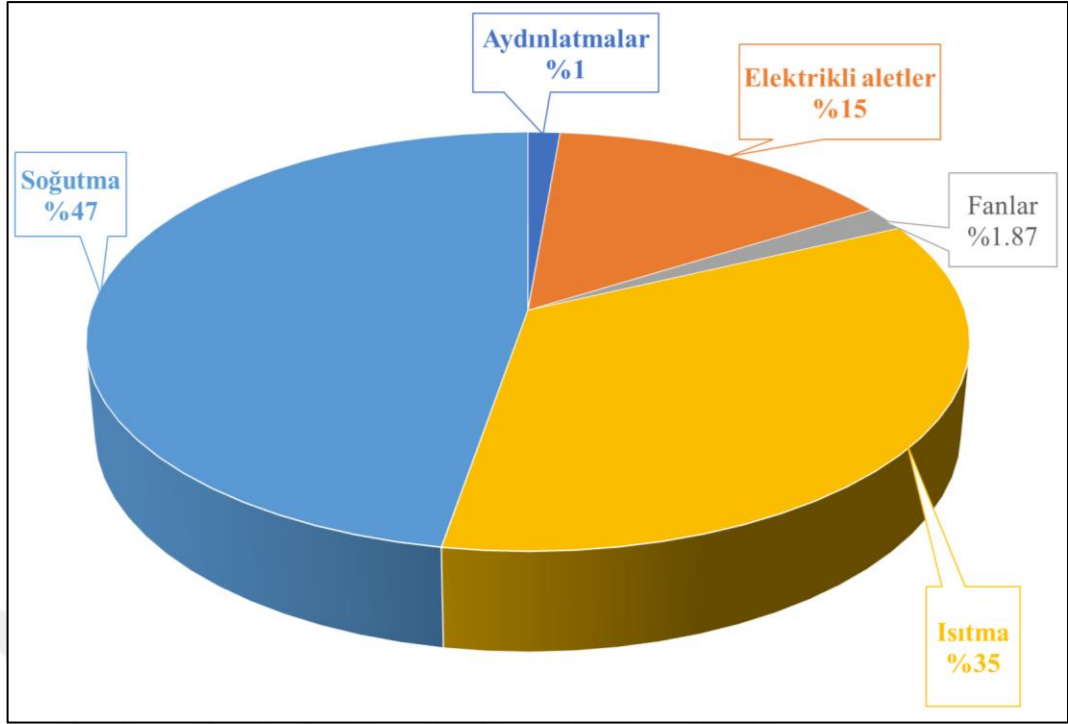
Şekil 3.4. İzmir için yıllık meteorolojik değerler

İzmir ilinde şebekeden bağımsız olarak tasarlanan iki katlı ev için OpenStudio yazılımı (OpenStudio, 2020) kullanılarak yıllık elektrik tüketimi hesaplanmıştır (Şekil 3.5). Evin elektrik tüketimi hesaplanırken 5 kişilik aile için senaryolar tanımlanmıştır. Ayrıca evin elektrik tüketiminde elektrikli aletlerin enerji tüketimi hesaba katılmış, evin ısıtma ve soğutma ihtiyacının ısı pompası vasıtasıyla elektrikle karşılandığı dikkate alınmıştır. Şekil 3.5'te elektriksel yük ihtiyacının (sıcak su hariç) yıllık değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi evin maksimum elektrik ihtiyacı temmuz ayının 14. gününde yaklaşık 22 kW olarak hesaplanmıştır.



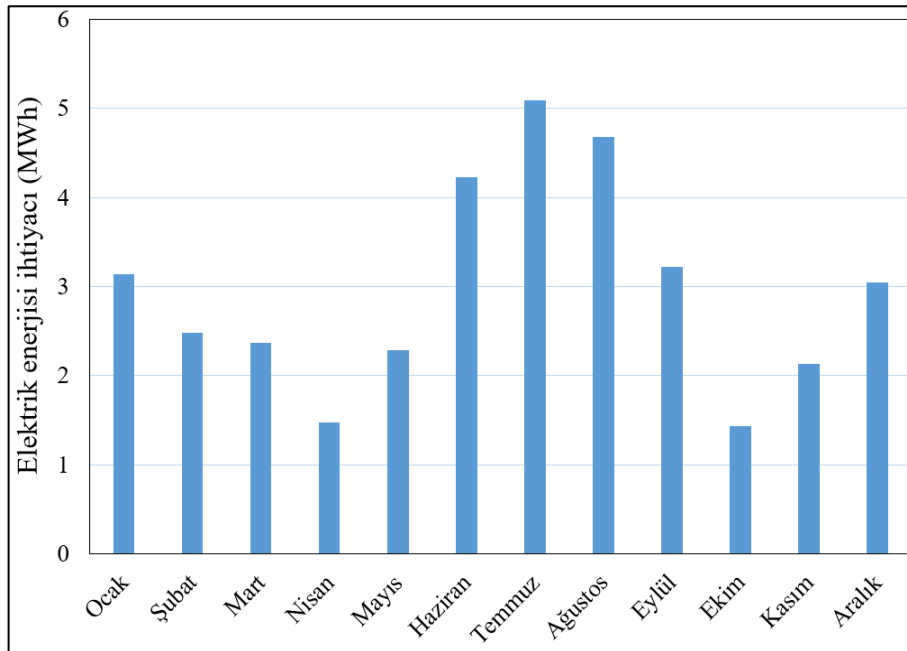
Şekil 3.5. Elektriksel yük profili

İzmir ilinde 5 kişinin yaşadığı iki katlı şebekeden bağımsız evin elektrik tüketiminin dağılımı Şekil 3.6'da görülmektedir. Evin elektrik tüketimi hesaplanırken aydınlatmalar, elektrikli aletler, fanlar, ısıtma ve soğutma ihtiyacının karşılanması için ısı pompasının elektrik tüketimi hesaba katılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi en fazla elektrik tüketimi %47 ile soğutma ihtiyacının karşılandığı sıradadır. Soğutma ihtiyacını %35 ile ısıtma ihtiyacı takip ederken, elektrikli aletler %15 ile üçüncü sıradadır. En düşük elektrik tüketimi ise %1 ile aydınlatma ihtiyacının karşılandığı sıradadır.



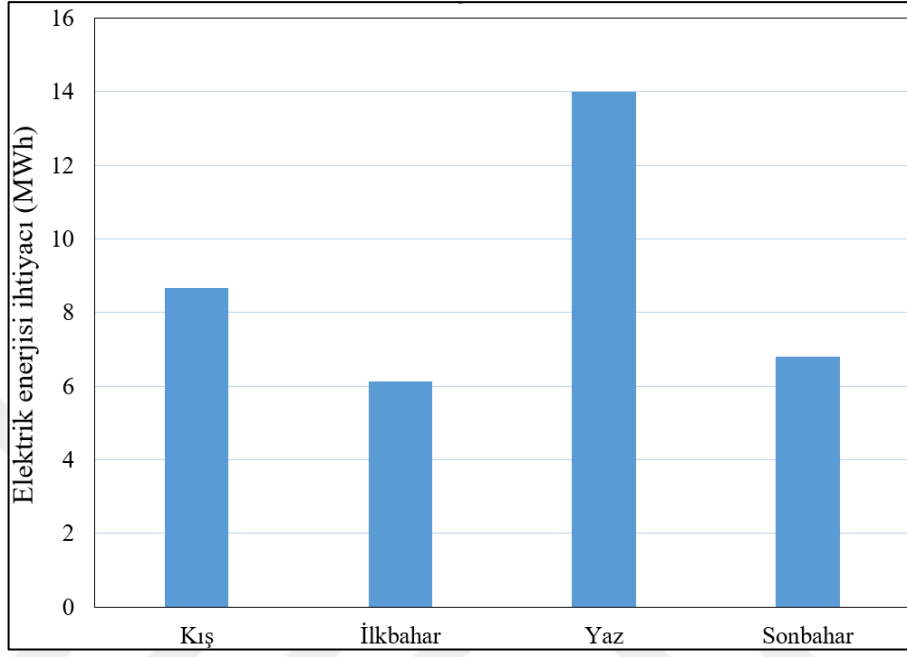
Şekil 3.6. Yıllık elektrik tüketimin dağılımı

Elektrik enerjisi ihtiyacının aylara göre değişimi Şekil 3.7’de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi elektrik enerjisi ihtiyacının maksimum değeri temmuz ayında 5.09 MWh iken, elektrik enerjisi ihtiyacının minimum değeri ekim ayında 1.43 MWh olarak hesaplanmıştır.



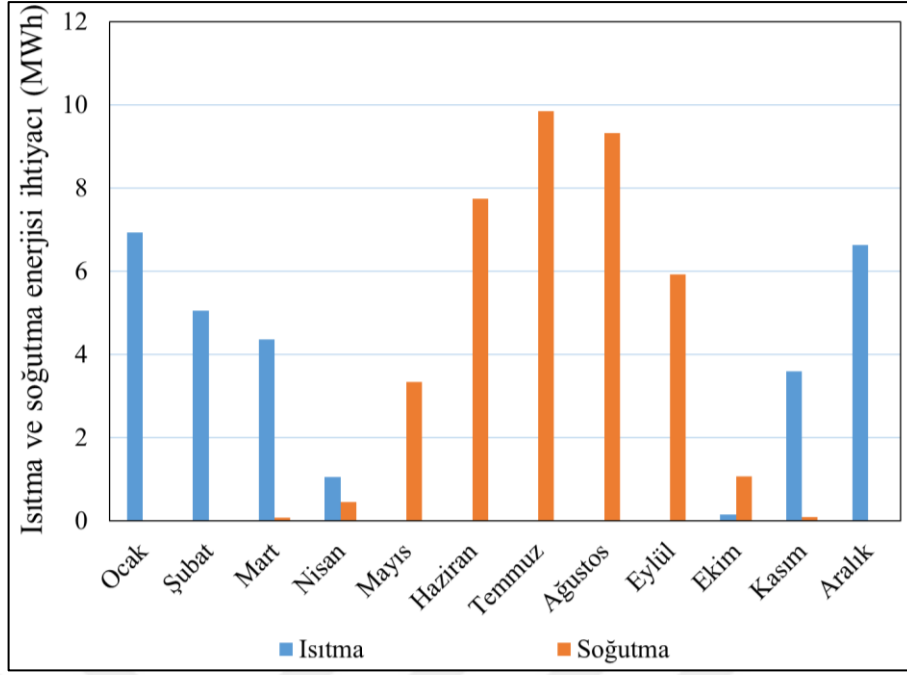
Şekil 3.7. Elektrik enerjisi ihtiyacının aylara göre değişimi

Şekil 3.8’de elektrik enerjisi ihtiyacının mevsimlere göre değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi en fazla elektrik enerjisi ihtiyacı 14 MWh ile yaz mevsiminde görülürken, en az elektrik enerjisi ihtiyacı 6.13 MWh ile ilkbahar mevsiminde görülmektedir.



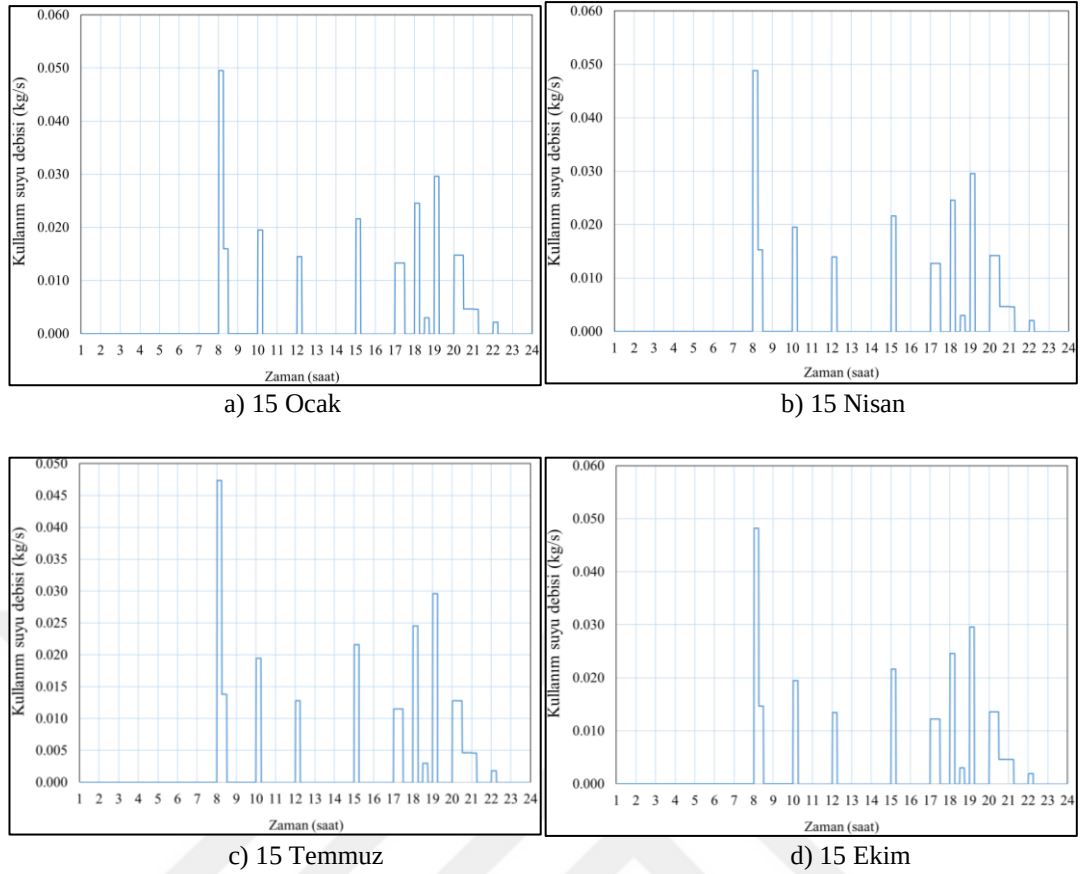
Şekil 3.8. Toplam elektrik enerjisi ihtiyacının mevsimlere göre değişimi

Tasarlanan iki katlı ev için aylara göre ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacı Şekil 3.9’da görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi aralık-şubat ayları arasında soğutma enerjisi ihtiyacı yok iken, maksimum ısıtma enerjisi ihtiyacı yaklaşık 7 MWh ile ocak ayındadır. mayıs-eylül ayları arasında ise ısıtma enerjisi ihtiyacı yok iken, en fazla soğutma enerjisi ihtiyacı yaklaşık 10 MWh ile temmuz ayındadır. Mart, nisan, ekim ve kasım aylarında ise hem ısıtma hem de soğutma enerjisi ihtiyacı vardır.



Şekil 3.9. Isıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacının aylara göre değişimi

Tasarlanan ev için kullanım sıcak su debileri elde edilmiştir. Şekil 3.10’da görüldüğü gibi kış, ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimlerde seçilen bir ayın (ocak, nisan, temmuz, ekim) bir günü için (her ayın 15. günü) sıcak su profilleri elde edilmiştir. Kullanım sıcak su debileri tüm yıl boyunca birbirine çok yakın değerlerde olmakla birlikte, en fazla sıcak su debisi ocak ayında yaklaşık 0.049 kg/s iken, en az sıcak su debisi temmuz ayında 0.047 kg/s olarak belirlenmiştir.

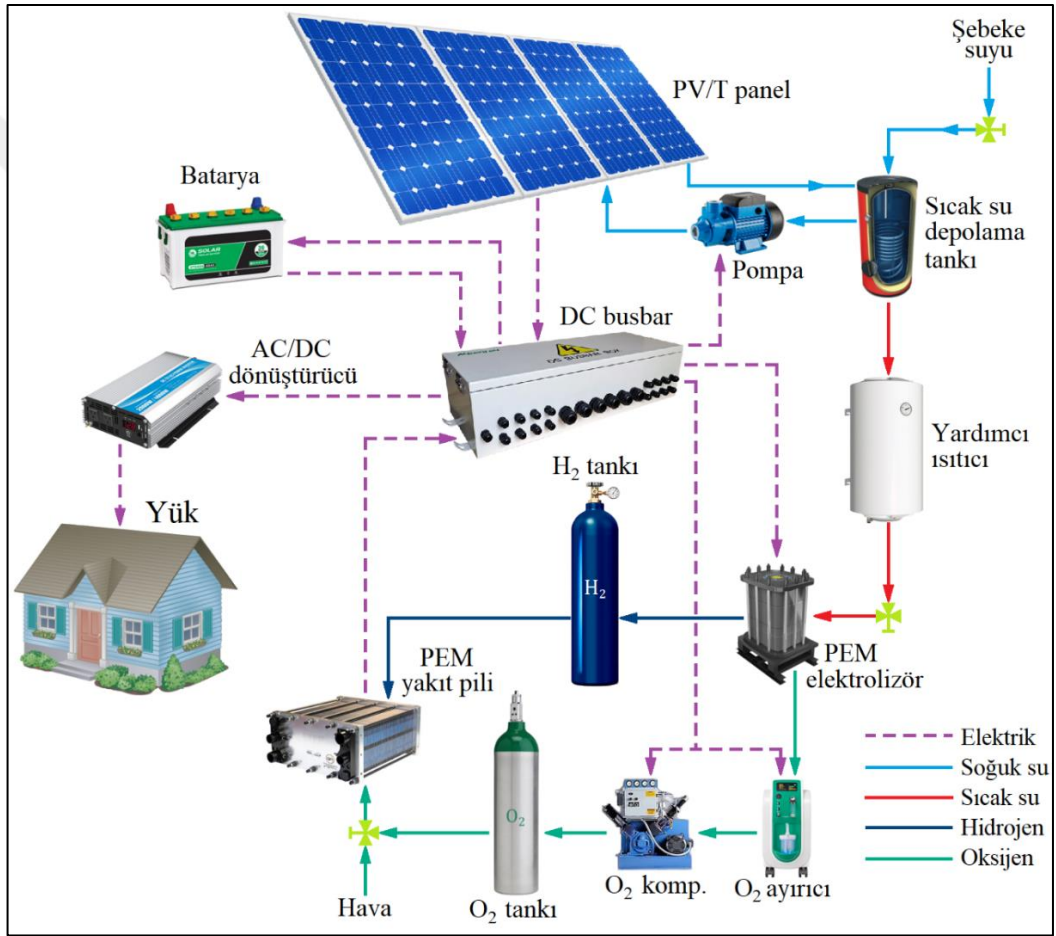


Şekil 3.10. Seçilen günler için sıcak su kullanım profili

3.2. Hibrit Sistemin Tasarlanması

Güneş ve hidrojen enerjisi dayalı elektrik/sıcak su üretmek amacıyla tasarlanan hibrit sistemin şematik gösterimi Şekil 3.11’de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi sistem temel olarak PV/T panel, batarya, PEM-El, hidrojen depolama tankı, PEM-FC, sıcak su depolama tankı, yardımcı ısıtıcı ve DC busbardan oluşmaktadır. Tasarlanan hibrit sistemde, PV/T modüllerinde elektrik enerjisi üretilir. PV/T modüllerinde yeteri kadar elektrik enerjisi üretilmediği durumlarda enerji yedeği batarya, PEM-El ve PEM-FC kombinasyonu ile sağlanır. Öncelikle güneş ışınımı PV/T paneller tarafından toplanır. PV/T paneller ve PEM yakıt pilleri tarafından üretilen elektrik doğru akımdır ve kullanıcıya verilmeden önce alternatif akıma dönüştürülmesi gerekir. Evin yük talebi PV/T paneller tarafından karşılandıktan sonra fazla enerjinin bir kısmı bataryayı şarj etmek için kullanırken, bir kısmı ise hidrojen üretmek amacıyla PEM elektrolizöre verilir. Batarya, gün boyunca geçici elektrik yükünün üstesinden gelmek için tampon görevindedir. PEM-El tarafından üretilen hidrojen, hidrojen depolama tanklarında depolanır. Hidrojen depolama, hava koşullarının PV/T’den güç elde edilmesine uygun

olmadığı durumlarda, gece boyunca veya talebin PV/T panellerden üretilen elektriği aştığı durumlarda önemli rol oynamaktadır. Depolanan hidrojen, depolama tankına ısı verilerek boşaltılır ve PV/T’den yeterli güç gelmediğinde elektrik yükünü karşılamak amacıyla PEM yakıt pilini çalıştırmak için kullanılır. PEM yakıt pilleri, çalışma sırasında yan ürün olarak ısı yayar ve bunun bir kısmı hidrojen depolama tankının desorpsiyon işlemi sırasında hidrojeni boşaltmak için kullanılır. Bu nedenle, 60-70°C’deki net ısı yükü, termal yükü karşılamak için gün içinde çoğu zaman hidrojen depolama tankından ve yakıt pillerinden elde edilebilir (Murthy vd., 2020).



Şekil 3.11. Hibrit sistem şematik gösterimi

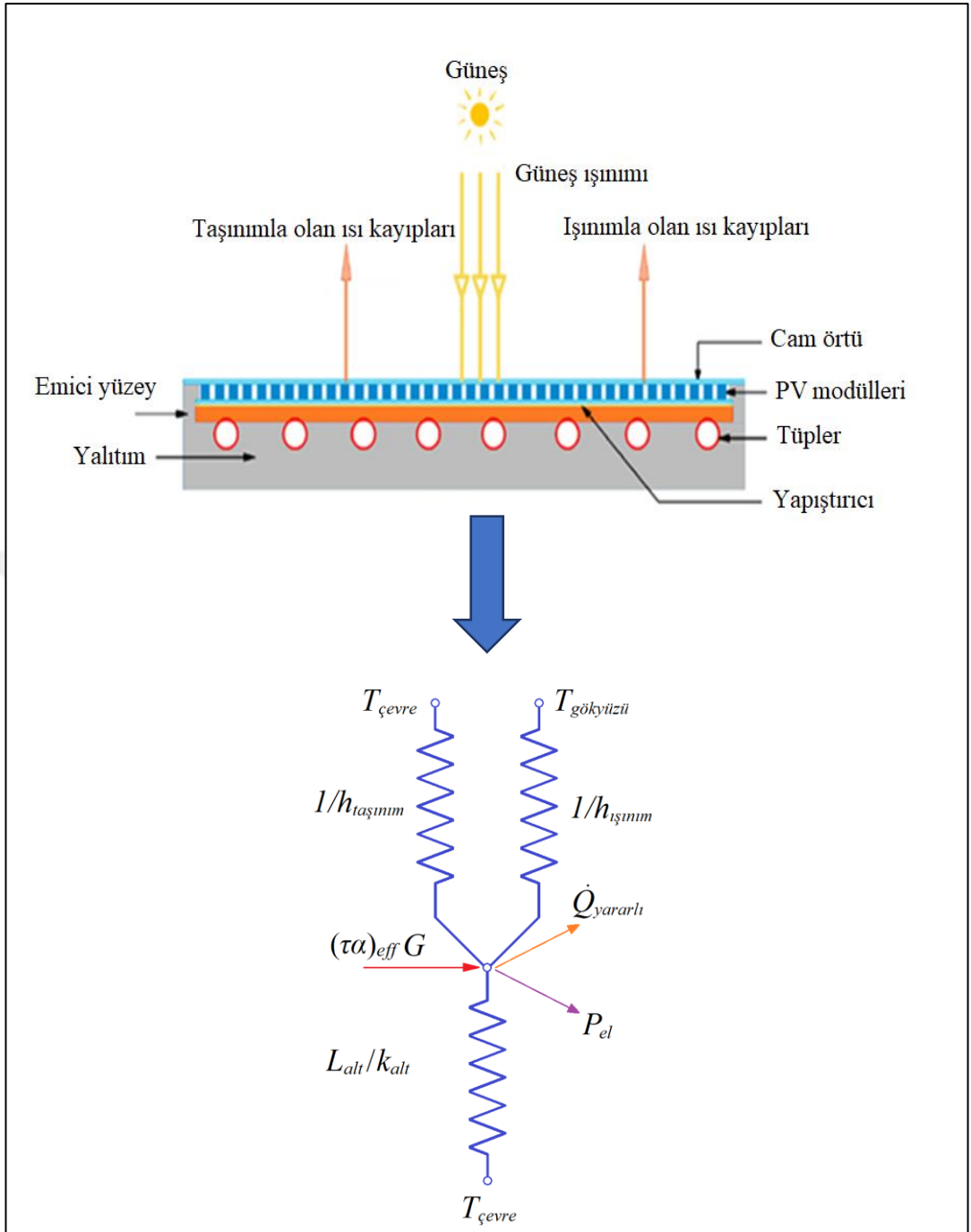
3.3. Hibrit Sistem Bileşenlerinin Matematiksel Modellemesi

Şebekeden bağımsız evin elektrik ve sıcak su ihtiyacını karşılamak amacıyla güneş-hidrojen enerjisine dayalı olarak tasarlanan hibrit sistem temel olarak PV/T panel, sıcak su depolama tankı, batarya, PEM-El, hidrojen depolama tankı ve PEM-FC’den oluşmaktadır. Sistemi oluşturan temel bileşenler için MATLAB ortamında 0-D

matematiksel modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan matematiksel modeller literatürde bulunan mevcut çalışmalar ile doğrulanmıştır.

3.3.1. PV/T modellemesi

Daha önce de belirtildiği gibi PV/T sistemlerde, güneş radyasyonunun bir kısmını elektrik enerjisine dönüştürken, büyük bir kısmı malzemede ısı yük oluşturmaktadır. Oluşan bu ısı yük, hem panellerin verimini düşürmekte, hem de malzemenin yapısına zarar verebilmektedir. Panellerde elektrik enerjisine dönüştürülemeyen güneş radyasyonunun oluşturduğu bu ısı yükü azaltmak amacıyla PV/T sistemler tasarlanmıştır. Bu sistemler eş zamanlı olarak hem sıcak hava veya kullanım suyu hem de elektrik enerjisi sağlayabilen hibrit sistemlerdir. En çok kullanılan PV/T tipi sıcak suyun sağlandığı sistemlerdir. Bu sistemler üst yüzeylerindeki modüller ile elektrik enerjisi üretir. Elektrik enerjisi üretimi sırasında oluşan ısı yük panellerin içerisinde bulunan soğutucu akışkan sayesinde panelden uzaklaştırılır. Böylece hücrelerde oluşan sıcaklık azaltılarak elektrik enerjisi verimi artırılır (Benli, 2018). Tipik bir PV/T panelin şematik diyagramı ve termal direnç ağı Şekil 3.12’de gösterilmektedir. PV/T panel; cam kapak, PV paneli, soğurucu yüzey, borular ve yalıtım katmanından oluşmaktadır (Jia vd., 2020).



Şekil 3.12. PV/T panel şematik gösterimi ve termal direnç ağı (Sakellariou vd., 2018)

Çizelge 3.4'te PV/T panelin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.4. PV/T panelin özellikleri (Sakellariou vd., 2018)

Temel Özellikler	Sembol	Değer
PV/T uzunluğu	L (m)	1.649 (Anonim, 2021b)
PV/T genişliği	W (m)	0.992 (Anonim, 2021b)
PV/T alanı	$A_{PV/T}$ (m ²)	1.635
PV/T hücre alanı	$A_{hücre}$ (m ²)	1.417
PV/T iletkenliği	$k_{PV/T}$ (W/mK)	187.1
PV kalınlığı	$\delta_{PV/T}$ (m)	0.0065
Soğurganlık katsayısı	α	0.85
Yayıcılık katsayısı	ε	0.88
Geçirgenlik katsayısı	τ	0.9
Paketleme faktörü	PF	0.9
Elektriksel Özellikler		
Hücre tipi		p-Si
Referans elektriksel verim	η_{ref} (%)	14.3
Sıcaklık güç katsayısı	β (1/K)	0.0046
Termal Özellikler		
Akışkan debisi	$\dot{m}_{HTF}$ (kg/s)	0.0001
Tüp sayısı	$n_{tüp}$	10
Tüpün dış çapı	D_0 (m)	0.008
Tüpün iç çapı	D_i (m)	0.006
Tüpler arasındaki mesafe	w (m)	0.099
Yalıtım kalınlığı	δ_{alt} (m)	0.03
Yalıtım iletkenliği	k_{alt} (W/mK)	0.04
Yapıştırıcı iletkenliği	k_{yap} (W/mK)	250
Yapıştırıcı genişliği	b_{yap} (m)	0.01
Yapıştırıcı kalınlığı	δ_{yap} (m)	0.05
Yapıştırıcı ısı transfer katsayısı	h_{ca} (W/m ² K)	30.321

PV/T matematiksel modellemesi yapılırken aşağıdaki kabuller dikkate alınmıştır (Duffie ve Beckman, 2013):

- 1) Isı transferinin bir boyutlu olduğu varsayılmaktadır.
- 2) PV/T paneller birbirine paralel bağlıdır.
- 3) Cam örtü ile PV hücreleri arasındaki hava boşlukları ihmal edilmiştir.
- 4) PV/T matematiksel modelin analizi yapılırken PV/T tek bir katman olarak kabul edilmiş, katmanlar arasındaki ısı transferi ihmal edilmiştir.
- 5) Doğal taşınım ile olan ısı transferi ihmal edilirken, rüzgâr ile olan ısı kayıplarının panelin sadece üst yüzeyinden olduğu kabul edilmiştir.
- 6) PV/T panelin kenar yüzeylerinden olan ısı kayıpları ihmal edilmiştir.

- 7) PV/T bileşenlerinin ısı kapasiteleri ve kütleleri ihmal edilmiş, sadece ısı transfer akışkanının termal kapasiteleri hesaba katılmıştır.

PV/T panelin farklı bileşenlerinde biriken ısıyı uzaklaştırmak amacıyla ısı transfer akışkanı olarak etilen glikol-su kullanılmıştır. Etilen glikol-su karışımı (kütlece %50) için (-40°C) - (110°C) sıcaklık aralığındaki termofiziksel özellikler Engineering Equation Solver (EES) (EES, 2022) veri tabanı kullanılarak eğri uydurma yöntemi ile elde edilmiştir (Denklem (3.1)). Eğri uydurmalarında doğrusal regresyon hatasının büyüklüğünün belirlenmesinde ' R^2 ' korelasyon katsayısı değerlendirilir. R^2 değerinin 1'e yakın çıkması uydurulan eğrinin veriyi en iyi şekilde ifade ettiği anlamına gelmektedir.

$$y = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4 + fT^5 + gT^6 \quad (3.1)$$

Burada a, b, c, d, e, f, g denklemin katsayıları, y , termofiziksel özellikler (c_p, k, ρ, μ, Pr) T (°C) ise sıcaklığı ifade etmektedir. Çizelge 3.5'te etilen glikol-su karışımının (kütlece %50) termofiziksel özelliklerine ait denklem katsayıları verilmiştir.

Çizelge 3.5.Termofiziksel özellik denkleminin katsayıları

Termo-fiziksel özellikler	a	b	c	d	e	f	g
c_p (J/kgK)	3202.88	5.64	-0.008	-0.0003	0	0	0
k (W/mK)	0.37	0.0006	3.17×10^{-7}	-4.10×10^{-9}	0	0	0
ρ (kg/m ³)	1074.62	-0.43	-0.002	0.000006	0	0	0
μ (kg/ms)	0	-0.0002	0.000009	-3.5×10^{-7}	7.3×10^{-9}	-6.93×10^{-11}	2.39×10^{-13}
Pr	67.19	-2.48	0.081	-0.0029	0.00006	-5.77×10^{-7}	1.98×10^{-9}

Şekil 3.12'de şematik gösterimi ve termal direnç ağı verilen PV/T panelden elde edilen yararlı ısı Denklem (3.2) ile hesaplanmaktadır (Sakellariou vd., 2018):

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{yararlı}} = F_R [I_{\text{güneş}}(\alpha\tau)(A_{\text{PV/T}} - A_{\text{hücre}}\eta_{\text{el}})] \\ - [A_{\text{PV/T}}U_L(T_{\text{HTF,giriş}} - T_{\text{çevre}})] \end{aligned} \quad (3.2)$$

Burada $\dot{Q}_{yararlı}$ (W) panelden sağlanan yararlı ısıyı, $I_{güneş}$ (W/m²) güneş radyasyonunu, $(\alpha\tau)$ soğurganlık-geçirgenlik katsayısını, $A_{PV/T}$ (m²) panelin yüzey alanını, $A_{hücre}$ (m²) PV/T hücre alanını, $T_{HTF,giriş}$ (K) akışkan giriş sıcaklığını ifade etmektedir. PV/T panel ısı kazanç faktörü (F_R) Denklem (3.3) ile aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır (Kalogirou, 2013):

$$F_R = \frac{\dot{m}_{HTF} c_{p_{HTF}}}{A_{PV/T} U_L} \left[1 - \exp \left(\frac{-A_{PV/T} U_L F'}{\dot{m}_{HTF} c_{p_{HTF}}} \right) \right] \quad (3.3)$$

Burada, $\dot{m}_{HTF}$ (kg/s) ısı transfer akışkanın kütleli debisini, $c_{p_{HTF}}$ (J/kgK) özgül ısı kapasitesini, F' ise panel verim faktörünü ifade etmektedir. PV/T panelin verim faktörü Denklem (3.4) ile aşağıdaki şekilde hesaplanabilir (Kalogirou, 2013):

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{w \left[\frac{1}{U_L(D_o + (W - D_o)F)} + \frac{1}{h_{ca}} + \frac{1}{\pi D_i h_f} \right]} \quad (3.4)$$

Burada, w (m) akışkanın geçtiği boruların arasındaki boşluğu, D_o (m) tüpün dış çapını, h_{ca} (W/m²K) yapıştırıcı ısı transfer katsayısını, D_i (m) tüpün iç çapını, h_f (W/m²K) ise akışkanın ısı transfer katsayısını ifade etmektedir. F , panellerin kanat faktörü olup Denklem (3.5) ile hesaplanmaktadır (Kalogirou, 2013):

$$F = \frac{\tanh \left[\frac{m(w - D_o)}{2} \right]}{\frac{m(w - D_o)}{2}} \quad (3.5)$$

Buradaki m değeri Denklem (3.6) ile belirlenir (Kalogirou, 2013):

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k_{PV/T} \delta_{PV}}} \quad (3.6)$$

PV/T panellerden olan toplam ısı kayıp katsayısı U_L (W/m²K) Denklem (3.7) ile hesaplanmaktadır. Burada yan yüzeylerden olan ısı kayıpları ihmal edilirken, üst ve alt

yüzeylerden olan ısı kayıplarının toplamı ile panelden olan toplam ısı kaybı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Kalogirou, 2013):

$$U_L = U_t + U_b \quad (3.7)$$

Burada U_t (W/m²K) panelin üst yüzeyinden olan ısı kayıp katsayısını, U_b (W/m²K) panelin alt yüzeyinden olan kayıp katsayısını ifade etmektedir. U_t (W/m²K) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Sakellariou vd., 2018):

$$U_t = h_{\text{taşınım}} + h_{\text{ışınım}} \quad (3.8)$$

Burada $h_{\text{taşınım}}$ (W/m²K) zorlanmış taşınım ile olan ısı transfer katsayısını, $h_{\text{ışınım}}$ (W/m²K) ise ışınım ile olan ısı transfer katsayısını ifade etmekte olup aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Kalogirou, 2013):

$$h_{\text{taşınım}} = 2.2V_{\text{rüzgar}} + 8.3 \quad (3.9)$$

$$h_{\text{ışınım}} = \varepsilon\sigma(T_{\text{PV/T}}^2 + T_{\text{gökyüzü}}^2)(T_{\text{PV/T}} + T_{\text{gökyüzü}}) \quad (3.10)$$

$$T_{\text{gökyüzü}} = 0.0552T_{\text{çevre}}^{1.5} \quad (3.11)$$

Yukarıdaki denklemlerde, $V_{\text{rüzgar}}$ (m/s) ortalama rüzgâr hızını, $T_{\text{PV/T}}$ (K) PV/T yüzey sıcaklığını, $T_{\text{gökyüzü}}$ (K) gökyüzü sıcaklığını, $T_{\text{çevre}}$ (K) ise ortam sıcaklığını ifade etmektedir. Panelin alt yüzeyinden olan ısı kayıp katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Kalogirou, 2013):

$$U_b = \frac{k_{\text{alt}}}{\delta_{\text{alt}}} \quad (3.12)$$

Burada k_{alt} (W/mK) alt yüzeyin ısıl iletkenliğini, δ_{alt} (m) alt yüzeyin kalınlığını ifade etmektedir. Denklem (3.4)'ün hesabında kullanılan h_f (W/m²K) boru içindeki akışkanının taşınım ile olan ısı transfer katsayısı olup aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Çengel, 2011):

$$h_f = \frac{Nuk}{D_i} \quad (3.13)$$

Burada, k (W/mK) ise akışkanın ısı iletkenliğini ifade etmektedir. Akışkanın ısı taşınım katsayısını hesaplayabilmek için öncelikle Reynolds (Re) sayısının hesaplanıp akış türüne karar verilmesi gerekmektedir. Re sayısı Denklem (3.14) ile aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır (Çengel, 2011):

$$Re = \frac{\rho V D_i}{\mu} \quad (3.14)$$

Yukarıdaki denklemde ρ (kg/m³) akışkanın yoğunluğunu V (m/s) akışkanın hızını, μ (kg/ms) ise dinamik viskoziteyi ifade etmektedir. Eğer $Re < 2500$ ise laminar akış, $Re \geq 2500$ ise boru içinde türbülanslı akış oluşmaktadır (Çengel, 2011). İçerisinde viskoz kayma kuvvetlerinin etkilerinin olduğu akış bölgesi sınır tabaka olarak adlandırılır. Borunun girişinden itibaren, sınır tabakanın boru eksen çizgisiyle birleştiği noktaya kadar olan bölgeye hidrokinamik giriş bölgesi ve bu bölgenin uzunluğuna hidrokinamik giriş uzunluğu denilmektedir. Hız profilinin geliştiği bölge olduğu için giriş bölgesindeki akış, hidrokinamik gelişen akış olarak adlandırılır. Giriş bölgesinin ilerisinde hız profilinin tam olarak geliştiği ve değişmeden kaldığı bölge, hidrokinamik tam gelişmiş olarak adlandırılır. Hız profili, laminar akıştaki tam gelişmiş akış bölgesinde parabolik, türbülanslı akışta ise bir miktar daha basıktır. Hidrokinamik giriş uzunluğu L (m), boru girişinden itibaren, kayma gerilmesinin (ve dolayısıyla sürtünme faktörünün) tam gelişmiş değere %2 kadar yaklaştığı uzunluk olarak ifade edilmektedir. Laminar ve türbülanslı akışta hidrokinamik giriş uzunlukları Denklem (3.15) ve Denklem (3.16) ile hesaplanmaktadır (Çengel, 2011):

$$L_{laminar} = 0.05 Re D_i \quad (3.15)$$

$$L_{türbülanslı} = 10 D_i \quad (3.16)$$

Tasarlanan modelde laminar akış olması durumunda ortalama Nusselt sayısı Denklem (3.17) veya Denklem (3.18) ile hesaplanır (Yazdanifard vd., 2016):

$$Nu = 1.953(x^*)^{-1/3} \quad x^* \leq 0.03 \quad (3.17)$$

$$Nu = 4.364 + \frac{0.0722}{(x^*)^{-1/3}} \quad x^* > 0.03 \quad (3.18)$$

Nu sayısının hesabında kullanılan x^* , Denklem (3.19) ile aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Yazdanifard vd., 2016):

$$x^* = \frac{L_{laminer}}{RePrD_i} \quad (3.19)$$

Burada Pr Prandtl sayısını ifade etmektedir.

Türbülanslı akış olması durumunda ortalama Nu sayısı Denklem (3.20) ile aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Çengel, 2011):

$$Nu = \frac{\frac{f}{8}(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} (Pr^{-1/3} - 1)} \quad (3.20)$$

Burada f sürtünme faktörüdür ve Denklem (3.21) ile hesaplanmaktadır (Sakellariou vd., 2018):

$$f = \frac{1}{[0.79 \ln(Re) - 1.64]^2} \quad (3.21)$$

PV/T'den elde edilen elektriksel güç aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Sakellariou vd., 2018):

$$P_{PV/T} = \eta_{elektriksel} I_{güneş} A_{hücre} (\alpha\tau) \quad (3.22)$$

Burada $\eta_{elektriksel}$ panellerin elektriksel verimini ifade etmektedir.

$$\eta_{elektriksel} = \eta_{ref} [1 - \beta(T_{PV/T} - T_{ref})] \quad (3.23)$$

Yukarıdaki denklemde η_{ref} referans noktasındaki elektriksel verimi, β (1/K) sıcaklık güç katsayısını, T_{ref} (K) ise PV/T panelin standart test koşullarındaki referans sıcaklığını ifade etmektedir.

PV/T yüzey sıcaklığı $T_{PV/T}$ (K), Denklem (3.24) ile hesaplanmaktadır (Sakellariou vd., 2018):

$$T_{PV/T} = T_{HTF,giriş} + \left(\frac{\dot{Q}_{yararlı}}{A_{PV/T} F_R U_L} \right) (1 - F_R) \quad (3.24)$$

Akışkanın PV/T panellerden çıkış sıcaklığı $T_{HTF,çıkış}$ (K), Denklem (3.25) ile hesaplanmaktadır:

$$T_{HTF,çıkış} = \dot{Q}_{yararlı} + \frac{\dot{m}_{HTF} c_{pHTF} (T_{HTF,giriş} - T_{HTF,çıkış}) \Delta t}{\dot{m}_{HTF} c_{pHTF}} + T_{HTF,çıkış} \quad (3.25)$$

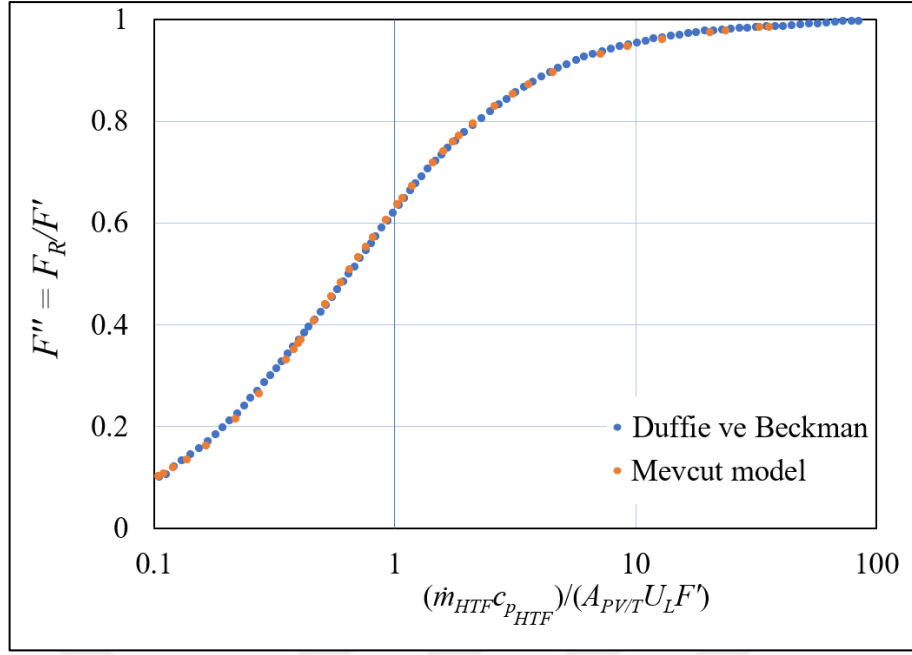
Burada, m_{HTF} (kg) ısı transfer akışkanının toplam kütesini ifade etmektedir. PV/T'nin termal verimi Denklem (3.26) ile hesaplanmaktadır (Yazdanifard vd., 2016):

$$\eta_{termal} = \frac{\dot{m}_{HTF} c_{pHTF} (T_{HTF,çıkış} - T_{HTF,giriş})}{I_{güneş} (\alpha \tau) A_{PV/T}} \quad (3.26)$$

PV/T panellerin toplam verimi Denklem (3.27) ile hesaplanmaktadır:

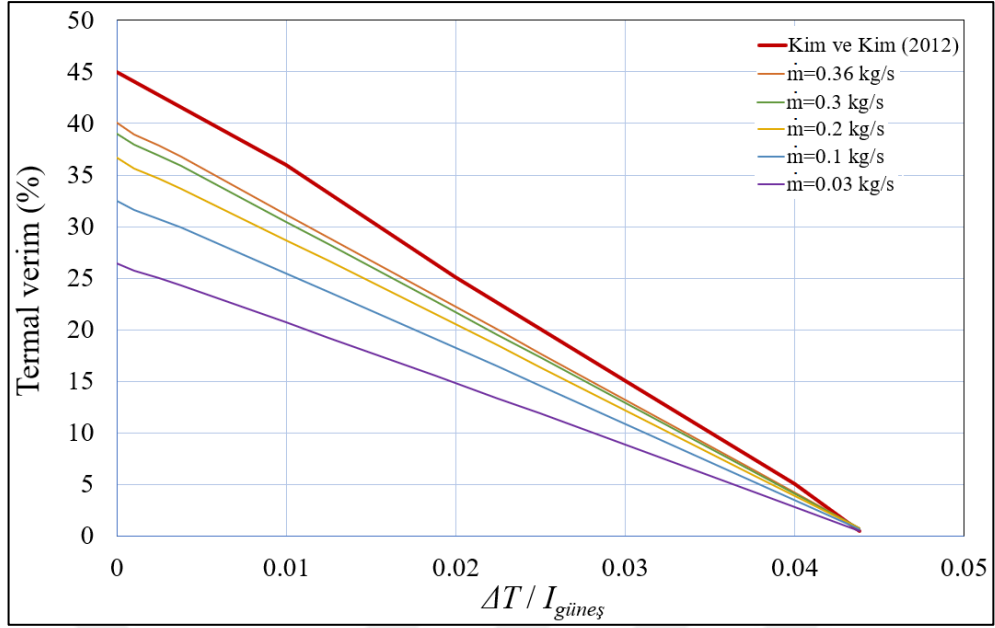
$$\eta_{PV/T} = \eta_{elektriksel} + \eta_{termal} \quad (3.27)$$

PV/T panelin 0-D matematiksel modeli doğrulamak amacıyla Duffie ve Beckman (2013), referans çalışmasındaki panel akış faktörü (F'') ile $(\dot{m} c_{pHTF}) / (A U_L F')$ boyutsuz sayısının değişimi grafiğinden yararlanılmıştır. Şekil 3.13'te görüldüğü gibi matematiksel modellemekten elde edilen sonuçlar ile referans çalışma birbiri ile uyumludur.



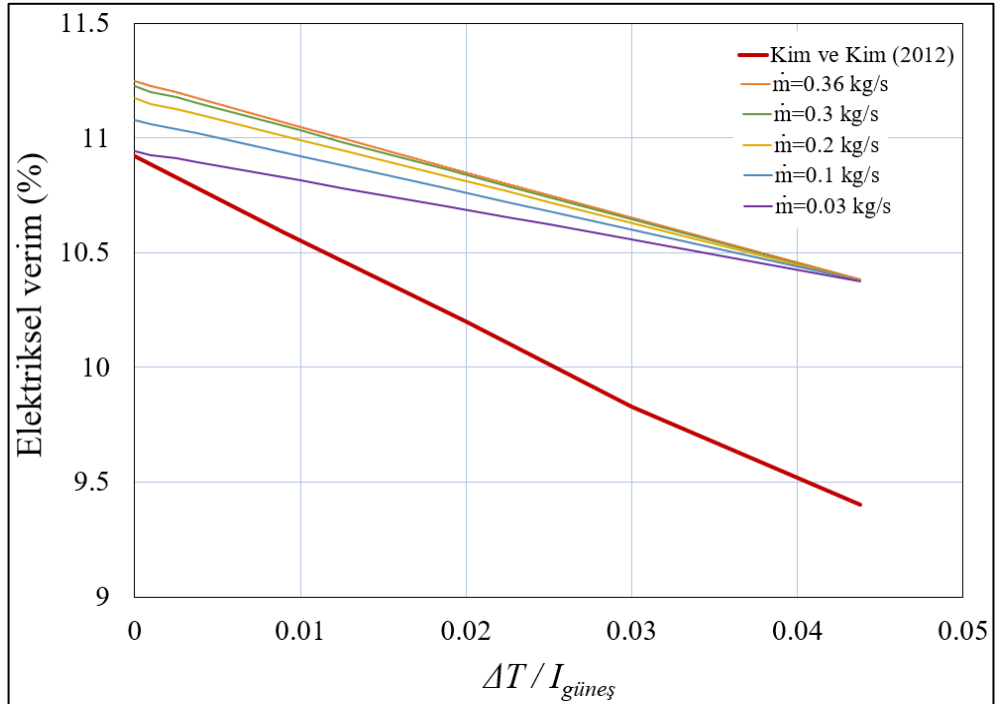
Şekil 3.13. $\frac{\dot{m}_{HTF} c_{p_{HTF}}}{A_{PV/T} U_L F'}$ değerinin bir fonksiyonu olarak panel akış faktörünün F'' değişimi

PV/T panellerin performansını değerlendirmek için bir gösterge olan $(\Delta T)/I_{güneş}$ oranına bağlı olarak PV/T'nin termal verimi farklı kütleli debiler için hesaplanmıştır. Şekil 3.14'te görüldüğü gibi $(\Delta T)/I_{güneş}$ oranı arttıkça farklı kütleli debiler için çalışma akışkanı ile ortam havası arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan ısı kayıplarının artmasından dolayı termal verimde düşme eğilimi olmuştur. Mevcut çalışmada 800 W/m^2 ışınlam şartlarında kütle akış hızının 0.03 kg/s 'den 0.36 kg/s 'ye yükseltilmesi ile termal verim %26'dan %40 değerine ulaşmaktadır. Ayrıca tasarlanan model Kim ve Kim (2012), referans çalışması dikkate alınarak doğrulanmıştır.



Şekil 3.14. $\Delta T/I_{güneş}$ oranına ve kütleli debiye bağlı PV/T termal verim değişimleri eğrisi

PV/T elektriksel veriminin $\Delta T/I_{güneş}$ oranına ve farklı kütleli debilere bağlı değişimi Şekil 3.15'te görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi Kim ve Kim (2012) referans çalışması ile doğrulama yapılmış, farklı kütleli debiler için $\Delta T/I_{güneş}$ oranı ile elektriksel verimin azalma eğiliminde olduğu gözlenmiştir.

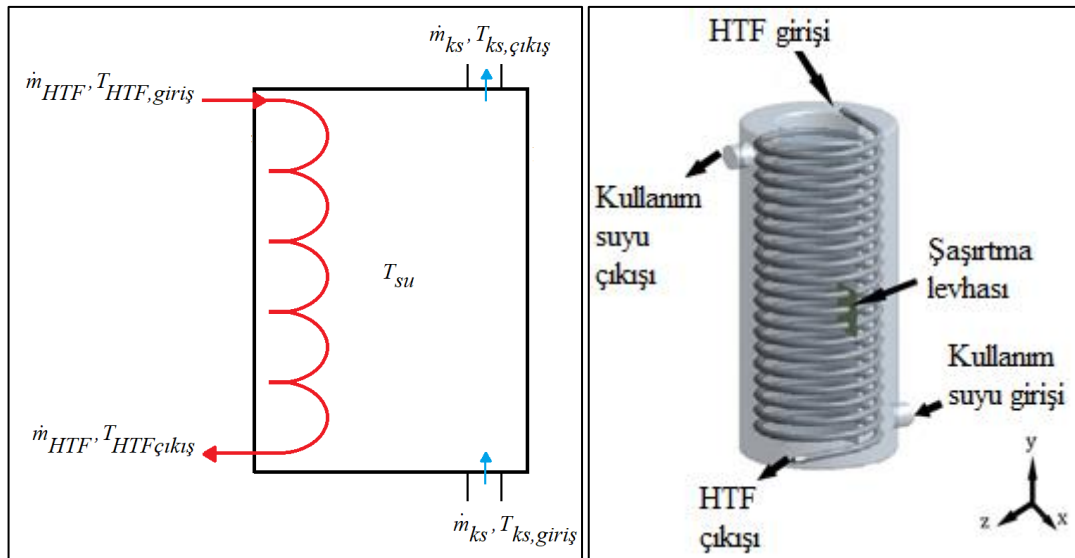


Şekil 3.15. $\Delta T/I_{güneş}$ oranına ve kütleli debiye bağlı PV/T elektriksel verim değişimleri eğrisi

3.3.2. Sıcak su depolama tankı modellemesi

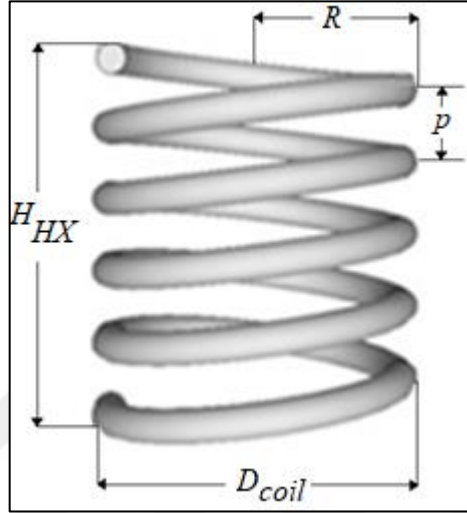
Sıcak su depolama tanklarının matematiksel modellemesi, 1970’lerden itibaren literatürde kapsamlı bir şekilde incelenmektedir. Dincer ve Rosen (2002) ve Duffie ve Beckman (2013), sıcak su depolama tanklarında ısı transferi, akış yönleri, performans değerlendirme ölçüleri ve sıcak su depolama tanklarının modelleme detayları ile ilgili kapsamlı çalışmalar yapmıştır. Sıcak su depolama tanklarının matematiksel modelleri oluşturulurken temel olarak, literatürde iki farklı yaklaşım bulunmaktadır: (i) tamamen karışmış tank ve (ii) tabakalı tank. Tamamen karışmış tank, depolama tankı içinde tek bir sıcaklık olduğunu varsayar ve sıcaklık yalnızca zaman içinde değişmektedir. Tabakalı tank modellerinde ise; tankın her bir katmanında farklı sıcaklıklar olup, ısı tabakalaşmalar mevcuttur. Bu tez çalışmasında; sıcak su depolama tankının tamamen karışmış olduğu yani ısı tabakalaşmaların oluşmadığı varsayılmıştır.

İçerisinde helisel borulu ısı değiştiricisi olan sıcak su depolama tankının şematik gösterimi Şekil 3.16’da verilmiştir. Şekilde görülen tank konfigürasyonu için 0-D modelleme yaklaşımı kabul edilerek analizler yapılmıştır. Sıfır boyutlu yaklaşımda depolama tankı tek bir sıcaklığa sahip tam karışmış bölge olarak kabul edilmektedir. Isı değiştiricisi dik konumda bulunmakta, sıcak akışkan tankın üst tarafından girip ısınımsını tank içerisinde bulunan soğuk akışkana aktarmaktadır.



Şekil 3.16. Sıcak su depolama tankı şematik gösterimi (Raccanello vd., 2019)

Helisel borulu ısı değıştircisinin detaylı gösterimi Şekil 3.17’de görölmektedir. Burada D_{coil} (m) coil çapını, R (m) ise dönüş yarıçapını belirtmektedir. Ayrıca p (m) ısı değıştirci hatvesini, H_{HX} (m) ısı değıştircisinin toplam yüksekliğini ifade etmektedir. Çizelge 3.6’da tankın ve helisel borulu ısı değıştircisinin geometrik özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.17. Helisel borulu ısı değıştircisinin fiziksel boyutları (Heo ve Chung, 2012)

Çizelge 3.6. Depolama tankının ve ısı değıştircisinin geometrik özellikleri (Raccanello vd., 2019)

Tankın geometrik özellikleri	Değerler
Yükseklik, H_{tank} (m)	2
Dış çap, $D_{tank,o}$ (m)	0.32
İç çap, $D_{tank,i}$ (m)	0.29
Taban alanı, A_{taban} (m ²)	0.06
Toplam alan, $A_{toplaml,tank}$ (m ²)	1.62
Hacim, Vol_{tank} (m ³)	0.132
Isı iletim katsayısı, k_{tank} (W/mK)	0.05
Isı değıştircisinin geometrik özellikleri	Değerler
Coil çapı, D_{coil} (m)	0.126
Isı değıştircisinin dış çapı, D_{HXo} (m)	0.016
Isı değıştircisinin iç çapı, D_{HXi} (m)	0.014
Isı değıştircisinin hatvesi, p (m)	0.031
Isı iletim katsayısı, k_{HX} (W/mK)	30
Coil sayısı, N_{coil}	10

Tank içindeki su hacmi için genel enerji dengesi (Raccanello vd., 2019):

$$(mc_p)_{su} \frac{dT}{dt} = (UA)_{HX}(T_{HTF,çıkış} - T_{su}) + (\dot{m}c_p)_{ks}(T_{ks,giriş} - T_{su}) - (UA)_{kayıp}(T_{su} - T_{çevre}) \quad (3.28)$$

Burada, m_{su} (kg) tank içindeki suyun kütlesini, $c_{p_{ks}}$ (J/kgK) kullanım suyunun özgül ısısı, $(UA)_{HX}$ (W/K) ısı değiştiricisinin toplam ısı transfer katsayısını, $T_{HTF,çıkış}$ (K) ısı değiştirici içerisindeki akışkanın çıkış sıcaklığını, T_{su} (K) tank içindeki su sıcaklığını, $\dot{m}_{ks}$ (kg/s) kullanım suyunun debisini ifade etmektedir. Ayrıca $T_{ks,giriş}$ (K) şebekeden gelen kullanım suyunun sıcaklığını, $(UA)_{kayıp}$ (W/K) tank içindeki su ile dış ortam arasındaki toplam ısı transfer kayıp katsayısını, $T_{çevre}$ (K) ise ortam sıcaklığını ifade etmektedir. Isı değiştiricisi içerisindeki akışkan için genel enerji dengesi aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Raccanello vd., 2019):

$$(mc_p)_{HTF} \frac{dT}{dt} = -(UA)_{HX}(T_{HTF,çıkış} - T_{su}) + (\dot{m}c_p)_{HTF}(T_{HTF,giriş} - T_{HTF,çıkış}) \quad (3.29)$$

Burada, m_{HTF} (kg) ısı transfer akışkanının kütlesini, $\dot{m}_{HTF}$ (kg/s) ısı transfer akışkanın debisini, $T_{HTF,giriş}$ (K) akışkanın ısı değiştiricisine giriş sıcaklığını ifade etmektedir.

Dikey silindirik bir geometriye sahip tank için toplam ısı kayıp katsayısı $(UA)_{kayıp}$ (W/K) aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Raccanello vd., 2019):

$$(UA)_{kayıp} = \left(\frac{1}{\pi D_{tank,i} h_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_{tank,o}}{D_{tank,i}}\right)}{2\pi k H_{tank}} + \frac{1}{\pi D_{tank,o} h_e} \right)^{-1} \quad (3.30)$$

Yukarıdaki denklemde, H_{tank} (m) tankın yüksekliğini, $D_{tank,o}$ (m) tankın dış çapını, $D_{tank,i}$ (m) tankın iç çapını, h_i (W/m²K) depolama ortamı ile tank duvarları arasındaki ısı taşınım katsayısını, h_e (W/m²K) ise tank ile ortam arasındaki ısı taşınım katsayısını ifade etmektedir. Depolama ortamı ve tank duvarları arasındaki ısı transferi, literatürde farklı bağıntılarla tanımlanmaktadır (Raccanello vd., 2019). Doğal taşınım ile ısı transferi olduğu varsayıldığında, ısı transfer katsayısı (h_i) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Raccanello vd., 2019):

$$Nu = \frac{h_i H_{HX}}{k_{su}} = \frac{0.68 Pr^{1/2} Gr^{1/4}}{0.952 + Pr^{1/2}} \quad 10 < GrPr < 10^8 \quad (3.31a)$$

$$Nu = \frac{h_i H_{HX}}{k_{su}} = 0.13 GrPr^{1/3} \quad GrPr > 10^9 \quad (3.31b)$$

Burada, k_{su} (W/mK) suyun ısı iletim katsayısını, Gr , Grashof sayısını ifade etmektedir.

Hibrit sistemlerde helisel borulu ısı değiştiricisi ile tank içindeki depolama ortamı arasındaki toplam ısı transfer katsayısı, U_{HX} (W/m²K), $h_{HX,iç}$ ve $h_{HX,dış}$ ısı taşınım katsayılarına bağlıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\frac{1}{U_{HX}} = \frac{1}{h_{HX,iç}} + \frac{1}{h_{HX,dış}} \quad (3.32)$$

Yukarıdaki denklemde $h_{HX,iç}$ (W/m²K) ısı değiştiricisi ile depolama ortamı arasındaki ısı taşınım katsayısını, $h_{HX,dış}$ (W/m²K) ise depolama ortamı ve tank duvarları arasındaki ısı taşınım katsayısını ifade etmekte olup aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Raccanello vd., 2019):

$$h_{HX,iç} = h_{coil} \left(\frac{D_{HX,i}}{D_{HX,o}} \right) \quad (3.33)$$

$$h_{coil} = h_{db} \left[1 + 3.5 \left(\frac{D_{HX,i}}{2r_{coil}} \right) \right] \quad (3.34)$$

$$h_{db} = j_h \left(\frac{k_{HX}}{D_{HX,i}} \right) Pr^{1/3} \quad (3.35)$$

Düz borunun ısı taşınım katsayısı h_{db} (W/m²K), Colburn faktörünü (j_h) Reynolds sayısına bağlayan Colburn grafik faktörü (Patil vd., 1982) kullanılarak hesaplanır. Ayrıca, matematiksel modellemede kullanılan helisel borulu ısı değiştiricisinin temel geometrik özellikleri Çizelge 3.7’de verilen formüller ile hesaplanmaktadır.

Çizelge 3.7. Isı değıştiricisinin temel geometrik özellikleri (Raccanello vd., 2019)

Geometrik özellik	Formül
Bobin uzunluğu (m)	$H_{HX} = N_{coil} \sqrt{(2\pi r_{coil})^2 + p^2}$
Bobin kalınlığı (m)	$\delta_{HX} = \frac{D_{HXo} - D_{HXi}}{2}$
Bobin alanı (m ²)	$A_{HX} = \pi D_{HXo} H_{HX}$
Bobin hacmi (m ³)	$Vol_{HX} = \frac{\pi D_{HXo}^2}{4} H_{HX}$

Helisel borulu ısı değıştiricilerinde toplam ısı transfer katsayısı U_{HX} , hem iç ortamdaki ısı taşınım katsayısına hem de dış ortamdaki ısı taşınım katsayısına bağıdır. $h_{HX,iç}$ ısı değıştiricisinin de özellikleri dikkate alınarak Denklem (3.33) ile hesaplanmaktadır. $h_{HX,dış}$ ise ya depolama ortamı ile ısı değıştirici arasında zorlanmış taşınım ile ısı transferi olduğu kabulünden ya da depolama ortamı ile ısı değıştirici arasında doğal taşınım ile ısı transferi olduğu kabulünden hesaplanmaktadır. Yapılan analizlerde ısı değıştirici ile depolama ortamı arasında doğal taşınım ile ısı transferi olduğu kabulü yapılmaktadır. Bu bağlamda literatürdeki çalışmalar incelendiğinde helisel borulu ısı değıştiricilerinde $h_{HX,iç}$, $h_{HX,dış}$ ve U_{HX} , değerlerinin zamana bağı değışimleri için deneysel ölçümler yapılmış ve ortalama değerler elde edilmiştir. Çizelge 3.8’de görüldüğü gibi toplam ısı transfer katsayısının 200-600 W/m²K aralığında değışmektedir.

Çizelge 3.8. Literatürde bulunan çalışmalardaki toplam ısı transfer katsayısı

Sıcak akışkan	$h_{HX,iç}$ (W/m ² K)	$h_{HX,dış}$ (W/m ² K)	U_{HX} (W/m ² K)	Referans
Etilen glikol (%33 glikol- %67 su) ($\dot{m} = 0.02$ kg/s)	882	96	83	Logie vd. (2010)
	1003	121	107	
	1653	108	99	
Etilen glikol (%33 glikol- %67 su) ($\dot{m} = 0.1$ kg/s)	4540	191	176	Logie vd. (2010)
	4185	288	264	
	6857	249	232	
Etilen glikol (%33 glikol- %67 su) ($\dot{m} = 0.1$ kg/s)	-	-	300	Logie ve Frank (2013)
Su	-	-	350-600	Sheeba vd. 2019
Sulu çözelti	-	-	200-500	Anonim (2022d)
Sulu çözelti	-	-	200-500	Anonim (2022e)
Sulu çözelti	-	-	200-500	Anonim (2022f)
Su	-	-	231-480	Malavasi (2015)
Sulu çözelti	-	-	200-500	Anonim (2022g)

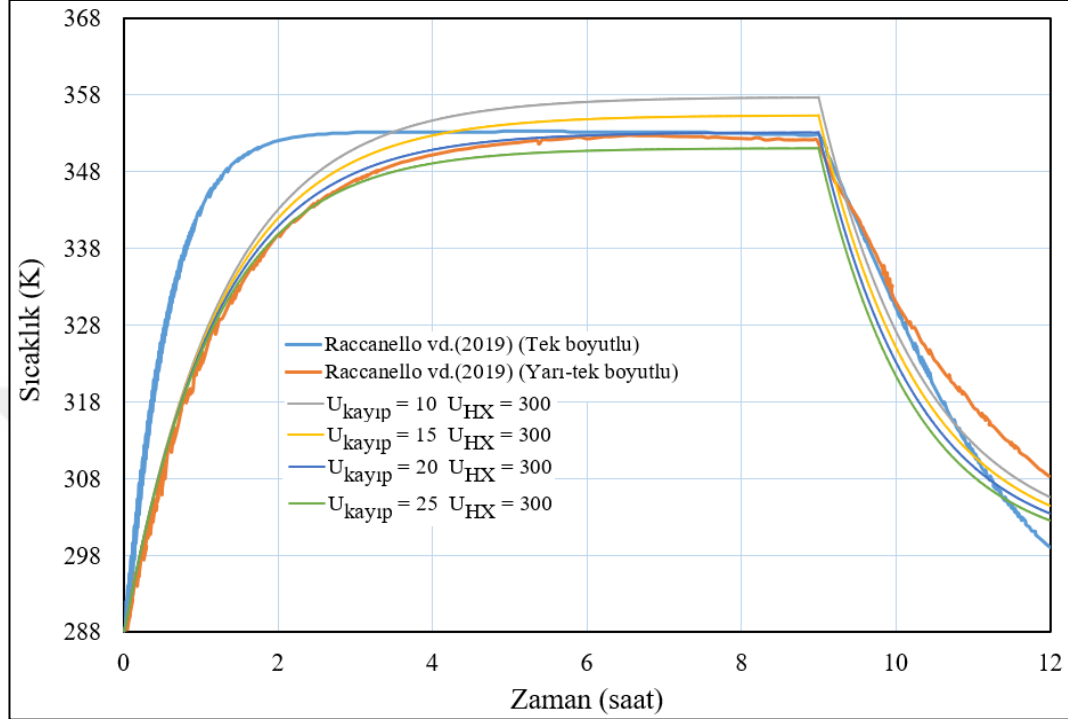
Ayrıca, literatürdeki çalışmalar incelendiğinde tankın toplam ısı kayıp katsayısının Çizelge 3.9’da görüldüğü gibi 1.45- 26 W/m²K aralığında değiştiği görülmektedir.

Çizelge 3.9. Literatürde bulunan çalışmalardaki toplam ısı kayıp katsayısı

$U_{kayıp}$ (W/m ² K)	Referans
25.95	Hoeschele vd. (2017)
6	Pero vd. (2016)
2	Gibout vd. (2010)
1.45	Shirinbakhsh vd. (2016)

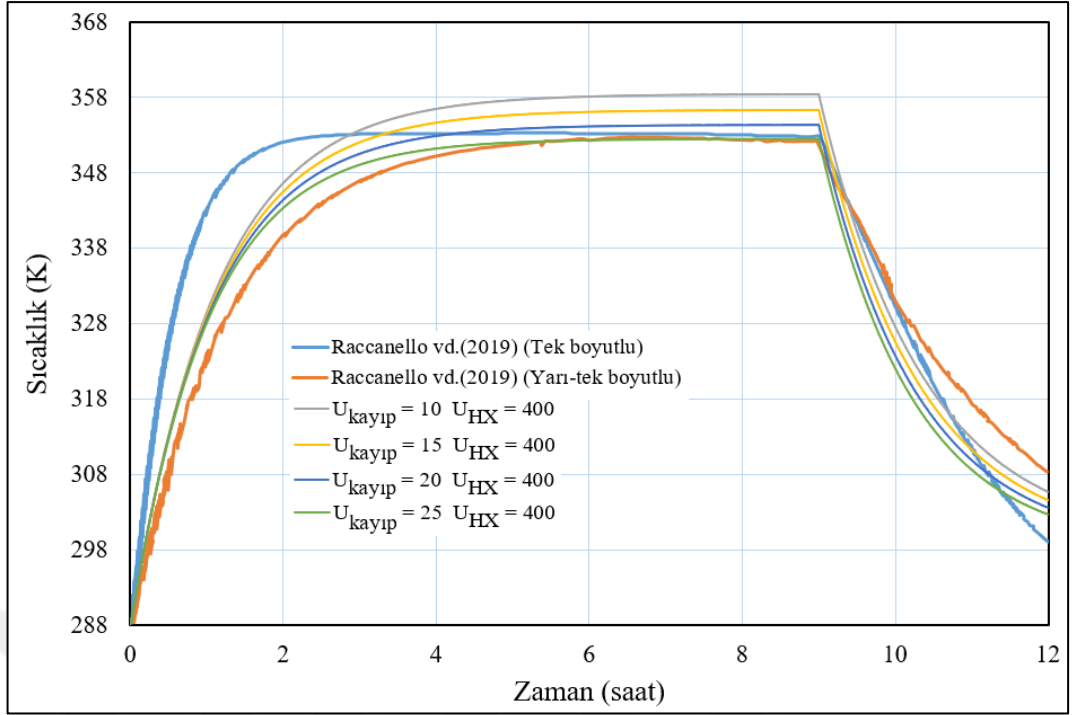
İçerisinde helisel borulu ısı değiştiricisi bulunan sıcak su depolama tankı için geliştirilen 0-D matematiksel modelin doğrulaması Raccanello vd. (2019) referans çalışmasındaki sıfır boyutlu ve bir boyutlu modelleme dikkate alınarak yapılmıştır. Referans çalışmada yaklaşık 9 saatlik şarj süresi sonunda tankın içindeki suyun ortalama sıcaklığı 353.4 K olarak hesaplanmıştır. Mevcut çalışmada $U_{HX} = 200-500$ W/m²K aralığında $U_{kayıp} = 10-25$ W/m²K aralığında seçilerek referans çalışma ile karşılaştırma grafikleri elde edilmiştir. Şekil 3.18’te $U_{HX} = 300$ W/m²K, $U_{kayıp}$ ise 10-25 W/m²K aralığında değiştirilerek analizler yapılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi

referans çalışmanın sıfır boyutlu ve tek boyutlu modelleme sonuçları dikkate alındığında, mevcut hesaplamalarda $U_{kayıp} = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$ değeri için sonuçlar birbiri ile uyumludur.



Şekil 3.18. Toplam ısı kayıp katsayısının değişimine göre ($U_{kayıp} = 10-25 \text{ W/m}^2\text{K}$) tankın sıcaklığının zamanla değişimi ($U_{HX} = 300 \text{ W/m}^2\text{K}$)

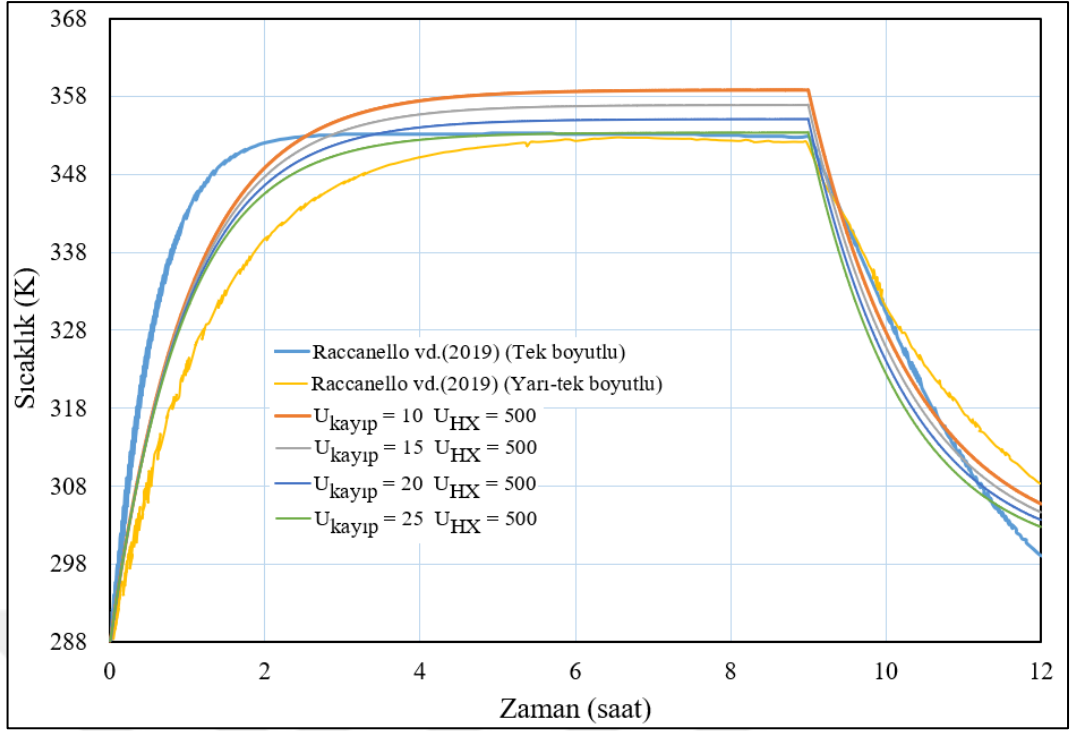
Şekil 3.19'da $U_{HX} = 400 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_{kayıp}$ ise 10-25 $\text{W/m}^2\text{K}$ aralığında değiştirilerek analizler yapılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi referans çalışmanın sıfır boyutlu ve tek boyutlu modelleme sonuçları dikkate alındığında, mevcut hesaplamalarda $U_{kayıp} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ değeri için sonuçlar birbiri ile uyumludur. Ayrıca $U_{HX} = 400 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve $U_{kayıp} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerlerinde deşarj durumunun sonunda tank içindeki akışkan sıcaklığı 303 K olmuştur.



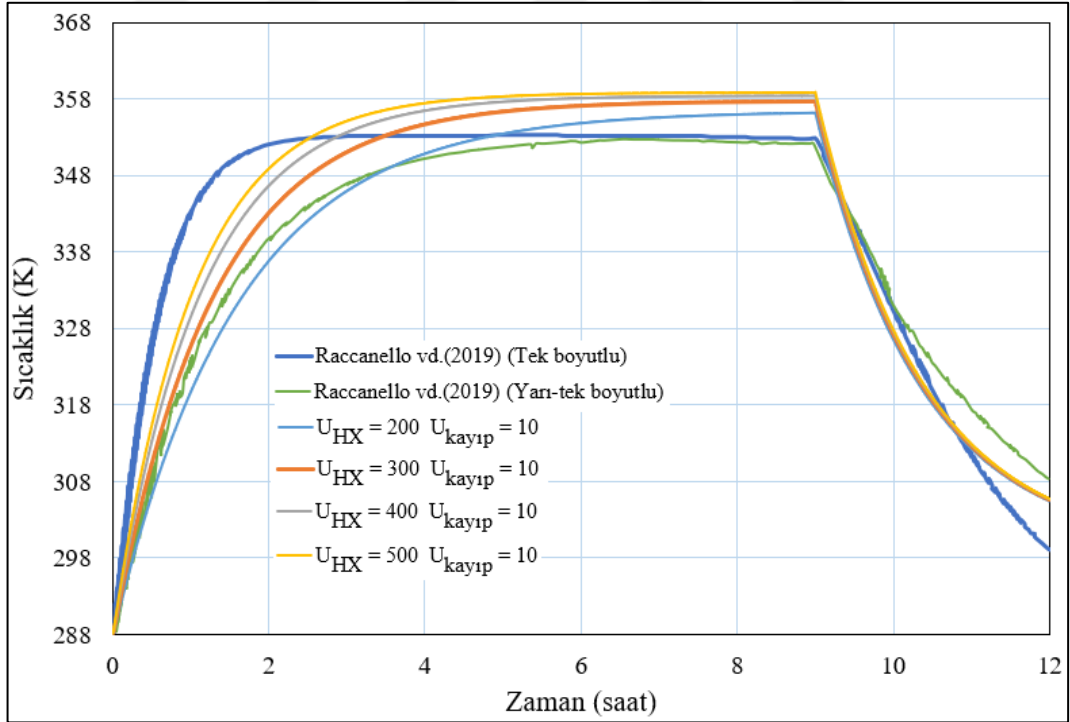
Şekil 3.19. Toplam ısı kayıp katsayısının değişime göre ($U_{kayıp} = 10-25$ W/m²K) tankın sıcaklığının zamanla değişimi ($U_{HX} = 400$ W/m²K)

Şekil 3.20'de $U_{HX} = 500$ W/m²K, $U_{kayıp}$ ise 10-25 W/m²K aralığında değiştirilerek analizler yapılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi referans çalışmanın sıfır boyutlu ve tek boyutlu modelleme sonuçları dikkate alındığında, mevcut hesaplamalarda $U_{kayıp} = 25$ W/m²K değeri için sonuçlar birbiri ile uyumludur.

Şekil 3.21'de $U_{kayıp} = 10$ W/m²K, U_{HX} ise 200-500 W/m²K aralığında değiştirilerek analizler yapılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi referans çalışmanın sıfır boyutlu ve tek boyutlu modelleme sonuçları dikkate alındığında, tankın içindeki akışkan sıcaklığı U_{HX} 'in bütün değerleri için referans çalışmadan yüksek çıkmaktadır.

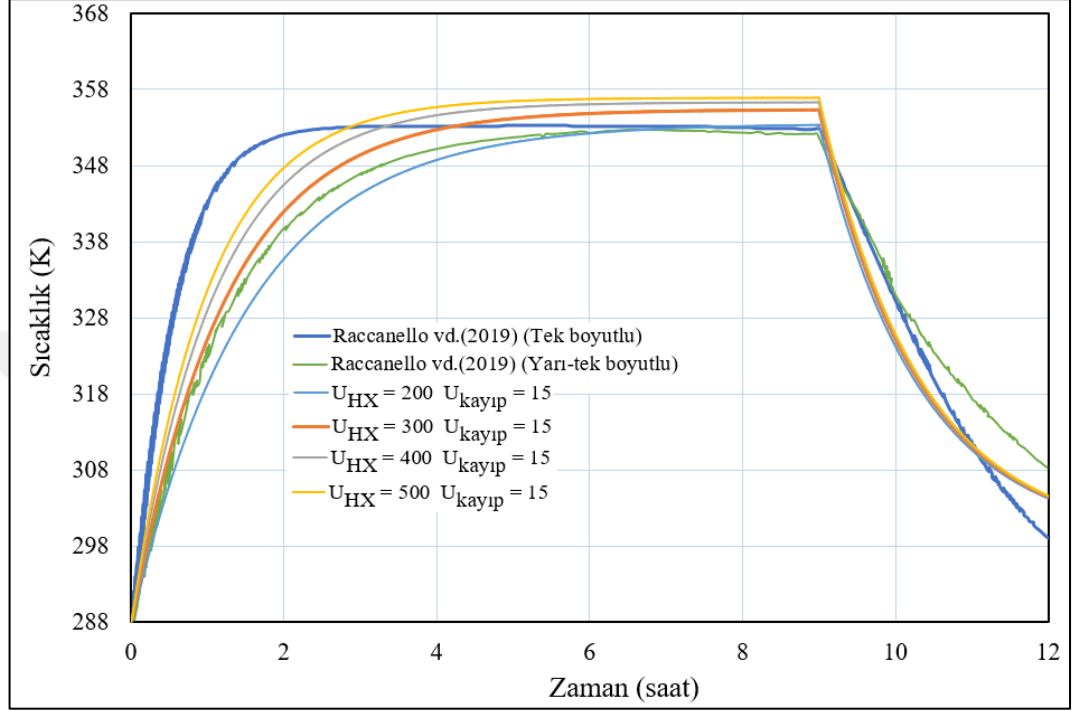


Şekil 3.20. Toplam ısı kayıp katsayısının değişime göre ($U_{kayıp}=10-25 \text{ W/m}^2\text{K}$) tankın sıcaklığının zamanla değişimi ($U_{HX} = 500 \text{ W/m}^2\text{K}$)



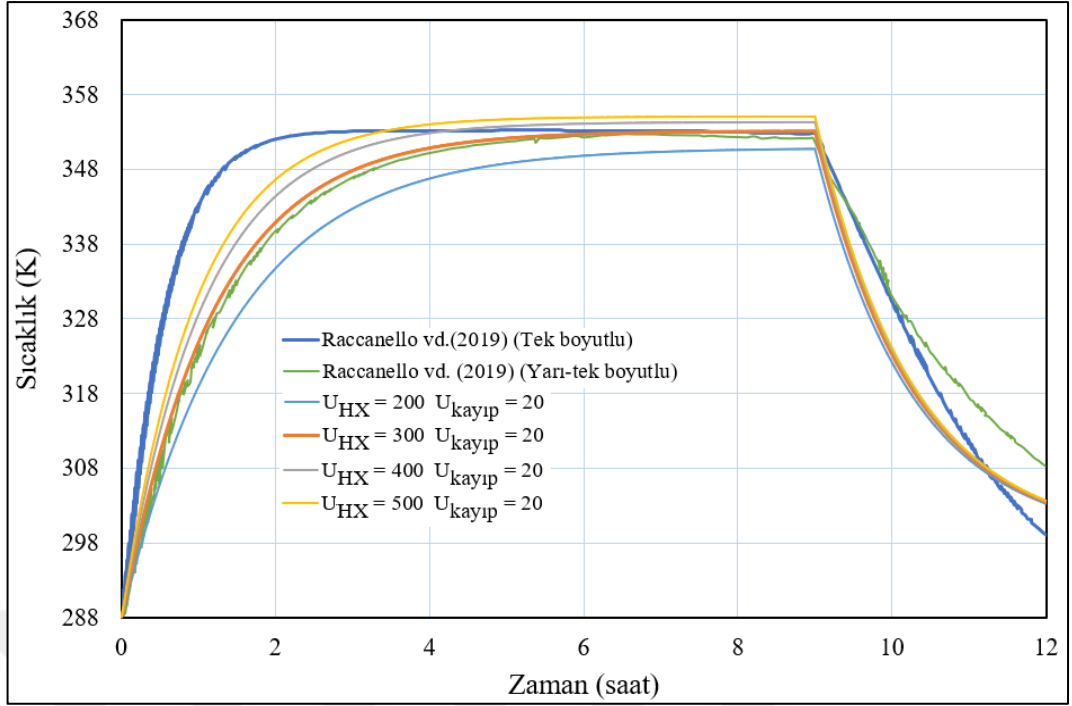
Şekil 3.21. Isı değiştiricisinin toplam ısı transfer katsayısının değişime göre ($U_{HX} = 200-500 \text{ W/m}^2\text{K}$) tankın sıcaklığının zamanla değişimi ($U_{kayıp} = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Şekil 3.22’de $U_{kayıp} = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$, U_{HX} ise 200-500 $\text{W/m}^2\text{K}$ aralığında değiştirilerek analizler yapılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi referans çalışmanın sıfır boyutlu ve tek boyutlu modelleme sonuçları dikkate alındığında, tankın içindeki akışkan sıcaklığı U_{HX} ’in bütün değerleri için referans çalışmadan farklıdır.



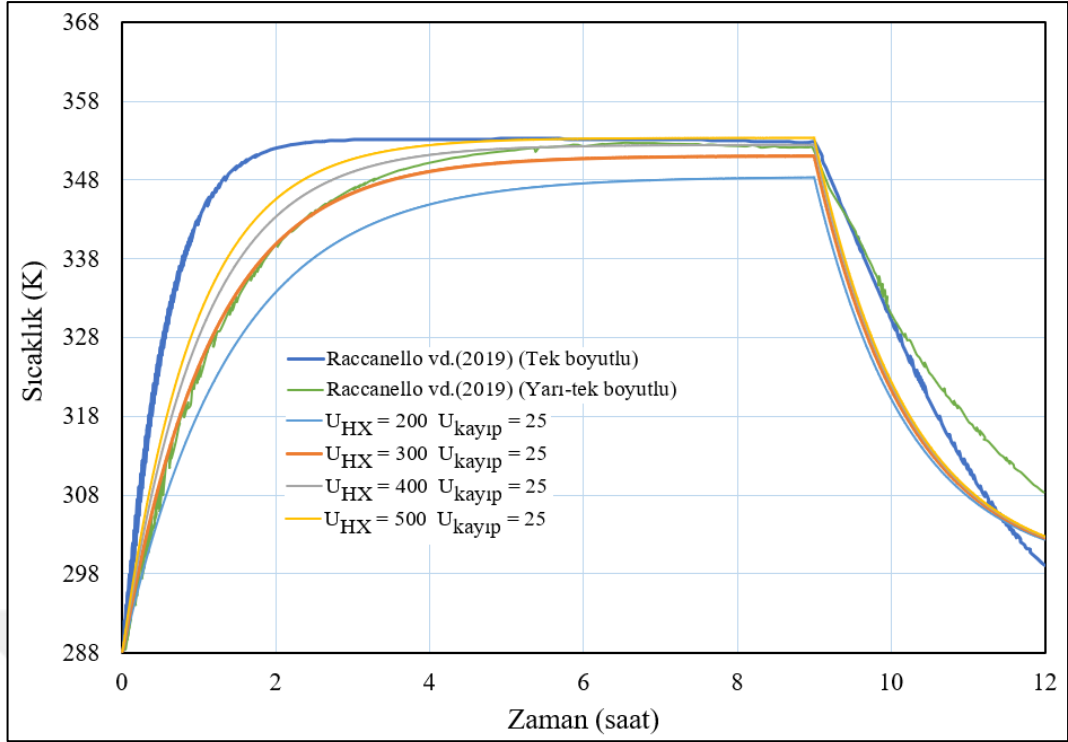
Şekil 3.22. Isı değiştiricisinin toplam ısı transfer katsayısının değişimine göre ($U_{HX} = 200-500 \text{ W/m}^2\text{K}$) tankın sıcaklığının zamanla değişimi ($U_{kayıp} = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Şekil 3.23’te $U_{HX} = 200-500 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_{kayıp}$ ise 20 $\text{W/m}^2\text{K}$ alınarak analizler yapılmıştır. Şekilde görüldüğü, $U_{HX} = 400 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve $U_{HX} = 500 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerleri için tankın sıcaklığı referans çalışmadan yüksek çıkarken, $U_{HX} = 300 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerinde tankın ortalama sıcaklığı referans sıcaklığı ile yaklaşık aynı olmaktadır. $U_{HX} = 200 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerinde ise tankın ortalama sıcaklığı referans sıcaklığından düşük olmaktadır.



Şekil 3.23. Isı değıştiricisinin toplam ısı transfer katsayısının değışime göre ($U_{HX} = 200-500 \text{ W/m}^2\text{K}$) tankın sıcaklığının zamanla değışimi ($U_{kayıp} = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Şekil 3.24'te $U_{HX} = 200-500 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_{kayıp}$ ise $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ alınarak analizler yapılmıştır. Şekilde görüldüğü, $U_{HX} = 400 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve $U_{HX} = 500 \text{ W/m}^2\text{K}$ değeri için tankın sıcaklığı referans çalışma ile yaklaşık aynı çıkmaktadır. $U_{HX} = 200 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve $U_{HX} = 300 \text{ W/m}^2\text{K}$ değeri için tankın ortalama sıcaklığı referans çalışmadan düşük çıkmaktadır.



Şekil 3.24. Isı değıştircisinin toplam ısı transfer katsayısının değışime göre ($U_{HX} = 200-500 \text{ W/m}^2\text{K}$) tankın sıcaklığının zamanla değışimi ($U_{kayıp} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Isı değıştircisinin toplam ısı transfer katsayısı $200-500 \text{ W/m}^2\text{K}$ aralığında ve toplam ısı kayıp katsayısı $10-25 \text{ W/m}^2\text{K}$ aralığında değıştirilerek doğrulama çalışmaları tamamlanmıştır. Yapılan doğrulama çalışmaları sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- 1) Sabit ısı kayıp katsayısında ($U_{kayıp} = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$) toplam ısı transfer katsayısı $200 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'den $500 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'e çıkarıldığında tanktaki su sıcaklığı artmaktadır (Referans çalışmadaki su sıcaklığından çok fazla, sapmalar çok fazla, eğilimler uyumsuz).
- 2) Sabit ısı kayıp katsayısında ($U_{kayıp} = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$) toplam ısı transfer katsayısı $200 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'den $500 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'e çıkarıldığında tanktaki su sıcaklığı artmaktadır (Referans çalışmadaki su sıcaklığından fazla, sapmalar çok, eğilimler uyumsuz).
- 3) Sabit ısı kayıp katsayısında ($U_{kayıp} = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$) toplam ısı transfer katsayısı $200 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'den $500 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'e çıkarıldığında tanktaki su sıcaklığı artmaktadır. $U_{HX} = 300 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerinde referans çalışma ile uyumlu sonuçlar elde

edilmiştir (Grafik eğilimi noktasal olarak da uyumludur. Diğer U_{HX} değerleri ile uyumsuz).

- 4) Sabit ısı kayıp katsayısında ($U_{kayıp} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$) toplam ısı transfer katsayısı $200 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'den $500 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'e çıkarıldığında tanktaki su sıcaklığı artmaktadır. $U_{HX} = 400 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve $U_{HX} = 500 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerinde referans çalışma ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir (Grafik eğilimleri noktasal olarak da uyumludur).
- 5) Sabit ısı transfer katsayısında ($U_{HX} = 500 \text{ W/m}^2\text{K}$) $U_{kayıp}$ $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'den $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'e çıkarıldığında referans çalışmadaki su sıcaklığına yaklaşılmaktadır (En yakın sonuçlar $U_{kayıp} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ olduğunda elde edilmektedir).
- 6) Sabit ısı transfer katsayısında ($U_{HX} = 400 \text{ W/m}^2\text{K}$) $U_{kayıp}$ $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'den $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'e çıkarıldığında referans çalışmadaki su sıcaklığına yaklaşılmaktadır (En yakın sonuçlar $U_{kayıp} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ olduğunda elde edilmektedir).
- 7) Sabit ısı transfer katsayısında ($U_{HX} = 300 \text{ W/m}^2\text{K}$) $U_{kayıp}$ $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'den $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'e çıkarıldığında referans çalışmadaki su sıcaklığına yaklaşılmaktadır (En yakın sonuçlar $U_{kayıp} = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$ olduğunda elde edilmektedir).
- 8) Tanktan çevreye toplam ısı kayıp katsayısı olan $U_{kayıp}$ artırıldıkça referans çalışmadaki tank sıcaklığına ($T_{su} = 353.3 \text{ K}$) yaklaşılmakta ve noktasal olarak grafik eğilimleri doğrulanmaktadır.
- 9) $U_{HX} = 300 \text{ W/m}^2\text{K}$ $U_{kayıp} = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_{HX} = 400 \text{ W/m}^2\text{K}$ $U_{kayıp} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ ya da $U_{HX} = 500 \text{ W/m}^2\text{K}$ $U_{kayıp} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerleri sabit girdi olarak kabul edildiğinde referans çalışmanın ortalama tank sıcaklığına yaklaşılmaktadır. Ayrıca grafik eğilimleri incelendiğinde $U_{HX} = 300 \text{ W/m}^2\text{K}$ $U_{kayıp} = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_{HX} = 400 \text{ W/m}^2\text{K}$ $U_{kayıp} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_{HX} = 500 \text{ W/m}^2\text{K}$ $U_{kayıp} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerleri için zaman adımındaki noktasal değerlerde doğrulanmaktadır.

Sonuç olarak; literatürdeki çalışmaların incelenmesi ve sıcak su depolama tankının matematiksel modelleme doğrulama çalışmaları sonucunda bu tez çalışmasında toplam ısı transfer katsayısı $U_{HX} = 500 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak kabul edilmiştir. Ayrıca sıcak su depolama tankı toplam ısı kayıp katsayısı $U_{kayıp} = 0.01 \text{ W/m}^2\text{K}$ alınarak sıcak su depolama tankı modellenmiştir.

3.3.3. Batarya modellemesi

Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere bataryalar yenilebilir enerji kaynaklarının kesikli ve süreksiz yapılarından meydana gelen aksaklıkların giderilebilmesi için kısa süreli depolama yapan elektrokimyasal cihazlardır. Bu tez çalışması kapsamında diğer batarya çeşitlerine göre daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olan Lityum-iyon batarya kullanılmıştır. Lityum-iyon bataryanın 0-D matematiksel modelini oluşturmak için Çizelge 3.10'da verilen teknik özellikler kullanılmıştır.

Çizelge 3.10. Batarya özellikleri (Toghyani vd., 2021)

Batarya özellikleri	Değerler
Minimum voltaj, V_{min} (V)	12
Minimum akım, I_{min} (A)	1
Maksimum voltaj, V_{max} (V)	24
Maksimum akım, I_{max} (A)	42
Nominal kapasite, $E_{batarya,nominal}$ (Ah)	1000
Toplam kapasite, $E_{batarya,toplam}$ (kWh)	24
Minimum şarj durumu, SOC_{min} (%)	30
Maksimum şarj durumu, SOC_{max} (%)	85
Şarj verimi, $\eta_{şarj}$ (%)	86
Deşarj verimi $\eta_{deşarj}$ (%)	86

Bataryalarda depolama sürecince elde edilen net güç, şarj ve deşarj işlemleri sırasında meydana gelen dönüşüm verimleri göz önünde bulundurularak hesaplanır. Bataryalarda depolanan enerjinin değişim hızı (dE_B/dt), üretilen net güç ile orantılıdır. Üretilen net güç ise, PV/T tarafından üretilen elektriksel güç ile ($P_{PV/T}$) evin elektrik ihtiyacı ($P_{yük}$) arasındaki fark olarak ifade edilmektedir. Bataryalarda depolanan enerjinin değişim hızı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Arun vd., 2008):

$$\frac{dE_B}{dt} = (P_{PV/T} - P_{yük})f \quad (3.36)$$

Burada f , şarj ve deşarj süreçlerindeki verimliliği ifade etmekte olup Denklem (3.37) ile hesaplanmaktadır:

$$f = \eta_{şarj} \quad P_{PV/T} \geq P_{yük} \quad (3.37a)$$

$$f = 1/\eta_{\text{deşarj}} \quad P_{PV/T} < P_{\text{yük}} \quad (3.37b)$$

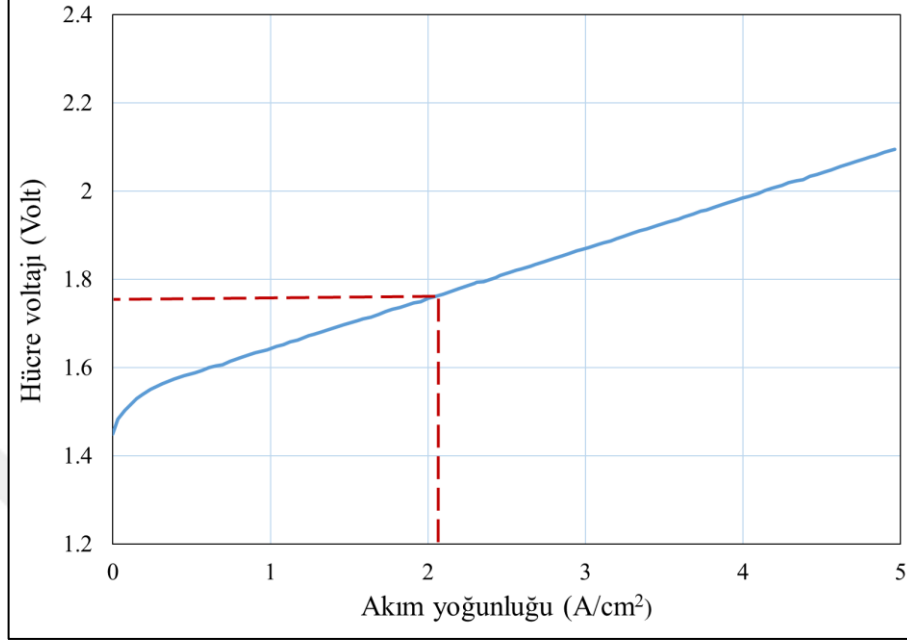
Denklem (3.36), PV/T gücü, elektriksel yük, şarj/deşarjdaki güç dönüşüm verimleri ile bataryalarda depolanan enerjinin değişim hızını ilişkilendirmektedir. dt zaman aralığı boyunca depolanan enerji olan E_B (J) aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$E_B(t) = E_B(t - \Delta t) + \int_{t-1}^t P_{PV/T}(t - \Delta t) - P_{\text{yük}}(t - \Delta t) dt \quad (3.38)$$

3.3.4. PEM elektrolizör modellemesi

PEM elektrolizörler elektrik akımı ile suyu oksijen ve hidrojene ayıran cihazlardır. Günümüzde ticari amaçlı kullanılan PEM elektrolizörler genellikle 30-40 bar basınçlarda çalışmaktadır. Bu basınçlarda çalışan PEM elektrolizörler ile üretilen hidrojenin depolama tanklarına gönderilmesi için hidrojen kompresörleri kullanılmalıdır. Ancak mekanik kompresörler arızalanmaya eğilimli olup sisteme daha fazla karmaşıklık, enerji tüketimi ve maliyet katmaktadır. Bu nedenle yüksek basınçlı PEM elektrolizörler, hidrojenin elektrolizör içinde elektrokimyasal olarak sıkıştırılması yoluyla kompresöre olan ihtiyacı ortadan kaldırırlar (Hancke vd., 2022). Hancke vd. (2022) yaptıkları çalışmada 80, 200, 350 ve 700 bar'da çalışan PEM elektrolizörler ile, mekanik bir kompresörle birlikte 30 bar'da çalışan elektrolizörleri karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında 200 bar basınca kadar çalışan yüksek basınçlı PEM-El sistemleri ile ekonomik olarak uygulanabilir çözümler elde etmenin mümkün olduğunu sonucuna varmışlardır. Ayrıca Marangio vd. (2011) çalışmalarında yüksek basınçlı PEM-El prototipini test etmişlerdir. Prototipin 70 bar basınca kadar çalışabildiğini ve böylece kompresör ihtiyacını ortadan kaldırarak enerji tasarrufu sağladığı sonucuna varmışlardır. Literatürdeki yüksek basınçlarda çalışan PEM-El modellemesinden yola çıkarak bu tez çalışmasında PEM-El'in 60 bar basınçta çalıştığı kabul edilmiştir. 60 bar basınçta üretilen hidrojen doğrudan 60 bar basınçta hidrojen depolama tanklarında depolanmaktadır. PEM El'in hücre voltajı ile akım yoğunluğu arasındaki ilişkiyi ifade etmek için polarizasyon eğrileri kullanılmaktadır. Bu eğriler PEM-El'in karakteristiğini hakkında bilgi vermektedir. Şekil 3.25'te PEM elektrolizöre ait polarizasyon eğrisi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi

elektrolizörün hücre voltajı 1.4-2.1 V arasında, akım yoğunluğu ise 0-5 A/cm² aralığında değişmektedir. 1.77 V hücre voltajına karşılık gelen 2.1 A/cm² akım yoğunluğu elektrolizörün çalışma noktasını ifade etmektedir.



Şekil 3.25. PEM elektrolizör polarizasyon eğrisi (Villagra ve Millet, 2019)

PEM elektrolizörün 0-D matematiksel modellemesinde kullanılmak üzere Çizelge 3.11’de verilen değerler kullanılmıştır.

Çizelge 3.11. PEM elektrolizör özellikleri (Villagra ve Millet, 2019)

PEM elektrolizör özellikleri	Değerler
Akım yoğunluğu, i (A/cm ²)	2
Voltaj, V (Volt)	1.78
Nominal çalışma gücü (W)	400
Hücre alanı, $A_{hücre}$ (cm ²)	100

PEM-El’in hücre sayısı aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır (Ceylan ve Devrim, 2021):

$$N_{hücre} = \frac{P_{PEM-El}}{V i A_{hücre}} \quad (3.39)$$

Burada, $N_{hücre}$ hücre sayısını, P_{PEM-El} (W) PEM-El gücünü, V (Volt) hücre voltajını, i (A/cm²) akım yoğunluğunu ve $A_{hücre}$ (cm²) hücre alanını temsil etmektedir. PEM-El’e

gelen güç nominal çalışma noktası olan 400W değerinin üzerindeyse PEM-El'de hidrojen üretimi gerçekleşmektedir. Bu durumda PEM-El'de üretilen hidrojenin kütleli debisi Faraday yasası ile aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır (Ceylan ve Devrim, 2021):

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{(i A_{hücre} N_{hücre} M_{H_2})}{2F} \quad (3.40)$$

Burada $\dot{m}_{H_2}$ (kg/s) hidrojenin kütleli debisini, M_{H_2} (kg/mol) hidrojenin moleküler ağırlığını ifade etmektedir.

3.3.5. Hidrojen depolama tankı

PV/T paneller tarafından elektrik ihtiyacının karşılanmasından sonra kalan güç ile bataryalar şarj edilmektedir. Bataryalar şarj edildikten sonra enerji yönetim stratejisinde belirlenen şartların yerine gelmesi durumunda kalan net güç ile hidrojen üretilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, üretilen hidrojeni güvenli bir şekilde depolamak amacıyla 60 bar basınçlı hidrojen depolama tankı kullanılmaktadır. Kullanılan hidrojen depolama tankının özellikleri Çizelge 3.12'de görülmektedir. Çizelge görüldüğü gibi hidrojen depolama tankı 4.2 kg hidrojen depolamaktadır.

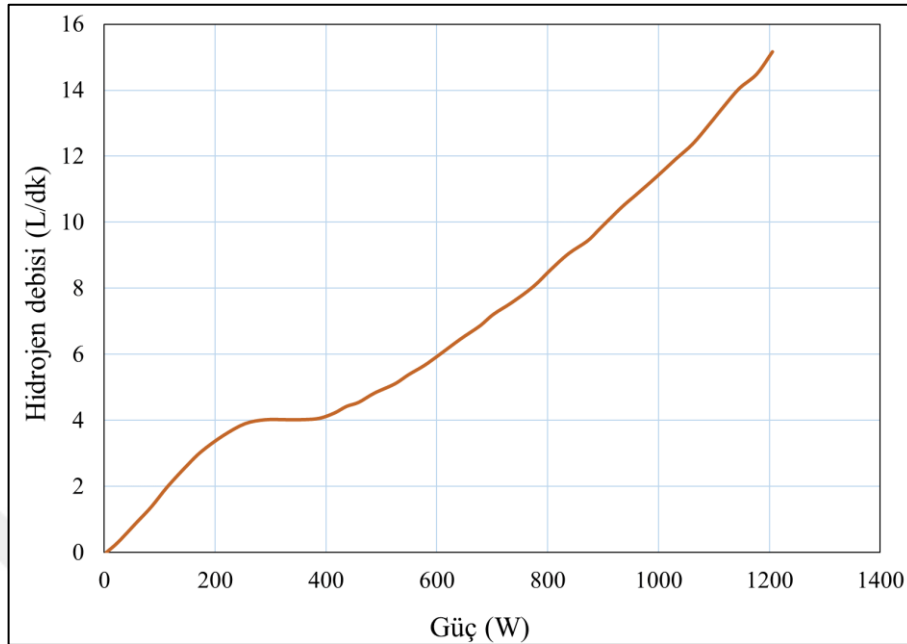
Çizelge 3.12. Hidrojen depolama tankı özellikleri (Anonim, 2022h)

Hidrojen depolama tankı özellikleri	Değerler
Model	MAHYTEC
Maksimum çalışma basıncı	60 bar
Hidrojen depolama kütlesi	4.2 kg
İç hacmi	850 litre

3.3.6. PEM yakıt pili modellemesi

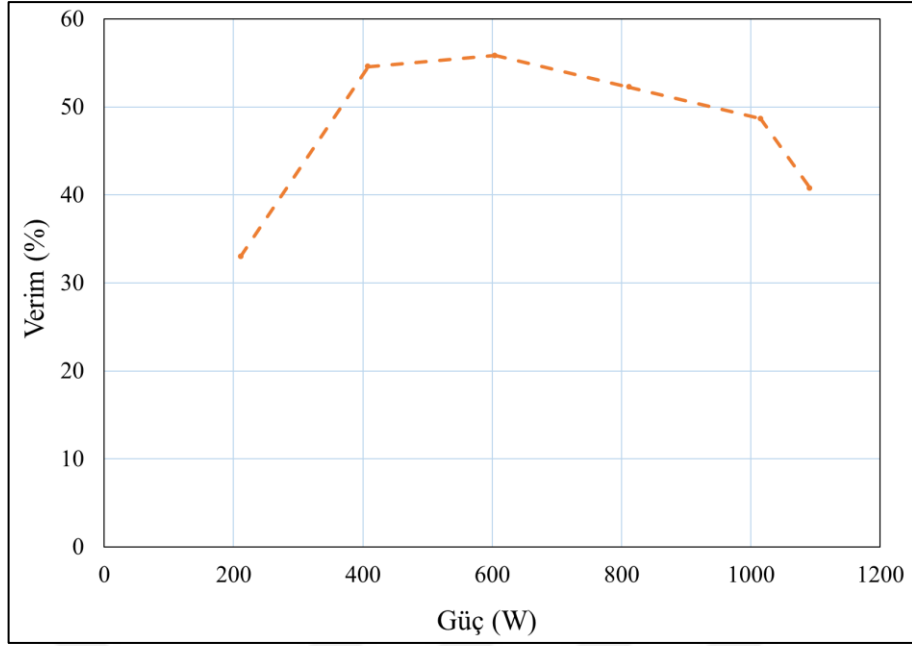
PEM yakıt pili, elektrik ihtiyacının PV/T'ler ve bataryalar ile karşılanamadığı durumlarda elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında PEM yakıt pili olarak ticari bir ürün olan H1000XP modelinin özellikleri kullanılmıştır. Bu yakıt piline ait güç - hidrojen kütleli debisi arasındaki ilişki Şekil 3.26'da görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi PEM yakıt pili değişken güçlerde farklı miktarlarda hidrojen tüketmektedir. Bu eğrinin denklemi EES yazılım programı

kullanılarak elde edilmiş ve PEM yakıt pilinin farklı güçlerde çalışması durumunda tüketilecek hidrojen miktarı hesaplanmıştır.



Şekil 3.26. H1000XP modeli için güç- hidrojen yakıt tüketimi ilişkisi (Anonim, 2022ı)

H1000XP modeline ait katalog verilerinden elde edilen güç-verim eğrisi Şekil 3.27’de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi PEM yakıt pili 600 W gücünde maksimum verimde çalışırken, PEM yakıt pili gücü arttıkça yakıt pilinin verimi azalmaktadır. Bu sebepten dolayı PEM yakıt pili sayısı belirlenirken yakıt pillerinin maksimum verimde (600 W gücünde) çalıştığı kabulü yapılmıştır.



Şekil 3.27. H1000XP modeli için güç-verim ilişkisi (Anonim, 2022ı)

Elektrik ihtiyacının $0 \leq P_{yük} < 1200$ W olması durumunda belirli sayıdaki yakıt pilinin en verimli nokta olan 600 W gücünde çalıştığı kabul edilmiştir. Bu durumda kaç tane yakıt pilinin çalışması gerektiği aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır:

$$N_{FC} = \frac{P_{yük}}{P_{max}} \quad (3.42)$$

Burada, N_{FC} aktif olan yakıt pili sayısını, $P_{yük}$ (W) evin elektrik ihtiyacını, P_{max} (W) ise PEM-FC'nin en verimli çalışma noktası olan 600 W değerini ifade etmektedir. Çıkan N_{FC} sayısı tam sayı değilse aşağı yuvarlama işlemi ile tam sayıya dönüştürülmelidir. Bu durumda karşılanması gereken elektrik ihtiyacı aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır:

$$P_{kalan} = P_{yük} - (N_{FC} P_{max}) \quad (3.43)$$

Burada P_{kalan} (W) belirli sayıda yakıt pili aktif olduktan sonra karşılanması gereken güç miktarını ifade etmektedir. Aktif olan yakıt pillerinin tüketmesi gereken hidrojen miktarı ise Denklem (3.44) ile hesaplanmaktadır:

$$\dot{m}_{H2,toplam} = \dot{m}_{H2,max} N_{FC} + \dot{m}_{H2,kalan} \quad (3.44)$$

Yukarıdaki denklemde, $\dot{m}_{H2,toplam}$ (kg/s) tüm yakıt pillerinin tüketmesi gereken toplam hidrojen miktarını, $\dot{m}_{H2,max}$ (kg/s) maksimum güçte çalışan yakıt pillerinin tüketmesi gereken hidrojen miktarını, $\dot{m}_{H2,kalan}$ (kg/s) ise kalan elektrik ihtiyacını karşılamak için çalışması gereken yakıt pillerinin tüketmesi gereken hidrojen miktarını ifade etmektedir.

Elektrik ihtiyacının $1200 \leq P_{yük}$ olması durumunda tüm yakıt pilleri aktif olup her bir yakıt piline karşılık gelen güç aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır:

$$P_{PEM-FC} = \frac{P_{yük}}{N_{FC}} \quad (3.45)$$

Burada P_{PEM-FC} (W) yakıt pilinin gücünü ifade etmektedir. Yakıt pilleri birbirine paralel bağlı olup her bir yakıt pilinin gücü aynıdır. Bu durumda yakıt pillerinin tüketmesi gereken hidrojen miktarı Şekil 3.26'dan yararlanılarak hesaplanır.

3.4. Enerji Yönetim Stratejisi

Enerji yönetimi; ürün kalitesinden, güvenlikten veya çevresel tüm koşullardan fedakârlık etmeksizin ve üretimi azaltmaksızın enerjinin verimli kullanımı doğrultusunda yapılandırılmış ve organize edilmiş disiplinli bir çalışmadır. Enerji yönetimin amacı; enerji arz güvenliğinin ve verimliliğinin sağlanması, enerji kaynaklarında çeşitliliğin ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının arttırılması, elektrik üretimi, iletimi, dağıtımı ve kullanımında kayıpların azaltılması, ekonomik, sosyal kalkınma, rekabet gücü ve ulusal güvenlikte önemli bir yer tutan enerji alanında, yenilik faaliyetlerini gerçekleştirmektir (Kocaman, 2014). Enerji yönetimi;

- Enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi
- Enerji tüketiminin en verimli ve optimum bir şekilde planlanması

- Gelecekte ihtiyaç duyulacak enerji tüketimine uygun olarak gerekli planlamaların yapılması
- Ekonomik varlık ve enerji arasında makul bir denge sağlanması ile ilgilidir.

Ayrıca;

- Yenilenebilir enerji kaynaklarının hava ve iklim koşullarına olan güvenilirliğinin dezavantajları nedeniyle, enerji yönetim sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.
- Enerji yönetim sistemleri, sistemi optimize etmek ve maksimum sistem performansı elde etmek için her bir eleman çalışmasını ve güç akışını izlemek ve kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır.
- Enerji yönetim sistemlerinin amacı, sistemin genel performansını ve verimliliğini artırmak, yakıt pili sisteminde hidrojen yakıt tüketimini azaltmak, sistem bileşeninin yaşam döngüsünü artırmak, şarj durumunu kontrol etmek, derin deşarjı önlemek ve kararlılığını korumaktır.

Enerji yönetiminde önemli performans kriterleri;

- Sistem, işletim, bakım, sermaye, enerji maliyeti
- Verim
- Uzun ömür
- Karbon ayak izi
- Ekonomik ve çevresel analiz
- Enerji yönetim stratejisi belirlemek
- Yöntemin etkinliğini ve uygulanabilirliğini doğrulamak
- Bileşen/Sistem boyutlandırması, kapasitesi vb.
- Algoritma ve Optimizasyon prosedürlerinin belirlenmesi

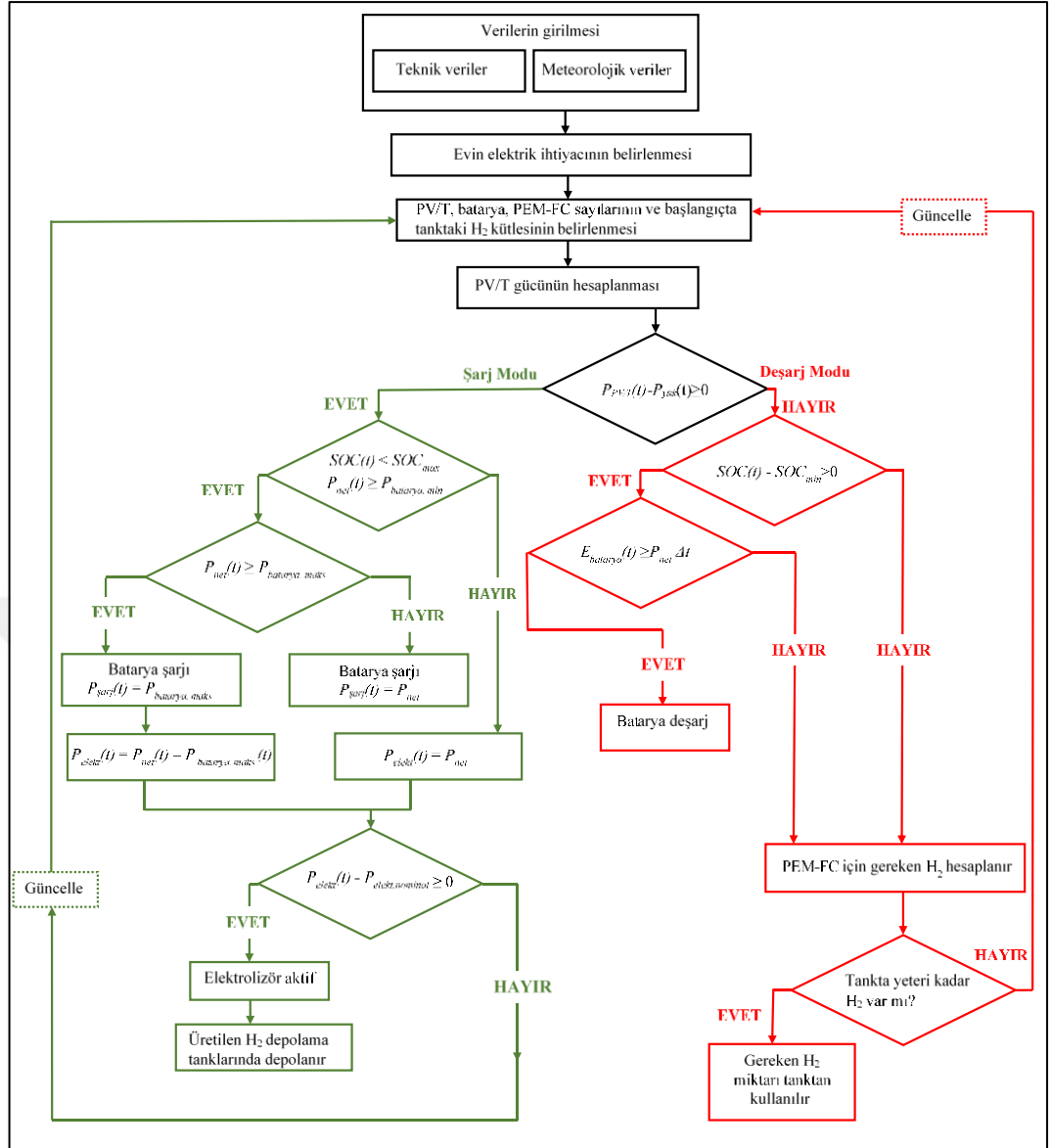
- Belirlenen prosedürlerin diğer yöntemlerle karşılaştırılması(avantajı/dezavantajı)

şeklinde sıralanabilir (Kocaman, 2014).

Modelleme ve doğrulama çalışmaları tamamlanan sistem elemanlarının belirli bir kontrol algoritmasına göre birbirine entegre edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla Şekil 3.28’de görülen enerji yönetim stratejisi geliştirilmiştir. Şekilde verilen enerji yönetim stratejisine göre, öncelikle İzmir ilindeki evin toplam elektrik ihtiyacı (elektrikli aletler, aydınlatmalar, fanlar, ısıtma, soğutma, sıcak su) OpenStudio yazılım program kullanılarak hesaplanacaktır. Daha sonra İzmir iline ait meteorolojik veriler (güneş ışınlamı, çevre sıcaklığı, rüzgâr hızı) elde edilecektir. Ayrıca analizlerde kullanılmak üzere PV/T, batarya, PEM-El, hidrojen depolama tankı, PEM-FC gibi ekipmanların teknik özellikleri belirlenecektir. Başlangıçta PV/T, batarya, PEM-FC sayıları ve hidrojen depolama tankının doluluk oranı (başlangıçta tanktaki hidrojen kütlesi) kabul edilerek analizlere başlanacaktır. Öncelikle PV/T panellerden elde edilen elektriksel güç hesaplanarak PV/T panellerin elektrik ihtiyacını karşılayıp karşılayamama durumları analiz edilecektir. PV/T panellerden elde edilen gücün elektrik ihtiyacını karşıladığı durumlarda, kalan fazla güç ile bataryalar için şarj moduna geçilecektir. Bataryaların şarj modunda öncelikle bataryaların şarjının önceden belirlenen maksimum şarj değerinden küçük olup olmadığı ve net gücün (PV/T paneller elektrik ihtiyacını karşıladıktan sonra kalan güç) bataryaların minimum çalışma gücünden büyük olup olmadığı kontrol edilecektir. Bu şartların aynı anda sağlanması durumunda net güç bataryaların maksimum çalışma gücü ile karşılaştırılacaktır. Net güç bataryaların maksimum gücünden büyükse bataryalar maksimum şarj değerine kadar şarj olacak, kalan güç ile PEM elektrolizörün çalışıp çalışmayacağı kontrol edilecektir. Net gücün bataryaların maksimum şarjından küçük olması durumunda ise net güç kadar bataryalar şarj olacaktır. Bataryaların şarjının maksimum şarj değerinde olduğu (bataryalar tamamen dolu) ve net gücün bataryaların minimum çalışma noktasından küçük olduğu durumlarda ise PEM elektrolizör ile hidrojen üretimi yapılıp yapılamayacağı kontrol edilecektir. PEM elektrolizöre gelen güç elektrolizörün nominal çalışma noktasından büyükse hidrojen üretimi gerçekleşecektir. Bu durumda üretilen hidrojen, hidrojen depolama tankına gönderilecek ve burada depolanacaktır.

PEM elektrolizörler ile hidrojen üretiminin olmadığı durumlarda başlangıçta belirlenen PV/T ve batarya sayısı değiştirilerek analizler tekrarlanacaktır.

PV/T panellerden elde edilen gücün elektrik ihtiyacını karşılayamaması durumunda elektrik ihtiyacı öncelikle bataryalar ile karşılanacaktır (Batarya deşarj modu). Bataryaların şarjının belirlenen minimum şarj değerinin üzerinde olduğu ve bataryaların enerjisinin net enerjiden (PV/T paneller elektrik ihtiyacını karşıladıktan sonra kalan enerji) fazla olduğu durumda bataryalar deşarj olarak elektrik ihtiyacını karşılayacaktır. Bataryaların sistemi besleyebilmesi için yeterli şarja (bataryaların şarjı minimum şarj değerinden küçük) ve enerjiye (bataryaların enerjisi net enerjiden küçük) sahip olmadığı durumlarda ise elektrik ihtiyacı PEM-FC'ler ile karşılanacaktır. PEM-FC'lerin çalışıp elektrik ihtiyacını karşılayabilmesi için hidrojen depolama tanklarında yeteri kadar hidrojen bulunmalıdır. Hidrojen depolama tanklarında yeteri kadar hidrojen varsa elektrik ihtiyacı PEM-FC'ler ile karşılanacaktır. Hidrojen depolama tanklarında yeteri kadar hidrojen olmayıp elektrik ihtiyacının karşılanamadığı durumlarda ise PV/T, batarya, PEM-FC sayıları ve başlangıçta tankta bulunan hidrojen kütlesi değiştirilerek analizler tekrarlanacaktır.

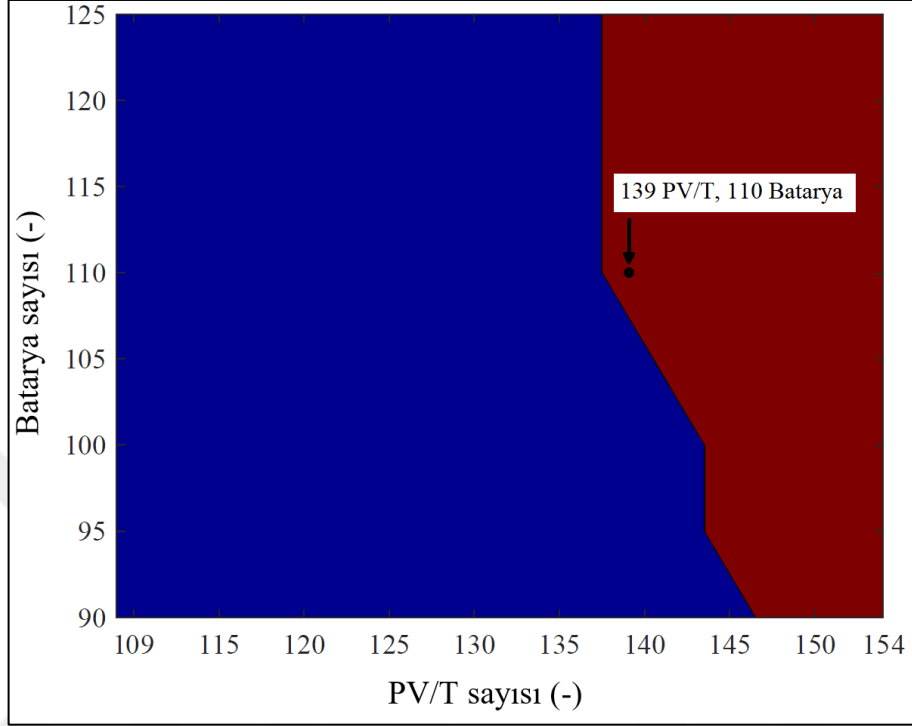


Şekil 3.28. Hibrit sistem için enerji yönetim stratejisi

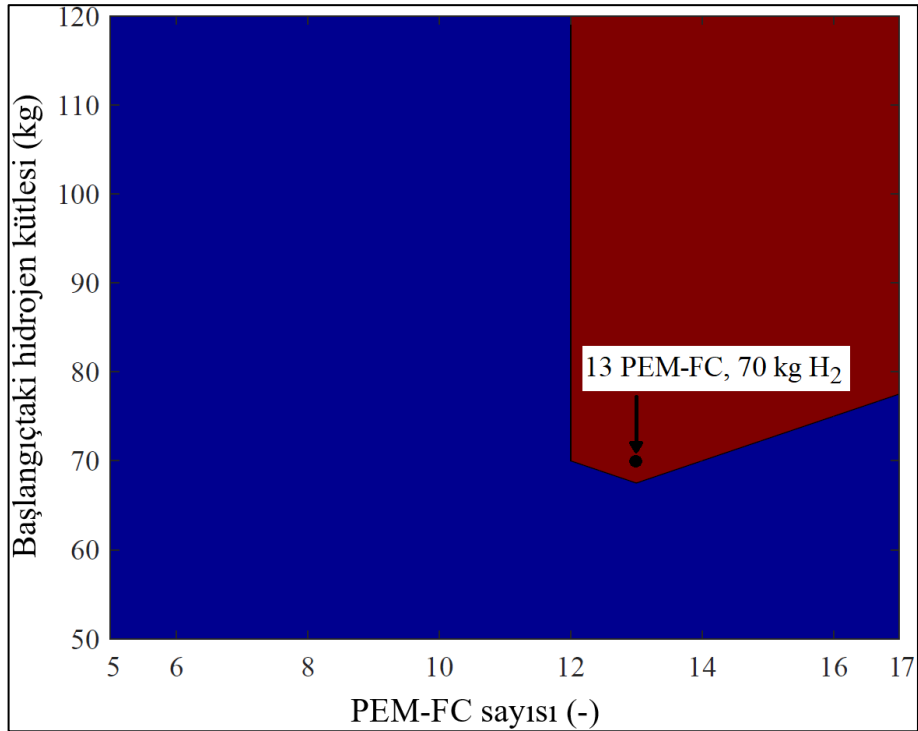
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında İzmir ilinde şebekeden bağımsız iki katlı evin elektrik ve sıcak su ihtiyacının karşılanması amaçlanmıştır. Bu amaçla bir yıl boyunca güç ve sıcak su elde etmek amacıyla güneş-hidrojen enerjisine dayalı hibrit bir sistem tasarlanmıştır. Hibrit sisteme ait her bir bileşen için 0-D matematiksel modeller oluşturulmuş, oluşturulan matematiksel modeller literatürde bulunan mevcut çalışmalar ile doğrulanmıştır. Ayrıca tasarlanan sistem ile bir yıl boyunca güç ve sıcak su elde etmek amacıyla enerji yönetim stratejisi geliştirilmiştir. Geliştirilen enerji yönetim stratejine göre elektrik ihtiyacı öncelikle PV/T paneller ile karşılanmakta, kalan güç ile bataryalar şarj edilmektedir. Bu nedenle öncelikle evin elektrik ihtiyacını karşılayan PV/T-batarya sayısı kabul edilerek analizlere başlanmıştır. Daha sonra başlangıçta kabul edilen PV/T-batarya sayısı azaltılarak analizler tekrarlanmıştır. Şekil 4.1(a)'da farklı sayılarda PV/T ve batarya sayıları belirlenerek yapılan analizler sonucunda sistemin çalışma bölgeleri görülmektedir. Burada mavi bölge PV/T ve batarya sayılarının yetersiz olup evin elektrik ihtiyacının karşılanamadığını, kırmızı bölge ise PV/T-batarya sayılarının yeterli olup elektrik ihtiyacının karşılandığını göstermektedir. Örneğin, 145 PV/T-95 batarya kullanılması durumunda elektrik ihtiyacı karşılanabilirken, 136 PV/T-115 batarya kullanılması durumunda elektrik ihtiyacı karşılanamamaktadır. PV/T ve batarya sayıları belirlenirken PEM-FC ve başlangıçta tankta bulunan hidrojen kütlesi sabit alınarak (13 PEM-FC, 70 kg H₂) yıllık dinamik analizler yürütülmüştür. Elektrik ihtiyacının PV/T ve bataryalar ile karşılanamadığı durumlarda PEM-FC'ler devreye girerek elektrik ihtiyacını karşılamaktadır. PEM-FC'lerin aktif olup elektrik ihtiyacını karşılayabilmesi için tankta yeteri kadar hidrojen bulunmalıdır. Bu nedenle PEM-FC ve tankta bulunması gereken hidrojen miktarı kabul edilerek analizlere devam edilmiştir. Kabul edilen PEM-FC sayısının ve hidrojen miktarının yeterli olmadığı durumlarda PEM-FC ve hidrojen miktarı değiştirilerek analizler tekrarlanmıştır. Şekil 4.1(b)'de farklı sayılarda PEM-FC ve tankta başlangıçta bulunan hidrojen kütlesi değiştirilerek yapılan analizler sonucunda sistemin çalışma bölgeleri görülmektedir. Şekil 4.1(a)'ya benzer şekilde burada da mavi bölge kabul edilen PEM-FC ve hidrojen kütlesinin yetersiz olduğunu, kırmızı bölge ise belirlenen PEM-FC sayısı ve hidrojen kütlesinin yeterli olduğunu göstermektedir. PEM-FC ve hidrojen kütlesi belirlenirken PV/T ve batarya sayıları sabit (139 PV/T, 110 batarya) alınarak analizler yapılmıştır. Bir yıllık dinamik analiz

sonucunda tasarlanan sistem ile kesintisiz güç elde etmek amacıyla gereken PV/T sayısı 139, batarya sayısı 110, PEM-FC sayısı 13 ve tankta başlangıçta bulunması gereken hidrojen kütlesi 70 kg olarak belirlenmiştir.



a) PV/T ve batarya sayısının belirlenmesi



b) PEM-FC ve hidrojen kütlesinin belirlenmesi

Şekil 4.1. Sistemin çalıştığı bölgeler

Tasarlanan hibrit sistem ile bir yıl boyunca kesintisiz olarak elektrik ve sıcak su elde etmek amaçlanmıştır. Bu amaçla yapılan analizler sonucu sistem bileşenlerinin minimum kapasiteleri/sayıları belirlenmiştir. Çizelge 4.1’de sistem bileşenlerinin temel özellikleri görülmektedir. Çizelgede görüldüğü gibi elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla 139 adet PV/T panel, 110 adet Lityum-iyon batarya, 13 adet PEM-FC ve 30 adet hidrojen depolama tankı kullanılmaktadır. Ayrıca evin sıcak su ihtiyacı sıcak su depolama tankı ile karşılanmaktadır. Sıcak su depolama tankındaki su sıcaklığının yetersiz durumlarda yardımcı ısıtıcı kullanılarak sıcak su ihtiyacı karşılanmaktadır. Bir yıl boyunca sıcak su ihtiyacının karşılanması için 132 litre hacminde sıcak su depolama tankı ve maksimum kapasitesi 4.13 kW olan yardımcı ısıtıcı kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Çizelge 4.1. Hibrit sistemin temel bileşenleri ve özellikleri

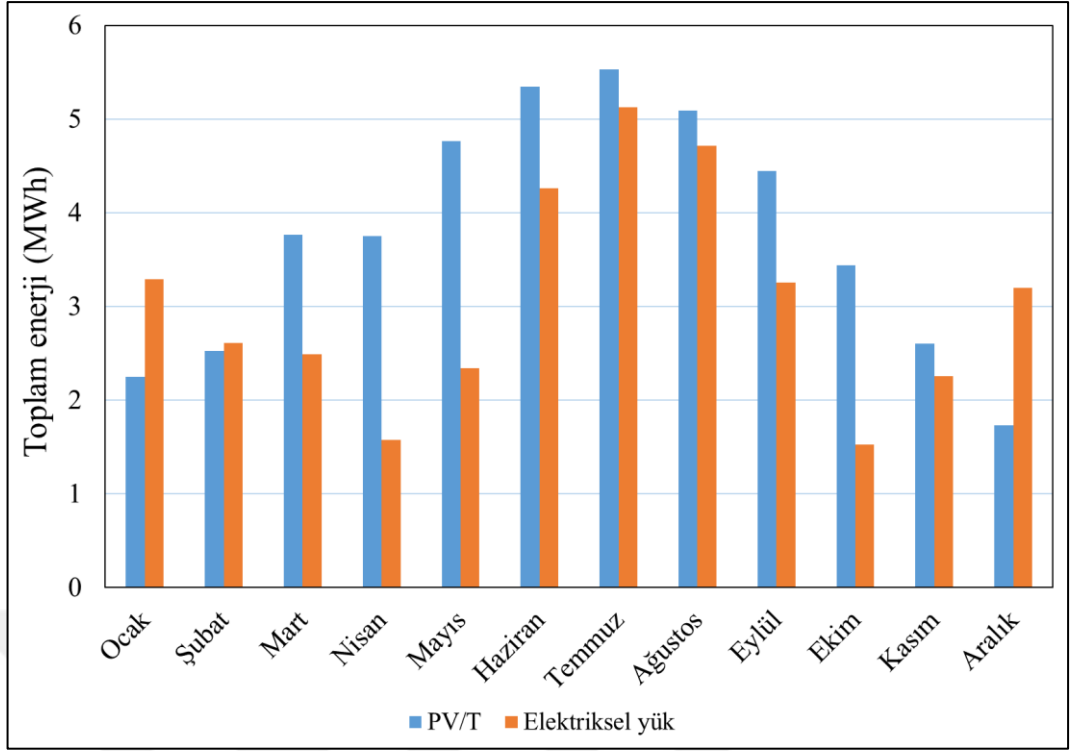
Sistem Bileşeni	Özellikler	Değer
PV/T	Hücre tipi	Monokristal
	Maksimum güç	21.83 kW
	Toplam alan	227.37 m ²
	Adet	139
Batarya	Tipi	Li-iyon
	Toplam kapasite	2640 kWh
	Başlangıç kapasitesi	2112 kWh
	Maksimum kapasite	2244 kWh
	$SOC_{başlangıç}$	0.80
	Adet	110
PEM elektrolizör	Aktif alan	100 cm ²
	Maksimum güç	19.15 kW
PEM yakıt pili	Model	H-1000XP
	Maksimum güç	11.62 kW
	Adet	13
Hidrojen depolama tankı	Model	MAHYTEC
	Başlangıçtaki hidrojen kütlesi	70 kg
	Toplam kapasite	126 kg
	Adet	30
Sıcak su depolama tankı	Kapasite	132 litre
Yardımcı ısıtıcı	Maksimum güç	4.13 kW
AC/DC dönüştürücü	Kapasite	22 kW

4.1. PV/T Panellerin Dinamik Analiz Sonuçları

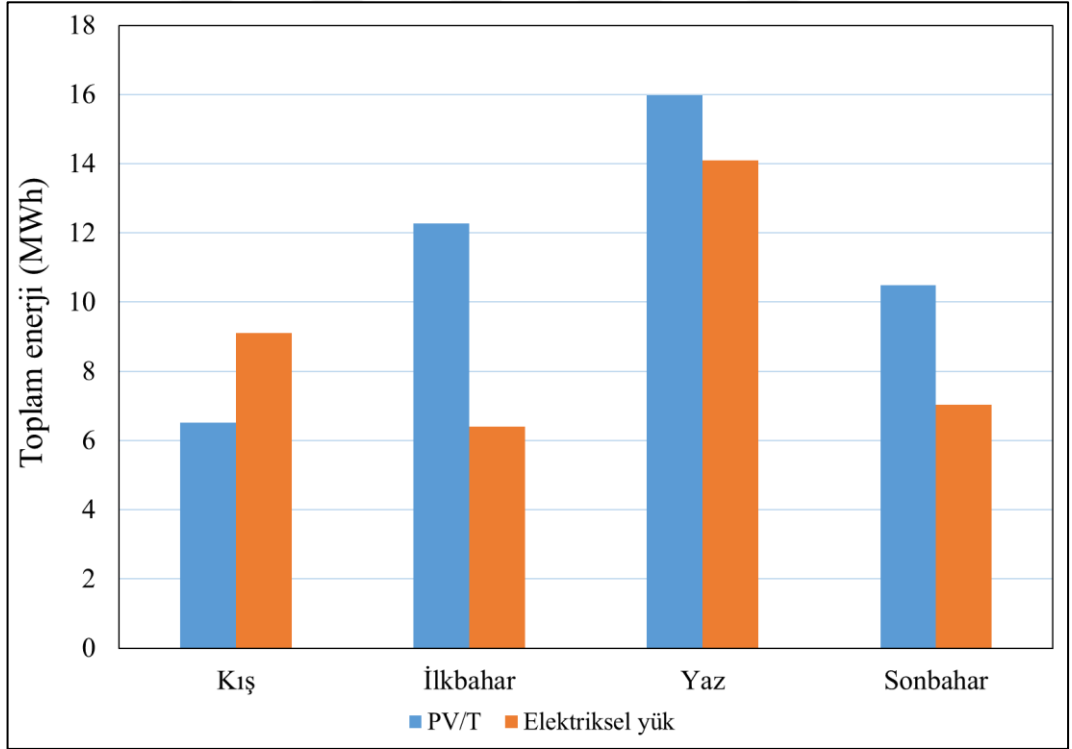
PV/T paneller tarafından üretilen toplam enerjinin ve toplam elektrik enerjisi (elektrikli aletler, aydınlatmalar, fanlar, ısıtma, soğutma, sıcak su) ihtiyacının aylara

ve mevsimlere göre değişimi şekil 4.2’de görülmektedir. şekilde görüldüğü gibi güneş ışınımının ve  evre sıcaklığının yüksek olmasından dolayı mayıs-eylül ayları arasında PV/T panellerden elde edilen enerji daha fazlayken, güneş ışınımının düşük olduğ  ekim-nisan ayları arasında PV/T panellerden daha az enerji elde edilmektedir. Ayrıca kış ayları olan aralık, ocak ve şubat aylarında evin elektrik enerjisi ihtiya ı, PV/T panellerin  rettiğ  toplam enerjiden daha fazladır. Bu aylarda PV/T paneller ile elektrik ihtiya ının karşılanamadığ  durumlarda bataryalar ve PEM-FC’ler devreye girerek elektrik ihtiya ını karşılamaktadır. PV/T paneller tarafından bir yıl boyunca üretilen toplam enerji 45.25 MWh, evin bir yıllık toplam elektrik enerjisi ihtiya ı ise 36.64 MWh olarak hesaplanmıştır.





a) Aylar



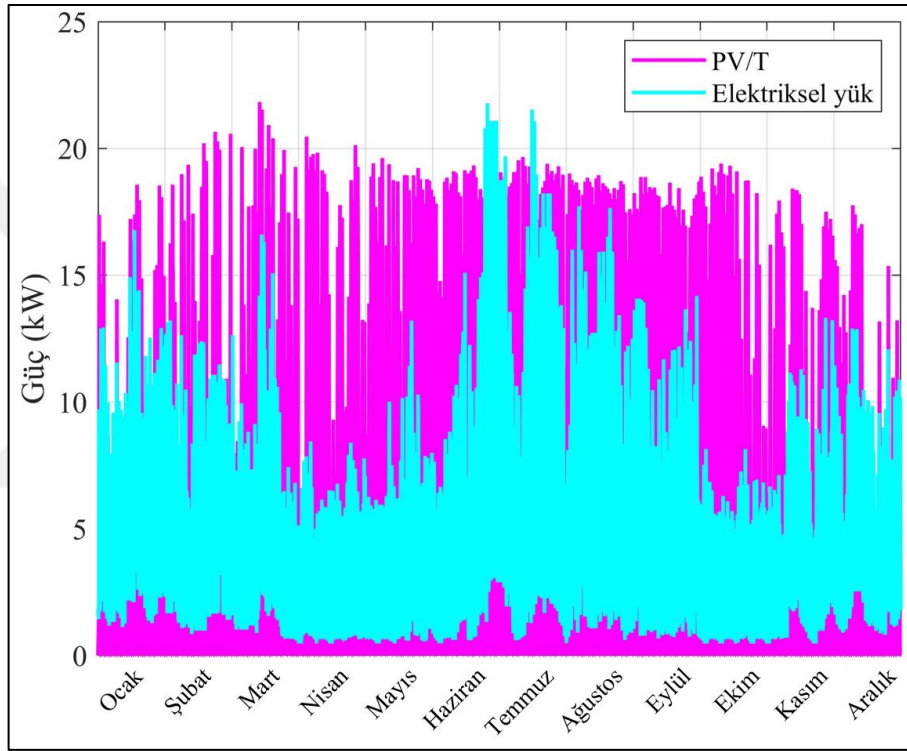
a) Mevsimler

Şekil 4.2. PV/T panellerin toplam enerjisinin aylara ve mevsimlere göre değişimi

PV/T paneller tarafından üretilen gücün ve evin elektrik ihtiyacının yıllık değişimi

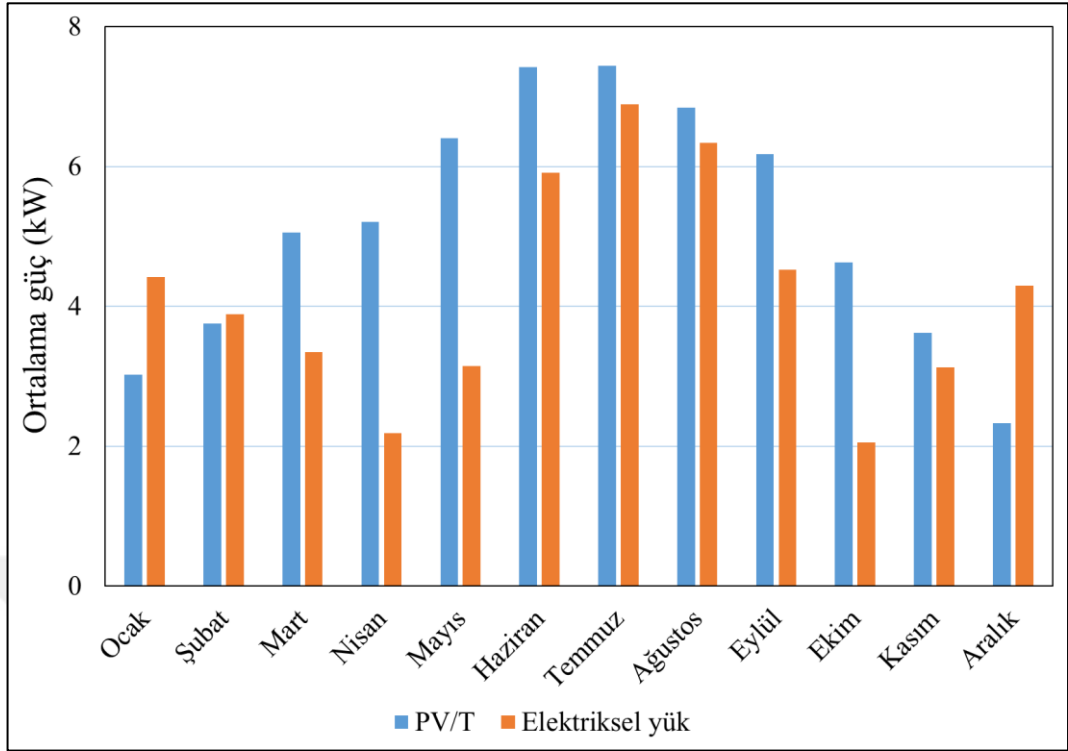
Şekil 4.3'te görülmektedir. PV/T panellerden elde edilen güç güneş ışınlamıyla doğru

orantılıdır. Şekil 3.4'te yer alan İzmir iline ait güneş ışıınım değęerlerinin yıllık değęişimi grafiği incelendiğinde güneş ışıınımının maksimum değęerine mart ayında (72.gün) ulaştığı görölmektedir. Şekil 4.3'ten göröldüğü gibi PV/T panellerden elde edilen güç de maksimum değęerine mart ayında (72. Gün) 8.4 kW ile ulaşmaktadır. Güneş ışıınımının yetersiz olduğu ya da hiç olmadığı gece saatlerinde ise PV/T paneller tarafından güç üretimi olmamaktadır. Ayrıca elektrik ihtiyacı maksimum değęerine temmuz ayının 14.gününde 22 kW ile ulaşmaktadır. Özellikle soğutma ihtiyacının yüksek olduğu yaz aylarında elektrik ihtiyacı daha yüksek değęerlerdedir.

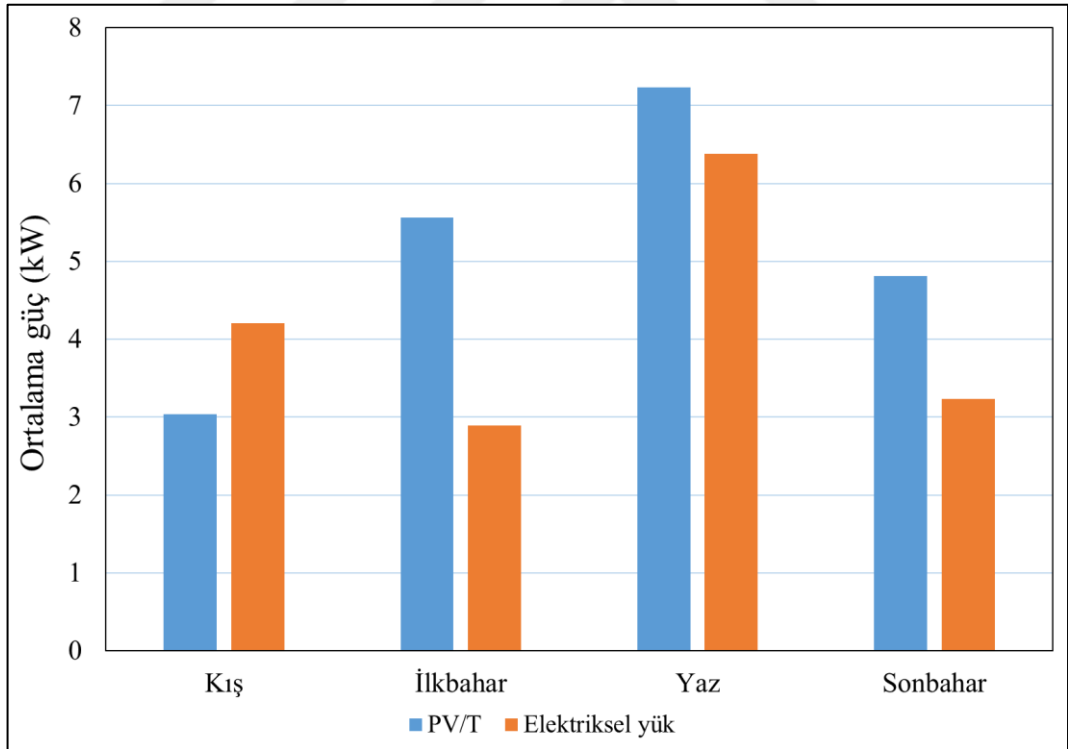


Şekil 4.3. PV/T panellerin ürettiği toplam gücün yıllık değęişimi

PV/T panellerden elde edilen gücün ve elektrik ihtiyacının aylık ve mevsimlik ortalamaları Şekil 4.4'te görölmektedir. Güneş ışıınımının ve çevre sıcaklığının artmasıyla PV/T panellerden elde edilen ortalama elektriksel güç artmaktadır. Şekilde göröldüğü gibi PV/T panellerden elde edilen maksimum ortalama güç 7.43 kW ile temmuz ayındayken, minimum güç 2.32 kW ile aralık ayındadır. Maksimum ortalama elektriksel yük (soğutma yükü) ise 6.89 kW ile temmuz ayındadır. Ayrıca mevsimler içerisinde yaz mevsiminde hem PV/T panellerin ortalama gücü hem de ortalama elektriksel yük maksimum değęerlerdedir.



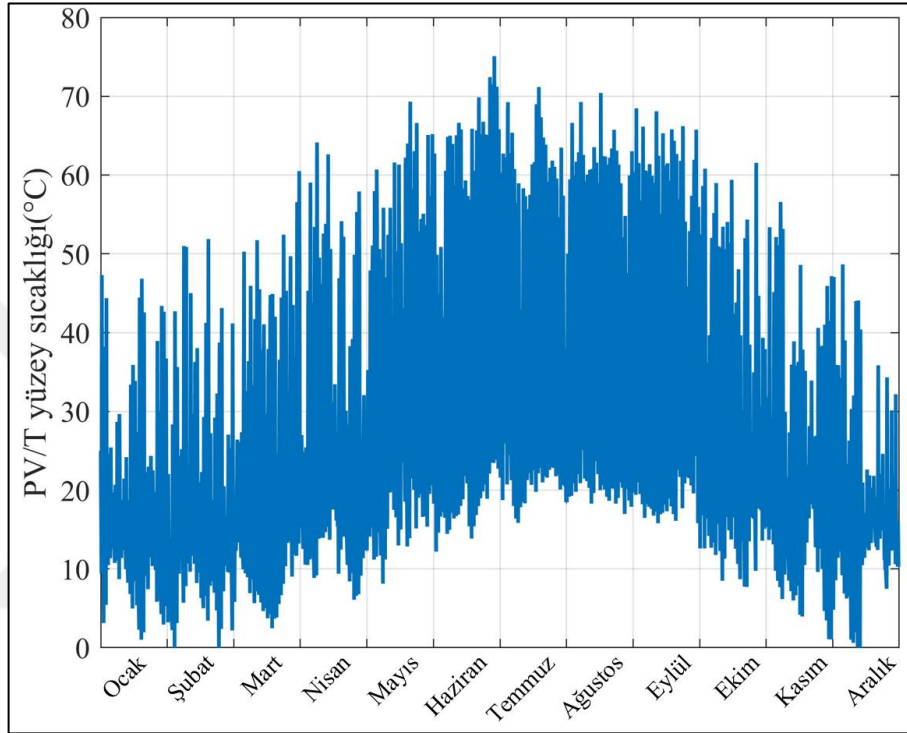
a) Aylar



b) Mevsimler

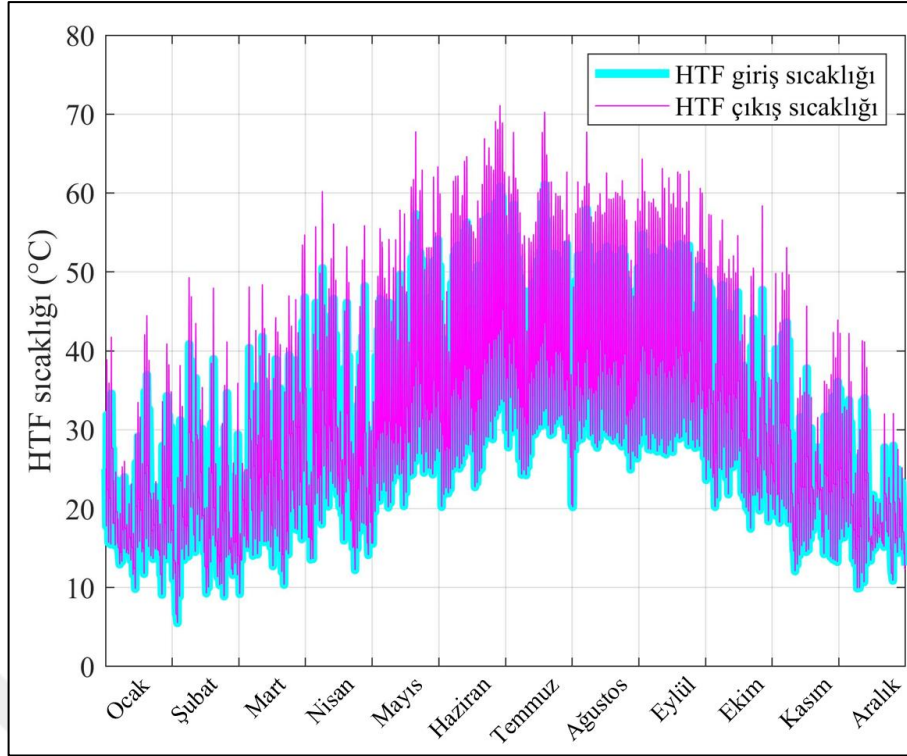
Şekil 4.4. PV/T gücü ve elektriksel yükün aylık ve mevsimlik ortalama değerleri

Şebekeden bağımsız evin elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla 139 adet PV/T panel kullanılmıştır. PV/T paneller birbirine paralel bağlı olup her birinin yüzey sıcaklığı aynıdır. Güneş ışınımının ve çevre sıcaklığının artmasıyla birlikte PV/T panellerin yüzey sıcaklığı artmaktadır. Şekil 4.5'te PV/T yüzey sıcaklığının bir yıl boyunca değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi PV/T panellerin en yüksek yüzey sıcaklığı 75.08°C ile haziran ayındadır.



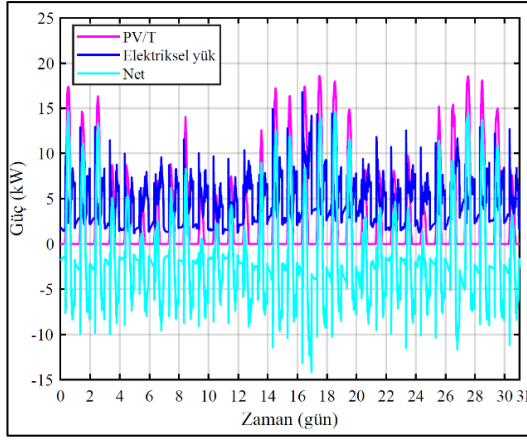
Şekil 4.5. PV/T yüzey sıcaklığının yıllık değişimi

PV/T panellerinde çalışma akışkanı olarak kullanılan etilen glikol-su karışımının giriş ve çıkış sıcaklıklarının yıllık değişimi Şekil 4.6'da görülmektedir. PV/T panellerde kullanılan etilen glikol-su karışımının toplam kütledebisi 0.0139 kg/s'dir. Her bir PV/T panelde 10 boru bulunmakta ve her bir borudan 0.00001 kg/s debi ile akışkan geçmektedir. Bir yıllık analiz sonucunda çalışma akışkanının giriş ve çıkış sıcaklıkları arasında maksimum 16.37°C sıcaklık farkı bulunmaktadır. Güneş ışınımı ve çevre sıcaklığının artmasıyla birlikte çalışma akışkanının çıkış sıcaklığı haziran ayında 71.12°C ile maksimum değere ulaşmaktadır.

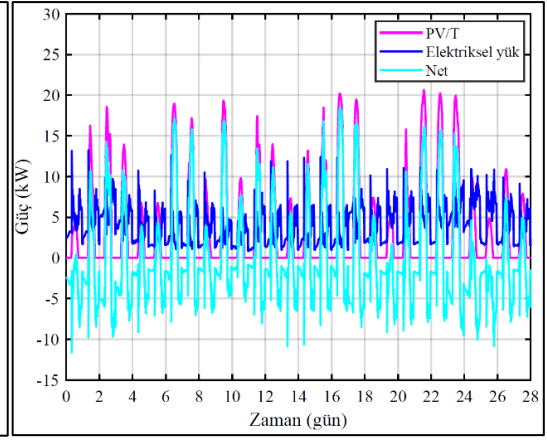


Şekil 4.6. Isı transfer akışkanının giriş ve çıkış sıcaklığının yıllık değişimi

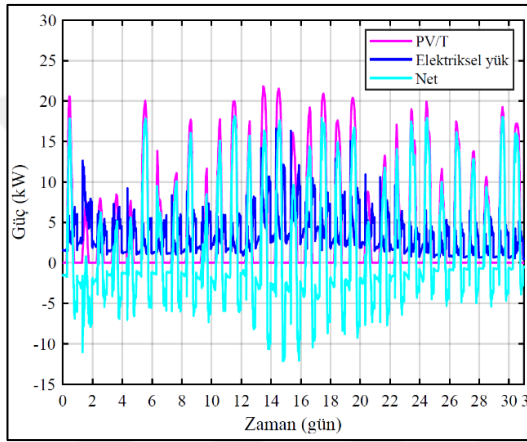
PV/T gücünün, toplam elektrik ihtiyacının ve net gücün yılın her ayı için değişimleri Şekil 4.7’de ve Şekil 4.8’de görülmektedir. PV/T gücü PV/T paneller tarafından üretilen gücü, toplam yük evin toplam elektrik ihtiyacını, net güç ise PV/T paneller tarafından üretilen güç evin elektrik ihtiyacını karşıladıktan sonra kalan gücü ifade etmektedir. Daha önce belirtildiği gibi enerji yönetim stratejisine göre, evin elektrik ihtiyacı öncelikle PV/T paneller tarafından karşılanmaktadır. PV/T paneller tarafından evin elektrik ihtiyacı karşılandıktan sonra kalan net güç ile bataryalar şarj edilmektedir. Yani net gücün pozitif çıktığı zamanlarda PV/T paneller tarafından üretilen güç evin elektrik ihtiyacından fazla olup, evin ihtiyacı PV/T paneller tarafından karşılanmaktadır. PV/T paneller tarafından evin elektrik ihtiyacının karşılanamadığı özellikle gece saatlerinde ve elektrik ihtiyacının PV/T gücünden fazla olduğu zamanlarda ise (net gücün negatif çıktığı zamanlar) elektrik ihtiyacı bataryalar ya da PEM yakıt pilleri tarafından karşılanmaktadır.



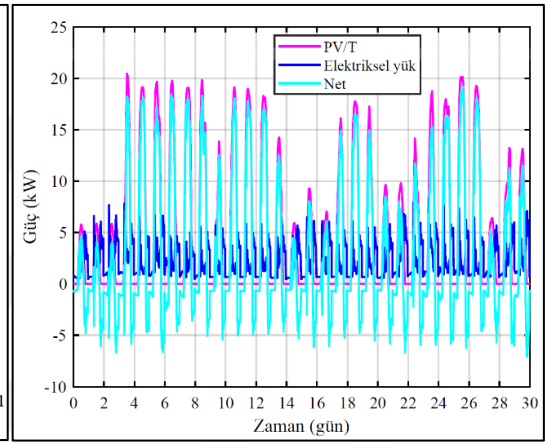
a) Ocak



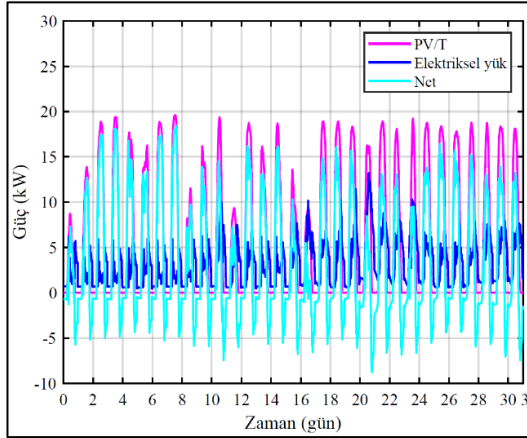
b) Şubat



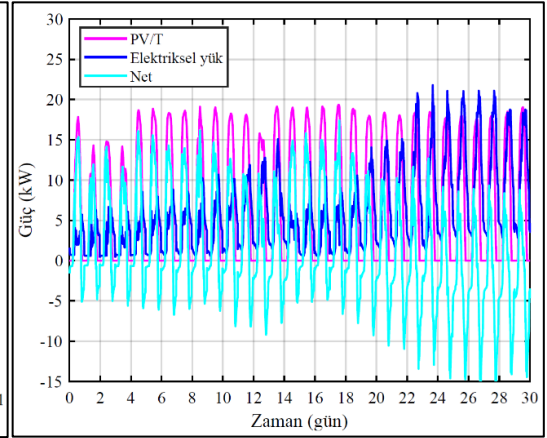
c) Mart



d) Nisan

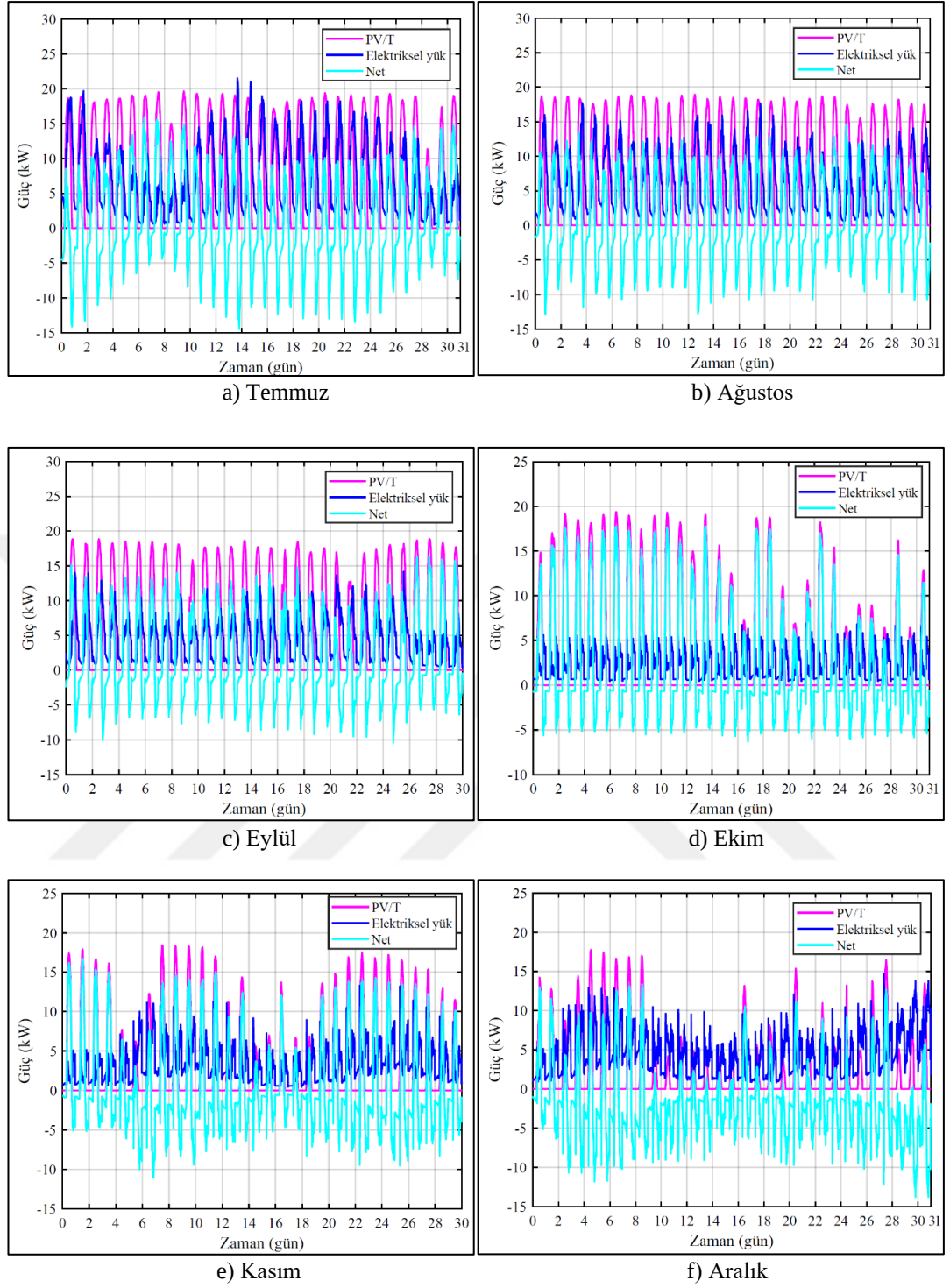


e) Mayıs



f) Haziran

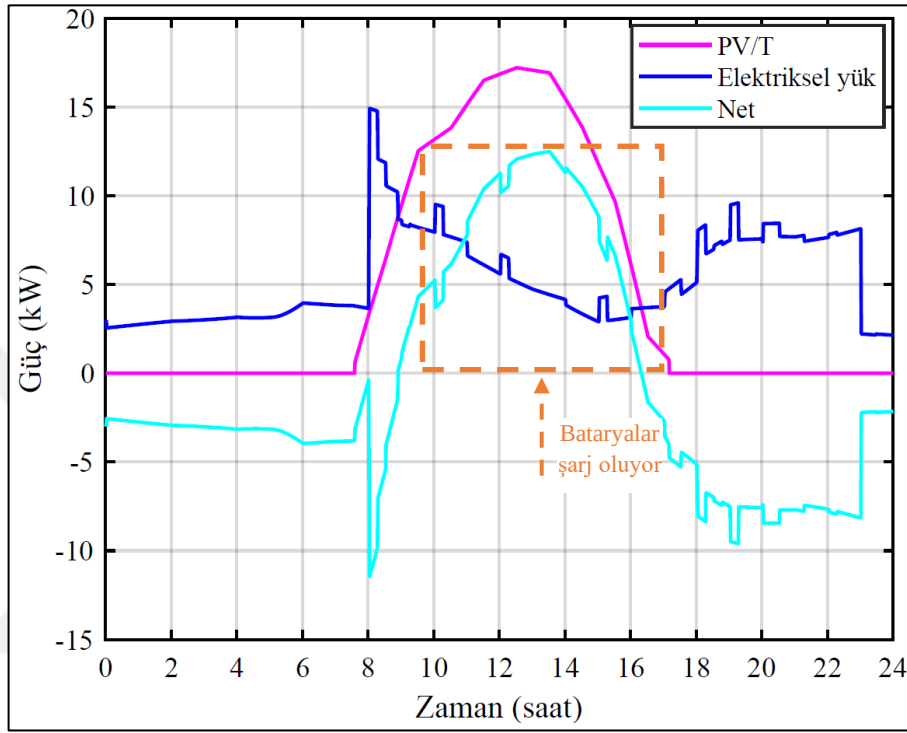
Şekil 4.7. Yılın ilk altı ayı için PV/T gücü, toplam elektriksel yük ve net gücün değişimi



Şekil 4.8. Yılın son altı için PV/T gücü, toplam elektriksel yük ve net gücün değişimi

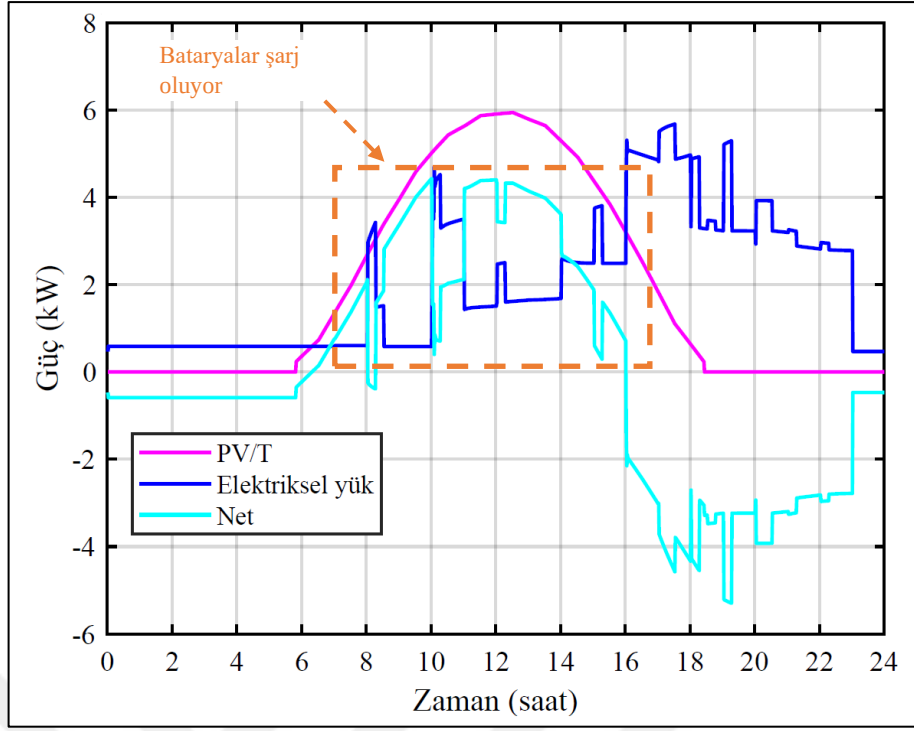
Şekil 4.9 - Şekil 4.12’de PV/T paneller tarafından üretilen gücün, toplam elektrik ihtiyacının ve net gücün ocak, nisan, temmuz ve ekim aylarının 15. günlerinde değişimi görülmektedir. Net gücün pozitif olduğu saatlerde PV/T paneller tarafından evin elektrik ihtiyacı karşılandıktan sonra kalan güç ile bataryalar maksimum şarj değerine kadar şarj olmaktadır. Bataryalar şarj edildikten sonra kalan net güç PEM

elektrolizörün nominal çalışma gücünün üstündeyse PEM elektrolizörler tarafından hidrojen üretilmektedir. Net gücün negatif olduğu saatlerde ise bataryanın şarjı ve enerjisi yeterliyse bataryalar deşarj olup evin elektrik ihtiyacını karşılamaktadır. Bataryaların enerjisinin evin elektrik ihtiyacını karşılamak için yeterli olmadığı durumlarda ise PEM yakıt piller devreye girerek elektrik ihtiyacını karşılamaktadır.



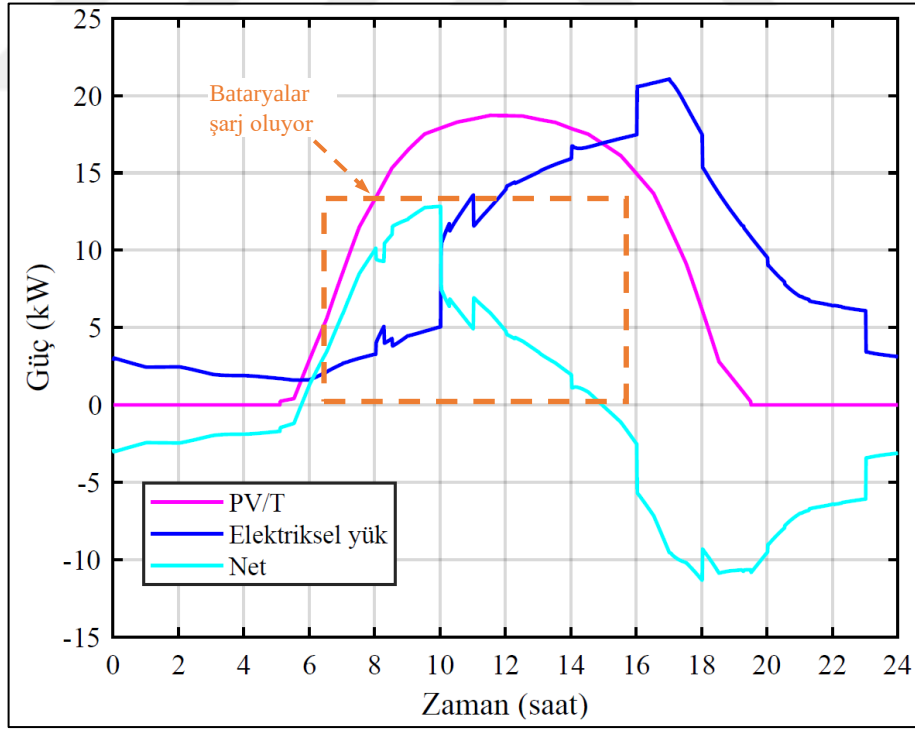
a) 15 Ocak

Şekil 4.9. 15 Ocak günü için net gücün, toplam yükün ve PV/T gücünün değişimi



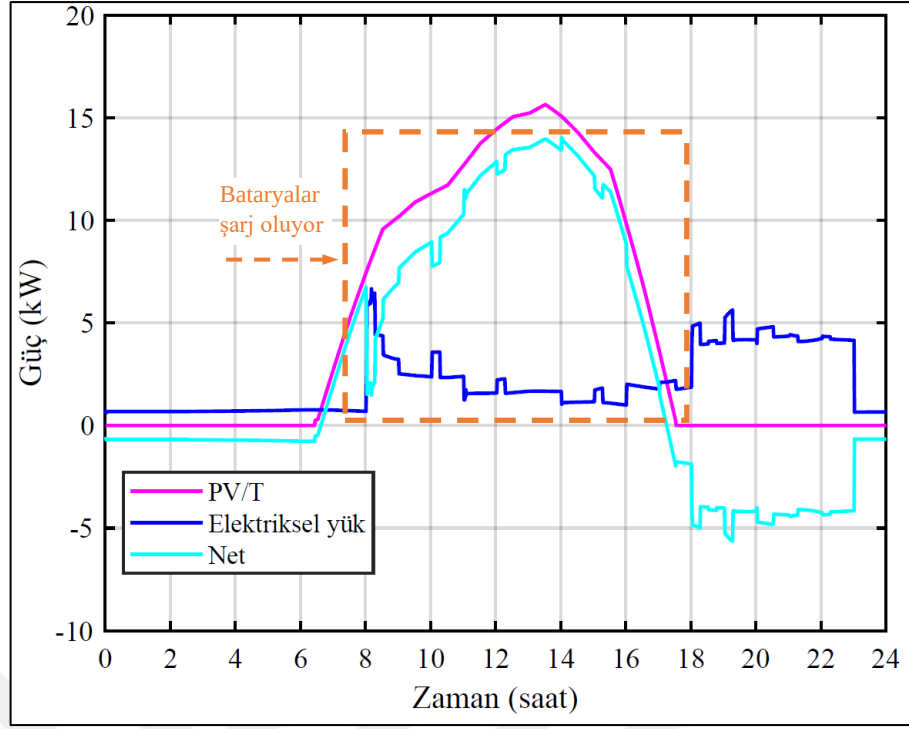
b) 15 Nisan

Şekil 4.10. 15 Nisan günü için net gücün, toplam yükün ve PV/T gücünün değişimi



c) 15 Temmuz

Şekil 4.11. 15 Temmuz günü için net gücün, toplam yükün ve PV/T gücünün değişimi



d) 15 Ekim

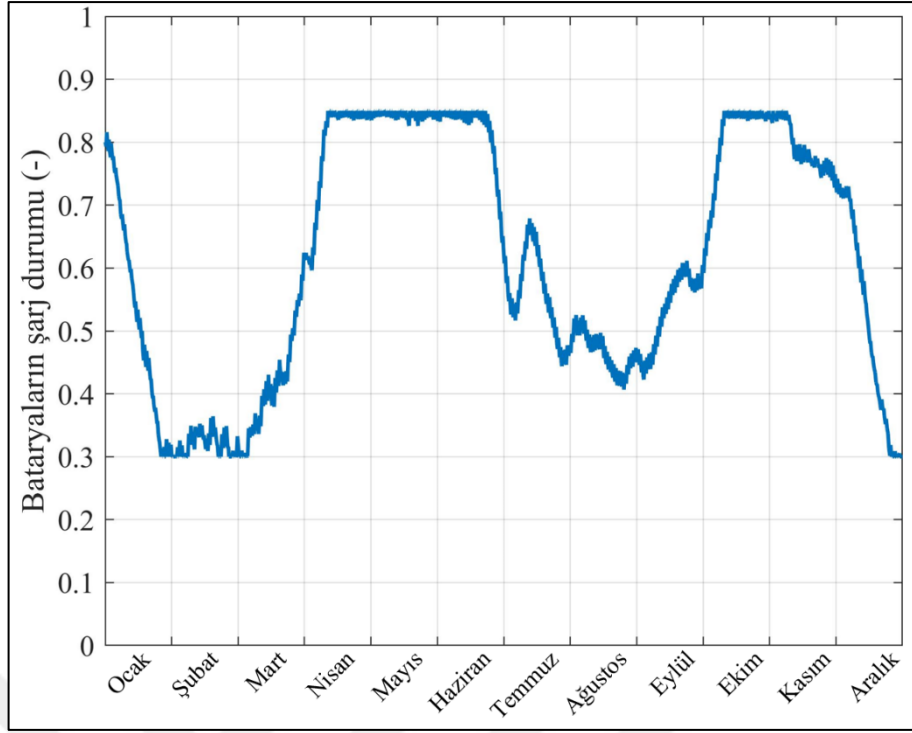
Şekil 4.12. 15 Ekim için net gücün, toplam yükün ve PV/T gücünün değişimi

4.2. Bataryaların Dinamik Analiz Sonuçları

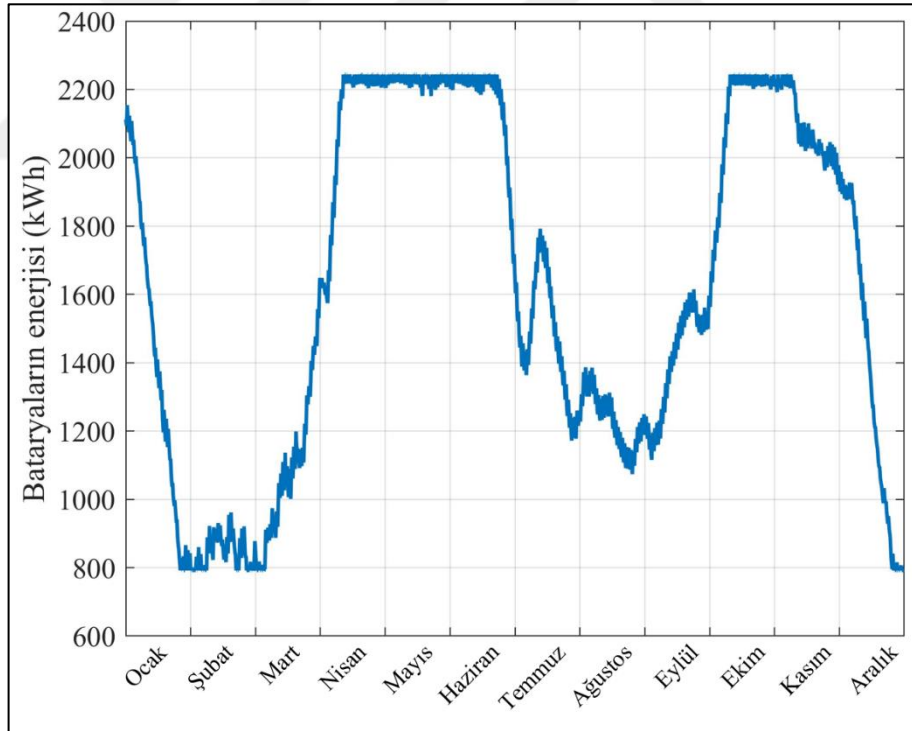
Genellikle yüzdelik olarak ifade edilen batarya şarj durumu (boyutsuz sayı olarak 0-1 arasında değişmektedir) bataryada kalan enerji kapasitesi hakkında bilgi vermektedir. Bu tez çalışmasında bataryanın ulaşabileceği maksimum şarj değeri 0.85, minimum şarj değeri 0.30 olup, başlangıçta bataryaların doluluk oranı 0.80 olarak kabul edilmiştir. Şekil 4.13(a)'da görüldüğü gibi yıl boyunca batarya şarj değeri 0.3-0.85 arasında değişmektedir. Batarya şarjının azaldığı günlerde batarya deşarj olarak evin elektrik ihtiyacını karşılamaktadır (PV/T paneller elektrik ihtiyacını karşılayamıyor). Özellikle ısıtma ve soğutma ihtiyacının fazla olduğu (aralık, ocak, şubat, temmuz, ağustos) aylarda bataryaların şarjı diğer aylara göre daha düşük değerlerdedir. Bunun nedeni güneş ışınımının olmadığı ya da yetersiz olduğu dönemlerde evin elektrik ihtiyacının bataryalar ile karşılanmasıdır. Özellikle aralık, ocak ve şubat aylarında bataryaların şarjı belli günlerde minimum şarj değerine düşmektedir. Bu günlerde bataryalar elektrik ihtiyacını karşılayamayacağı için PEM-FC'ler devreye girmektedir. Bataryaların şarjının arttığı günlerde ise PV/T paneller tarafından elektrik ihtiyacı karşılanmakta, kalan güç ile bataryalar şarj edilmektedir. Bataryalar şarj edildikten sonra kalan güç ile hidrojen üretilmektedir (Kalan net güç PEM-El'in nominal çalışma

gücünün üstündeyse). Bataryaların şarjının maksimum şarj değerinde olduğu yani bataryaların tamamen dolu olduğu durumda ise net güç doğrudan PEM-El'de hidrojen üretimi için kullanılmaktadır. Bu durumda PEM-El'e gelen net güç PEM-El'in nominal çalışma gücünün üstündeyse hidrojen üretilmektedir. Şekil 4.13(b)'de ise bataryaların enerjilerinin yıl boyunca değişimi görülmektedir. Başlangıçta %80 dolu olan bataryaların toplam enerjisi 2 112 kWh olarak hesaplanmıştır. Evin elektrik ihtiyacının bataryalardan karşılandığı durumda bataryaların enerjisi azalmaktadır (batarya deşarj modu). PV/T paneller tarafından evin elektrik ihtiyacının karşılanıp kalan net güç ile bataryaların şarj edildiği zamanlarda ise bataryaların enerjisi artmaktadır (batarya şarj modu)





a) Bataryaların şarjı

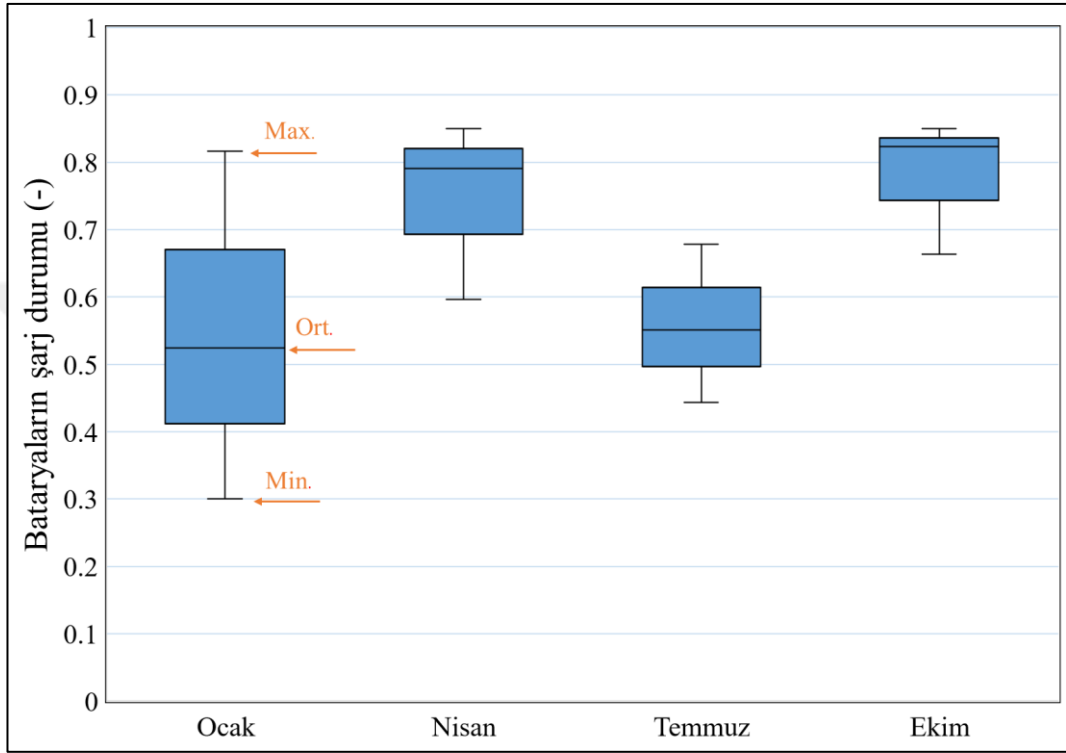


b) Bataryaların enerjisi

Şekil 4.13. Bataryaların şarjının ve enerjisinin yıl boyunca değişimi

Şekil 4.14’te batarya şarj durumunu yani kapasitesine göre batarya şarj düzeyini temsil etmek için mum grafiği kullanılmıştır. Her mevsimde seçilen bir ay için bataryaların maksimum şarj değeri 0.85 olarak hesaplanmıştır. Ocak, nisan, temmuz ve ekim ayları

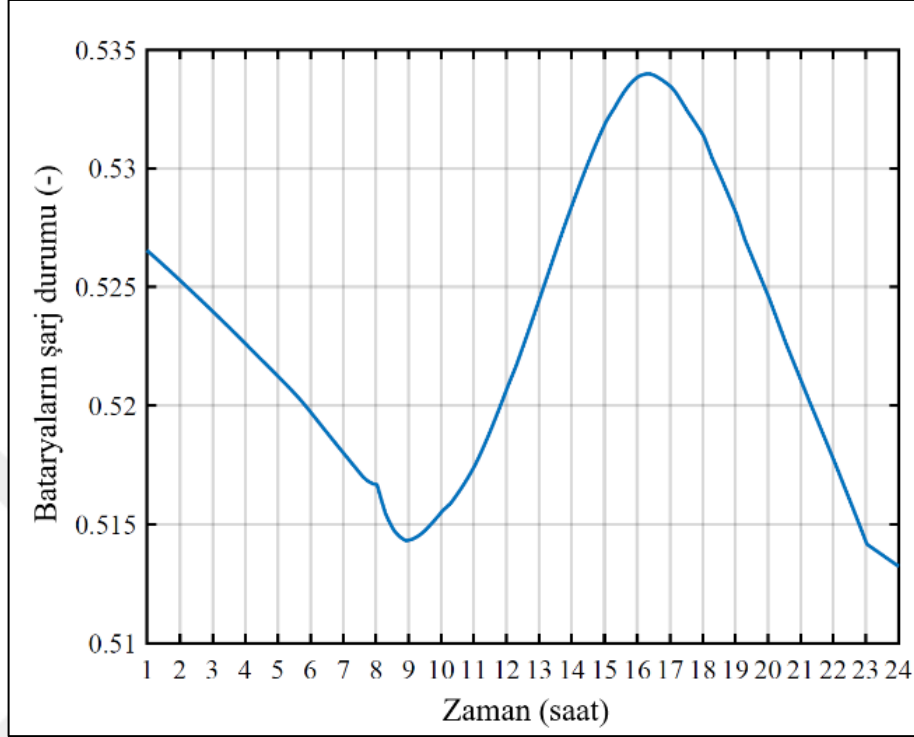
için minimum şarj değeri sırasıyla 0.3, 0.6, 0.44 ve 0.66'dir. Ocak ve temmuz aylarında bataryaların şarjının minimum değerlerde çıkmasının nedeni, evin elektrik ihtiyacının bu aylarda fazla olması ve bu ihtiyacın öncelikle PV/T-batarya kombinasyonu ile sağlanmasındandır. Ocak ayının son günlerinde bataryaların şarjı minimum şarj değerinde olduğu için bu günlerde elektrik ihtiyacı PEM-FC'ler ile karşılanmaktadır.



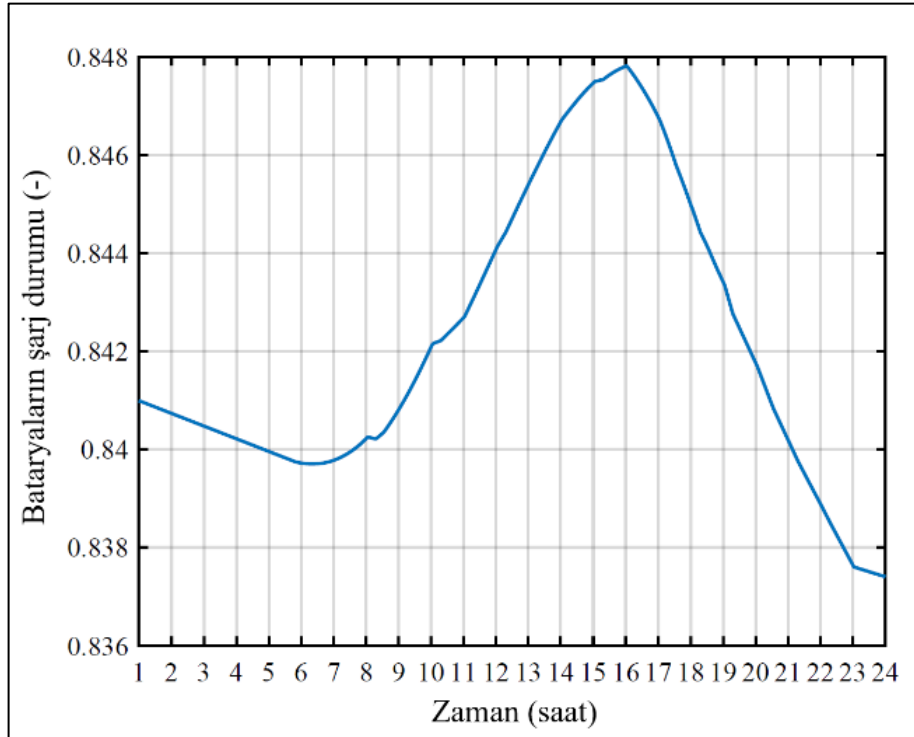
Şekil 4.14. Seçilen dört ay için bataryaların şarj durumu

Ocak, nisan, temmuz ve ekim aylarının 15. günleri için batarya şarj durumlarının değişimi Şekil 4.15 - Şekil 4.18'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi 15 Ocak günü 01:00-09:00 ve 16:30-24:00 saatleri arası, 15 Nisan günü 01:00-08:00 ve 16:00-24:00 saatleri arası, 15 Temmuz günü 01:00-06:00 ve 16:00-24:00 saatleri arası, 15 Ekim günü 01:00-07:00 ve 17:30-24:00 saatleri arasında bataryaların şarjı azalmaktadır. Bu azalmaların nedeni güneş ışınımının olmadığı ya da yetersiz olduğu durumlarda bataryanın deşarj olarak evin elektrik ihtiyacının karşılanmasıdır. Güneş ışınımının artmaya başladığı saatlerde ise PV/T paneller tarafından güç üretilerek evin elektrik ihtiyacı karşılanmakta ve kalan net güç ile bataryalar şarj edilmektedir. 15 Ocak günü 08:30-16:30, 15 Nisan günü 07:00-16:00, 15 Temmuz günü 06:00-16:00 saatleri arasında, 15 Ekim günü ise 07:00-12:00 saatleri arasında bataryalar şarj olmaktadır. Ayrıca 15 Ekim günü incelediğinde bataryaların ulaşabilecekleri

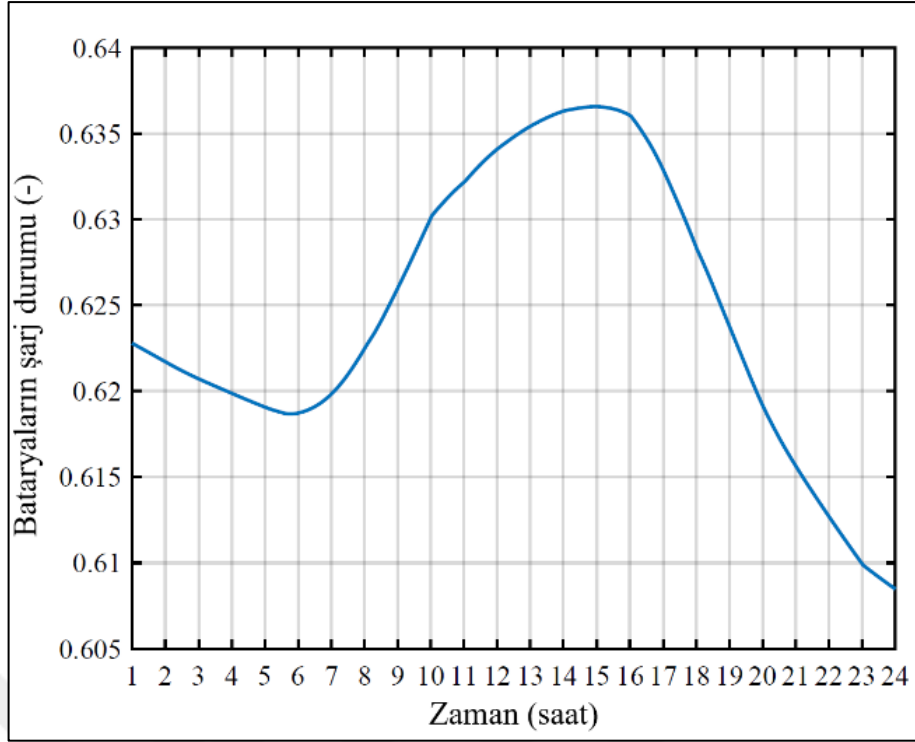
maksimum şarj değerine (0.85) ulaştığı görülmektedir. Bataryalar maksimum şarj değerine ulaştıktan sonra fazla enerji, hidrojen üretimi için PEM elektrolizörlerde kullanılmaktadır.



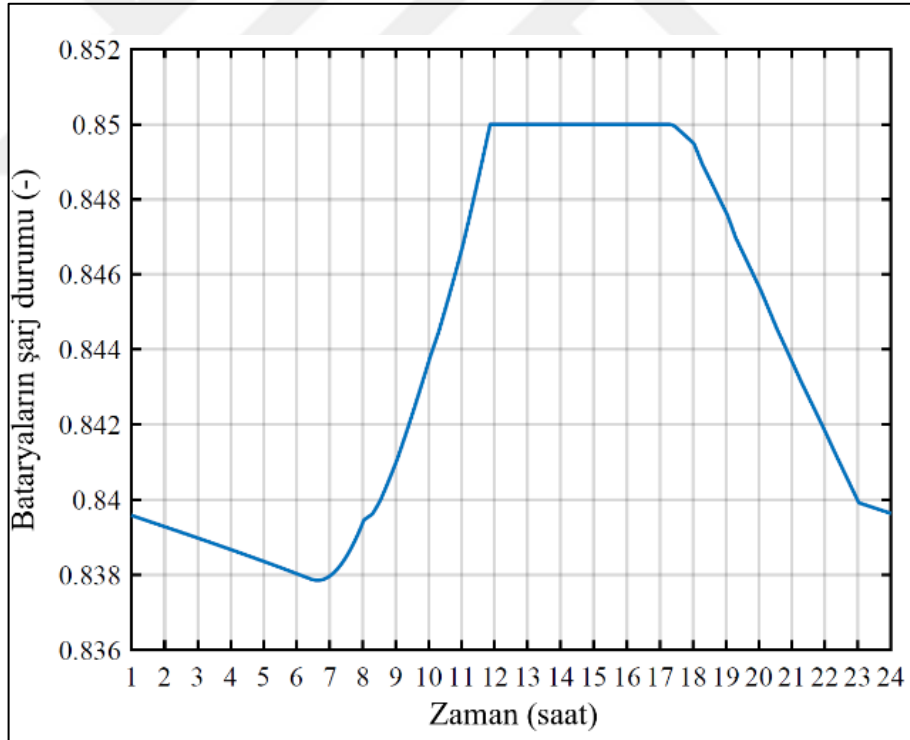
Şekil 4.15. 15 Ocak günü için bataryaların şarj durumunun değişimi



Şekil 4.16. 15 Nisan günü için bataryaların şarj durumunun değişimi



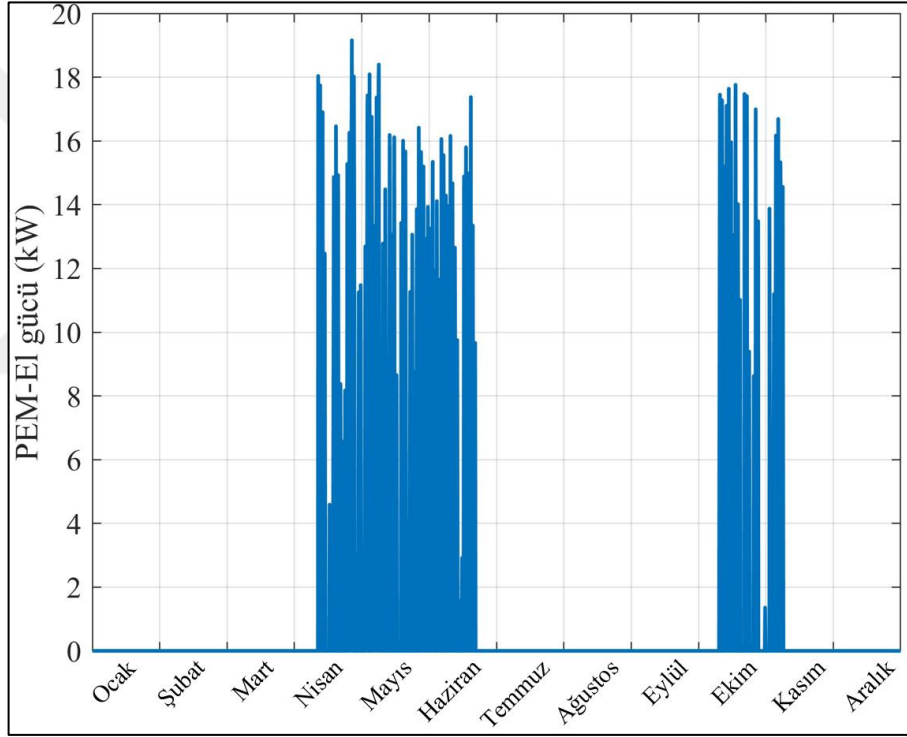
Şekil 4.17. 15 Temmuz günü için bataryaların şarj durumunun değişimi



Şekil 4.18. 15 Ekim günü için bataryaların şarj durumunun değişimi

4.3. PEM Elektrolizörün Dinamik Analiz Sonuçları

PV/T panellerden elde edilen gücün elektrik talebini karşıladığı durumlarda kalan güç ile bataryalar şarj olmaktadır. Bataryalar tamamen şarj olduktan sonra kalan net güç ile PEM elektrolizörün çalışıp çalışmayacağı kontrol edilmektedir. PEM elektrolizöre gelen net güç elektrolizörün nominal çalışma gücünün (400 W) üstünderse hidrojen üretilmektedir. Şekil 4.19’de PEM elektrolizör gücünün yıllık değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi PEM elektrolizör gücü 0-20 kW arasında değişmektedir. Maksimum PEM-El gücü nisan ayında 19.12 kW olup, yılın belli günlerinde PEM elektrolizör gücü 0’dır. Yani bu günlerde hidrojen üretimi olmamaktadır.

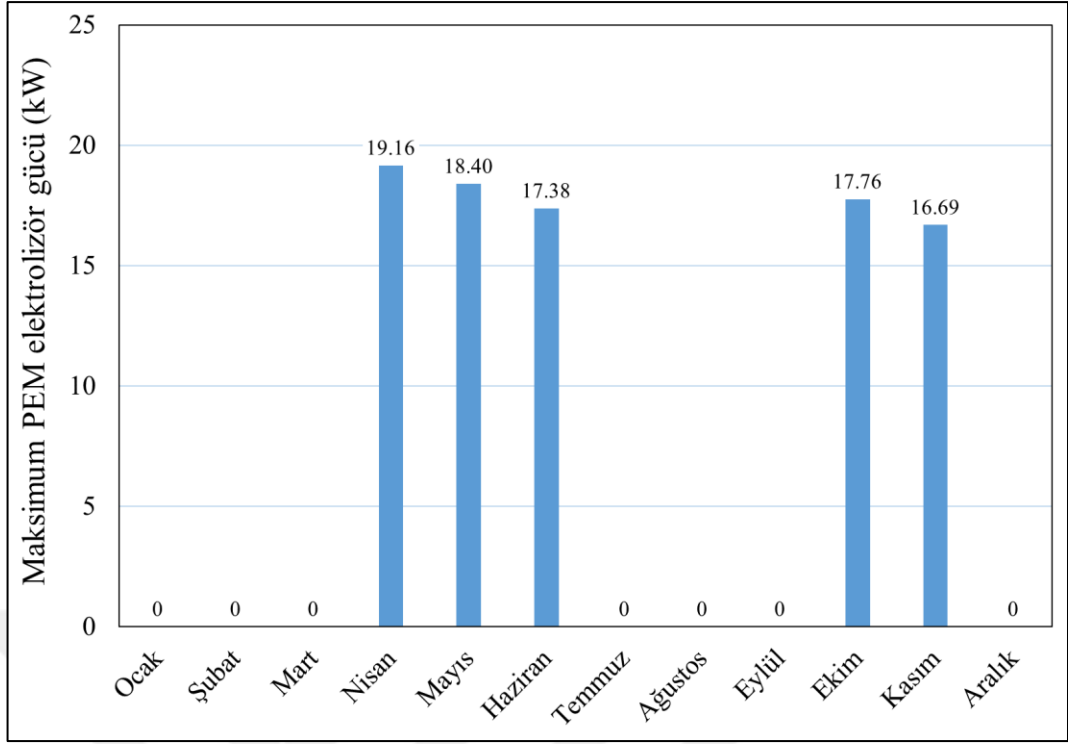


Şekil 4.19. PEM elektrolizör gücünün yıllık değişimi

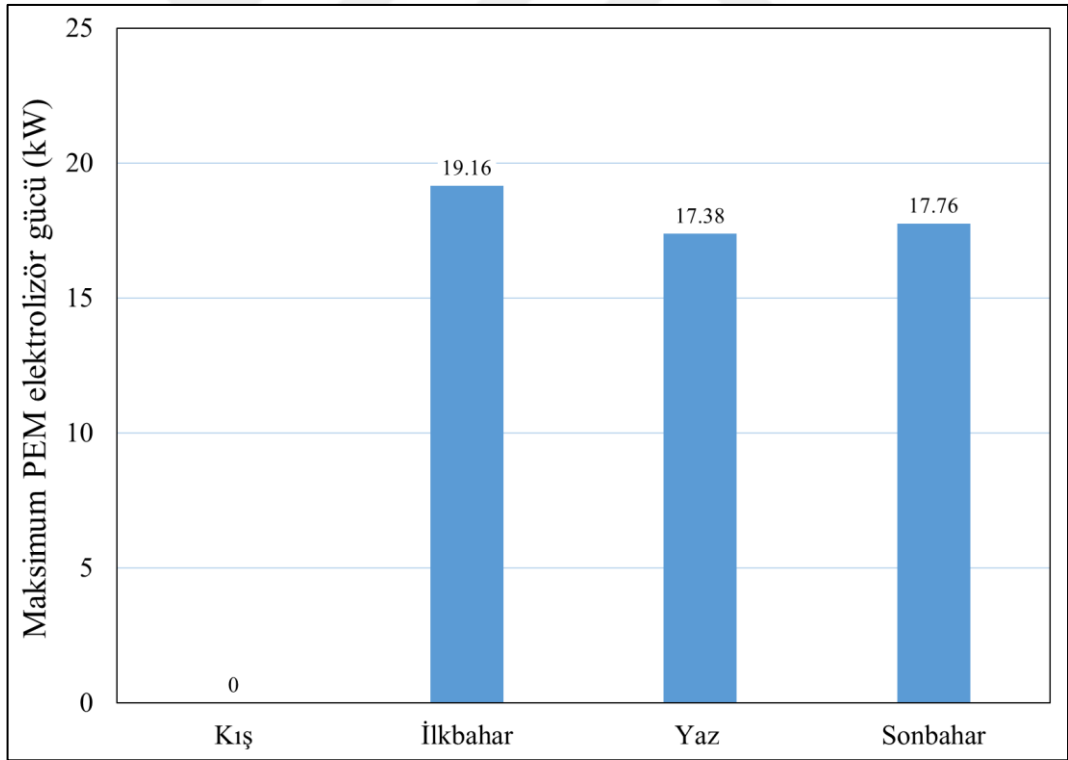
Şekil 4.20’de maksimum PEM elektrolizör gücünün aylara ve mevsimlere göre değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi maksimum PEM elektrolizör gücü 19.16 kW ile nisan ayındadır. Aralık-mart ayları arası ve temmuz-eylül arasında PEM elektrolizör gücü 0 olup bu aylarda PEM elektrolizörler aktif değildir (Hidrojen üretimi yok). Mevsimler içerisinde ise maksimum PEM elektrolizör gücü ilkbahar mevsiminde 19.16 kW olup, kış mevsiminde PEM elektrolizör 0’dır. Yaz mevsiminde maksimum PEM elektrolizör gücünün ilkbahar ve sonbahar mevsimlerine göre düşük

olmasının nedeni, yaz mevsiminde soğutma yükünün çok fazla olmasıdır. Enerji yönetim stratejisine göre öncelikle PV/T paneller tarafından evin elektrik ihtiyacı karşılanmakta daha sonra bataryalar şarj olmaktadır. Bataryaların şarjı tamamlandıktan sonra kalan net güç elektrolizör gücünü oluşturmaktadır.





a) Aylar

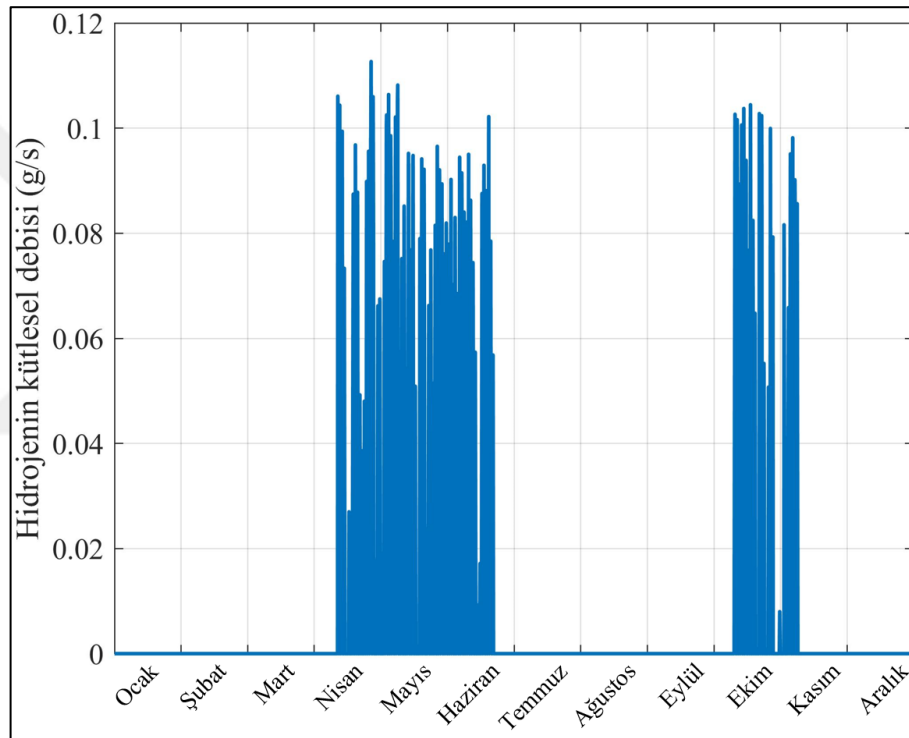


b) Mevsimler

Şekil 4.20. Maksimum PEM elektrolizör gücünün aylara ve mevsimlere göre değişimi

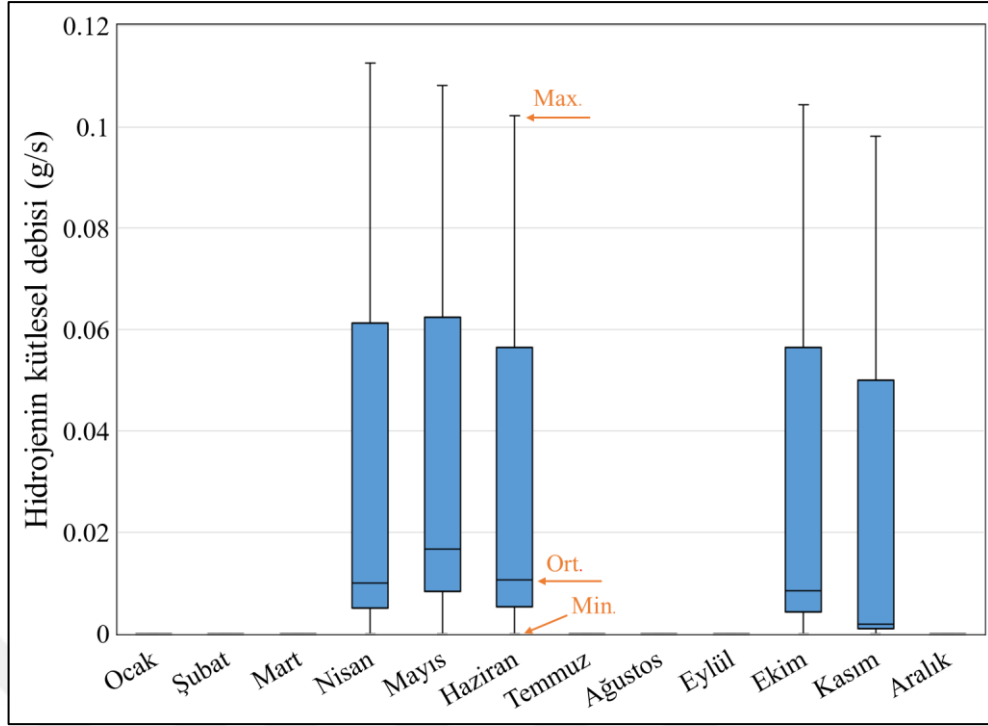
Enerji yönetim stratejisine göre bataryalar tamamen şarj olduktan sonra kalan net güç PEM elektrolizöre gönderilmektedir. Net gücün PEM elektrolizörün nominal çalışma

noktası olan 400 W değerinden büyük olduğu durumlarda hidrojen üretilmektedir. PEM elektrolizörün değişken güçlerde çalışmasının sonucu olarak bir yıl boyunca farklı miktarlarda hidrojen üretilmektedir. Yıl boyunca PEM elektrolizör tarafından üretilen hidrojenin kütleli debi değişimi Şekil 4.21’te görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi PEM elektrolizör tarafından üretilen hidrojenin kütleli debisi yıl boyunca 0-0.12 g/s arasında değişmektedir. Şekil 4.19 (PEM elektrolizör gücünün yıllık değişimi) ile bağlantılı olarak PEM elektrolizörün çalışmadığı günlerde hidrojen üretimi olmamakta, PEM elektrolizöre gelen net güç arttıkça hidrojen üretimi artmaktadır.



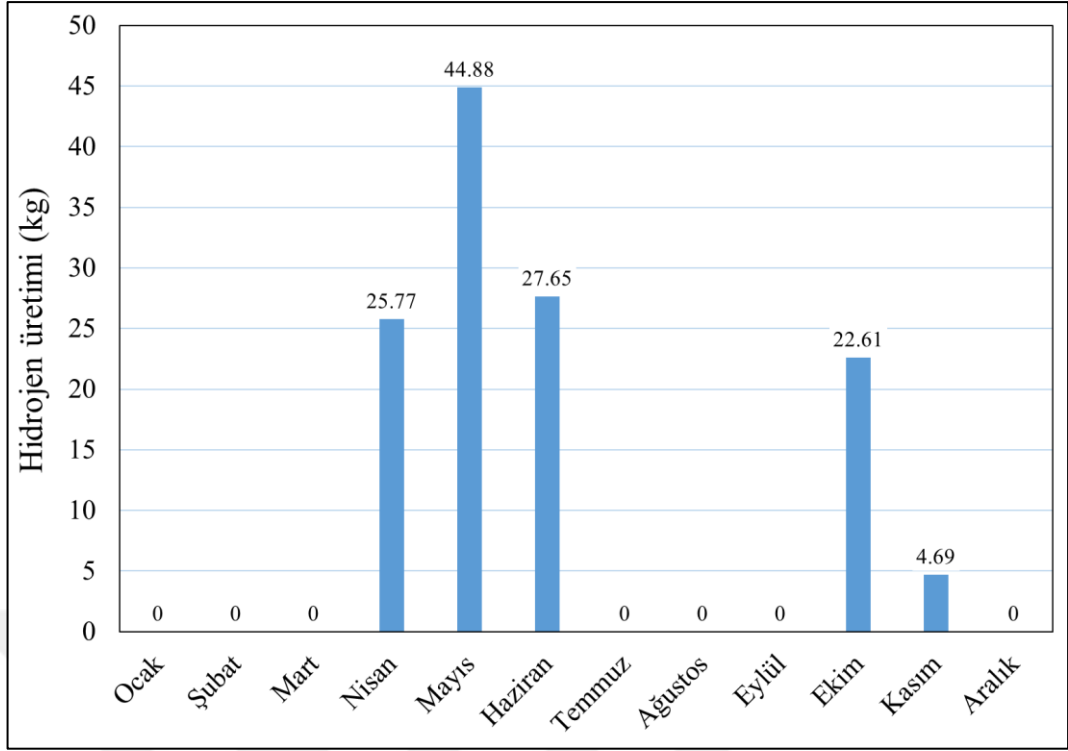
Şekil 4.21. Hidrojenin kütleli debisinin yıllık değişimi

PEM elektrolizör tarafından bir yıl boyunca üretilen hidrojenin kütleli debilerinin minimum, maksimum ve ortalama değerleri Şekil 4.22’te görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi nisan ayında üretilen hidrojenin kütleli debisinin maksimum değeri 0.11 g/s, ortalama değeri 0.0099 g/s, minimum değeri ise 0’dır. Hidrojenin kütleli debisinin ortalama değeri incelendiğinde en yüksek hidrojen üretimi, ortalama değerin en yüksek olduğu Mayıs ayındadır.



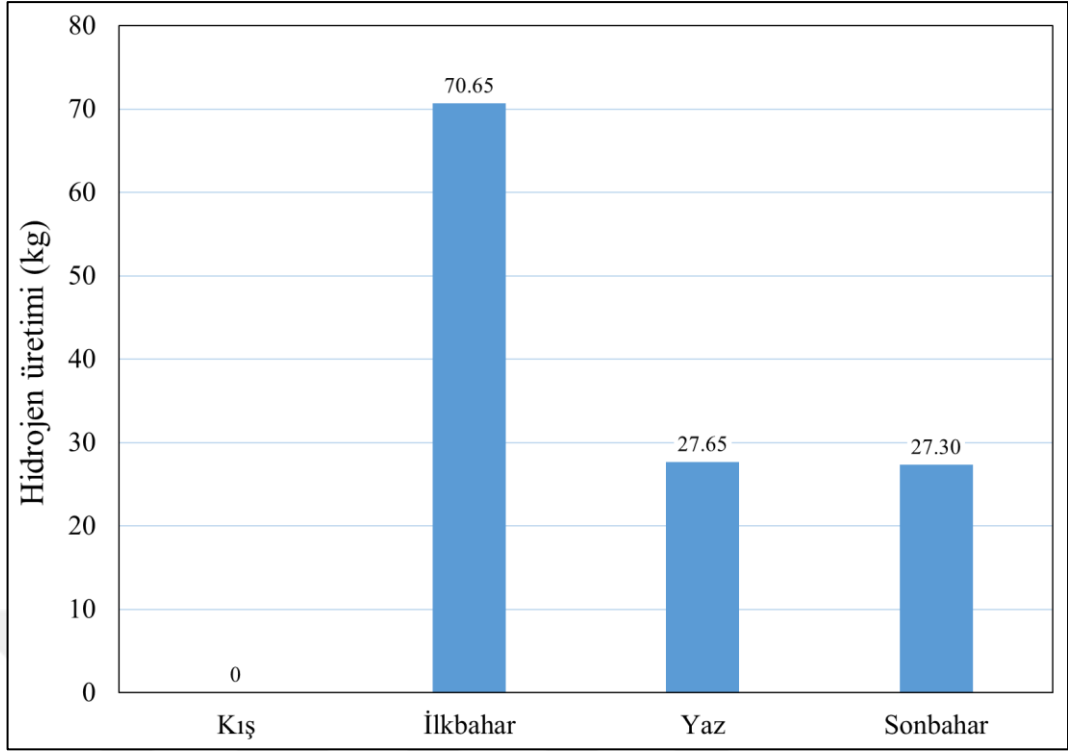
Şekil 4.22. Seçilen dört ay için hidrojenin kütleli debisi

Enerji yönetim stratejisine göre elektrolizörlerin devreye girebilmesi için öncelikle evin elektrik ihtiyacının karşılanması gerekmektedir. Evin elektrik ihtiyacı karşılandıktan sonra kalan güç ile bataryalar şarj edilmektedir. Bataryalar maksimum şarj değerine ulaştıktan sonra PV/T panellerden elde edilen fazla elektriksel güç elektrolizörün çalışması için kullanılmaktadır. PEM-El tarafından üretilen hidrojen miktarının aylara göre değişimi Şekil 4.23'te görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi en fazla hidrojen üretimi toplam 44.88 kg ile Mayıs ayındadır. Mayıs ayını sırası ile 27.65 kg ile Haziran, 25.77 kg ile Nisan ayı takip etmektedir. Soğutma ihtiyacının maksimum olduğu Temmuz, Ağustos aylarında ve ısıtma ihtiyacının maksimum olduğu Aralık-Şubat ayları arasında hidrojen üretimi olmamaktadır. Bunun nedeni, özellikle bu aylarda evin elektrik ihtiyacı maksimum değerlerde olmasıdır. Elektrik ihtiyacı karşılanıp bataryalar şarj edildikten sonra kalan net güç hidrojen üretimine yetmediği için bu aylarda hidrojen üretilmemektedir.



Şekil 4.23. Hidrojen üretiminin aylara göre değişimi

Hidrojen üretiminin mevsimlere göre değişimi Şekil 4.24'te görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi en fazla hidrojen üretimi 70.65 kg ile ilkbahar mevsimindedir. İlkbahar mevsimini 27.65 kg ile yaz mevsimi ve 27.30 kg ile sonbahar mevsimi takip ederken kış mevsiminde hidrojen üretilmemektedir. Yaz mevsiminde diğer mevsimlere göre daha az hidrojen üretilmesinin nedeni bu mevsimde soğutma ihtiyacının çok fazla olmasıdır.

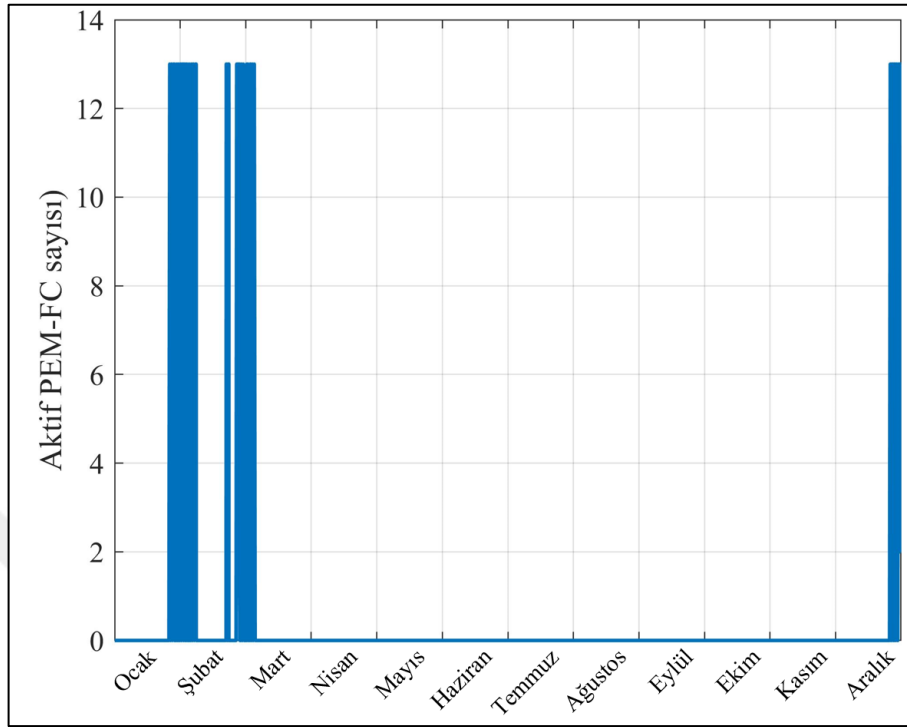


Şekil 4.24. Hidrojen üretiminin mevsimlere göre değişimi

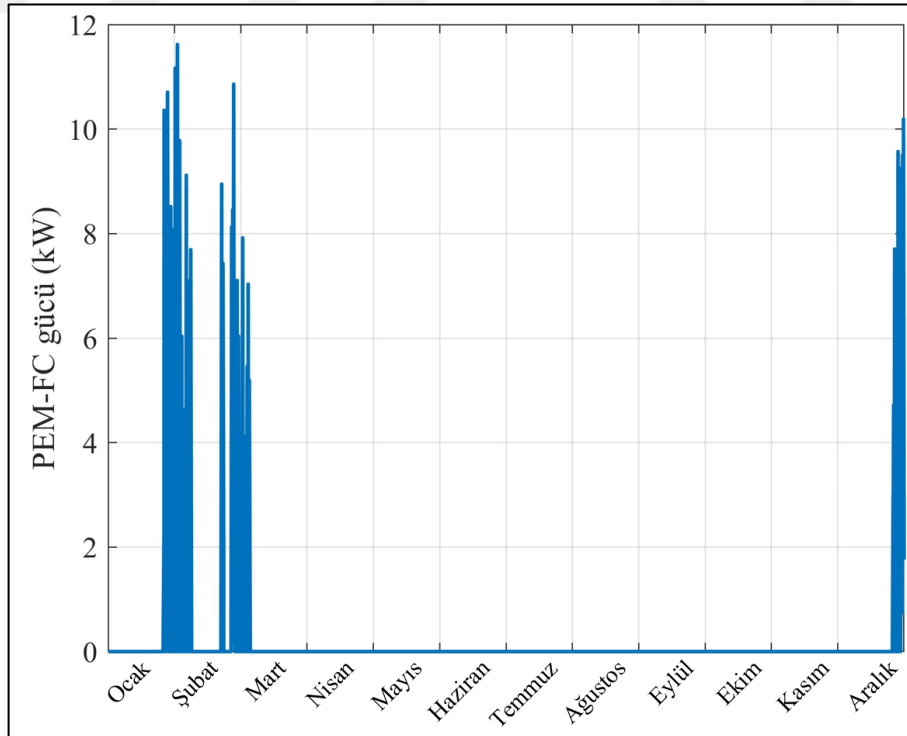
4.4. PEM Yakıt Pili Dinamik Analiz Sonuçları

Elektrik ihtiyacının PV/T'ler ve bataryalar ile karşılanamadığı yani net gücün negatif olduğu ve bataryaların deşarj olabilmek için yeterli enerjiye sahip olmadığı durumlarda (bataryaların şarjı belirlenen minimum şarj değerinde) PEM-FC'ler devreye girerek evin elektrik ihtiyacını karşılamaktadır. Yapılan yıllık analizler sonucunda bu tez çalışması kapsamında toplam 13 adet H1000XP PEM-FC kullanılmıştır. Evin elektrik ihtiyacının $0 \leq P_{yük} < 1200$ W olması durumunda belirli sayıdaki yakıt pili en verimli çalışma noktası olan 600 W gücünde çalışmaktadır. Elektrik ihtiyacının $1200 \leq P_{yük}$ olması durumunda ise tüm yakıt pilleri aktif olup aynı güçte çalışmaktadır. Şekil 4.25(a)'da yıl boyunca aktif olan PEM-FC sayısı, Şekil 4.25(b)'de ise toplam PEM-FC gücünün yıl boyunca değişimi görülmektedir. Şekil 4.25(a)'da görüldüğü gibi 25 Ocak-5 Şubat arası, mart ayının ilk günlerinde ve aralık ayının belli günlerinde tüm PEM-FC'ler aktiftir. Ayrıca ocak, şubat ve aralık ayının belli günlerinde değişken sayılarda PEM-FC'ler aktiftir. Şekil 4.25(b)'de görüldüğü gibi aralık, ocak, şubat ve mart aylarının belli günlerinde güneş ışıının yetersiz olması ve bataryaların minimum şarj değerinde olmasından dolayı PEM-FC'ler aktif

olup elektrik ihtiyacını karşılamaktadır. Mart-kasım ayları arasında ise PEM-FC'ler aktif olmayıp elektrik ihtiyacı PV/T'ler ve bataryalar ile karşılanmaktadır.



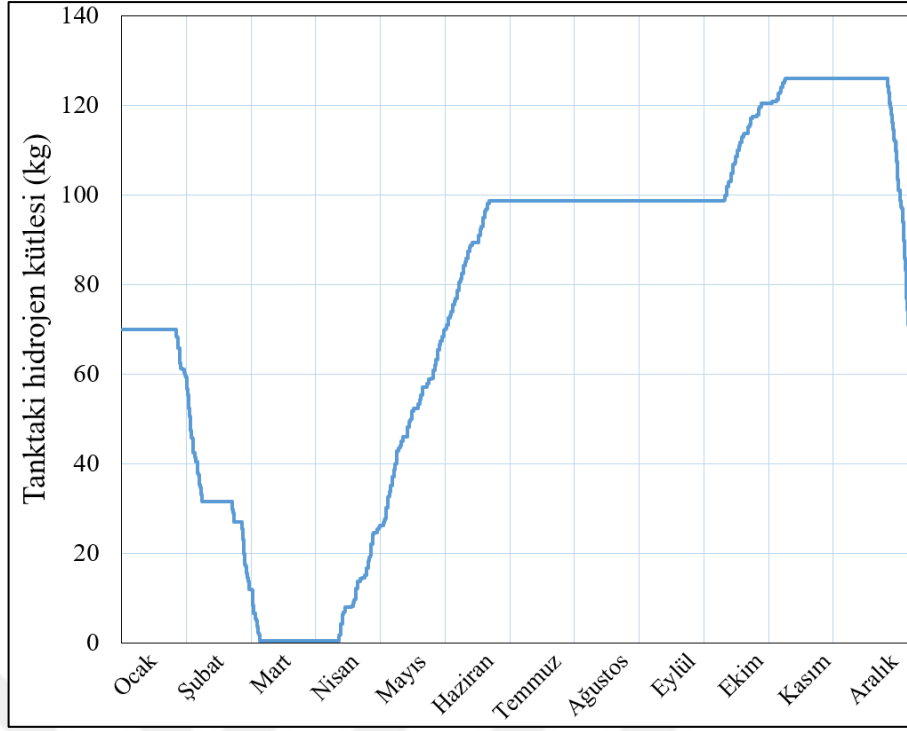
a) Aktif PEM-FC sayısı



b) Toplam PEM-FC gücü

Şekil 4.25. Aktif PEM-FC sayısı ve toplam PEM-FC gücünün aylara göre değişimi

PEM yakıt pillerinin elektrik ihtiyacını karşılayabilmesi için hidrojen depolama tankında yeteri kadar hidrojen olmalıdır. PEM yakıt pillerinin çalışması için gereken hidrojen miktarı tanktan karşılanamadığı durumlarda evin elektrik ihtiyacı karşılanamamaktadır. Böyle bir durum olmaması ve evin elektrik ihtiyacının kesintisiz bir şekilde karşılanabilmesi için başlangıçta tankta 70 kg hidrojen bulunmaktadır. Şekil 4.26’da tanktaki hidrojen miktarının aylara göre değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi aralık-ocak-şubat aylarında tanktaki hidrojen miktarı azalmaktadır. Yani bu aylarda elektrik ihtiyacının bir kısmı PEM-FC’ler ile karşılanmakta, PEM-FC’lerin çalışması için gereken hidrojen, hidrojen tanklardan karşılanmaktadır (Tanktaki hidrojen miktarında azalma olduğu durumlar). Mart, nisan, haziran-ekim aylarının belli günlerinde tanktaki hidrojen kütlesi değişmemektedir. Bu günlerde elektrik ihtiyacı PV/T’ler ve bataryalar ile karşılanmaktadır. Ayrıca bu günlerde kalan net güç PEM-El’in nominal çalışma noktasının altında olduğu için hidrojen üretimi olmamakta ve tanktaki hidrojen kütlesi sabit kalmaktadır. Elektrik ihtiyacının PV/T’ler ve bataryalar ile karşılanıp kalan gücün PEM-El’in nominal çalışma noktasından fazla olduğu durumlarda ise hidrojen üretilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi nisan, mayıs, haziran, ekim ve kasım aylarının belli günlerinde hidrojen üretilmekte ve üretilen hidrojen depolama tanklarında depolanmaktadır (Tanktaki hidrojen miktarında artma olduğu durumlar). Bir yıllık analiz sonucunda hidrojen depolama tankında maksimum 125.6 kg hidrojen olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca aralık ayı sonunda başlangıçta tankta bulunan hidrojen miktarı kadar (70 kg) hidrojen bulunmaktadır. Yani başlangıçta hidrojen depolama tankında bulunan hidrojen kütlesi ile yıl sonunda tankta bulunan hidrojen kütlesi aynıdır. Ceylan ve Devrim (2021) tarafından Şanlıurfa’da bulunan bir seranın elektrik ihtiyacını karşılayabilmek amacıyla yapılan benzer bir çalışmada hidrojen depolama tankında 430 kg hidrojen depolandığı sonucuna varmışlardır.

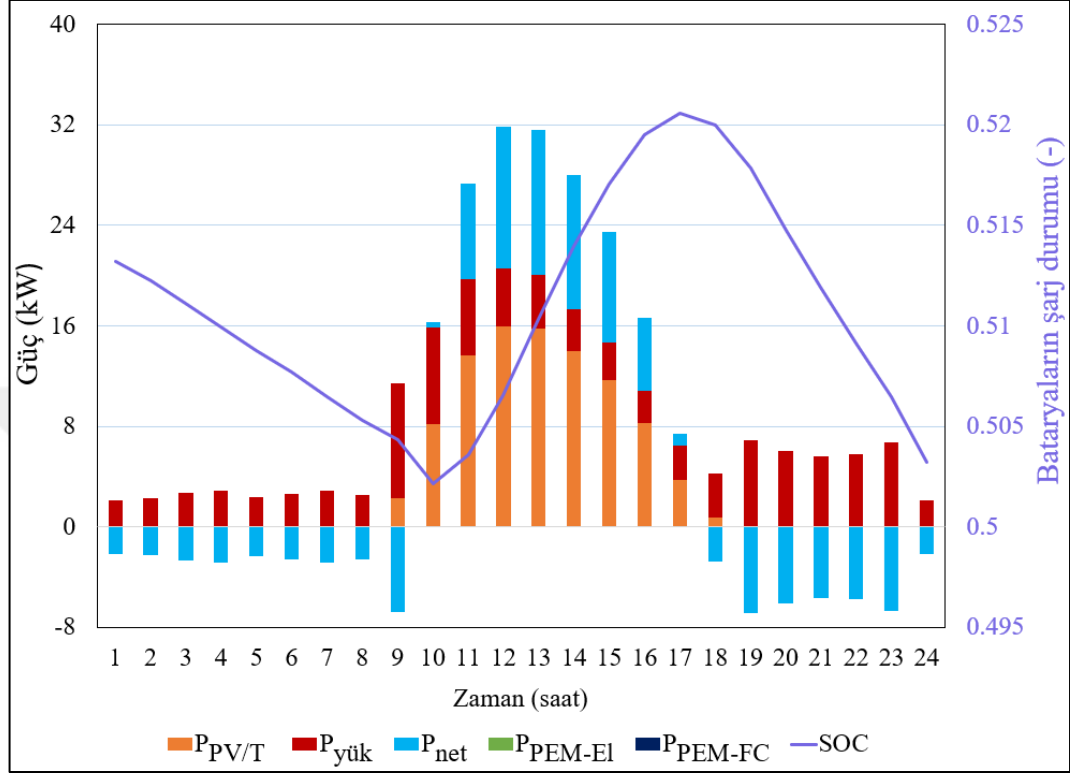


Şekil 4.26. Tankta depolanan hidrojen kütlesinin değişimi

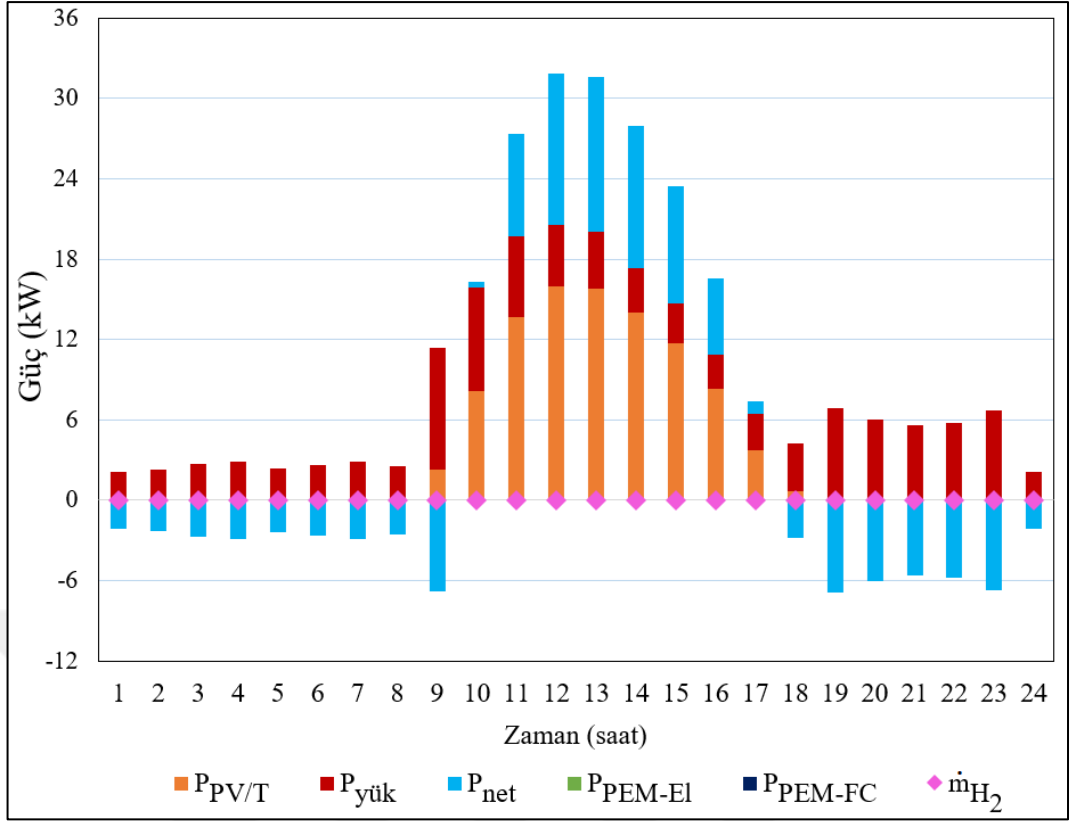
4.5. Sistem Bileşenlerinin Güçlerinin Karşılaştırılması

Şekil 4.27 – Şekil 4.36’da seçilen günler için PV/T panellerin ürettiği güç ($P_{PV/T}$), toplam elektrik ihtiyacı ($P_{PV/T}$), PV/T panellerin ürettiği güç ile elektrik ihtiyacı arasındaki fark (P_{net}), PEM elektrolizör gücü (P_{PEM-El}), PEM-FC gücü (P_{PEM-FC}), bataryaların şarj durumu (SOC) ve üretilen hidrojen miktarı ($\dot{m}_{H_2}$) görülmektedir. Çevre sıcaklığı ve güneş ışıınının artmasıyla birlikte PV/T panellerden elde edilen güç artmaktadır. Net gücün pozitif olduğu saatlerde elektrik ihtiyacı PV/T paneller tarafından karşılanmakta ve kalan güç ile bataryalar maksimum şarj durumuna kadar şarj edilmektedir (bataryaların şarjının arttığı saatler). PV/T panellerin elektrik ihtiyacını karşılayamadığı saatlerde ise net güç eksi değerlere düşmektedir. Bu durumda elektrik ihtiyacı bataryalar ile karşılanmaktadır (bataryaların şarjının azaldığı saatler). Şekilde görüldüğü gibi P_{PEM-El} değerinin sadece pozitif olduğu saatlerde hidrojen üretilmektedir. Bunun nedeni enerji yönetim stratejisine göre kalan güç PEM elektrolizörün nominal çalışma noktasından büyükse hidrojen üretimi olmasıdır. Bu şartın sağlanmadığı saatlerde PEM elektrolizör tarafından hidrojen üretilmemektedir. Ayrıca seçilen günler olan 15 Ocak, 15 Nisan, 15 Temmuz ve 15 Ekim günlerinde PEM-FC’ler aktif olmayıp, bu günlerde elektrik ihtiyacı PV/T’ler ve bataryalar ile

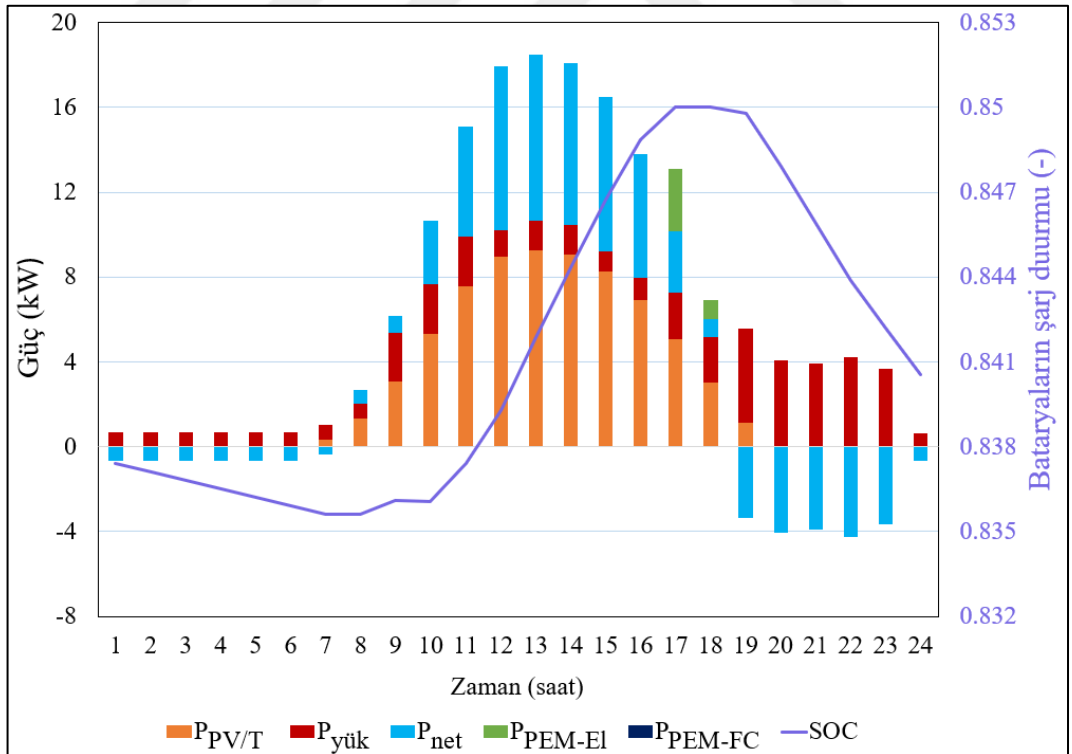
karşılanmaktadır. PEM-FC'lerin çalıştığı bir güne örnek olması amacıyla 15 Aralık günü seçilerek net güçler, bataryaların enerjisi ve hidrojen debisi yığılmış sütun grafiği ile ifade edilmiştir.



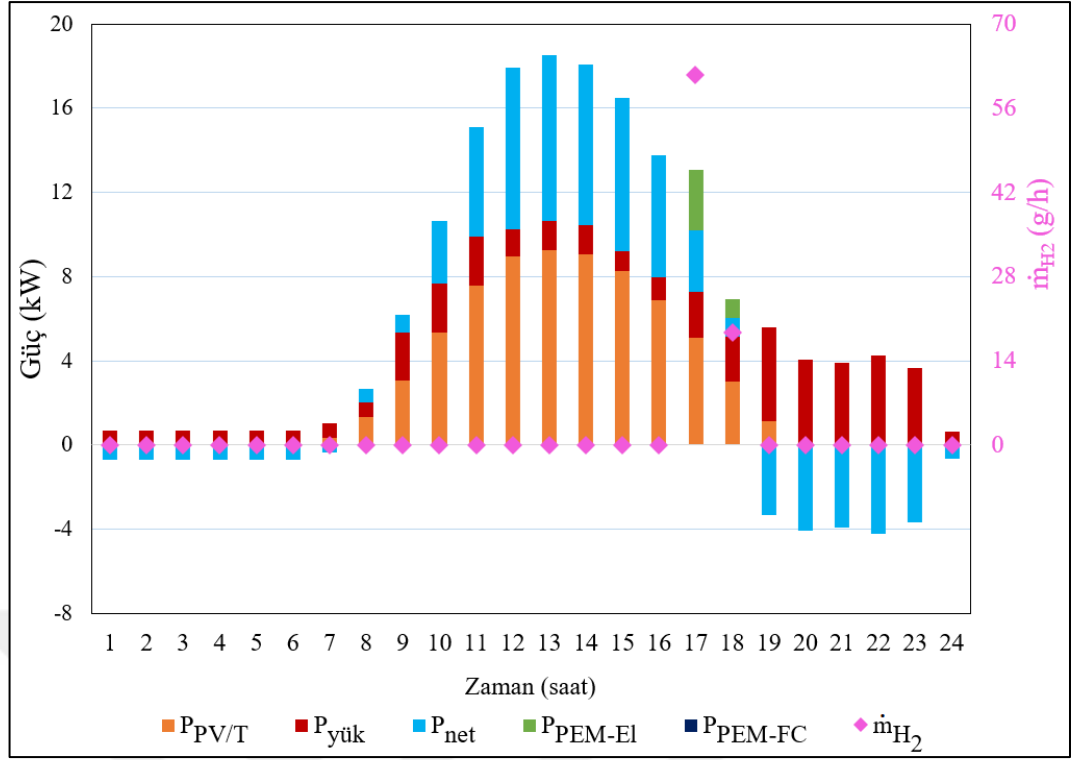
Şekil 4.27. 15 Ocak günü için güç üretim-tüketiminin ve bataryaların şarj durumunun değişimi



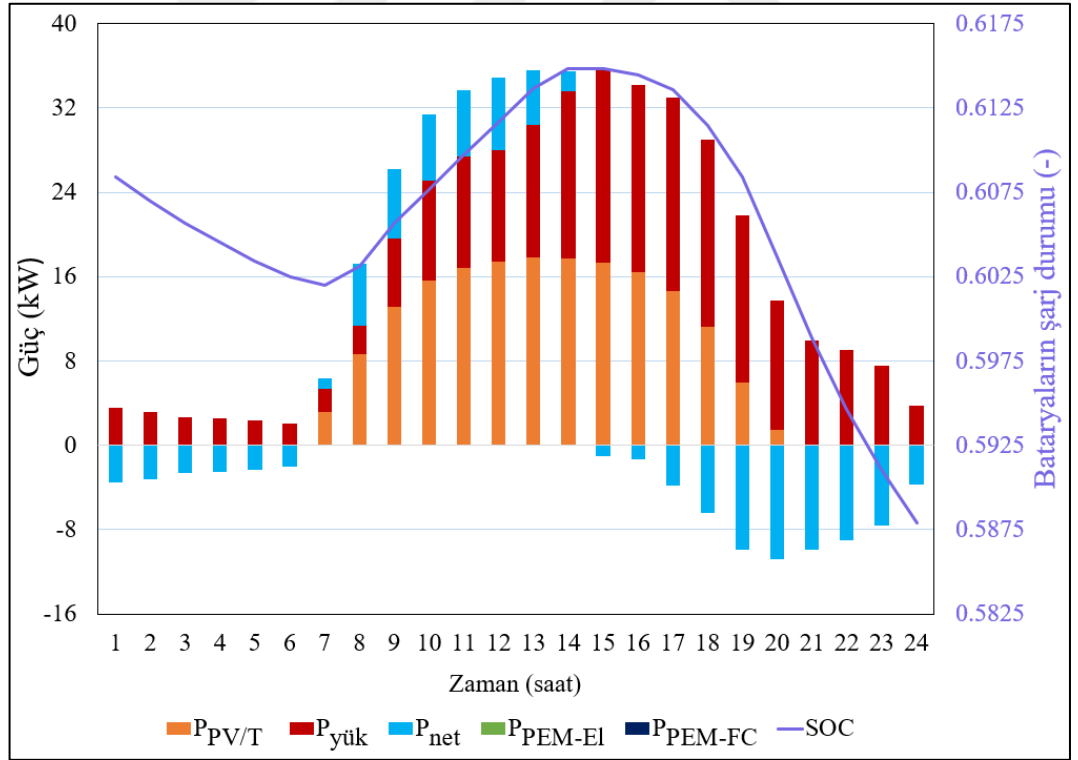
Şekil 4.28. 15 Ocak günü için güç üretim-tüketiminin ve hidrojen üretiminin değişimi



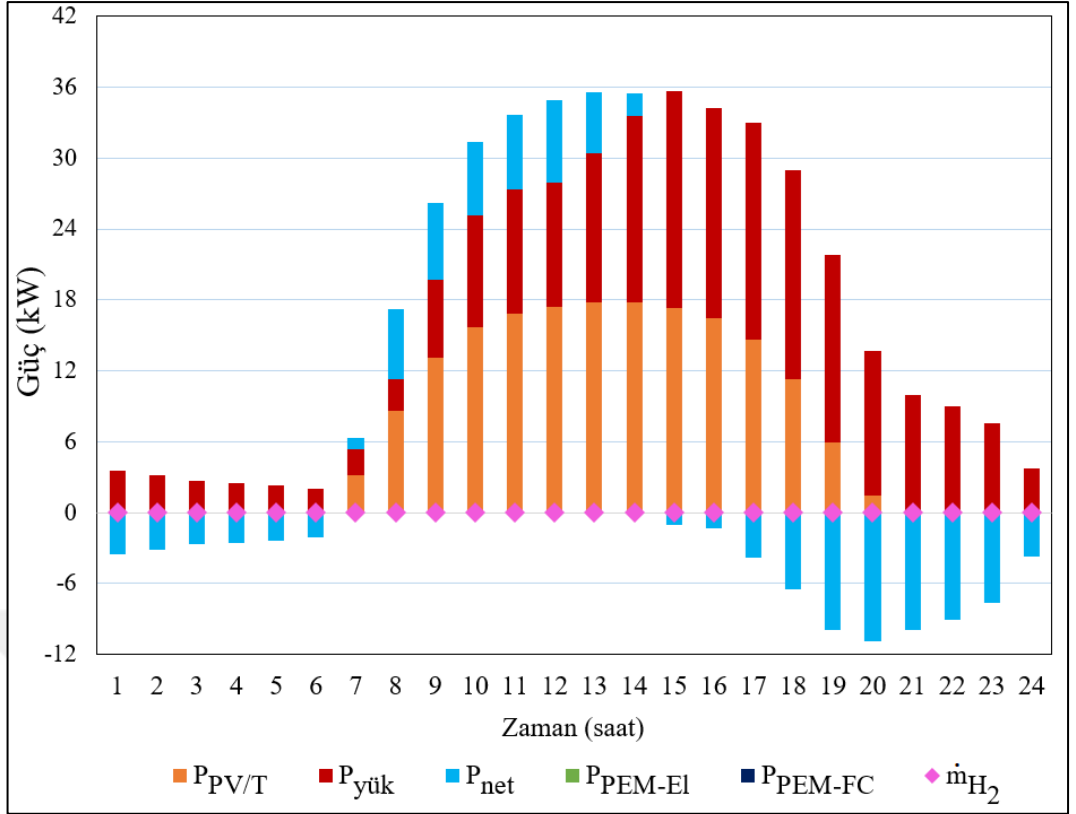
Şekil 4.29. 15 Nisan günü için güç üretim-tüketiminin ve bataryaların şarj durumunun değişimi



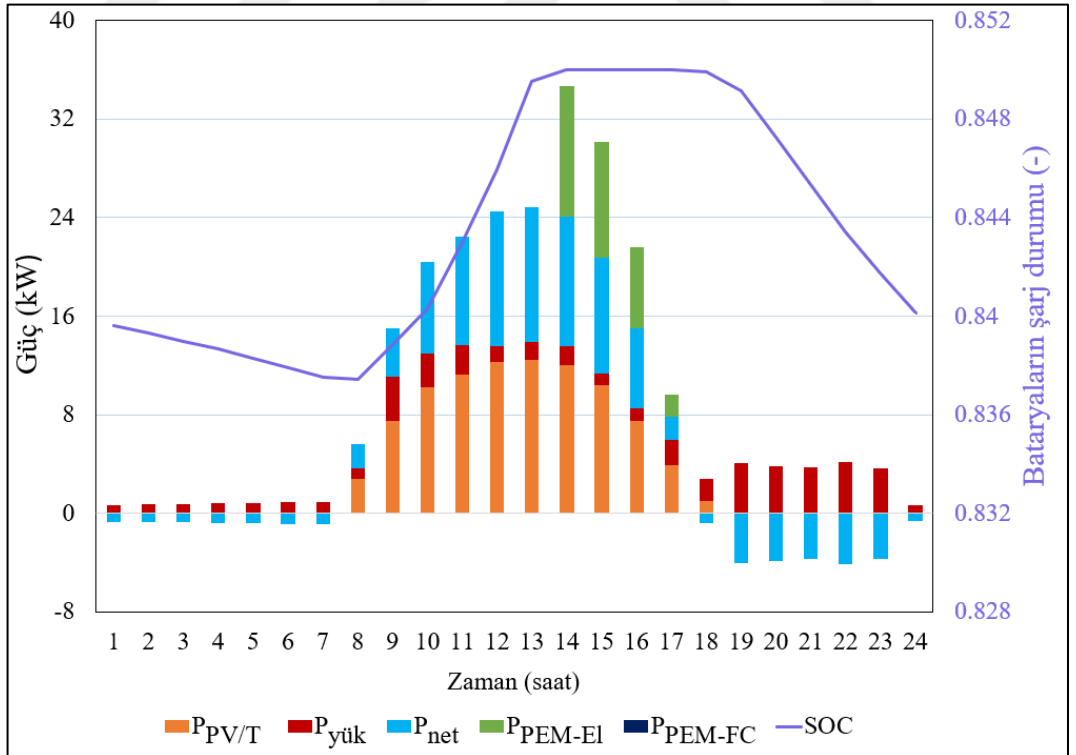
Şekil 4.30. 15 Nisan günü için güç üretim-tüketiminin ve hidrojen üretiminin değişimi



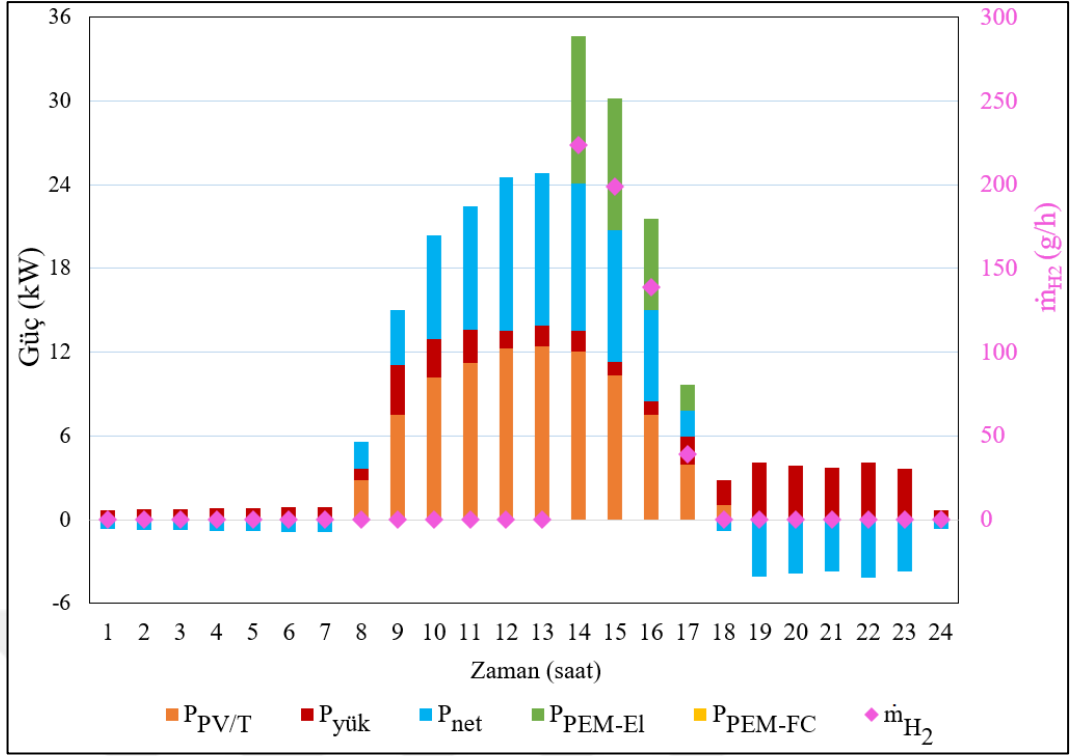
Şekil 4.31. 15 Temmuz günü için güç üretim-tüketiminin ve bataryaların şarj durumunun değişimi



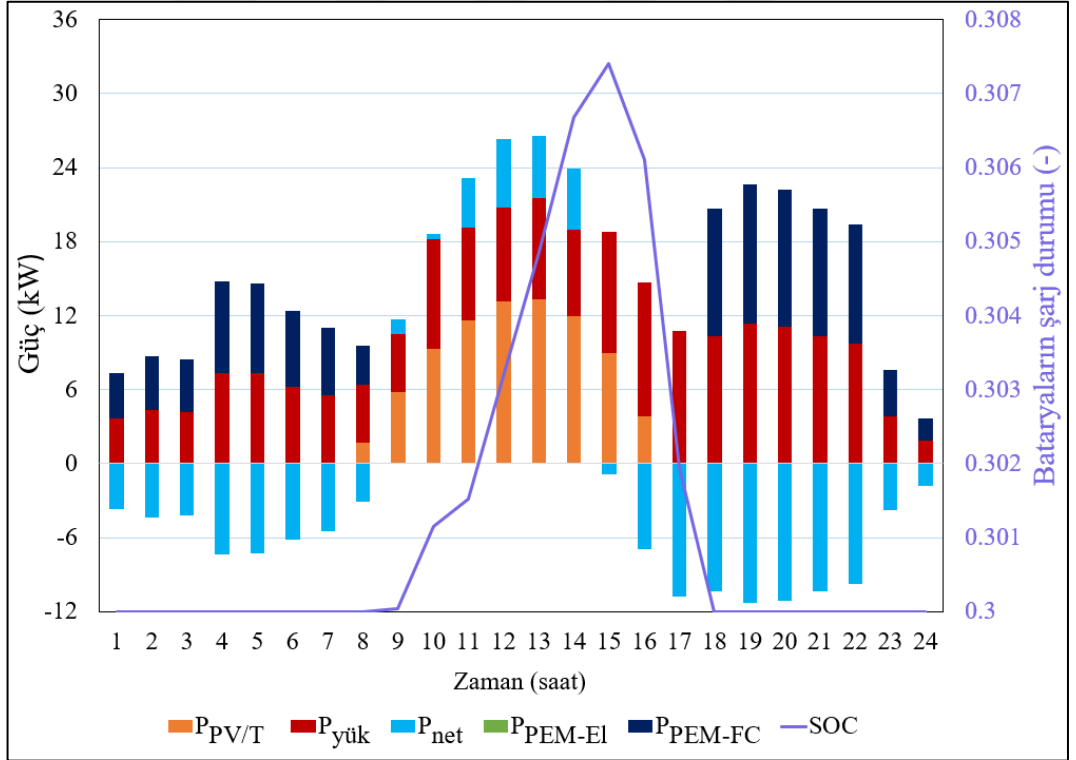
Şekil 4.32. 15 Temmuz günü için güç üretim-tüketiminin ve hidrojen üretiminin değişimi



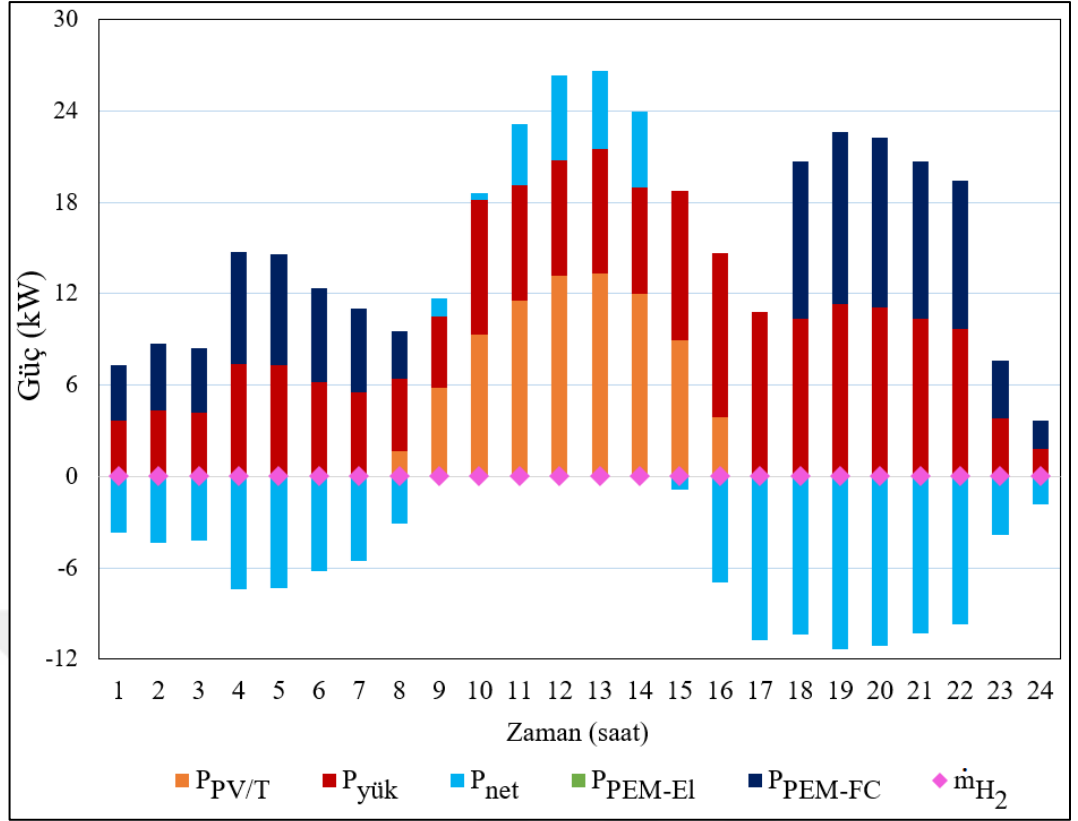
Şekil 4.33. 15 Ekim günü için güç üretim-tüketiminin ve bataryaların şarj durumunun değişimi



Şekil 4.34. 15 Ekim günü için güç üretim-tüketiminin ve hidrojen üretiminin değişimi



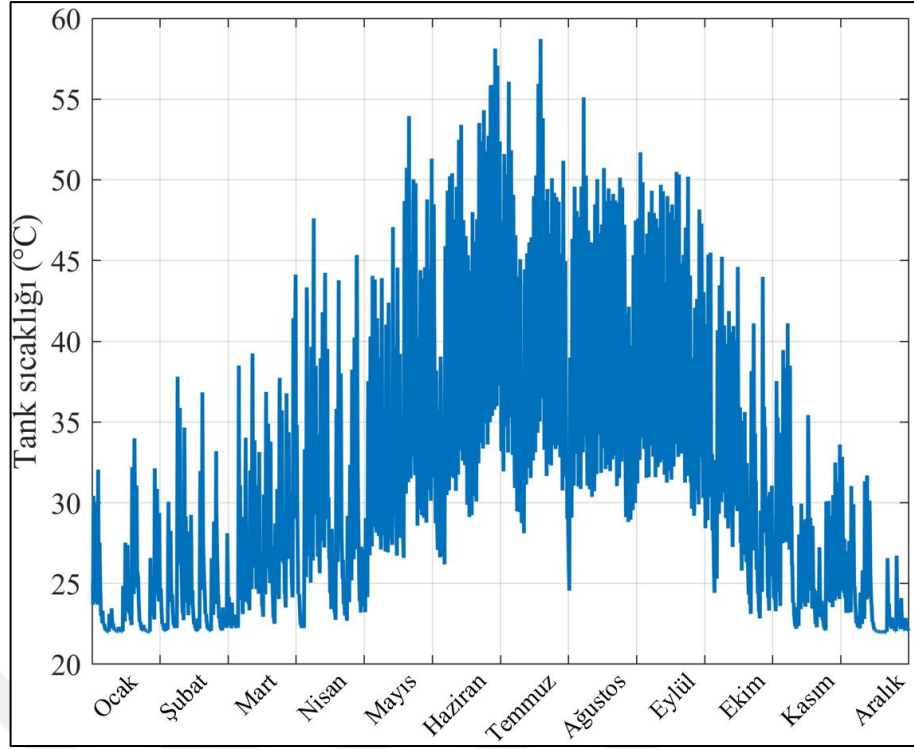
Şekil 4.35. 15 Aralık günü için güç üretim-tüketiminin ve bataryaların şarj durumunun değişimi



Şekil 4.36. 15 Aralık günü için güç üretim-tüketiminin ve hidrojen üretiminin değişimi

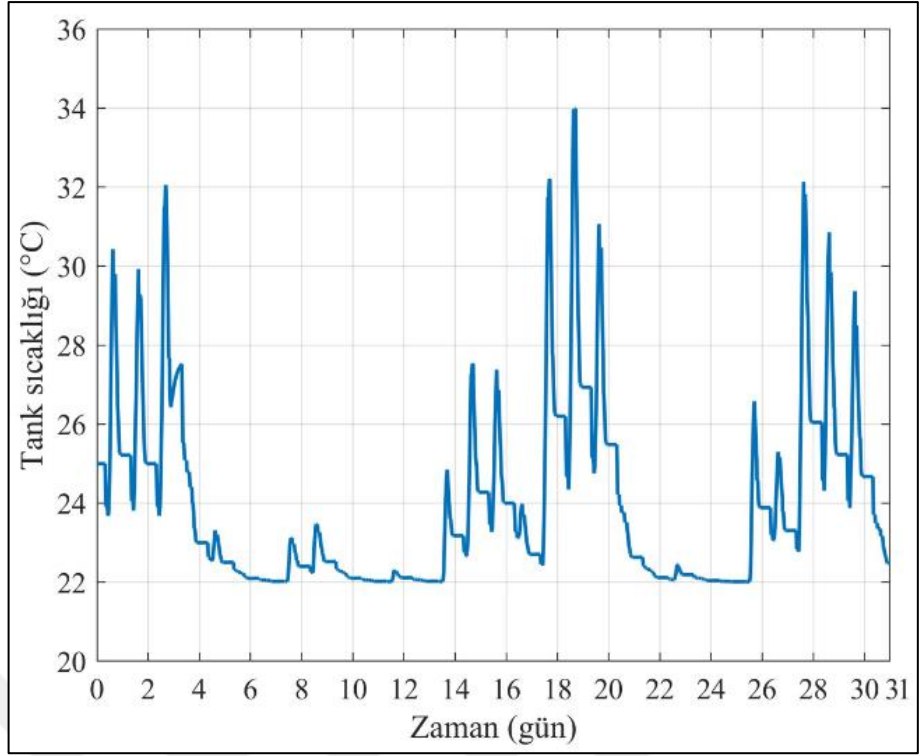
4.6. Sıcak Su Depolama Tankı Dinamik Analiz Sonuçları

Şebekeden bağımsız evin sıcak su ihtiyacı sıcak su depolama tankı ile karşılanmaktadır. Şebekeden gelen 22°C'deki soğuk su tanka girmekte ve tank içinde bulunan su ile karışmaktadır. Son durumda tankın içindeki su sıcaklığının 42°C olması gerekmektedir. Tank içindeki su sıcaklığının yıllık değişimi Şekil 4.37'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi tank içindeki suyun maksimum sıcaklığı 17 Temmuz gününde 58.73°C'dir. Bunun nedeni güneş ışıınının ve çevre sıcaklığının bu günlerde yüksek değerlerde olmasıdır.

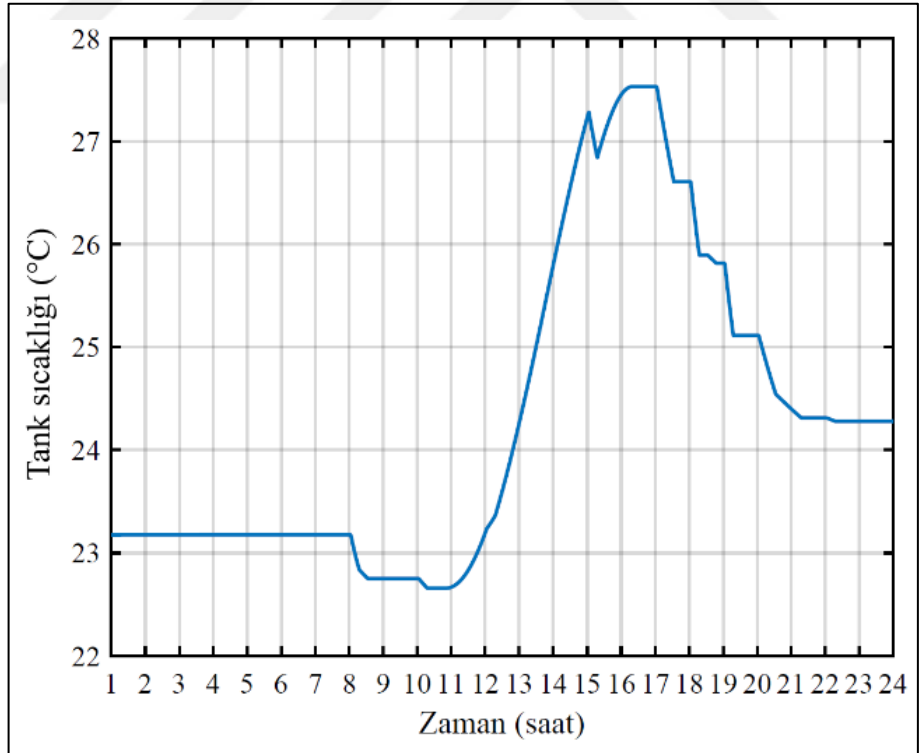


Şekil 4.37. Tank sıcaklığının yıllık değişimi

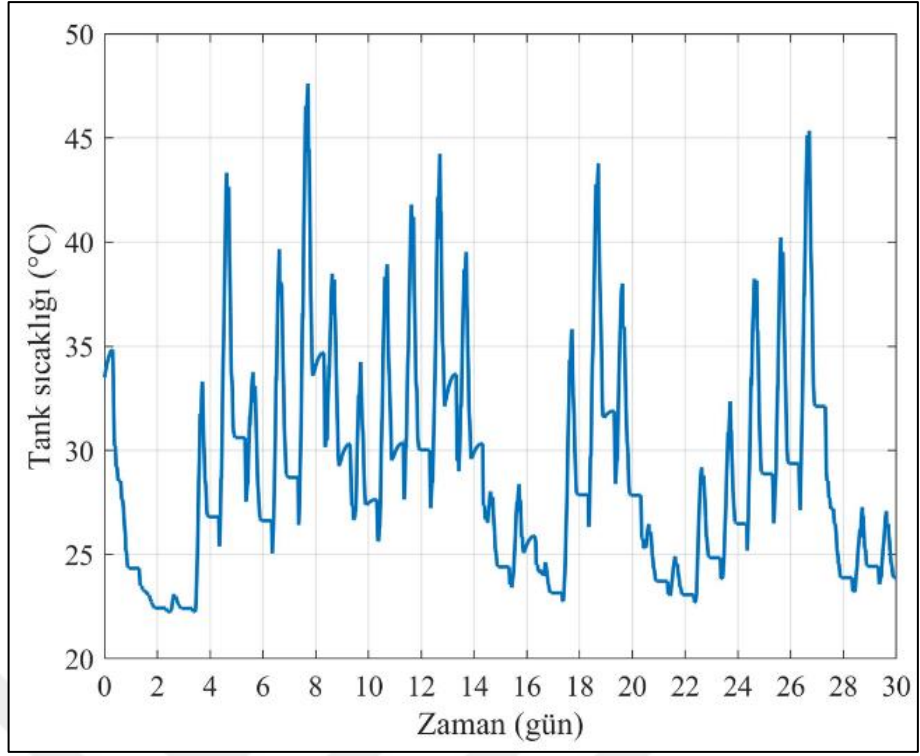
Seçilen aylar ve o ayların 15.günlerinde sıcak su depolama tankı içindeki su sıcaklığının değişimi Şekil 4.38 – Şekil 4.45’te görülmektedir. Çevre sıcaklığının ve güneş ışınımının artmasıyla birlikte tankın içindeki su sıcaklığı artmaktadır. Güneş ışınımının olmadığı akşam ve gece saatlerinde tank içindeki su sıcaklığı azalmaktadır. Tankın içindeki maksimum su sıcaklığını ocak ayında 34°C, nisan ayında 47.61°C, temmuz ayında 58.73°C ve ekim ayında 45.24°C olarak hesaplanmıştır. Ayrıca seçili günler için tankın sıcaklık değişimi incelendiğinde sıcak su talebinin olmadığı saatlerde tank sıcaklığının sabit kaldığı görülmektedir.



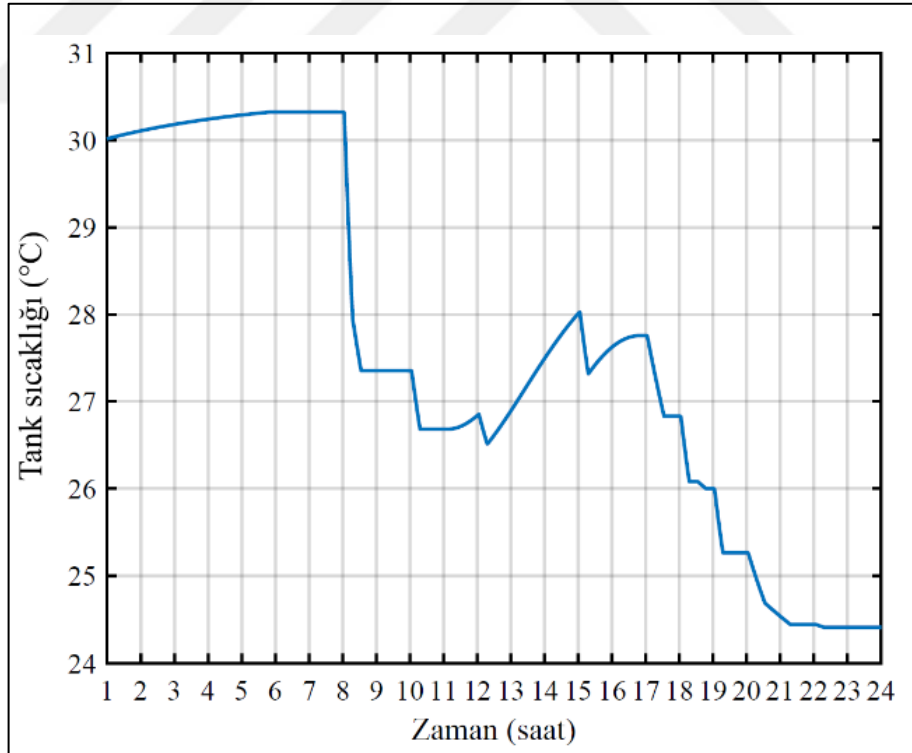
Şekil 4.38. Ocak ayında tank sıcaklığının değişimi



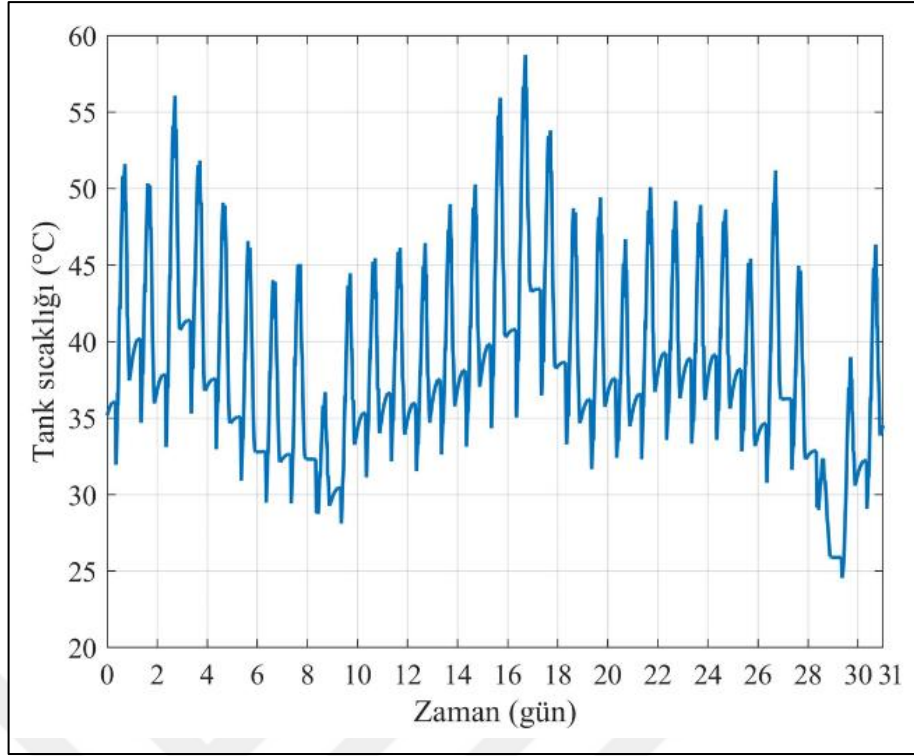
Şekil 4.39. 15 Ocak gününde tank sıcaklığının değişimi



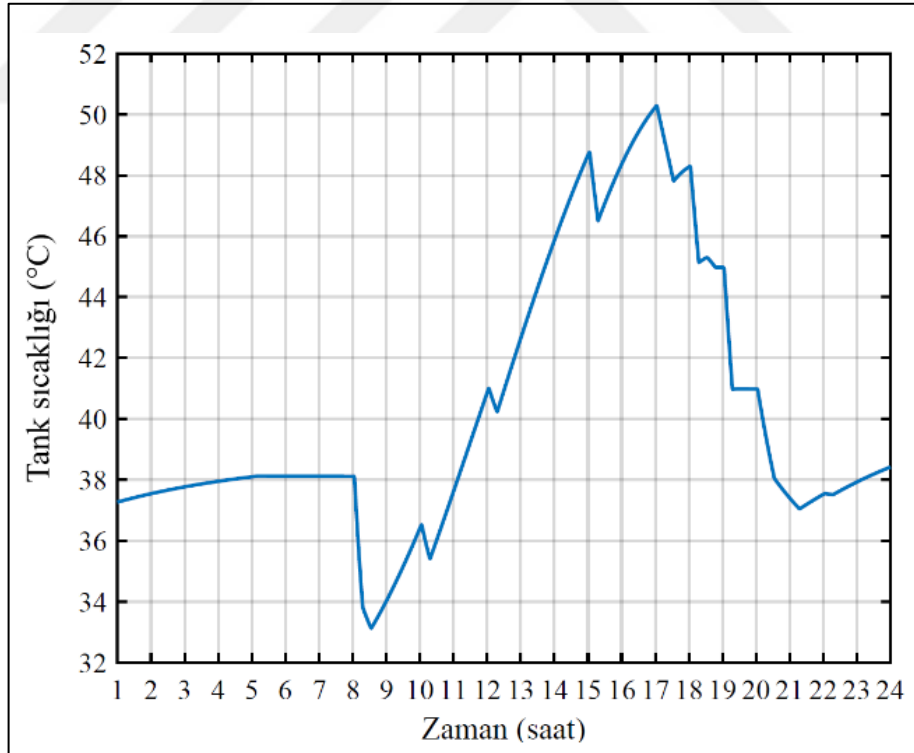
Şekil 4.40. Nisan ayında tank sıcaklığının değişimi



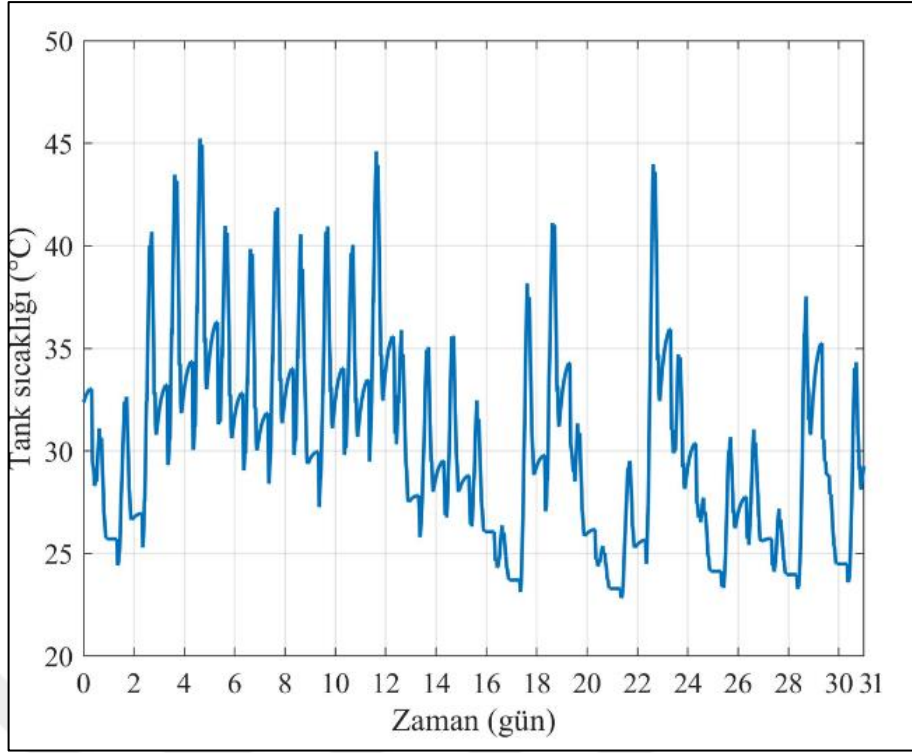
Şekil 4.41. 15 Nisan gününde tank sıcaklığının değişimi



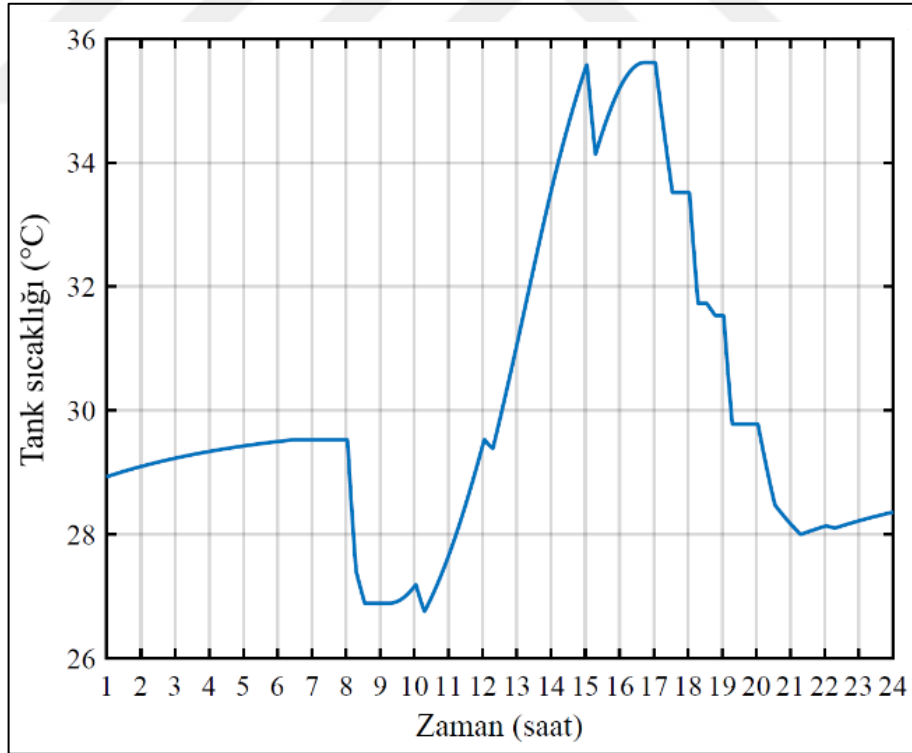
Şekil 4.42. Temmuz ayında tank sıcaklığının değişimi



Şekil 4.43. 15 Temmuz gününde tank sıcaklığının değişimi



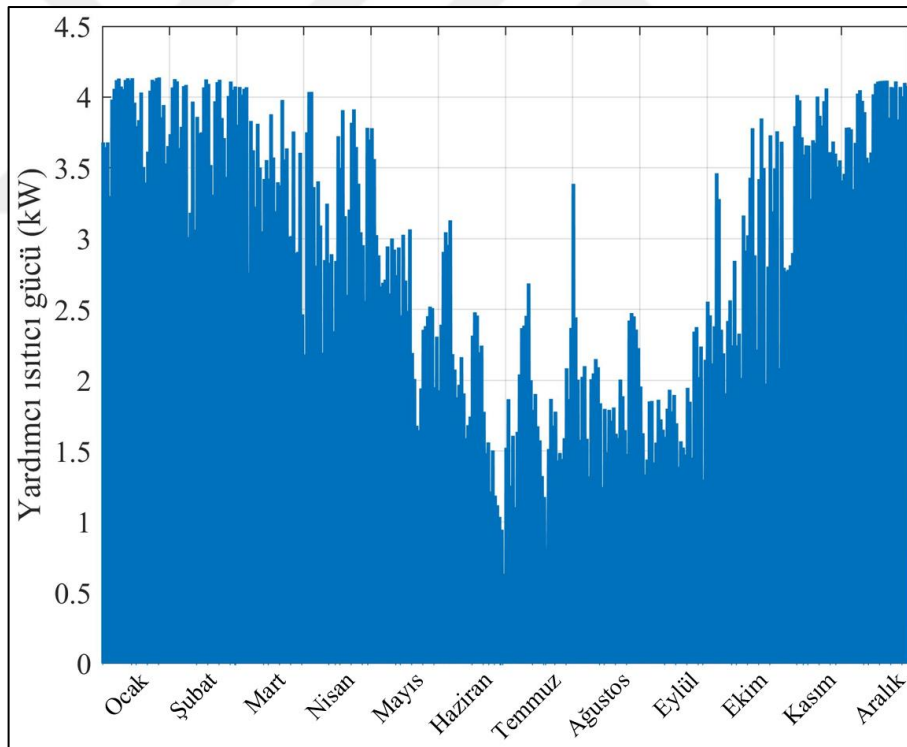
Şekil 4.44. Ekim ayında tank sıcaklığının değişimi



Şekil 4.45. 15 Ekim gününde tank sıcaklığının değişimi

4.7. Yardımcı Isıtıcı Gücü Dinamik Analiz Sonuçları

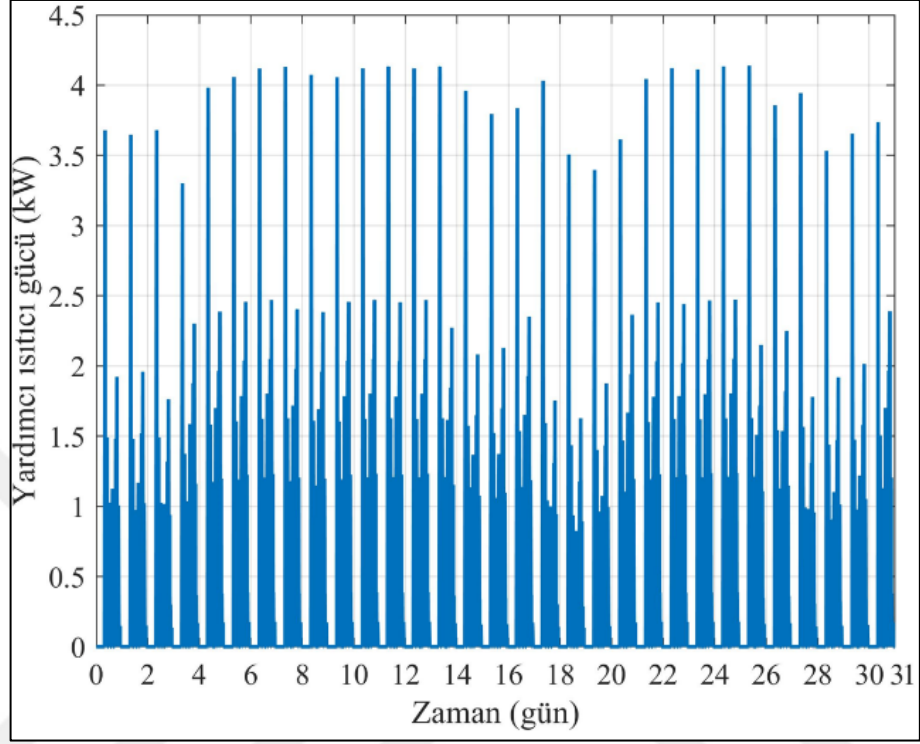
Güneş enerjisinin yetersiz olup depolama tankındaki su sıcaklığının 42°C'den düşük olduğu durumlarda son kullanıcının sıcak su ihtiyacını karşılamak için sıcak su deposunun çıkışına yardımcı ısıtıcı yerleştirilmiştir. Bir yıl boyunca sıcak su ihtiyacının %14.33'si yardımcı ısıtıcı kullanılmadan sıcak su deposu tarafından karşılanmakta, geri kalan %85.67'lık kısımda ise yardımcı ısıtıcı kullanılmaktadır. Şekil 4.46'da yardımcı ısıtıcı gücünün yıl boyunca değişimi görülmektedir. Yapılan analizler sonucunda, maksimum 4.13 kW gücünde yardımcı ısıtıcı kullanılması durumunda ise evin sıcak su ihtiyacı bir yıl boyunca kesintisiz olarak karşılandığı sonucuna varılmıştır. Rahmani ve Iqbal (2019) tarafından yapılan benzer bir çalışmada sıcak su depolama tankı ile sıcak su ihtiyacının karşılanamadığı zamanlarda 4 kW gücünde yardımcı ısıtıcı kullanılarak evin sıcak su ihtiyacı karşılanmıştır.



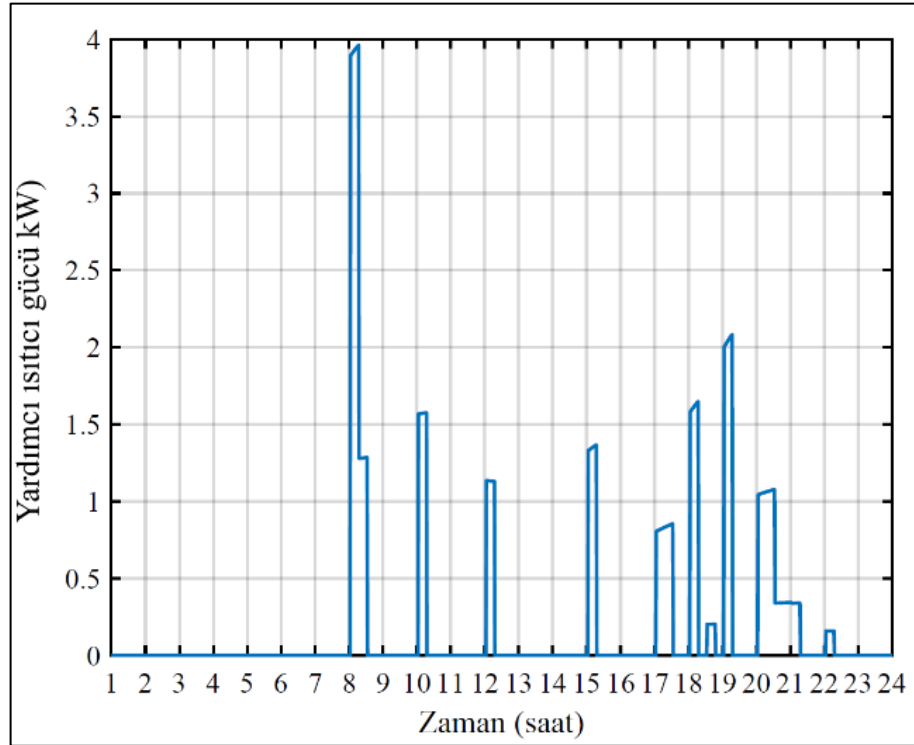
Şekil 4.46. Yardımcı ısıtıcı gücünün yıllık değişimi

Her mevsimde seçilen bir ay ve o ayların 15.günü için yardımcı ısıtıcı gücünün aylık değişimi Şekil 4.47 – Şekil 4.54'te görülmektedir. Evin sıcak su ihtiyacının olmadığı zamanlarda (kullanım sıcak su debisinin 0 olduğu saatler) yardımcı ısıtıcı kullanılmamaktadır. Şekilde görüldüğü gibi yardımcı ısıtıcı gücü en fazla 4.13 kW ile

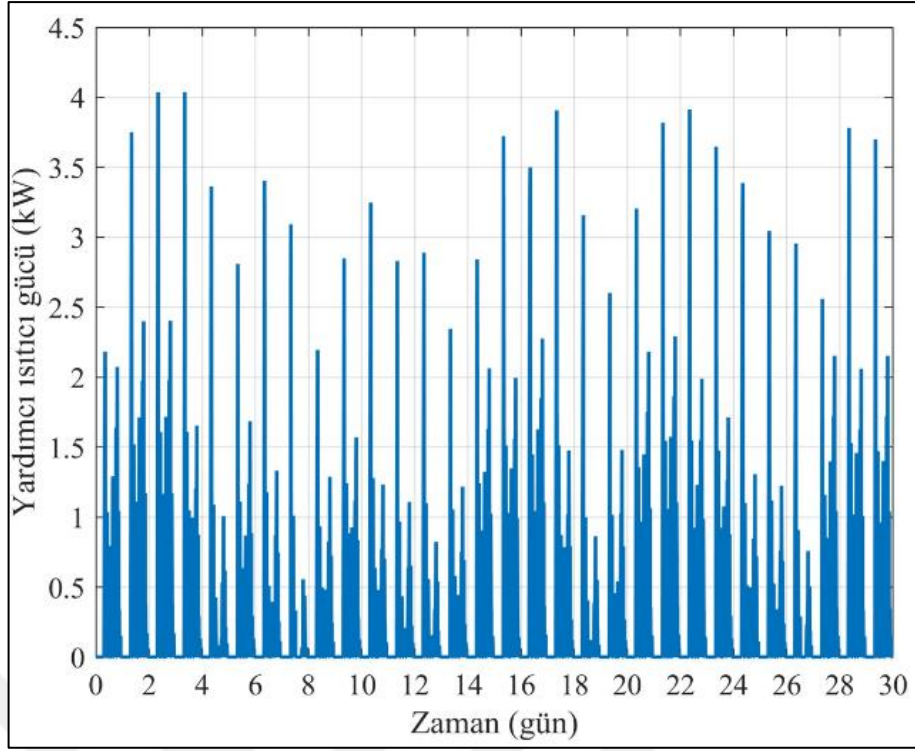
ocak ayındadır. Bunun nedeni ocak ayında tankın içindeki su sıcaklığının diğer aylara göre daha düşük değerlerde olması yani sıcak su depolama tankının evin sıcak su ihtiyacının büyük bölümünü karşılayamamasıdır.



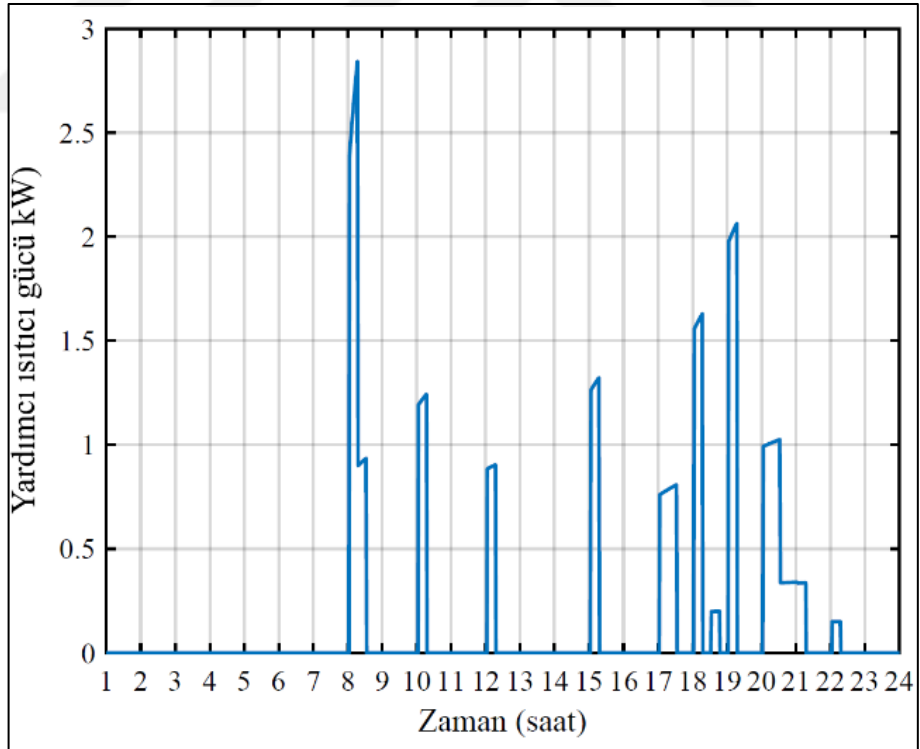
Şekil 4.47. Ocak ayında yardımcı ısıtıcı gücünün değişimi



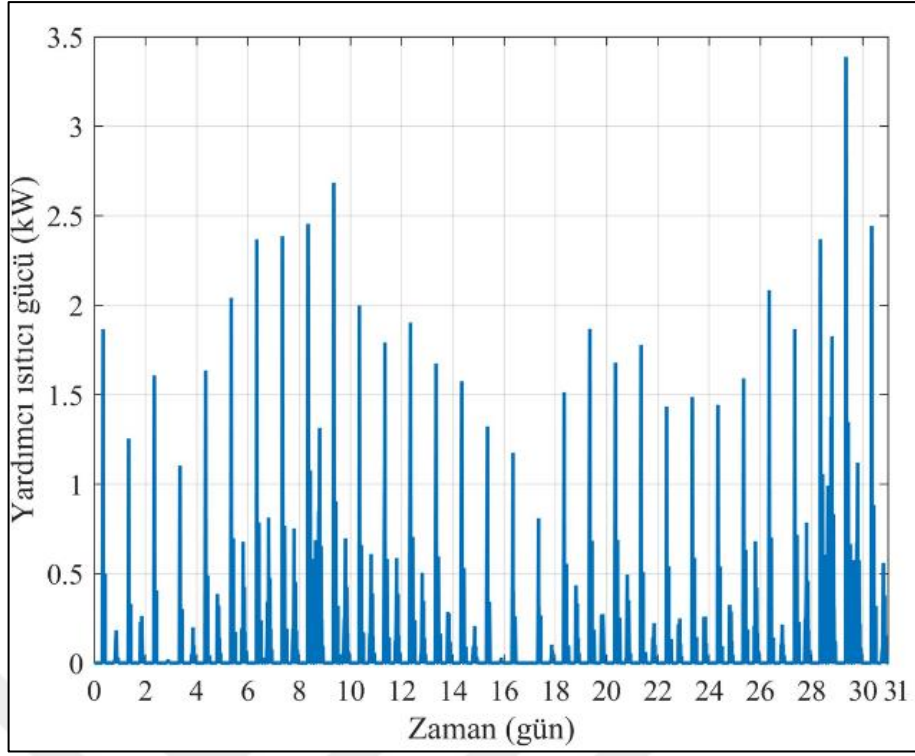
Şekil 4.48. 15 Ocak gününde yardımcı ısıtıcı gücünün değişimi



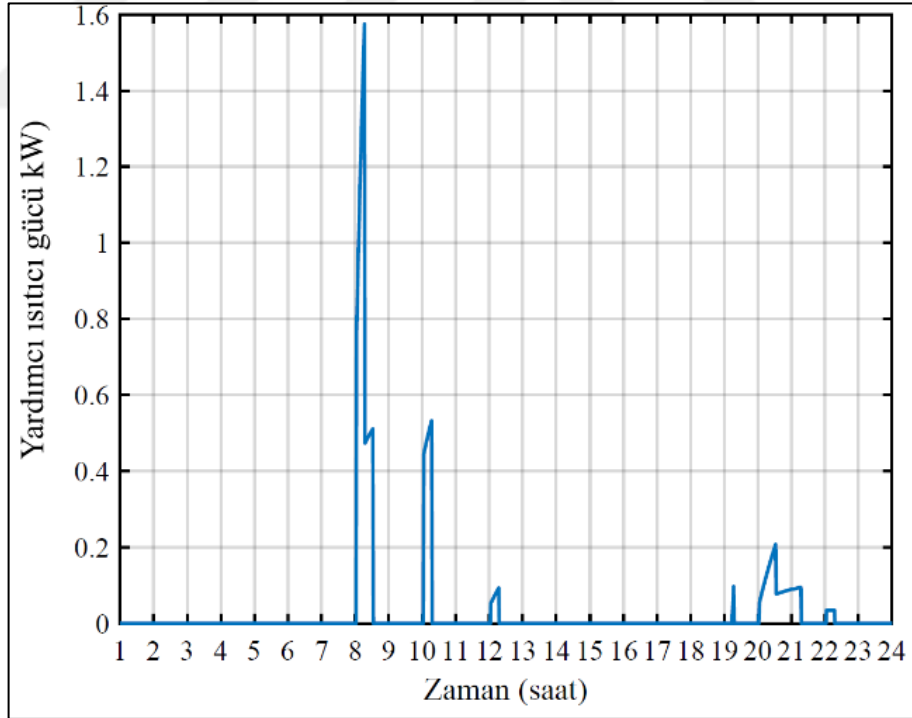
Şekil 4.49. Nisan ayında yardımcı ısıtıcı gücünün değişimi



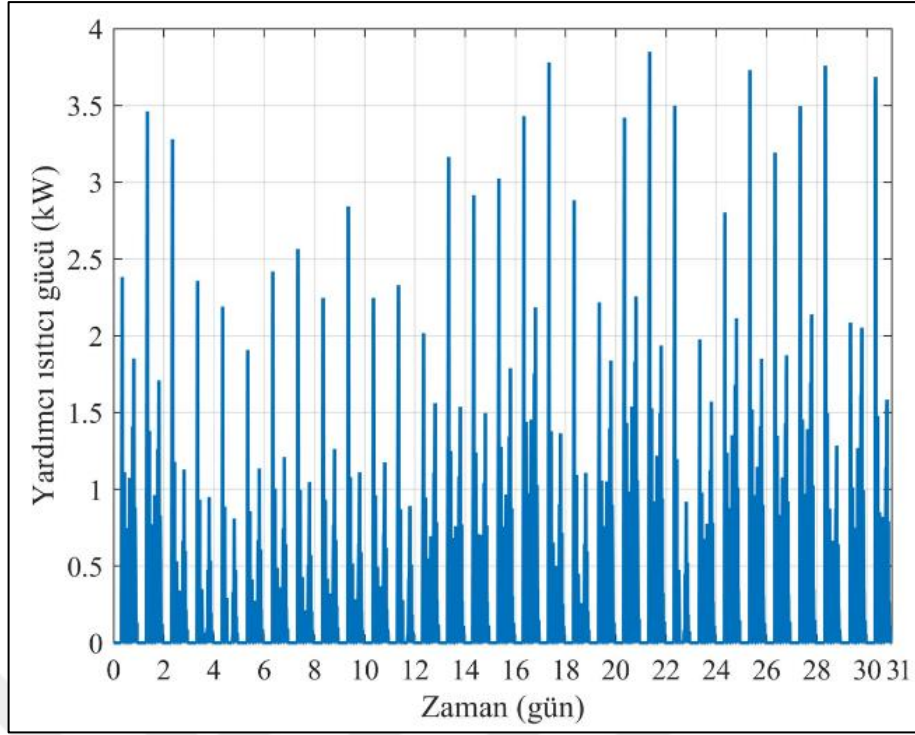
Şekil 4.50. 15 Nisan gününde yardımcı ısıtıcı gücünün değişimi



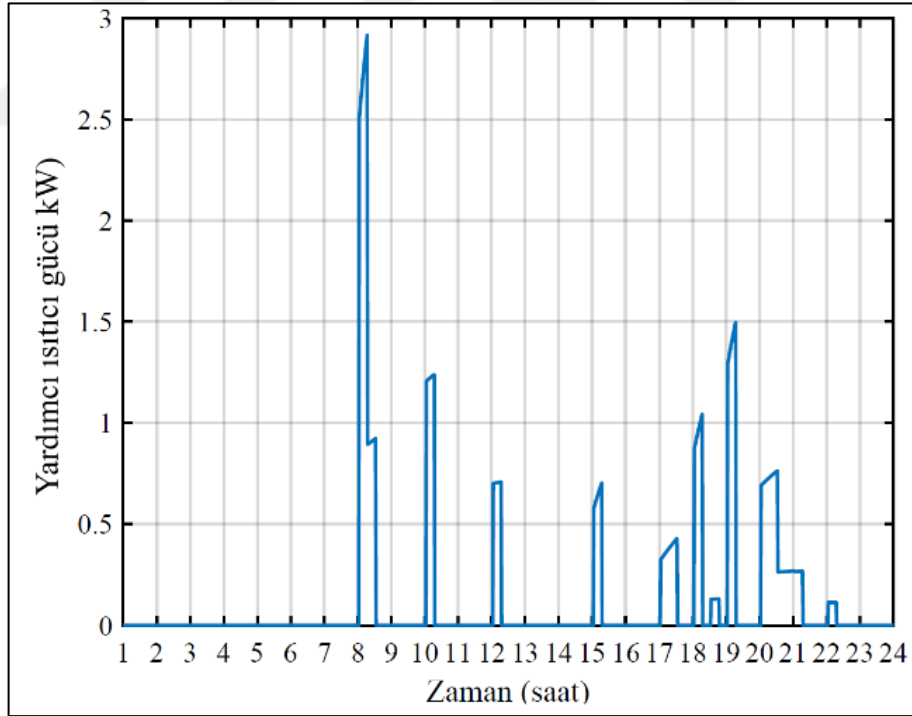
Şekil 4.51. Temmuz ayında yardımcı ısıtıcı gücünün değişimi



Şekil 4.52. 15 Temmuz gününde yardımcı ısıtıcı gücünün değişimi



Şekil 4.53. Ekim ayında yardımcı ısıtıcı gücünün değişimi



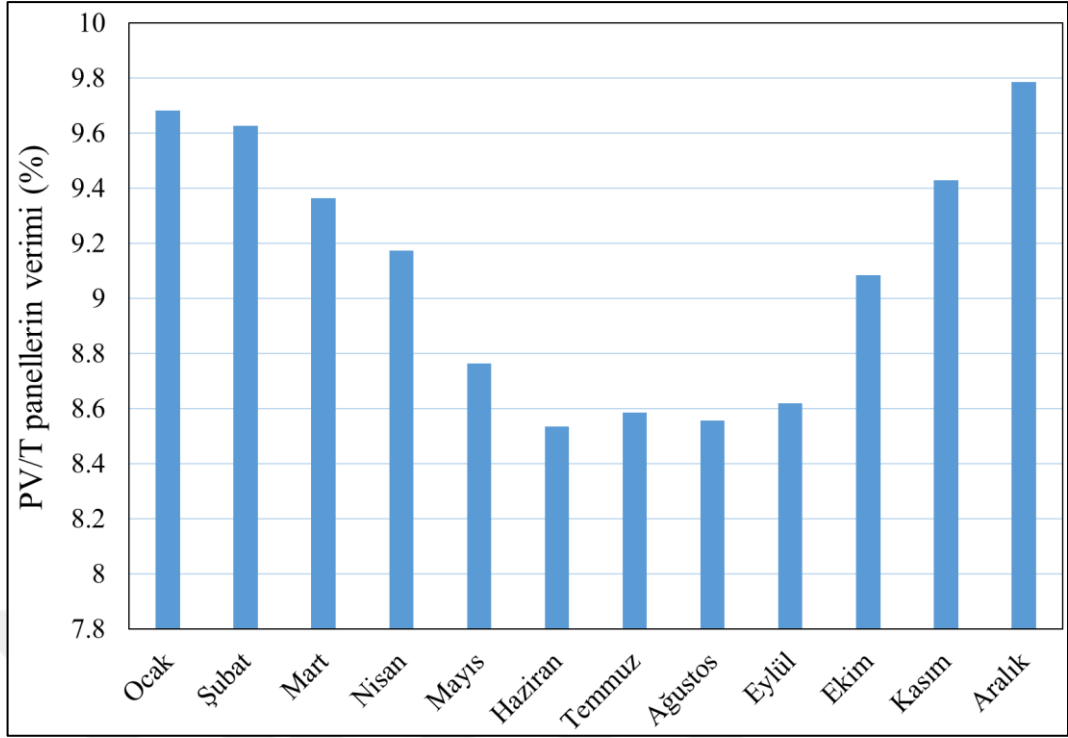
Şekil 4.54. 15 Ekim gününde yardımcı ısıtıcı gücünün değişimi

4.8. PV/T Panellerin ve Sistemin Verimi

En genel anlamıyla verim, elde edilmesi gereken değer ve harcanması gereken değer ile tanımlanmaktadır (Çengel ve Boles, 2012). Ayrıca verim, enerji dönüşümünün nasıl iyi bir şekilde gerçekleştiğini ifade etmektedir. Bu tez çalışması kapsamında PV/T panellerin verimi Denklem (4.1) ile hesaplanmaktadır:

$$\eta_{PV/T} = \frac{\text{PV/T panellerin toplam enerjisi}}{\text{Toplam güneş enerjisi}} \quad (4.1)$$

Burada PV/T panellerin toplam enerjisi (kWh), bir yıl boyunca PV/T'ler tarafından üretilen enerjilerin toplamını, toplam güneş enerjisi ise (kWh) İzmir ili için panellere gelen yıllık toplam güneş enerjisini ifade etmektedir. Yapılan analizler sonucunda PV/T paneller tarafından üretilen yıllık toplam enerji 45.25 MWh, toplam güneş enerjisi ise 506.29 MWh olarak hesaplanmıştır. Böylece PV/T panellerin yıllık verimi %8.93'tür. Ayrıca Şekil 4.55'te PV/T panellerinin aylık verimleri görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yaz aylarında PV/T panellerin verimi kış aylarına göre daha düşüktür. PV/T panellerin verimini etkileyen en önemli parametreler panellerin yüzey sıcaklığı ve güneş ışıdır. Güneş ışıdır ise panel gücünü doğrudan etkilemektedir. Yani güneş ışıdır arttıkça panellerin gücü artmaktadır. Panellerin yüzey sıcaklığı ile panellerin gücü arasında ise ters orantı bulunmaktadır. Yani ortam sıcaklığı arttıkça panellerin gücü düşmekte ve panellerden elde edilen verim azalmaktadır. Bu sebeplerden dolayı çevre sıcaklığının yüksek olduğu aylarda PV/T'lerin verimi daha düşüktür. Yılancı (2008), yaptığı tez çalışmasında aylara göre panellerin verim değişiminde aynı eğilimi elde etmiştir.

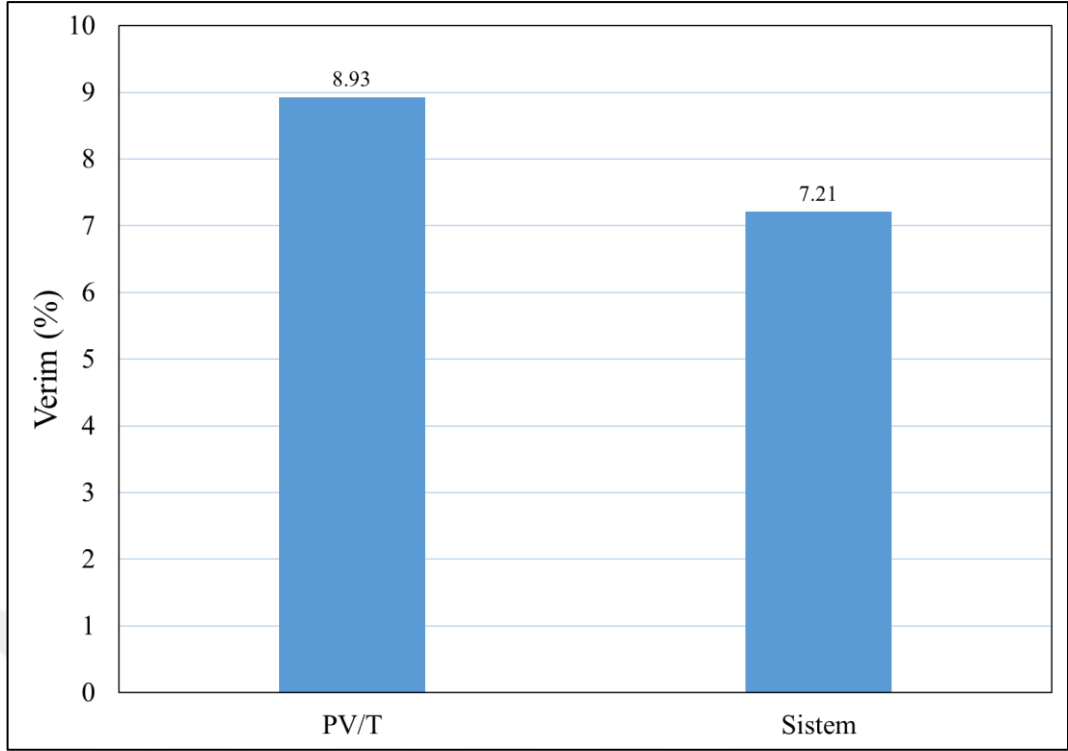


Şekil 4.55. PV/T panellerin veriminin aylara göre değişimi

Güneş ve hidrojen enerjisine dayalı hibrit sistemin toplam verimi Denklem (4.2) ile hesaplanmaktadır.

$$\eta_{sistem} = \frac{\text{Toplam enerji ihtiyacı}}{\text{Toplam güneş enerjisi} + \text{Toplam hidrojen enerjisi}} \quad (4.2)$$

Burada toplam enerji ihtiyacı (kWh) bir yıl boyunca elektrik ve sıcak su enerjisinin toplamını ifade etmektedir. Bir yıllık analizler sonucunda yıllık toplam enerji ihtiyacı 36.64 MWh olarak hesaplanmıştır. Ayrıca sistemin bir yıl boyunca kesintisiz çalışabilmesi için başlangıçta hidrojen depolama tankında 70 kg hidrojen bulunmalıdır. Toplam hidrojen enerjisi hesaplanırken yılın ilk günü ve son günündeki hidrojen miktarı dikkate alınmıştır. Analizler sonucunda yılın ilk günü ile son günündeki hidrojen miktarının aynı olduğu görülmektedir. Yani yıllık verim hesabında sisteme giren toplam hidrojen enerjisi 0'dır. Sonuç olarak sistemin yıllık verimi %7.21 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.56'da PV/T panellerin ve sistemin yıllık verimleri görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi PV/T panellerden elde edilen verim sistemin genel veriminden daha fazladır. Bunun nedeni enerji dönüşümleri sırasında sistem bileşenlerinde meydana gelen verim kayıplarıdır.



Şekil 4.56. PV/T panellerin ve sistemin yıllık verimi

4.9. Ekonomik Analiz Sonuçları

Birden fazla enerji kaynağı ile çalışan hibrit sistemlerin performansı, çevresel koşullara bağlı olmakla birlikte, bileşenlerin boyutuna ve ekonomik parametrelere bağlıdır. Bu bağlamda hibrit sistem analizlerinde sistem verimi, maliyet ve enerji güvenliği dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardır. Tasarlanan sistemlerin enerji veriminin yüksek olması, toplam maliyetinin düşük olması ve sera gazı emisyonunun minimum seviyelerde olması istenmektedir (Altun, 2021). Ekonomik analizi yapılan hibrit sistemlerde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması sürdürülebilir kalkınma politikası ile uyumlu olup çevresel risklerin tanımlanması açısından oldukça önemlidir. Bunun yanı sıra yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı hibrit sistemlerin bugüne kadar çok yaygınlaşmamasının nedeni toplam maliyetinden dolayı ekonomik olmamalarıdır (Telli, 2010). Bu tez çalışması kapsamında şebekeden bağımsız tasarlanan iki katlı ev için maliyet analizi yapılmıştır. Maliyet analizi yapılırken Çizelge 4.1’de görülen sistem bileşenlerinin özellikleri (sayısı, kapasitesi gibi) dikkate alınmıştır. Çizelge 4.2’de sistemin oluşturan bileşenlerin maliyet analizinde kullanılan denklemler, ilk yatırım maliyetleri ve bileşenlerin çalışma ömürleri görülmektedir. Çizelgede görüldüğü gibi sistem bileşenlerinin toplam ilk

yatırım maliyeti 445 188.6 \$'dır. Ayrıca ilk yatırım maliyeti en fazla olan sistem bileşeni bataryalar olup, bataryaları hidrojen depolama tankları ve PV/T paneller takip etmektedir. Çizelge 5.3'te ise sistemi oluşturan bileşenlerin ilk yatırım maliyeti, yenileme maliyeti ve toplam maliyetleri görülmektedir. Sistem bileşenlerinin toplam maliyeti hesaplanırken sistemin ömrünün 15 yıl olduğu varsayılmıştır. Sistem bileşenlerinden sistem ömrü içinde yenilenmesi gereken batarya ve PEM yakıt pilinin yenileme maliyetleri Jafari vd. (2019) referans çalışması dikkate alınarak hesaplanmıştır. Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi sistemin toplam maliyeti 704934.1\$'dır. Sistemin amortisman süresi hesaplanırken bir yıl boyunca toplam elektrik tüketimi dikkate alınmıştır. İzmir ilindeki şebekeden bağımsız evin bir yıllık toplam elektrik ihtiyacı 36 645.86 kWh olarak hesaplanmıştır. Türkiye'de elektrik birim fiyatı vergi ve fonlar dahil meskenler için 2.6 TL/kWh'dir (Anonim 2022i). Buna göre yıllık toplam enerji maliyeti 95 279.26 TL'dir (5 145.08 \$). Bu verilerden yola çıkarak sistemin amortisman süresi 137.01 yıl olarak hesaplanmıştır.

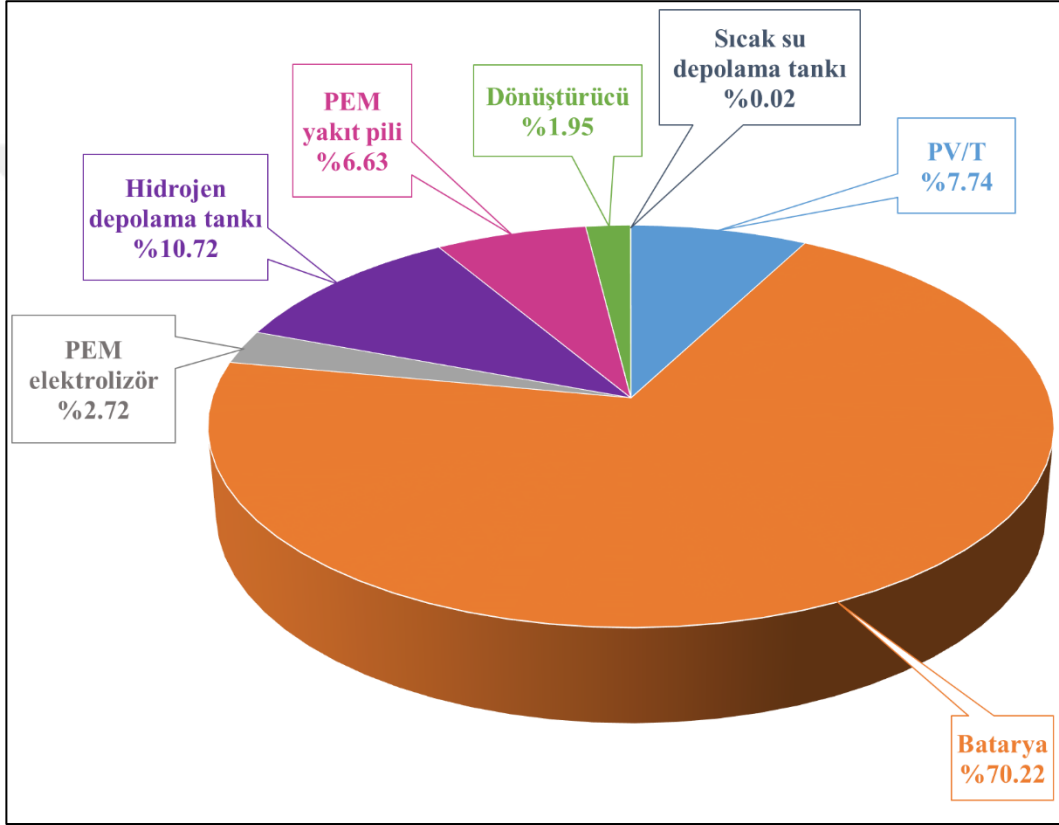
Çizelge 4.2. Sistem bileşenlerinin ilk yatırım maliyeti

Sistem Bileşeni	Maliyet Formülü	İlk yatırım maliyeti	Referans	Ömür (Jafari vd., 2019)
PV/T	$C_{PV/T} = P_{PVT,max} \times \text{PV/T fiyatı}$	$C_{PV/T} = 21.83 \text{ kW} \times 2\,500 \text{ \$/kW}$ $= 54\,575 \text{ \$}$	Jafari vd. (2019)	25 yıl
Batarya	$C_{batarya} = N_{batarya} \times \text{Batarya fiyatı}$	$C_{batarya} = 110 \times 2\,250 \text{ \$}$ $= 247\,500 \text{ \$}$	Anonim (2022j)	10 yıl
PEM elektrolizör	$C_{PEM-El} = 1\,000 \text{ \$/kW} \times P_{PEM-El}$	$C_{PEM-El} = 1\,000 \text{ \$/kW} \times 19.15 \text{ kW}$ $= 19\,150 \text{ \$}$	Akrami vd. (2020)	15 yıl
H ₂ depolama tankı	$C_{H2,tank} = \text{Tank kapasitesi} \times \text{Tank fiyatı}$	$C_{H2,tank} = 126 \text{ kg} \times 600 \text{ \$/kg}$ $= 75\,600 \text{ \$}$	Pal ve Mukherjee (2021)	25 yıl
PEM yakıt pili	$C_{PEM-FC} = 2\,500 \text{ \$/kW} \times \text{Kapasite}$	$C_{PEM-FC} = 2\,500 \text{ \$/kW} \times 13.79 \text{ kW}$ $= 34\,475 \text{ \$}$	Malik vd. (2020)	5 yıl
Dönüştürücü	$C_{dönüştürücü} = \text{Kapasite} \times \text{Fiyat}$	$C_{dönüştürücü} = 22 \text{ kW} \times 625 \text{ \$/kW}$ $= 13\,750 \text{ \$}$	Jafari, vd. (2019)	15 yıl
Sıcak su depolama tankı	$C_{tank} = 1\,000 \text{ €/m}^3 \times \text{Kapasite}$	$C_{tank} = 1\,000 \text{ €/m}^3 \times 0.132 \text{ m}^3$ $= 132 \text{ €} = 138.6 \text{ \$}$	Mayer vd. (2020)	20 yıl
Toplam ilk yatırım maliyeti	445 188.6 \\$			

Çizelge 4.3. Sistem bileşenlerinin toplam maliyeti

Sistem Bileşeni	İlk yatırım maliyeti (ABD\$)	Yenileme maliyeti (ABD\$)	Toplam maliyet (ABD\$)
PV/T	54 575	0	21 025
Batarya	247 500	247 500	46 950
PEM elektrolizör	19 150	0	5 830
H ₂ depolama tankı	75 600	0	39 000
PEM yakıt pili	34 475	12 245.52	61 051.76
Dönüştürücü	13 750	0	13 750
Sıcak su depolama tankı	138.6	0	138.6
Toplam	704 934.1\$		

Sistemin toplam maliyetinde sistemi oluşturan her bir bileşenin maliyet dağılımı Şekil 4.57’da görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi toplam maliyeti en fazla olan sistem bileşeni %70.22 ile bataryalardır. Bataryaları %10.72 ile hidrojen depolama tankı takip ederken, PV/T’ler %7.74 ile üçüncü sıradadır. En az maliyeti olan sistem bileşeni ise %0.02 sıcak su depolama tanklarıdır.



Şekil 4.57. Sistem bileşenlerinin toplam maliyetlerinin dağılımı

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında İzmir ilinde şebekeden bağımsız bir evin elektrik ve sıcak su ihtiyacının karşılanması amaçlanmıştır. Bu amaçla öncelikle 300 m² taban alanına sahip 5 kişilik bir ailenin yaşadığı iki katlı ev tasarlanmıştır. Tasarlanan evin elektrik ve sıcak su ihtiyacı hesaplanmış, İzmir iline ait meteorolojik veriler elde edilmiştir. Elektrik ve sıcak su ihtiyacının karşılanması amacıyla güneş-hidrojen enerjisine dayalı hibrit bir sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan sistem PV/T paneller, bataryalar, PEM elektrolizör, hidrojen depolama tankı, PEM yakıt pilleri, sıcak su depolama tankı, AC/DC dönüştürücü, oksijen kompresörü, oksijen tankı, ayırıcı ve pompadan oluşmaktadır. Sistemi oluşturan her bir bileşen için MATLAB ortamında 0-D matematiksel modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan matematiksel modeller literatürde bulunan mevcut çalışmalar ile doğrulanmıştır. Modelleme ve doğrulama çalışmaları tamamlanan sistem elemanlarının birbirine entegrasyonu için enerji yönetim stratejisi geliştirilmiştir. Geliştirilen enerji yönetim stratejisine göre PV/T sayısı, batarya sayısı, PEM yakıt pili sayısı ve hidrojen tankının doluluk oranı (başlangıçta tankta bulunan hidrojen kütlesi) belirlenerek analizlere başlanmıştır. Enerji yönetim stratejisine göre öncelikle evin elektrik ihtiyacı PV/T paneller ile karşılanmış, kalan güç ile bataryalar şarj edilmiştir. Evin elektrik ihtiyacı karşılanıp, bataryalar şarj edildikten sonra kalan güç ile PEM elektrolizör tarafından hidrojen üretilmiştir. Üretilen hidrojen, hidrojen depolama tanklarında depolanmıştır. Elektrik ihtiyacının PV/T'ler ve bataryalar karşılanamadığı durumlarda PEM yakıt pillerinin devreye girmesi gerekmektedir. Bu durumda PEM-FC'lerin aktif olabilmesi için gereken hidrojen, hidrojen depolama tanklarından karşılanmıştır. Enerji yönetim stratejisindeki gerekli şartlar yerine gelmediği durumlarda (örneğin; şarj modunda PEM-El ile hidrojen üretimi olmadığı durumlar, deşarj modunda tankta yeteri kadar hidrojen olmadığı durumlar) PV/T sayısı-batarya sayısı-PEM-FC sayısı ve başlangıçta tankta bulunan hidrojen kütlesi değiştirilerek analizler tekrarlanmıştır. Ayrıca evin sıcak su ihtiyacı sıcak su depolama tankından sağlanmaktadır. Sıcak su depolama tankı ile ihtiyacın karşılanamadığı durumlarda depolama tankı çıkışında bulunan yardımcı ısıtıcı ile sıcak su ihtiyacı karşılanmıştır. Enerji yönetim stratejisine göre sistem elemanlarının birbirine entegrasyonu tamamlandıktan sonra günlük, aylık, mevsimlik ve yıllık bazda

dinamik analizler yapılmıştır. Yapılan analizlerde sistemin ocak ayında kurulduğu kabulü yapılmıştır. Ocak ayından başlayan dinamik analiz sonuçlarına göre tasarlanan hibrit sistem ile şebekeden bağımsız evin bir yıl boyunca elektrik ihtiyacının karşılanması için 139 adet PV/T panel, 110 adet batarya, 13 adet PEM-FC ve 30 adet hidrojen depolama tankı kullanılmıştır. Ayrıca sıcak su ihtiyacının karşılanması için 132 litre hacminde sıcak su depolama tankı ve maksimum kapasitesi 4.13 kW olan yardımcı ısıtıcı kullanılmıştır. Sistemin yıllık elektrik tüketimi dikkate alındığında bir yıl boyunca 35834 kg CO₂ salınımı olduğu hesaplanmıştır. Tüm analizler sistemin yaz mevsiminin başlangıcı olan haziran ayında kurulduğu kabulüyle de tekrarlanmıştır. Haziran ayında başlayan dinamik analiz sonuçlarına göre bir yıl boyunca kesintisiz olarak elektrik ihtiyacının karşılanması için 149 adet PV/T panel, 120 adet batarya, 16 adet PEM-FC ve 181 kg kapasiteli (44 adet hidrojen depolama tankı) gerekmektedir. Haziran ayında sistem elemanlarının sayılarının ve kapasitelerinin ocak ayına göre daha yüksek çıkmasının nedeni, yaz mevsimindeki soğutma ihtiyacının kış mevsimindeki ısıtma ihtiyacından fazla olmasıdır. Sonuç olarak hem ocak ayında başlayan analizlerde hem de haziran ayında başlayan analizlerde, ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimlerinde elektrik ihtiyacının PV/T'ler ve bataryalar ile karşılanabildiği belirlenmiştir. Kış mevsiminin büyük bir kısmında ise elektrik ihtiyacının PEM-FC'ler ile karşılandığı sonucuna varılmıştır. Yani ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimlerinde üretilen hidrojen, kışın PEM-FC'ler tarafından tüketilerek elektrik ihtiyacı karşılanmıştır.

Özetle, bu tez çalışmasında şebekeden bağımsız sistemlerde güneş-hidrojen enerjisine dayalı hibrit bir sistemle elektrik-sıcak su ihtiyacının karşılanması amaçlanmıştır. Bu amaçla yeni bir enerji yönetim stratejisi geliştirilmiştir. Geliştiren enerji yönetim stratejine göre sistem elemanlarının boyutları, sayıları/kapasiteleri belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışma ile güneş-hidrojen enerjisine dayalı sistemlerin performanslarının analizinde enerji dengesinin önemli olduğu ve sistem boyutlandırılmasının iyi yapılması gerektiği anlaşılmıştır. Aksi taktirde, sistemin elektrik ihtiyacının karşılanmasında sorunlar meydana gelebilmektedir. Bu yüzden bu sistemlerin yıllık enerji dengelerinin ortaya çıkarılması ve farklı kontrol stratejilerinin denenmesi gerekmektedir. Böylece farklı enerji yönetim stratejileri geliştirilip sistem boyutları sayıları/kapasiteleri belirlenerek literatüre

katkı sağlayabileceği düşünölmektedir. Ayrıca ekonomik analiz sonuçlarından göröldüğü gibi bu sistemlerin pahalı olması nedeniyle kısa ve orta vadeli yaygınlaşmaları beklenmemelidir. Fakat, küçük çaplı pilot tesisler kurularak böyle sistemler hakkında bilgi ve tecrübe kazanılmalıdır. Ayrıca bu sistemlerin kurulabilmesi için devlet destekleri gerekmektedir. Ülkemizde şu an güneş enerjisi sistemlerine destekler olsa ülkemizdeki enerji politikalarının geliştirilip, yenilenebilir enerjilerde daha etkin olarak yol kat edilmesi gerekmektedir.



KAYNAKLAR

- Aksakal C, Z. (2007). *Hydrogen production from water using solar cells powered nafion membrane elektrolyzers*. (Master of Science, İzmir Institute of Technology)
- Akrami, E., Ameri, M., Rocco, M.V., & Sanvito, F.D. (2020). Thermodynamic and exergo economic analyses of an innovative semi self-feeding energy system synchronized with waste-to-energy Technology. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 40, 100759. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100759>
- Alayi, R., Ahmadi, M.H., Visei, A.R., Sharma, S., & Najafi, A. (2021). Technical and environmental analysis of photovoltaic and solar water heater cogeneration system: a case study of Saveh City. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 16, 447-453. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaa077>
- Alnejaili, T., Drid, S., Mehdi, D., Alaoui, L. C., Belarbi, R., & Hamdouni, A. (2015). Dynamic control and advanced load management of a stand-alone hybrid renewable power system for remote housing. *Energy Conversion and Management*, 105, 377-392. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.080>
- Altun Fidan, A. (2021). *Şebekeden Bağımsız, Güneş ve Rüzgâr Kaynaklı, Batarya ve Hidrojen Depolamalı Hibrit Enerji Sistemlerinin Dinamik Modellemesi, Enerji, Ekserji ve Seviyelendirilmiş Maliyet*. (Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Amo, A.D., Martínez-Gracia, A., Bayod-Rújula, A.A., & Antoñanzas, J. (2017). An innovative urban energy system constituted by a photovoltaic/thermal hybrid solar installation: Design, simulation and monitoring. *Applied Energy* 186, 140–151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.011>
- Anonim (2021a). Energy Economics, Energy Charting Tool. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>. (Son erişim tarihi: 10.09.2021)
- Anonim (2021b). Solimpeks. <https://www.solimpeks.com.tr/>. (Son Erişim Tarihi: 09.10.2021)
- Anonim (2021c). Vikipedi Özgür Ansiklopedi. https://tr.wikipedia.org/wiki/Hidrojen_depolama. (Son Erişim Tarihi: 11.12.2021)
- Anonim (2021d). IRENA International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/>. (Son erişim tarihi: 24.12.2021)
- Anonim (2022a). Powertec Solar Inc. <https://powertecsolar.ca/off-grid-solar-system/>. (Son erişim tarihi: 08.03.2022)

- Anonim (2022b). SketchUp. <https://www.sketchup.com/>. (Son Erişim Tarihi: 31.04.2022)
- Anonim (2022c). EnergyPlus. <https://energyplus.net/weather>. (Son Erişim Tarihi: 02.05.2022)
- Anonim (2022d). Typical Overall Heat Transfer Coefficients. <https://www.isissteam.com/downloads/heat-transfer.pdf>. (Son Erişim Tarihi: 10.05.2022)
- Anonim (2022e). Overall Heat Transfer Coefficient. <http://mechanicalequipdesign.blogspot.com/2016/10/overall-heat-transfer-coefficient.html>. (Son Erişim Tarihi: 09.06.2022)
- Anonim (2022f). The Engineering ToolBox. https://www.engineeringtoolbox.com/heat-transfer-coefficients-coils-d_178.html. (Son Erişim Tarihi: 10.07.2022)
- Anonim (2022g). Typical Overall Heat Transfer Coefficient. <http://www.engineeringpage.com/technology/thermal/transfer.html>. (Son Erişim Tarihi: 15.07.2022)
- Anonim (2022h). Compressed Hydrogen Tank. <https://www.mahytec.com/en/compressed-hydrogen-storage/>. (Son Erişim Tarihi: 13.08.2022)
- Anonim (2022i). H1000XP Fuel Cell Catalog. <https://www.horizoneducational.com/h-1000-xp-fuel-cell-stack/p1407>. (Son Erişim Tarihi: 07.09.2022)
- Anonim (2022i). Elektrik birim fiyatı. <https://www.encazip.com/elektrik-fiyatlari>. (Son erişim tarihi: 01.10.2022)
- Anonim (2022j). Lityum-iyon batarya. https://www.alibaba.com/product-detail/Long-life-12v-24v-100ah-150ah_62319516710.html. (Son Erişim Tarihi: 06.10.2022)
- Arun, P., Banerjee, R., & Bandyopadhyay, S. (2008). Optimum sizing of battery-integrated diesel generator for remote electrification through design-space approach. *Energy*, 33, 1155-1168. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.02.008>
- Assaf, J., & Shabani, B. (2018). Experimental study of a novel hybrid solar-thermal/PV-hydrogen system: Towards 100% renewable heat and power supply to standalone applications. *Energy*, 157, 862-876. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.125>
- Babayan, M., Mazraeh, A.E., Yari, M., Niazi, N.A., & Saha, S.C. (2019). Hydrogen production with a photovoltaic thermal system enhanced by phase change materials, Shiraz, Iran case study. *Journal of Cleaner Production*, 215, 1262-1278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.022>

- Barbu, M., Darie, G., & Siroux, M. (2020). A parametric study of a hybrid photovoltaic thermal (PVT) system coupled with a domestic hot water (DHW) storage tank. *Energies*, 13, 6481. <https://doi.org/10.3390/en13246481>
- Barkhordarian, G., Klassen, T., & Bormann, R. (2006). Catalytic mechanisms of transition metal oxides on hydrogen sorption reaction of magnesium. *Journal of Physical Chemistry*, 22, 110-120. <https://doi.org/10.1021/jp0541563>
- Bayrak Ural, Z. (2014). *Evsel Ykler İçin Yakıt Pili-Gneş Pili Hibrit Sisteminin Tasarımı, Modellenmesi ve Uygulaması*. (Doktora Tezi, Fırat niversitesi Fen Bilimleri Enstits)
- Behzadi, A., Habibollahzade, A., Ahmadi, P., & Gholamian, E. (2019). Multi-objective design optimization of a solar based system for electricity, cooling, and hydrogen production. *Energy*, 169, 696-709. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.047>
- Bektaş, B., Hakyemez, C., Yanık, D.., & Yıldızca, O. (2021). Hidrojen Enerjisi Bilgilendirme Notu. Enerji alışma Grubu.
- Benli, F. (2018). *Fotovoltaik (PV) ve Fotovoltaik Termal (PV/T) Kolektrlerin Deneyisel Olarak Karşılaştırılması*. (Yksek Lisans Tezi, Osmaniye Korkut niversitesi Fen Bilimleri Enstits)
- Budak, Y., & Devrim, Y. (2019). Comparative study of PV/PEM fuel cell hybrid energy system based on methanol and water electrolysis. *Energy Conversion and Management*, 179, 46-57. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.053>
- Cano, A.Y., Gonzlez-Huerta, R.G., Tufio-Velzquez, M., Barbosa R., & Escobar, B. (2016). Solar-hydrogen hybrid system integrated to a sustainable house in Mexico. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 19539-19545. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.203>
- Ceylan, C. (2020). *Design And Optimization of Solar Based Hybrid Power System*. (Master of Science Thesis, The Graduate School of Natural And Applied Sciences of Atılım University)
- Ceylan, C., & Devrim, Y. (2021). Design and simulation of the PV/PEM fuel cell based hybrid energy system using MATLAB/Simulink for greenhouse applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 22092-22106. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.034>
- engel, Y., & Boles, M.A. (2012). *Termodinamik*. İzmır Gven Kitapevi, Gven Bilimsel.
- engel, Y.A. (2011). *Isı ve Ktle Transferi*. İzmır Gven Kitapevi, Gven Bilimsel.

- De, R.K., & Ganguly, A. (2021) Modeling and analysis of a solar thermal-photovoltaic-hydrogenbased hybrid power system for running a standalone cold storage. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126202. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126202>
- Devrim, Y., & Bilir, L. (2016). Performance investigation of a wind turbine–solar photovoltaic panels–fuel cell hybrid system installed at Incek region – Ankara, Turkey. *Energy Conversion and Management*, 126, 759–766. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.062>
- Dimanta, I., Paiders, M., Gruduls, A. ,& Nikolajeva, V. (2019). Selection and modification of microorganisms and substrates for acquiring and separation of energy carriers. *Nanostructured Composite Materials for Energy Storage and Conversion*, 69-99. <https://www.researchgate.net/publication/332804450>
- Dincer, I., & Rosen, M. (2002). *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*. John Wiley & Sons.
- Dinçer, İ., & Ezan, M.A. (2018). *Heat Storage: A Unique Solution For Energy Systems*. Springer.
- Dinçer, İ., Eroğlu, İ., & Öztürk, M. (2021). Türkiye İçin Hidrojen Teknolojileri Yol Haritası. Hidrojen Teknolojileri Derneği.75s.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.). New York: Wiley.
- Dulkadiroğlu, H. (2018). Türkiye’de elektrik üretiminin sera gazı emisyonları açısından incelenmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7, 67-74. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.369948>
- Elmas, Ü. (2016). *Metal Hidrür Esaslı Hidrojen Depolanmasında Reaktör Tasarımının Sayısal ve Deneysel Olarak İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Engineering Equation Solver. <https://fchartsoftware.com/ees/> (Son Erişim Tarihi: 10.12.2022)
- Erdinç, O. (2012). *Şebekeden Bağımsız Uygulamalar İçin Hibrit Bir Rüzgâr Türbini/Fotovoltaik/Yakıt Hücresi/Batarya Sisteminin Optimizasyonu, Tasarımı ve Uygulaması*. (Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Fernandez, A.M., & Cano, U. (2011). Alkaline Electrolysis with Skeletal Ni Catalysts. <https://doi.org/10.5772/50617>
- Genç, Ö. (2013). *PEM Elektrolizörlerin Performansına Etki Eden Parametrelerin Sayısal İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi)

- Genç, Ö., & Kallioğlu, M.A. (2018). Proton Elektrolit Membranlı (PEM) elektrolizörün sayısal incelenmesi ve deneysel doğrulanması. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7, 370-380. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.387154>
- GEPA (Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası), 2021. <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/>. (Son erişim tarihi: 10.03.2022)
- Ghenai, C., Salameh, T., & Merabet, A. (2020). Technico-economic analysis of off grid solar PV/Fuel cell energy system for residential community in desert region. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 11460-11470. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.110>
- Gibout, S., Bédécarrats, J.P., Franquet, E., Lasvignottes, J.C., & Dumas, J.P. (2010). Energetic interest of the use of phase change materials in a solar domestic hot water system. <https://doi.org/10.18086/eurosun.2010.01.03>
- Glenk, G., Meier, R., & Reichelstein, S. (2021). Cost dynamic of clean energy technologies. *Schmalenbach Journal of Business Research*, 73,179-206. <https://doi.org/10.1007/s41471-021-00114-8>
- Grigoriev, A., Porembsky, V.I., & Fateev, V.N. (2006). Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31, 4-7. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.04.038>
- Gül, M., & Akyüz, E. (2020). Hydrogen Generation from a small-scale solar photovoltaic thermal (PV/T) electrolyzer system: Numerical model and experimental verification. *Energies*, 13, 2997. <https://doi.org/10.3390/en13112997>
- Gülcan, İ. (2011). *Karbon Nanotüplerde Hidrojen Depolanması* (Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Hancke, R., Holm, T., & Qystein Ulleberg. (2022). The case for high-pressure PEM water electrolysis. *Energy Conversion and Management*, 261, 115642. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115642>
- Heo, J.H., & Chung, B.J. (2012). Influence of helical tube dimensions on open channel natural convection heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 2829-2834. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.02.043>
- Hepbasli, A. (2008). A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 593–661. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.001>
- Herrando, M., Markides, C.N., & Hellgardt, K. (2014). A UK-based assessment of hybrid PV and solar-thermal systems for domestic heating and power: System

Performance. *Applied Energy*, 122, 288–309.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.061>

Hoeschele, M., Weitzel, E., & Backman, C. (2017). Assessment of a hybrid retrofit gas water heater. *Energy Efficiency & Renewable Energy*.

International Energy Agency (2021). <https://www.iea.org/reports/turkey-2021> (Son erişim tarihi: 11.03.2022)

IPCC. (2014). Climate Change Synthesis Report, 151s.

Jafari, M., Armaghan, D., Mahmoudi, S. S., & Chitsaz, A. (2019). Thermo-economic analysis of a standalone solar hydrogen system with hybrid energy storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 19614-19627.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.195>

Jia, Y., Ran, F., Zhu, C., & Fang, G. (2020). Numerical analysis of photovoltaic-thermal collector using nanofluid as a coolant. *Solar Energy*, 196, 625-636.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.12.069>

Kalogirou, S. (2009). *Solar Energy Engineering Processes and System*. Elsevier.

Kayfeci, M. (2011). *Metal Hidrür Reaktör Tasarım Parametrelerinin Hidrojen Depolama Özelliklerine Etkisinin Deneyisel Olarak İncelenmesi*. (Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)

Kazemian, A., Taheri, A., Sardarabadi, S., Ma, T., Fard, M.P., & Peng, J. (2020). Energy, exergy and environmental analysis of glazed and unglazed PVT system integrated with phase change material: An experimental approach. *Solar Energy*, 201, 178-189. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.096>

Khalid, F., Aydin, M., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2016). Comparative assessment of two integrated hydrogen energy systems using electrolyzers and fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 19836-19846.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.121>

Khosravi, A., Koury, R. N. N., Machado, L., & Pabon, J. J. G. (2018). Energy, exergy, and economic analysis of a hybrid renewable energy with hydrogen storage system. *Energy*, 148, 1087-1102. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.008>

Kim, J.H., & Kim, J.T. (2012). Comparison of Electrical and Thermal Performances of Glazed and Unglazed PVT Collectors. *International Journal of Photoenergy*.
<https://doi.org/10.1155/2012/957847>

Kocaman, B. (2014). Mikro Şebekeler İçin Örnek Bir Enerji Yönetimi Uygulaması. *Bitlis Eren Üniversitesi, Tatvan Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü*, 3, 35-52.

- Kocaman, B. (2015). *Yenilenebilir Enerji Kaynaklı Mikro Şebekelerde Enerji Yönetimi*. (Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Kornelakis, A. (2010). Multiobjective particle swarm optimization for the optimal design of photovoltaic grid-connected systems. *Solar Energy*, 84, 2022-2033. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2010.10.001>
- Koşar, C. (2021). Hydrogen storage methods. *Open Journal of Nano*, 6.
- León, D. R. F., Cavaliero, C. K. N., & Da Silva, E. P. (2020). Technical and economical design of PV system and hydrogen storage including a sodium hypochlorite plant in a small community: Case of study of Paraguay. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 5474-5480. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.059>
- Logie, W., Frank, E., Haller, M.Y., & Rommel, M. (2010). Investigation of immersed coil heat exchangers in regard to heat transfer and storage Stratification. <https://doi.org/10.18086/eurosun.2010.16.17>
- Logie, W., & Frank, E. (2013). A transient immersed coil heat exchanger model. *Journal of Solar Energy Engineering*. <https://doi.org/10.1115/1.4023928>
- Ma, T., Yang, H., Zhang, Y., Lu, L., & Wang, X. (2015). Using phase change materials in photovoltaic systems for thermal regulation and electrical efficiency improvement: A review and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1273-1284. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.003>
- Malavasi, B.M.T. (2015). *Replacing Finned Copper with Corrugated Stainless Steel, for the Heat Exchangers of a Solar Combisystem Store-Performance and Economic Evaluation*. (Master Thesis, European School of Solar Engineering)
- Malik, M.Z., Musharavati, F., Khanmohammadi, S., Pakseresht, A.H., Khanmohammadi, S. & Nguyen, D.D. (2020). Design and comparative exergy and exergo-economic analyses of a novel integrated Kalina cycle improved with fuel cell and thermoelectric module. *Energy Conversion and Management*, 220, 113081. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113081>
- Marangio, F., Pagani, M., Santarelli, M., & Cali, M. (2011). Concept of a high pressure PEM electrolyzer prototype. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 7807-7815. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.129>
- Marefati, M., & Mehrpooya, M. (2019). Introducing a hybrid photovoltaic solar, proton exchange membrane fuel cell and thermoelectric device system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 36, 100550. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.091>
- Mayer, M.J., Szilagyi, A., & Grof, G. (2020). Environmental and economic multi objective optimization of a household level hybrid renewable energy system by

- genetic algorithms. *Applied Energy*, 269, 115058. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115058>
- Murthy, S.S., Dutta, P., Sharma, R., & Rao, B.S. (2020). Parametric studies on a stand-alone polygeneration microgrid with battery storage. *Thermal Science and Engineering Progress*, 19, 100608. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100608>
- Nguyen, H.Q., & Shabani, B. (2020). Metal hydride thermal management using phase change material in the context of a standalone solar-hydrogen system. *Energy Conversion and Management* 224, 113352. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113352>
- Nguyen, H.Q., & Shabani, B. (2022). Thermal management of metal hydride hydrogen storage using phase change materials for standalone solar hydrogen systems: An energy/exergy investigation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 1735-1751. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.129>
- Nasrallah, S.B., & Jemni, A. (1997). Heat and mass transfer models in metal-hydrogen reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 22, 67-76.
- Natarajan, S. K., Kamran, F., Ragavan, N., Rajesh, R., Jena, R. K. & Suraparaju, S. K. (2019). Analysis of PEM hydrogen fuel cell and solar PV cell hybrid model. *Materials Today: Proceedings*, 17, 246-253. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.426>
- Open Studio. <https://www.openstudio.net/>. (Son Erişim Tarihi: 04.11.2022)
- Oruç, O., & Dinçer, İ. (2021). Assessing the potential of thermo-chemical water splitting cycles: A bridge towards clean and sustainable hydrogen generation. *Fuel*, 286, 119325. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119325>
- Özden, E., & Tari, İ. (2016). Energy–exergy and economic analyses of a hybrid solar–hydrogen renewable energy system in Ankara, Turkey. *Applied Thermal Engineering* 99, 169–178. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.042>
- Özışık, G. (2012). *Nükleer Hidrojen Üretimi ve Üretilen Hidrojenin Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücrelerinde Uygulaması*. (Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Pal, P. & Mukherjee, V. (2021). Off-grid solar photovoltaic/hydrogen fuel cell system for ,renewable energy generation: An investigation based on techno-economic feasibility assessment for the application of end-user load demand in North-East India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111421. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111421>

- Patil, R.K., Shende, B.W., & Ghosh, P.K. (1982). Designing a helical-coil heat exchanger. *Chemical Engineering*, 13.
- Pero, C.D., Butera, F.M., Piegari, L., Faifer, M., Buffoli, M., & Paolo, M. (2016). Characterization and monitoring of a self-constructible photovoltaic-based refrigerator. *Energies*, 9, 749. <https://doi.org/10.3390/en9090749>
- Rahaman, M.H., & Iqbal, M.T. (2019). A comparison of solar photovoltaic and solar thermal collector for residential water heating and space heating system. *European Journal of Engineering Research and Science*, 4, 12. <http://dx.doi.org/10.24018/ejers.2019.4.12.1640>
- Raccanello, J., Rech, S., & Lazzaretto, A. (2019). Simplified dynamic modeling of single-tank thermal energy storage systems, *Energy*, 182, 1154-1172. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.088>
- Ramesh, T., Dharunprasath, L., Kaliappan, S., & Emayavaramban, G. (2018). Performance of solar PV-fuel cell (FC) hybrid system for stand-alone applications. *International Journal of Engineering and Technology*, 7, 271-276. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.21.12380>
- Sachit, F.A., Rosli, M.A.M., Tamaldin, N., Misha, S., & Abdullah, A.L. (2018). Nanofluids used in Photovoltaic Thermal (PV/T) systems: a review. *International Journal of Engineering & Technology*, 7, 599-611. <https://www.researchgate.net/publication/328802644>
- Sacedón, C.G., Fernández, E.L., Osa-Puebla, A.R., Fernández, F.D., Vera, E.A. & Consuegra, A.L. (2021). Preliminary design of a self-sufficient electrical storage system based on electrolytic hydrogen for power supply in residential application. *Applied Sciences*, 11, 9582. <https://doi.org/10.3390/app11209582>
- Sakellariou, E., & Axaopoulos, P. (2018). An experimentally validated, transient model for sheet and tube PVT collector. *Solar Energy*, 174, 709-718. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.058>
- Santarelli, M., Cal, M., & Macagno S. (2004). Design and analysis of stand-alone hydrogen energy systems with different renewable sources. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29, 1571 – 1586. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.01.014>
- Samy, M. M., Barakat, S., & Ramadan, H. S. (2019). A flower pollination optimization algorithm for an off-grid PV-Fuel cell hybrid renewable system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 2141-2152. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.127>
- Scita, R., Raimondi, P., & Noussan, M. (2020). Green hydrogen: the holy grail of decarbonisation? an analysis of the technical and geopolitical implications of the

future hydrogen economy, *Çalışma Belgesi*, FEEM, İtalya.
<http://hdl.handle.net/10419/228789>

- Shaahid, S.M., & Elhadidy, M.A. (2007). Technical and economic assessment of grid-independent hybrid photovoltaic–diesel–battery power systems for commercial loads in desert environments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 1794–1810. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.03.001>
- Sheeba, A., Abhijith, C.M., & Prakash, M.J. (2019). Experimental and numerical investigations on the heat transfer and flow characteristics of a helical coil heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*, 99, 490-497. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.12.002>
- Shirinbakhsh, M., Mirkhani, N., & Sajadi, B. (2016). Optimization of the PCM-integrated solar domestic hot water system under different thermal stratification conditions. *Energy Equipment and Systems*, 4(2), 271-279.
- Singh, A., Baredar, P., & Gupta, B. (2017). Techno-economic feasibility analysis of hydrogen fuel cell and solar photovoltaic hybrid renewable energy system for academic research building. *Energy Conversion and Management*, 145, 398-414. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.014>
- Sorgulu, F., & Dincer, I. (2018). A renewable source based hydrogen energy system for residential applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 5842-5851. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.101>
- Soytürk Yıldırım, G. (2018). *Faz Değiştiren Madde ile Güneş Enerjisinin Depolanmasının ve Isıtma Uygulamalarında Kullanımının İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Spiegel, C. (2008). *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB®*. Academic Press.
- Telli, A.Y. (2010). *Şebeke Bağlantılı ve Şebekeden Bağımsız Hibrit Güç Sistemleriyle Enerji Üretiminin Ekonomik Analizi*. (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü)
- Temiz, M., & Javani, N. (2020). Design and analysis of a combined floating photovoltaic system for electricity and hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 3457-3469. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.226>
- Tevfik, Y. (2017). *Bir Evin Elektrik Enerjisi İhtiyacının Şebekeden Bağımsız Olarak Karşlanması: Güneş Pili, PEM Elektrolizör ve PEM Yakıt Pili Bütünleşik Sistem Modeli Geliştirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halis Demir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)

- Tiar, M., Betka, A., Drid, S., Abdeddaim, S., Becherif, M., & Tabandjat, A. (2017). Optimal energy control of a PV-fuel cell hybrid system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 1456-1465. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.113>
- Toghyani, S., Baniasadi, E., & Afshari, E. (2021). Performance assessment of an electrochemical hydrogen production and storage system for solar hydrogen refueling station. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 24271-24285. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.026>
- Tong, L., Xiao, J., Yang, T., & Benard, R.C. (2019). Complete and reduced models for metal hydride reactor with coiled-tube heat exchanger. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 15907-15916. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.07.102>
- Tsutomu, O., & Yoshinori, S. (2004). Optimum hydrogen generalin capacity and current density of the PEM-type water electrolyser operated only during the off-peak period of electricity demand. *Journal of Power Sources* 129, 229–237. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.11.050>
- Uçar, E. (2007). *Metal Hidrit Nanoparçacıkların Sentezi ve Hidrojen Depolama Özelliklerinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Villagra, A., & Millet, P. (2019). An analysis of PEM water electrolysis cells operating at elevated current densities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 9708-9717. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.179>
- Waegel, A., Byrne, J., Tobin, D., & Haney, B. (2006). Hydrogen Highways: Lessons on the energy technology-policy interface. *Bulletin of Science, Technology & Society*, 26, 288-298. <https://doi.org/10.1177/0270467606291834>
- Yang, H., Lu, L., & Zhou, W. (2007). A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system. *Solar Energy*, 81, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.010>
- Yazdanifard, F., Ebrahimnia-Bajestan, E., & Ameri, Mehran. Investigating the performance of a water-based photovoltaic/thermal (PV/T) collector in laminar and turbulent flow regime. *Renewable Energy*, 99, 295-306. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.004>
- Yılancı, A. (2008). *Güneş-Hidrojenli Bir Sistemin Kurulması ve Performansının Analizi*. (Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Yılmaz, A., Ünvar, S., Ekmen, M., & Aydın, S. (2017). Yakıt pili teknolojisi. *Technological Applied Sciences*, 12, 185-192. <http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2017.12.4.2A0126>

- Yiğit, T. (2013). *Bir Evin Elektrik İhtiyacının Şebekeden Bağımsız Olarak Karşılanması: Güneş Pili, PEM Elektrolizör ve PEM Yakıt Pili Bütünleşik Sistem Modeli Geliştirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Yoon, J. H., Bladick, R., & Novoselac, A. (2014). Demand response for residential buildings based on dynamic price of electricity. *Energy and Buildings*, 80, 531-541. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.002>
- Zhou, W., Lou, C., Li, Z., Lu, L., & Yang, H. (2010). Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar–wind power generation systems. *Applied Energy*, 87, 380–389. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.08.012>
- Zhang, Y., Sun, H., & Guo, Y. (2020). Integration design and operation strategy of multi-energy hybrid system including renewable energies, batteries and hydrogen. *Energies*, 13, 5463. <https://doi.org/10.3390/en13205463>
- Zulkepli, A., Ibrahim, H., Alias, A., Azran, Z., & Basrawi, F. (2016). Review on the recent developments of photovoltaic thermal (PV/T) and proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) based hybrid system. *MATEC Web of Conferences*. 74, 00019. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20167400019>