



**CARNOT BATARYALARI İLE ENERJİ DEPOLANMASININ
İNCELENMESİ**

Güven Hasret YILMAZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- 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 çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza

Güven Hasret YILMAZ

20/07/2022

CARNOT BATARYALARI İLE ENERJİ DEPOLANMASININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Güven Hasret YILMAZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2022

ÖZET

Tüm dünyada artan küresel ısınma endişeleri ve fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerjinin kullanımının artması enerji arz ve talebinde de bir takım sorunları beraberinde getirmektedir. Akıllı şehirler konsepti ile elektrik enerjisinin tümüyle yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılandığı durum arz ve talep senaryolarında gün içinde ve mevsimsel olarak dengesizlikleri ortaya çıkaracaktır. Yenilenebilir enerjinin kesikli yapısı emre amadelik konusunda da sürekliliğin sağlanamamasını beraberinde getirecektir. Bu kapsamda enerji depolama teknikleri büyük önem kazanmaktadır. Ancak, maliyet ve uygulanabilirlik açısından termal enerji depolama daha ön planda yer bulmaktadır. Termal Enerji Depolama sistemleri kısa ya da uzun vadeli olarak ısı enerjisinin depolandığı sistemlerdir. Bununla birlikte, bu enerjinin tekrar elektriğe çevrilmesi ile elektrik enerjisinde arz-talebin dengelenmesi Carnot Batarya'ları ile sağlanabilir. Yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilen arz fazlası enerjinin ısıl direnç, ısı pompası gibi teknolojilerle ısı enerjisine çevrilmesi ve depolanması sonrasında talep olduğunda ve yenilenebilir kaynaklar mevcut olmadığında konvansiyonel elektrik üretim sistemleri ile tekrar elektrik eldesi Carnot Bataryaları ile mümkün olabilmektedir. Carnot Batarya'ları, yüksek verime, uzun ömre, düşük maliyetlere sahip sistemlerdir. Ayrıca, bu sistemlerde herhangi bir coğrafik koşula ihtiyaç duyulmaz. Bu çalışmada, fotovoltaiik sistemler üzerinden elde edilen talep fazlası elektrik enerjisinin ısıl dirençler yoluyla ısı enerjisine çevrilmesi ve sonrasında Brayton çevrimi ile iki farklı konfigürasyonda (Model 2 ve Model 3) elektrik üretiminin enerji, ekserji ve maliyet çalışmaları yapılmıştır. Çalışmada incelenen Modeller için dört farklı basınç oranının ve dört farklı ısı depolama malzemesinin etkileri incelenmiştir. Analizlerde MATLAB'de oluşturulan ve güneş yolunu da hesaplayan genel bir kod yazılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Model 2'nin ortalama çevrim verimi farklı basınç oranlarına göre %18,76 – 20,27 aralığında iken şarj-deşarj verimi ise farklı malzemelere ve basınç oranlarına göre % 35,4 – 56,96 aralığında olmuştur. Model 3'ün ortalama çevrim verimi ise yine farklı basınç oranlarına göre % 28,7 – 31,06 aralığında iken şarj-deşarj verimi de farklı malzemelere ve basınç oranlarına göre % 35,4 – 52,81 aralığında olmuştur.

Bilim Kodu : 91408

Anahtar Kelimeler : Carnot Bataryaları, termal enerji depolama, akıllı şehirler, sürdürülebilirlik

Sayfa Adedi : 132

Danışman : Doç. Dr. M. Zeki YILMAZOĞLU

INVESTIGATION OF ENERGY STORAGE WITH CARNOT BATTERIES

(M. Sc. Thesis)

Güven Hasret YILMAZ

GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE

June 2022

ABSTRACT

Increasing global warming concerns all over the world and the increase in the use of renewable energy instead of fossil fuels bring along some problems in energy supply and demand. With the concept of smart cities, the situation where electrical energy is completely supplied from renewable energy sources will reveal daily and seasonal imbalances in supply and demand scenarios. The intermittent nature of renewable energy will also lead to the lack of continuity in terms of availability. In this context, energy storage techniques gain great importance. However, thermal energy storage is more prominent in terms of cost and applicability. Thermal Energy Storage systems are systems where heat energy is stored for short or long term. However, by converting this energy back into electricity, the supply and demand balance in electrical energy can be achieved with Carnot Batteries. After the excess supply of energy produced by renewable energy sources is converted into heat energy and stored with technologies such as thermal resistance and heat pump, when there is electricity demand and renewable sources are not available, it is possible to obtain electricity again with conventional electricity generation systems with Carnot Batteries. In this study, energy, exergy and cost analyses of electricity production were carried out by converting excess demand electrical energy from photovoltaic systems to heat energy through thermal resistors and then using the stored in the two different Brayton cycle configuration (Model 2 and Model 3). In the analysis, a general code was written, which was created in MATLAB and also calculates the solar path. According to the results obtained, the average cycle efficiency of Model 2 was between 18.76% and 20.27% according to different pressure ratios, while the round-trip efficiency was between 35.4 - 56.96% according to different materials and pressure ratios. While the average cycle efficiency of Model 3 was between 28.7 - 31.06% according to different pressure ratios, the round-trip efficiency was between 35.4 - 52.81% according to different materials and pressure ratios.

Science Code : 91408

Key Words : Carnot Batteries, thermal energy storage, smart cities, sustainability

Page Number : 132

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. M. Zeki YILMAZOĞLU

TEŞEKKÜR

Çalışmam boyunca bana sağladığı katkılardan, yol göstermesinden ve çalışmadaki emeğinden ötürü danışmanım Doç. Dr. M. Zeki YILMAZOĞLU'na, bana manevi katkılarından ve bilgilerini paylaştıkları için arkadaşlarım, İbrahim KIZILTOPRAK'a, Ahmet Fırat ÇELİK'e, Arş. Gör. Emre Aşkın ELİBOL'a, Arş. Gör. Yasin DEMİRER'e, Arş. Gör. Görkem AĞÖREN'e ve Yeliz ERDOĞAN'a, maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgememiş dayım Güvenç GÜVEN'e, anneannem Gülhan GÜVEN'e, annem Emel YILMAZ'a ve babam Süleyman YILMAZ'a teşekkürü borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. MATERYAL VE METOT	37
2.1. Matematiksel Model ve Parametreler	44
2.1.1. Model Validasyonu	45
2.1.2. Enerji Korunum Denklemleri.....	51
2.1.3. Ekserji Analizi.....	53
2.1.4. Maliyet Analizi.....	56
3. SONUÇLAR	61
3.1. Brayton Çevriminin (Model 1) Sonuçları	61
3.2. Model 2 ve Model 3'ün Ortak Sonuçları	63
3.2.1. Şarj Prosesi Sonuçları	63
3.2.2. Deşarj Prosesi Sonuçları.....	68
3.3. Model 2'ye Özgü Olan Sonuçlar	72
3.4. Model 3'e Özgü Olan Sonuçlar	80
3.5. Model 2 ve Model 3'ün Karşılaştırılması	94
3.6. Model 1, Model 2 ve Model 3'ün Karşılaştırılması	101

	Sayfa
4. TARTIŞMA.....	105
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ	113



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Bazı ülkelerin 2015 yılında yüzdesel olarak elektrik üretim kaynakları....	2
Çizelge 1.2. Enerji depolama sistemlerinin enerji yoğunlukları, depolanan birim enerji başına maliyetleri, verimleri ve ömürleri.....	7
Çizelge 1.3. Dünyada faaliyet gösteren Termal Enerji Depolama sistemleri	10
Çizelge 1.4. Bu çalışmada yer alan Carnot Batarya'ları ile ilgili çalışmalar ve bu çalışmalara ait birtakım veriler	15
Çizelge 1.5. Bu çalışmada yer alan Carnot Batarya'ları ile ilgili çalışmalar ve bu çalışmalara ait birtakım veriler (devamı)	16
Çizelge 1.6. Bu çalışmada yer alan Carnot Batarya'ları ile ilgili çalışmalar ve bu çalışmalara ait birtakım veriler (devamı)	17
Çizelge 2.1. Model 1'de kullanılan parametrelerin örnek alındığı gaz türbinlerinin özellikleri	38
Çizelge 2.2. Brayton çevriminde (Model 1) kullanılan parametreler	39
Çizelge 2.3. Model 2 ve Model 3'te kullanılan parametreler	43
Çizelge 2.4. Depolama malzemesi ve tanka ait birtakım özellikler	44
Çizelge 2.5. Doğrulama çalışmasında kullanılan parametreler.....	46
Çizelge 2.6. Çalışmada kullanılan malzemeler ve tonaj fiyatları.	60
Çizelge 3.1. Brayton çevrimine (Model 1) ait sonuçlar	62

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Kaliforniya eyaleti için oluşturulmuş örnek bir ördek eğrisi.....	5
Şekil 1.2. Akıllı şehir konsepti ve bu konseptin önemli araçları	5
Şekil 1.3. Mevcut enerji depolama sistemleri ve kapasiteleri.....	7
Şekil 1.4. Carnot Bataryalarında elektrik-ısı ve ısı-elektrik dönüşümünün temsili görünümü	8
Şekil 1.5. Carnot Bataryalarının farklı konfigürasyonları	9
Şekil 1.6. Carnot Bataryası: Isı Pompası-Duyulur Isı Depolama-Rankine Çevrimi.....	9
Şekil 1.7. Siemens Gamesa şirketinin Carnot Batarya projesinin tarihsel süreci ve özellikleri.....	11
Şekil 1.8. Siemens Gamesa şirketinin 2019 yılında devreye aldığı bir demonstratör Carnot Batarya sistemi.....	11
Şekil 1.9. Carnot Batarya'ları ile ilgili yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı.....	12
Şekil 1.10. Carnot Batarya'ları ile ilgili yapılan çalışmaların farklı disiplinlere göre dağılımı	13
Şekil 1.11. Carnot Batarya'ları ile ilgili yapılan çalışmaların ülkelere göre dağılımı	13
Şekil 1.12. Tezde yer verilen Carnot Batarya'ları ile ilgili yapılan çalışmaların analiz tipine göre dağılımı	14
Şekil 1.13. Peterson'ın (2011) çalışmasındaki sistem şeması.....	18
Şekil 1.14. Wojcik ve Wang'ın çalışmalarında inceledikleri sistemin şeması	23
Şekil 1.15. Benato ve Stoppato'nun (2018) inceledikleri Carnot Batarya sistemi	30
Şekil 2.1. Çalışmada incelenen Brayton çevriminin (Model 1) şematik görünümü.....	38
Şekil 2.2. Model 2'nin şematik görünümü.....	40
Şekil 2.3. Model 3'ün şematik görünümü.....	42
Şekil 2.4. Enerji Depolama Tankının temsili görseli.....	44
Şekil 2.5. Validasyon için seçilen çalışmadaki tank geometrisi ve diskritizasyonu	47

Şekil	Sayfa
Şekil 2.6. Singh ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada elde ettikleri 4. ve 8. saat sonundaki tankın sıcaklık dağılımları (sol), validasyon çalışmasında ulaşılan 4. ve 8. saatin sonundaki sıcaklık dağılımları (sağ).....	48
Şekil 2.7. Enerji Depolama Tankının diskritize edilmiş görseli	48
Şekil 2.8. Tez çalışmasının akış şeması	56
Şekil 3.1. Güneş ışınlamı saatlik değişim grafiği	63
Şekil 3.2. Çalışmada oluşturulan ördek eğrisi	64
Şekil 3.3. Şarj periyodu için tanktaki basınç kaybının zamana göre değişimi	65
Şekil 3.4. Fanda tüketilen gücün zamana göre değişimi.....	66
Şekil 3.5. Elektrik direncinden hava tarafından çekilen birim zamandaki ısı transferinin zamana göre değişimi	67
Şekil 3.6. Şarj prosesi için enerji depolama tankındaki sıcaklık dağılımı	68
Şekil 3.7. Havanın deşarj periyodu sırasında tanktan çektiği birim zamandaki ısı transferinin zamana göre değişimi	69
Şekil 3.8. Deşarj prosesi için enerji depolama tankındaki sıcaklık dağılımı	69
Şekil 3.9. Tanktaki ekserjinin zamana göre değişimi	70
Şekil 3.10. Tanktaki birim zamanda yok edilen ekserjinin zamana göre değişimi.....	71
Şekil 3.11. Tankın ekserjik veriminin zamana göre değişimi.....	71
Şekil 3.12. Türbin giriş sıcaklığının zamana göre değişimi.....	72
Şekil 3.13. Türbin çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi	73
Şekil 3.14. Türbinden elde edilebilecek gücün zamana göre değişimi.....	74
Şekil 3.15. Net çevrim gücünün zamana göre değişimi.....	74
Şekil 3.16. Türbindeki ekserjinin zamana göre değişimi.....	75
Şekil 3.17. Türbinde birim zamanda yok edilen ekserjinin zamana göre değişimi	76
Şekil 3.18. Türbinin ekserjik veriminin zamana göre değişimi	77
Şekil 3.19. Geri-iş oranının zamana göre değişimi.....	78

Şekil	Sayfa
Şekil 3.20. Çevrim veriminin zamana göre değişimi.....	79
Şekil 3.21. Şarj-deşarj veriminin basınç oranlarına göre değişimi	80
Şekil 3.22. Yanma odasından havaya geçen birim zamandaki ısı transferinin zamana göre değişimi.....	82
Şekil 3.23. Yanma odasında yakılmak üzere kullanılan yakıtın kütsel debisinin zamana göre değişimi	83
Şekil 3.24. Yakıtın ekserjisinin zamana göre değişimi.....	84
Şekil 3.25. Yanma odasında birim zamandaki ekserji değişimi	85
Şekil 3.26. Yanma odasındaki birim zamanda yok edilen ekserjinin zamana göre değişimi.....	85
Şekil 3.27. Yanma odasının ekserjik veriminin zamana göre değişimi	86
Şekil 3.28. Hava içerisindeki azotun, oksijenin, karbondioksitin ve su buharının molar yüzdesinin zamana göre değişimi	87
Şekil 3.29. Türbin çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi	88
Şekil 3.30. Türbin gücünün zamana göre değişimi.....	88
Şekil 3.31. Net çevrim gücünün zamana göre değişimi.....	89
Şekil 3.32. Türbindeki ekserjinin zamana göre değişimi.....	90
Şekil 3.33. Türbinde birim zamanda yok edilen ekserjinin zamana göre değişimi	90
Şekil 3.34. Türbinin ekserjik veriminin zamana göre değişimi	91
Şekil 3.35. Geri-iş oranının zamana göre değişimi.....	92
Şekil 3.36. Deşarj çevriminin veriminin zamana göre değişimi	92
Şekil 3.37. Şarj-deşarj veriminin zamana göre değişimi	93
Şekil 3.38. Model 2 ve Model 3 için şarj-deşarj verimlerine enerji depolama malzemelerinin etkisi	95
Şekil 3.39. Farklı malzemeler için depolanan birim enerji başına maliyet.....	96
Şekil 3.40. Farklı malzemelerin proje değerlendirme metotlarına etkisi (PR=6,9)	97

Şekil	Sayfa
Şekil 3.41. Farklı malzemelerin proje değerlendirme metotlarına etkisi (PR=7,4)	98
Şekil 3.42. Farklı malzemelerin proje değerlendirme metotlarına etkisi (PR=8,5)	99
Şekil 3.43. Farklı malzemelerin proje değerlendirme metotlarına etkisi (PR=10,4)	100
Şekil 3.44. Proje değerlendirme metotlarına basınç oranlarının etkisi	101
Şekil 3.45. Model 1, Model 2 ve Model 3 için geri-iş oranının basınç oranına göre değişimi	102
Şekil 3.46. Model 1, Model 2 ve Model 3 için net çevrim enerjisinin basınç oranına göre değişimi	102
Şekil 3.47. Model 1, Model 2 ve Model 3 için çevrim veriminin basınç oranına göre değişimi	103
Şekil 3.48. Model 1, Model 2 ve Model 3 için proje değerlendirme metotlarının basınç oranına göre değişimi	104

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
m^3	Metreküp
m^2	Metrekare
m	Metre
$^{\circ}C$	Santigrat Derece
kg	Kilogram
s	Saniye
bar	Bar
kJ	KiloJoule
$kmol$	Kilomol
K	Kelvin
dk	Dakika
kW	KiloWatt
Kısaltmalar	Açıklamalar
AB	Akış Bataryaları (Flow Batteries)
CB	Carnot Batarya (Carnot Battery)
EED	Elektrostatik Enerji Depolama (Electrostatic Energy Storage)
HD	Hidrojen Depolama (Hydrogen Storage)
PHED	Pompalanmış Hidroelektrik Enerji Depolama (Pumped Hydro Energy Storage)
SHED	Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama (CAES Compressed Air Energy Storage)
SK	Süper Kapasitör (Supercapacitor)

Kısaltmalar**Açıklamalar****SMED**

Süperiletken Manyetik Enerji Depolama
(Superconductor Magnetic Energy Storage)

TED

Termel Enerji Depolama (Thermal Energy Storage)

YED

Yer-Çekimi ile Enerji Depolama (Gravity Energy
Storage)



1. GİRİŞ

Günümüz dünyasında, insanlık için en büyük önem arz eden konulardan biri enerjidir. Enerji, doğrudan bir ülkenin gelişmişlik seviyesi hakkında bilgi verebilmektedir. Gelişmiş ülkelerde endüstriyel üretim, bilimsel araştırmalar ve teknolojik ilerlemelerden dolayı daha fazla enerji tüketimi, dolayısıyla daha fazla enerji üretimi olmaktadır. Az gelişmiş ülkelerde ise, sanayi üretimi ve teknolojik gelişmeler çok fazla yaşanmadığı için enerji tüketimi, dolayısıyla enerji üretimi azdır. Ayrıca, enerji üretim biçimi de ülkenin gelişmişlik seviyesi hakkında bilgi veren diğer bir husustur. Gelişmemiş veya gelişmekte olan ülkelerde enerji üretimi büyük ölçekte fosil kaynaklı olurken, gelişmiş ülkelerde ise yenilenebilir enerji sistemlerinin kullanımı oldukça yaygındır. Çizelge 1.1’de bazı ülkelerdeki 2015 yılına ait bazı elektrik üretim kaynakları yüzdesel olarak verilmiştir. Gelişmiş ülkelerde, yenilenebilir enerji sistemlerinin kullanımının yaygın olmasının yanında, bu sistemlerin yoğunluğu artırılmaya çalışılmaktadır. Gelişmiş ülkelerde yenilenebilir enerji sistemlerinin kullanımının bu derece fazla olması ve artırılma çabası, bu enerji sistemlerinin çevre dostu olmaları, fazladan dış bir enerji kaynağına ihtiyaç duymamaları ve yerli kaynakların kullanımıdır. Bu yüzden, ülkelerde yenilenebilir enerji sistemlerinin kullanımı oldukça önem arz etmektedir. Ulusal ve uluslararası fon destekleri yenilenebilir enerji sistemlerinin yaygınlaşmasına teşvik sağlamak için araştırmalara maddi destek sağlamaktadırlar (Benato ve Stoppato, 2018a).

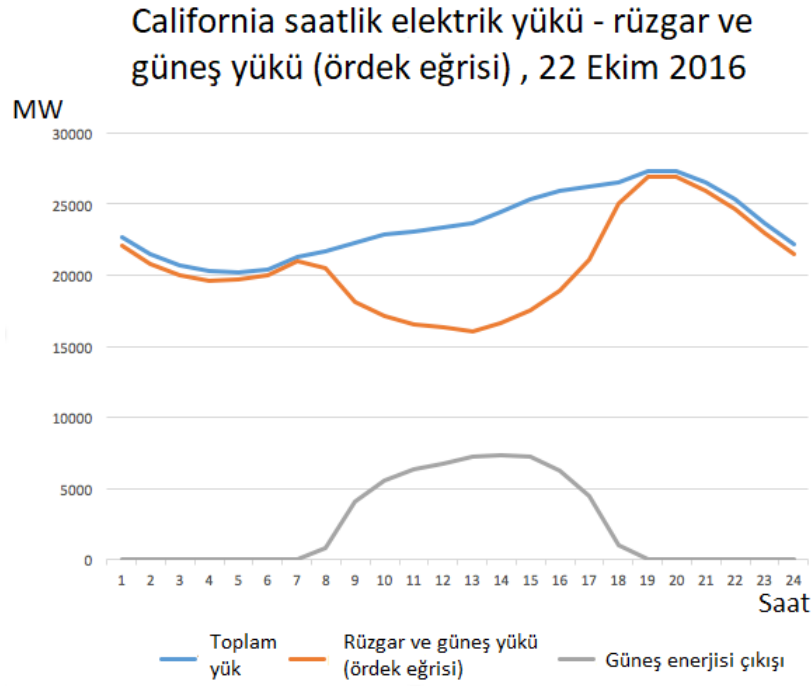
Çizelge 1.1. Bazı ülkelerin 2015 yılında yüzdesel olarak bazı elektrik üretim kaynakları
(World Development Indicators)

Ülke	Doğal Gaz	Petrol	Hidroelektrik	Yenilenebilir Kaynaklar	Nükleer Güç
ABD	% 31,9	% 0,9	% 5,8	% 7,4	% 19,3
Almanya	% 9,8	% 1,0	% 3,0	% 26,3	% 14,3
Avustralya	% 20,8	% 2,7	% 5,3	% 8,3	% 0,0
Avusturya	% 12,6	% 1,4	% 60,0	% 16,5	% 0,0
Azerbaycan	% 86,1	% 6,5	% 6,6	% 0,4	% 0,0
Birleşik Arap Emirlikleri	% 98,5	% 1,2	% 0,0	% 0,2	% 0,0
Birleşik Krallık	% 29,7	% 0,6	% 1,9	% 23,0	% 20,9
Brezilya	% 13,7	% 5,0	% 61,8	% 12,1	% 2,6
Çin	% 2,5	% 0,2	% 19,1	% 4,9	% 2,3
Çekya	% 2,7	% 0,1	% 2,2	% 9,2	% 32,5
Danimarka	% 6,3	% 1,1	% 0,1	% 65,4	% 0,0
Dünya	% 22,8	% 3,3	% 15,9	% 6,8	% 8,1
El Salvador	% 0,0	% 42,2	% 22,6	% 35,2	% 0,0
Estonya	% 0,6	% 1,2	% 0,3	% 14,2	% 0,0
Etiyopya	% 0,0	% 0,0	% 92,7	% 7,3	% 0,0
Fransa	% 3,5	% 0,4	% 9,7	% 6,2	% 77,6
Gabon	% 46,0	% 10,2	% 43,2	% 0,6	% 0,0
Gana	% 38,8	% 0,0	% 50,9	% 0,0	% 0,0
Hollanda	% 42,3	% 1,3	% 0,1	% 12,4	% 3,5
Hindistan	% 4,9	% 1,7	% 10,0	% 5,4	% 2,8
İspanya	% 18,9	% 6,2	% 10,1	% 24,8	% 20,6
İsveç	% 0,3	% 0,2	% 46,5	% 16,8	% 34,7
İzlanda	% 0,0	% 0,0	% 73,3	% 26,7	% 0,0
Japonya	% 39,6	% 7,5	% 8,2	% 7,8	% 0,9
Kanada	% 10,0	% 1,2	% 56,7	% 6,3	% 15,5
Küba	% 14,5	% 46,0	% 0,2	% 3,7	% 0,0
Lübnan	% 0,0	% 97,4	% 2,6	% 0,0	% 0,0
Libya	% 53,7	% 46,3	% 0,0	% 0,0	% 0,0
Litvanya	% 46,5	% 6,5	% 8,2	% 31,2	% 0,0
Malezya	% 46,6	% 1,2	% 9,3	% 0,7	% 0,0
Meksika	% 59,9	% 10,1	% 9,9	% 5,5	% 3,7
Norveç	% 1,8	% 0,0	% 95,8	% 1,9	% 0,0
Pakistan	% 25,7	% 37,2	% 30,7	% 0,8	% 4,8
Portekiz	% 20,6	% 2,6	% 16,9	% 30,6	% 0,0
Rusya	% 49,7	% 0,9	% 15,8	% 0,1	% 17,0
Suudi Arabistan	% 55,8	% 20,4	% 0,0	% 0,0	% 0,0
Türkiye	% 37,9	% 0,8	% 25,6	% 6,3	% 0,0
Ukrayna	% 6,2	% 0,5	% 3,3	% 1,1	% 48,6

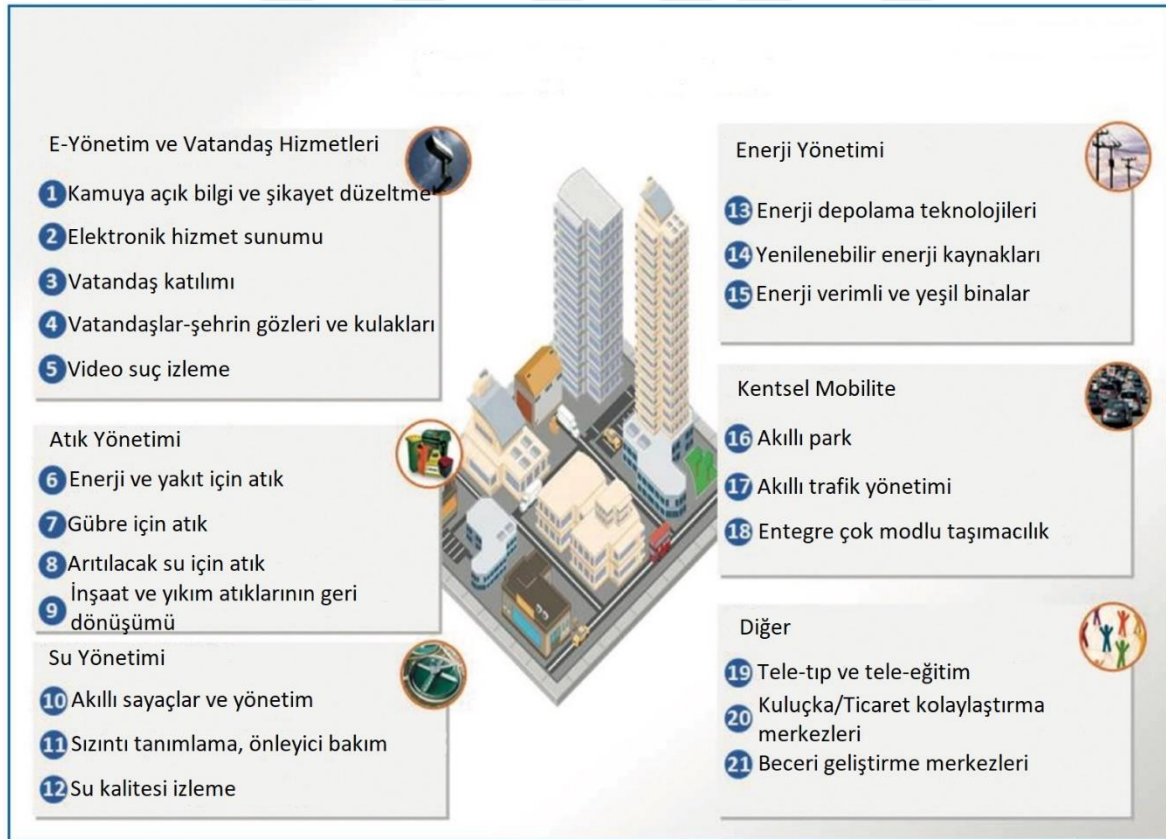
Yenilenebilir enerji sistemleri genel haliyle, hidroelektrik enerji, rüzgâr enerjisi, biyoenerji, güneş enerjisi, jeotermal enerji ve dalga enerjisinden oluşmaktadır. Bu enerji sistemlerinin birçok avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Yenilenebilir enerji sistemleri, düşük karbon emisyonuna sahip, ucuz elektrik üretimi imkânı sunan, sonsuz bir enerji kaynağına sahip olan ve daha temiz su ve havaya sahip olmamızı sağlayan sistemlerdir. Her ne kadar birçok avantajı olsa da, yenilenebilir enerji sistemlerinin belirli dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar, yüksek ilk yatırım maliyetleri, coğrafik kısıtlamalar ve bu sistemlerin çevre koşullarına doğrudan bağımlı olmalarıdır. Çevre koşulları, her zaman elektrik üretimi için uygun olmamaktadır ve kesikli enerji üretimi yapısı en büyük sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle, 7/24'lük bir elektrik üretiminden bahsetmek oldukça zordur. Enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji sistemlerinin bu dezavantajını ortadan kaldırabilmektedir. Enerji depolama sistemleri ve yenilenebilir enerji sistemlerinin bütünleşmiş bir şekilde kullanımıyla, oldukça verimli bir enerji sistemleri ortaya çıkmaktadır. Bu ortak kullanım, elektrik arzı ve talebine göre yapılmaktadır. Elektrik arzı, elektrik talebini geçtiği durumlarda enerji depolama sistemlerinde enerji depolanırken, elektrik talebi, elektrik arzını geçtiği durumlarda ise enerji depolama sistemlerinde depolanan enerji, elektriğe dönüştürülmektedir. Enerji depolama sistemleri yenilenebilir enerji sistemleriyle birlikte kullanılabildiği gibi ayrıca bu sistemler, konvansiyonel enerji santralleriyle beraber de kullanılabilmektedirler. Özellikle Avrupa Komisyonu tarafından önerilen “55 hedefine uyum” ve yeşil mutabakat paketleri düşünüldüğünde, enerji depolama sistemlerinin önemi artmaktadır. Avrupa Komisyonu tarafından önerilen paketlerden “55 hedefine uyum”, Avrupa Birliği içerisinde 2030 yılı itibarıyla sera gazı emisyonlarının %55 oranında azaltılmasının hedeflendiği bir pakettir ve 2021 yılında önerilmiştir. Yeşil mutabakat ise, “55 hedefine uyum” paketine benzer ve sera gazı emisyonu değerlerinin 1990 yılındaki seviyelerine göre 2030 itibarıyla en az %50 ve hatta %55'e doğru azaltılmasının planlandığı, 2050 yılında ise iklimin nötr hale getirilmesinin planlandığı bir pakettir.

Günümüzde dünyanın geleceği düşünüldüğünde, ilk akla gelen öğelerden biri akıllı şehir konseptidir. Akıllı şehirler, nesnelerin interneti sayesinde birbirleriyle daima iletişim halinde olan nesnelerin yer aldığı ve bu nesnelerin birbirlerine veri aktararak bölgede insanlığın yararına en verimli şekilde hizmet imkanının sunulduğu bir konsepttir. Bu konseptin temelini oluşturan birtakım teknolojik öğeler vardır. Bu teknolojik öğelerden en önemlileri, trijenerasyon teknolojileri, yenilenebilir enerji sistemleri, düşük-güç kaynakları, kaynakların kademeli kullanım teknolojileri, akıllı elektrik ve termal ağ bileşenleri, mobilite

teknolojileri, bilgi ve iletişim teknolojileri ve enerji depolama sistemleridir (Schmidt ve diğerleri, 2012; Mekhdiev ve diğerleri, 2018). Her ne kadar enerji depolama sistemleri, akıllı şehir konseptinin önemli bir parçası olsa da, akıllı şehir konsepti de enerji depolama sistemleri için oldukça önemlidir. Akıllı şehir konseptinde nesneler arasındaki veri aktarımından ve yapay zekânın efektif kullanımından dolayı, enerji depolama sistemlerinin verimleri maksimum düzeyde, maliyetleri de minimum düzeyde olacaktır. Yenilenebilir enerji sistemlerindeki elektrik arz-talebinin dengesizliğini, “ördek eğrisi” olarak tanımlanan eğri çok iyi ifade edebilmektedir. “Ördek eğrisi”, bir gün boyunca yenilenebilir enerji sistemlerinde enerji üretimi ile enerji talebinin dengesizliğini gösteren bir eğridir. Kaliforniya eyaleti için oluşturulmuş bir “ördek eğrisi” örneği, Şekil 1.1’de görülmektedir. Bu ördek eğrisinde, toplam yük, rüzgar ve güneş yükü ve güneş enerjisi çıkışı eğrileri görülmektedir. Bir akıllı şehir sisteminde bu eğrinin elde edilmesi ve işlenmesi sayesinde, yenilenebilir enerji-enerji depolama sistemleri en verimli şekilde kullanılabilirler. Garlik (2022), merkezi bir akıllı enerji depolama sisteminin fotovoltaik paneller ve pil depolama sistemi ile kullanıldığında, günlük enerji maliyetinin önemli ölçüde düştüğünü bildirmiştir. Günümüz dünyasının en büyük enerji problemleri, yakıt fiyatlarındaki artış, sera gazı salınımı sonucu iklim değişikliklerinin ve küresel ısınmanın yaşanması ve birincil enerji kaynaklarının sınırlı olması ve rezervlerinin azalmasıdır. Bu problemler, enerji depolama sistemlerinin kullanımı ve enerji sistemlerinin, akıllı sistemlerin enerji sistemlerine entegrasyonu ile verimlerinin artırılması ile çözülebilir (Parameshwaran ve diğerleri, 2012). Akıllı şehir uygulamalarında nesnelerin interneti uygulamasının yardımıyla enerji piyasası fiyatlarının modeline göre enerji, düşük maliyetlerle şarj edilebilmektedir ve yüksek fiyatlarla deşarj prosesi gerçekleştirilebilmektedir (Golpîra ve Bahramara, 2020). Akıllı şehir sistem şeması ve bu konseptin önemli elemanları, Şekil 1.2’de görülmektedir.



Şekil 1.1. Kaliforniya eyaleti için oluşturulmuş örnek bir ördek eğrisi



Şekil 1.2. Akıllı şehir konsepti ve bu konseptin önemli araçları

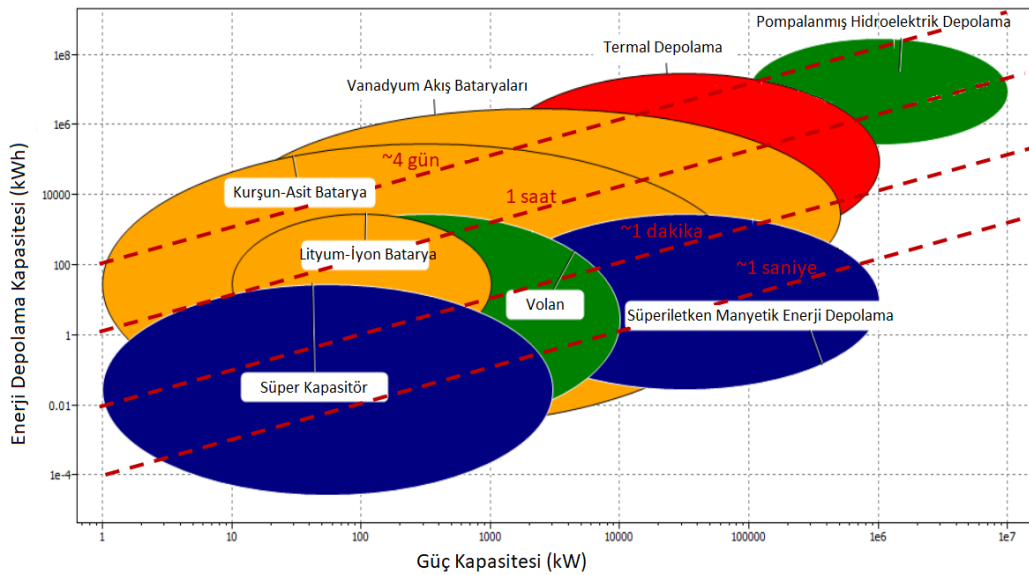
Dünya üzerinde hâlihazırda kullanılmakta olan ve kullanımı yaygınlaşmak üzere olan birçok

enerji depolama sistemleri vardır. Bu sistemler, Pompalanmış Hidroelektrik Enerji Depolama (PHED), Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama (SHED), Sıvılaştırılmış Hava ile Enerji Depolama, Süper Kapasitör (SK), Volan, Yer-Çekimi ile Enerji Depolama (YED), Süperiletken Manyetik Enerji Depolama (SMED), Elektrostatik Enerji Depolama (EED), Akış Bataryaları (AB), Carnot Bataryaları (CB) veya Termal Enerji Depolama (TED) ve Hidrojen Depolama'dır (HD) (Kalaiselvam ve Parameshwaran, 2014). Bu sistemler arasından Dünya'da en yaygın olan ve en çok kabul görmüş enerji depolama sistemi Pompalanmış Hidroelektrik Enerji Depolama sistemidir. PHED, düşük maliyetleri, yüksek verimleri ve uzun ömürleri ile öne çıkan enerji depolama sistemidir. Ancak PHED sistemlerinde alçak ve yüksek rezervuara ihtiyaç olduğu için bu sistemler her bölgeye kurulamaz (Benato ve Stoppato, 2018a). Bu enerji depolama sistemlerinin güç kapasitesi-enerji depolama kapasitesi grafiği Şekil 1.3'te gösterilmiştir. Pompalanmış Hidroelektrik Enerji Depolama sistemlerinden sonra en çok kullanılan enerji depolama sistemlerinden biri de Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama sistemleridir. SHED sistemleri, yüksek sayılabilecek enerji yoğunluğu, düşük maliyetleri, yüksek sayılabilecek verimleri ve uzun ömürleri ile kabul görmüş sistemlerdir. SHED sistemlerinde hava mağara gibi bölgelerde basınçlandırılarak enerji depolanmaktadır. SHED sistemleri bu özelliğinden ötürü uygun morfolojik bölgelere ihtiyaç duymaktadır, dolayısıyla bu sistemler de her bölgeye kurulamamaktadır. Bir diğer yaygın kabul gören enerji depolama sistemlerinden olan Akış Bataryaları'nda ise, enerji yoğunluğu ve verim yüksektir ancak bu sistemlerin maliyetleri de yüksektir ve ömürleri daha kısadır. Yaygın kabul görmüş bu enerji depolama sistemlerine en iyi alternatif olabilecek enerji depolama sistemi, Termal Enerji Depolama sistemleridir. Termal enerji depolama sistemleri yüksek enerji yoğunlukları, düşük enerji maliyetleri, yüksek verimleri ve uzun ömürleri ile birlikte gelecek vadede önemli enerji depolama sistemleridir. TED sistemlerinin verimleri alternatiflerine kıyasla çok yüksek değildir ancak bu sistemler düşük sıcaklıklı ısı kaynakları ile birlikte kullanıldıklarında verimleri ciddi miktarda artabilmektedir ve bu sistemler düşük maliyetli ve uzun ömürlülerdir (Frate ve diğerleri, 2020; Novotny ve diğerleri, 2022). Ayrıca bu sistemlerin, herhangi bir coğrafik kısıtlamaları da yoktur ve her bölgeye kurulabilirler. Aynı zamanda bu sistemler, fosil kaynaklı elektrik üretim tesislerine sonradan dahi olsa entegre edilebilirler ve böylelikle bu tesislerin karbon salınımlarını önemli ölçüde düşürürler (Thess, 2019). Bu yüzden TED sistemleri, geleceğin en yaygın kullanılan enerji depolama sistemi olabilir. Farklı birtakım enerji depolama sistemlerinin enerji yoğunlukları, depolanan birim enerji başına maliyetleri, verimleri ve ömürleri Çizelge 1.2'de verilmiştir. Carnot Batarya'ları bu kapsamda önemli

bir alternatif teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır. Ülkemizde 9 Mayıs 2021 tarihinde resmi gazetede yayınlanan enerji depolama yönetmeliği incelendiğinde, enerji depolama sistemlerine teşvik olduğu görülmektedir ve ayrıca, PHED sistemleri ve kesintisiz güç kaynakları bu yönetmeliğin kapsamı dışında bırakılmıştır. Bu yüzden ülkemizde de Carnot Bataryalarının önü açıktır (Resmi Gazete).

Çizelge 1.2. Enerji depolama sistemlerinin enerji yoğunlukları, depolanan birim enerji başına maliyetleri, verimleri ve ömürleri (Benato ve Stoppato, 2018b)

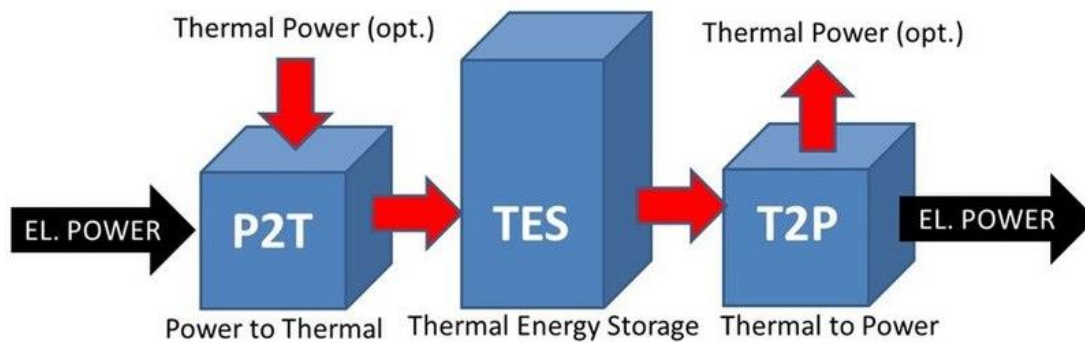
Enerji Depolama Sistemi	Enerji Yoğunluğu [Wh/l]	Depolanan Birim Enerji Başına Maliyet [\$/kWh]	Verim [%]	Ömür [yıl]
PHED	0,5 – 1,5	5 – 100	65 – 87	30 – 60
SHD	3 – 12	2 – 200	40 – 95	20 – 60
AB	16 – 60	120 – 1000	57 – 85	5 – 15
CB	110 – 170	60	70 – 80	25 – 30
YED	0,5 – 1,5	-	70 – 86	30 – 40
SHED	50	260 – 530	40 – 85	20 – 40
Hidrojen	500 – 3000	1 – 10	20 – 50	5 – 30



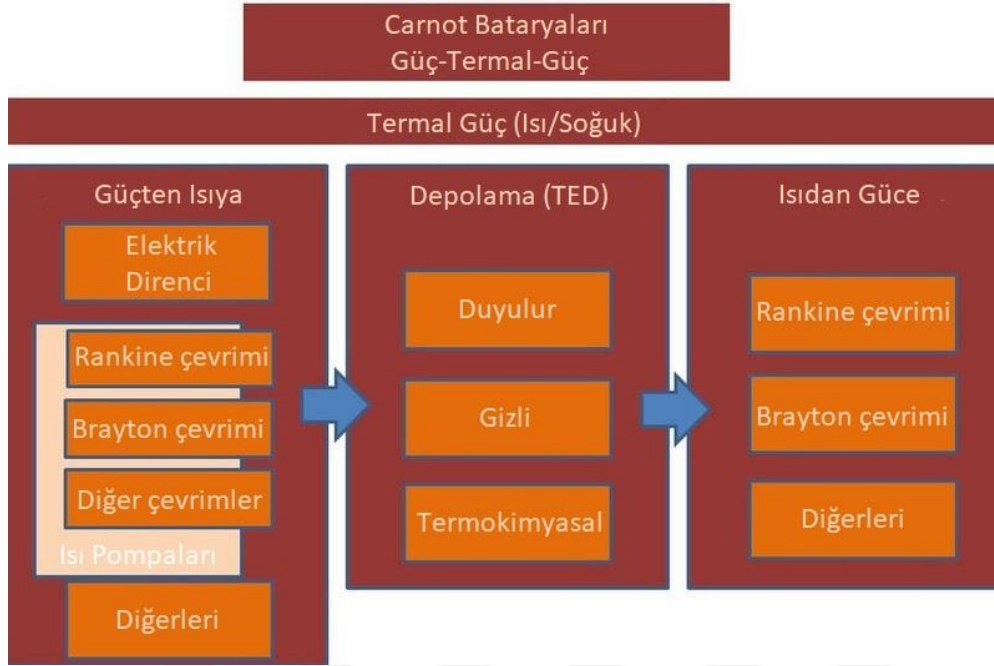
Şekil 1.3. Mevcut enerji depolama sistemleri ve kapasiteleri (McTigue, 2019)

Termal Enerji Depolama sistemleri ve/veya Carnot Batarya'ları, prensip olarak arz fazlası olan enerjinin ısı enerjisine dönüştürülerek depolandığı ve ihtiyaç durumunda da depolanan ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülerek elektrik talebinin sağlanmasında yardımcı olan sistemlerdir. Carnot Bataryalarının çalışma prensibi, Şekil 1.4'te şematik olarak

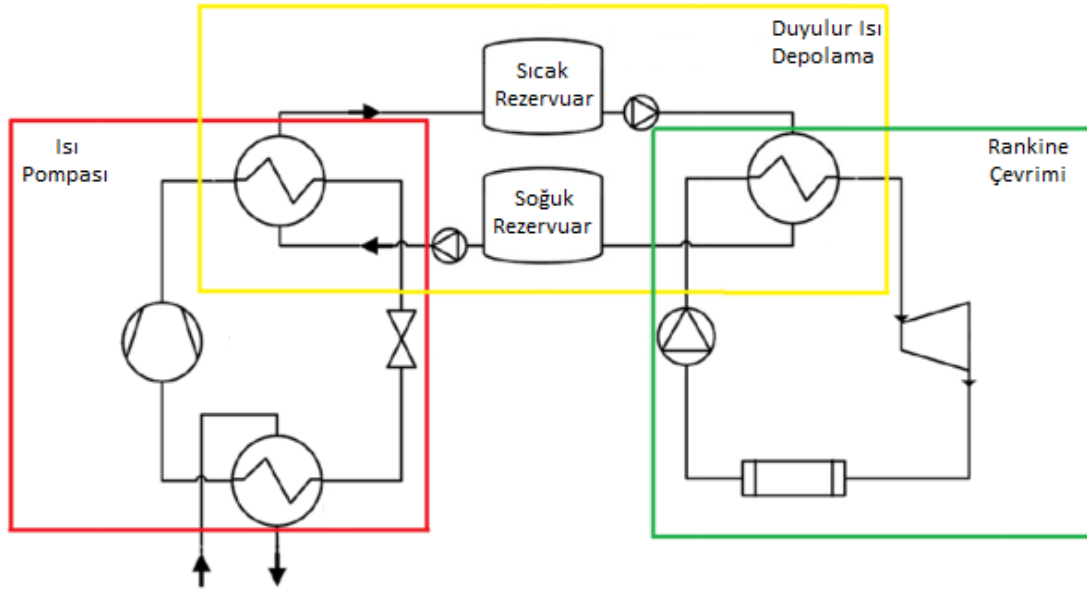
verilmiştir. Bu sistemler, farklı birçok konfigürasyona sahip bir şekilde kullanılabilir. Bu konfigürasyonlar, şarj prosesi, deşarj prosesi ve ısı depolanma biçimine göre oluşmaktadır. TED sistemlerinde şarj prosesi için ısı pompası veya elektrik direnci kullanılmakta iken, deşarj prosesi için Brayton çevrimi, Rankine çevrimi veya bu iki çevrimi kapsayan hibrit bir çevrim kullanılmaktadır. Isının, bir tank içerisindeki termodinamik özellikleri enerji depolamaya uygun birtakım malzemelerle birlikte tutulduğu TED sistemlerinde ısı depolanma biçimi de üçe ayrılmaktadır. Bunlar, duyuşur ısı depolama, gizli ısı depolama ve termokimyasal ısı depolamadır (Zhang ve diğerkleri, 2016). Gizli ısı depolama tankında kullanılan malzemeler, faz değıştiren malzeme olarak isimlendirilmektedir ve bu malzemeler termal enerjinin depolanması veya depolanan enerjinin kullanılması sırasında faz değıştirirler ve gizli enerjiyi de kullanmış olurlar. Ancak faz değıştiren malzemelerin, duyuşur ısı depolama malzemelerine göre maliyetleri yüksektir (Benato ve Stoppato, 2018). Duyuşur ısı depolama tanklarında ise ucuz, yanıcı olmayan ve zehirsiz malzemeler kullanılmaktadır. Duyuşur ısı depolama tanklarının maliyetleri oldukça düşüktür. Termokimyasal ısı depolama tanklarında belirli kimyasal reaksiyonlara girerek enerji depolayan $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_3$ gibi maddeler kullanılmaktadır. Carnot Bataryalarının bahsedilen bu konfigürasyonları, Şekil 1.5'te verilmiştir. Ayrıca, Şekil 1.6'da da sık karşılaşılabilecek bir konfigürasyona sahip Carnot Batarya'sı gözükmektedir. Bu sistem, ısı pompası, duyuşur ısı depolama tankı ve Rankine çevriminden oluşmaktadır. Bu sistemde, ısı pompası sayesinde duyuşur ısı depolama tankı şarj edilirken, belirli miktarda ısı depolandıktan sonra depolanan bu ısı, Rankine çevriminde elektriğe dönüştürülmektedir. Şekil 1.6'da görülen konfigürasyonda şarj prosesinde ısı pompası kullanıldığı için bu konfigürasyona sahip TED sistemleri literatürde Pompalanmış Termal Enerji Depolama (PTED) veya Pompalanmış Isıl Enerji Depolama (PIED) olarak adlandırılmaktadır (Dumont ve diğerkleri, 2020).



Şekil 1.4. Carnot Bataryalarında elektrik-ısı ve ısı-elektrik dönüşümünün temsili görünümü



Şekil 1.5. Carnot Bataryalarının farklı konfigürasyonları



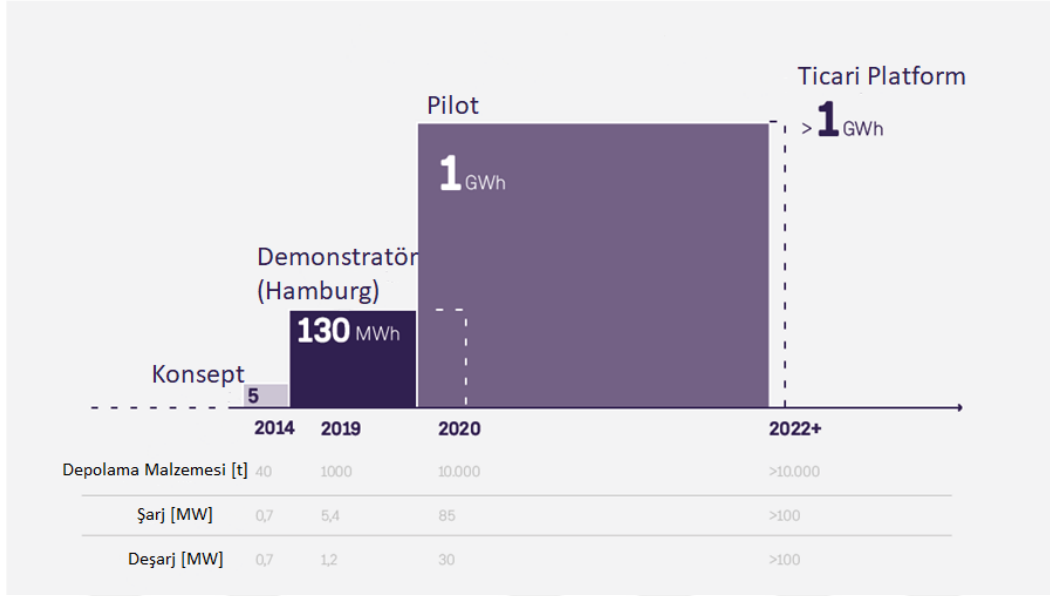
Şekil 1.6. Carnot Bataryası: Isı Pompası-Duyulur Isı Depolama-Rankine Çevrimi (Dumont ve diğerleri, 2020)

Her ne kadar büyük avantajları olsa da Carnot Bataryaları, dünyadaki kullanımına bakıldığında beklenildiği kadar yaygınlaşamamıştır. Fakat bu sistemlerin kurulu örnekleri de mevcuttur. Bu sistemlerin kurulduğu örneklerde genellikle güneş enerjisinden yararlanılmıştır. Bu sistemlere örnek olarak dünyada kurulan sistemler, Çizelge 1.3'te verilmiştir. Bu sistemlerin yanı sıra, Siemens Gamesa şirketinin de pilot olarak oluşturduğu

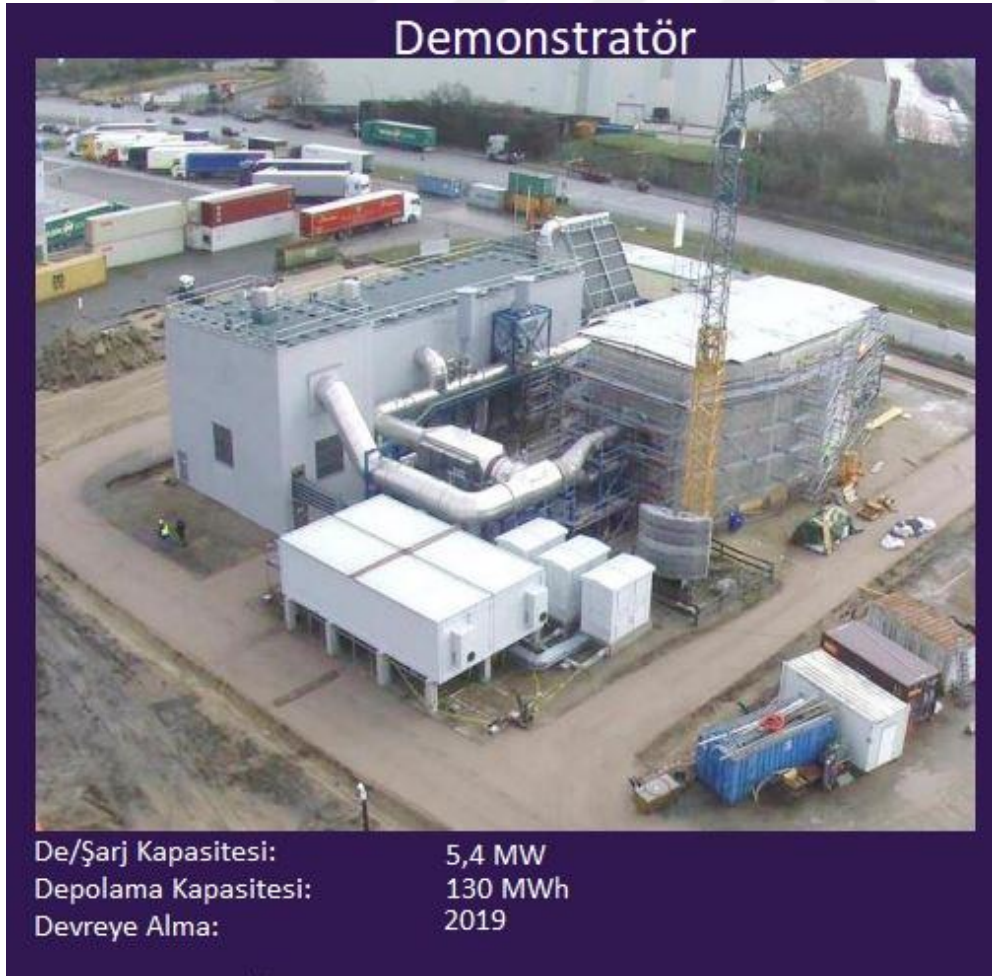
ve çok yakında düzenli faaliyet gösteren bir sisteme dönüşecek olan bir Carnot Batarya projesi de mevcuttur. Bu Carnot Batarya şirket tarafından, Elektrotermal Enerji Depolama sistemi olarak adlandırılmaktadır. Projede sistem gücünü bir elektrik rezistansından alırken, sistem bir buhar türbiniyle deşarj olmaktadır. Carnot Batarya sisteminde depolama kısmında volkanik taşlar düşünülmüştür ve bu taşlar şirket tarafından enerji endüstrisi için devrim niteliğinde olarak görülmüştür. Bu taşların kullanımıyla ve tank etrafında efektif bir yalıtımın oluşturulmasıyla birlikte bir hafta veya daha uzun süren enerji depolamanın mümkün olduğu şirket tarafından iddia edilmiştir (<https://www.rechargenews.com>). Siemens Gamesa şirketinin Carnot Batarya projesinin tarihi gelişimi ve bu projeye ait bir takım özellikler Şekil 1.7’de yer almaktadır. Şekil 1.7’de görülen demonstratör yapısının kurulu hali ve özellikleri ile birlikte Şekil 1.8’de görülmektedir.

Çizelge 1.3. Dünyada faaliyet gösteren Termal Enerji Depolama sistemleri

Sistemin Adı	Yer/Bölge	Başlangıç-Bitiş	Kurulu Güç	Arazi Alanı
Cerro Dominador Güneş Enerjisi Santrali	Antofagasta/Şili	2014 – 2021	210 MW	750 ha
Varzazat Güneş Enerjisi İstasyonu	Varzazat/Fas	2013 – 2016	510 MW	2500 ha
Solana Üretim İstasyonu	Arizona/ABD	2010 – 2013	280 MW	780 ha
Extresol Güneş Enerjisi İstasyonu	Badajoz/İspanya	2006 – 2009	149,7 MW	600 ha
Crescent Dunes Güneş Enerjisi Projesi	Nevada/ABD	2011 – 2016	110 MW	676 ha
Andasol Güneş Enerjisi İstasyonu	Granada/İspanya	2006 – 2009	149,7 MW	600 ha
Bokpoort CSP	Kuzey Kap/Güney Afrika	2013 – 2015	50 MW	300 ha
KaXu Güneş Enerjisi Santrali	Kuzey Kap/Güney Afrika	2012 – 2015	100 MW	1100 ha
Khi Güneş Enerjisi Santrali	Kuzey Kap/Güney Afrika	2012 – 2016	50 MW	140 ha

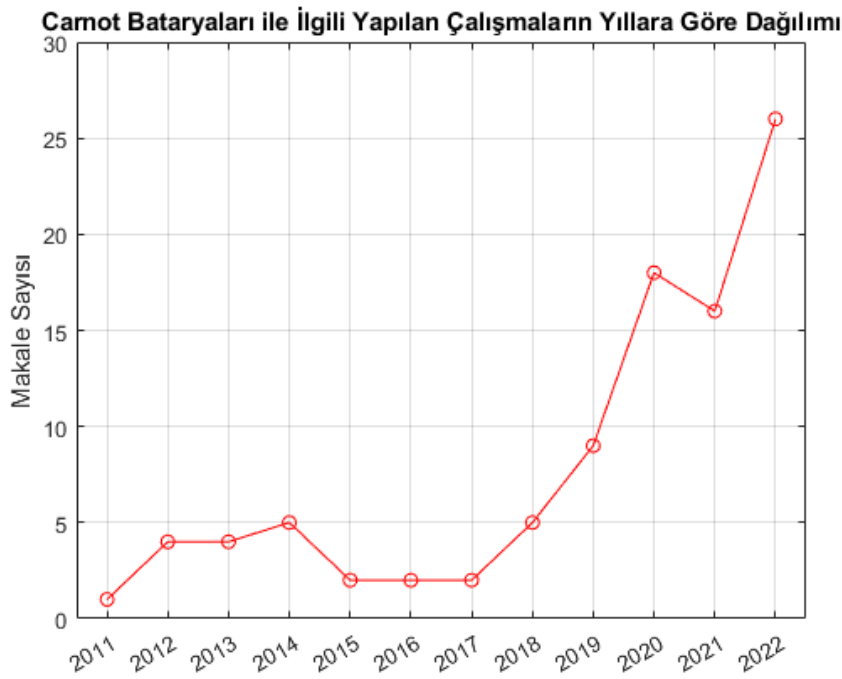


Şekil 1.7. Siemens Gamesa şirketinin Carnot Batarya projesinin tarihsel süreci ve özellikleri (www.siemensgamesa.com)

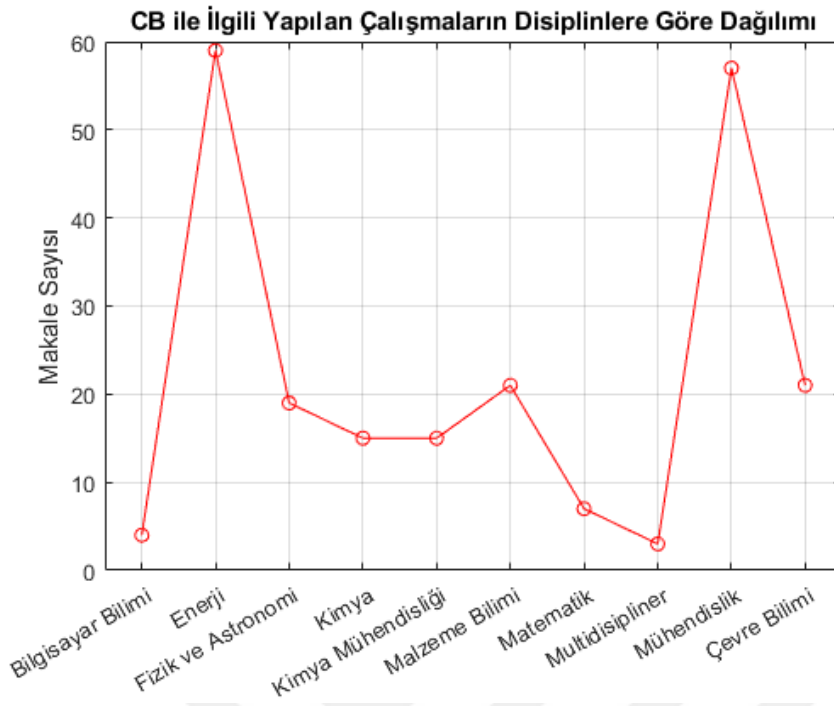


Şekil 1.8. Siemens Gamesa şirketinin 2019 yılında devreye aldığı bir demonstratör Carnot Batarya sistemi (<https://www.strommarkttreffen.org>)

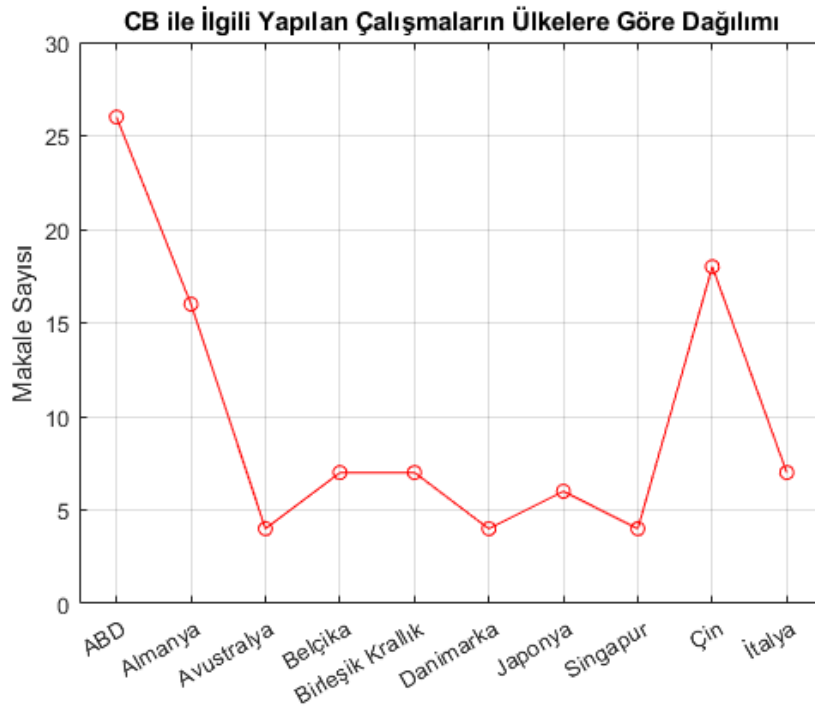
Carnot Bataryalarının, literatürde güncel bir konu olmasına karşın bu konu oldukça fazla çalışılmıştır. Bu durum, Carnot Batarya'larına geçişin ne kadar önemli olduğunu ve Carnot Batarya'larının yaygınlaştırılma çabasının ne kadar yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca Carnot Batarya'ları, son yıllarda üzerine çalışmaların arttığı ve farklı birçok disiplinin ilgilendiği bir konudur. Sırasıyla Şekil 1.9 ve 1.10'da Carnot Batarya'ları ile ilgili yapılan çalışmaların yıllara göre ve disiplinlere göre dağılım grafiği verilmiştir. Bununla birlikte, Carnot Batarya'ları ile alakalı yapılmış olan çalışmaların ülkelere göre dağılımı da Şekil 1.11'de verilmiştir.



Şekil 1.9. Carnot Batarya'ları ile ilgili yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı



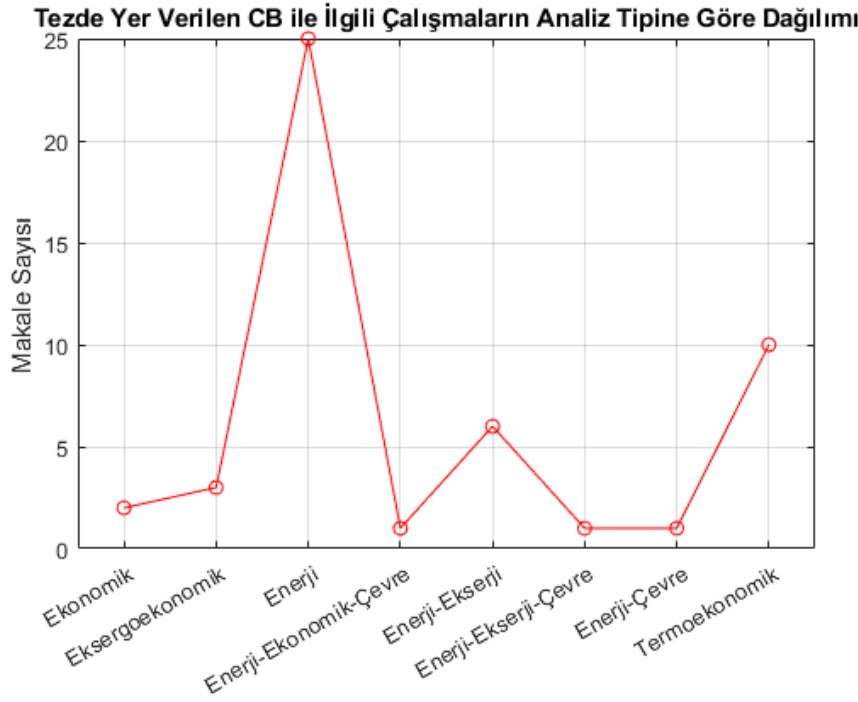
Şekil 1.10. Carnot Batarya'ları ile ilgili yapılan çalışmaların disiplinlere göre dağılımı



Şekil 1.11. Carnot Batarya'ları ile ilgili yapılan çalışmaların ülkelere göre dağılımı

Literatürde incelenen Carnot Batarya'ları, farklı konfigürasyona sahip olmakla birlikte, bu sistemlere literatürde farklı bakış açılarıyla yaklaşmıştır. Literatürde yapılan çalışmaların büyük bir kısmında Carnot Batarya'ları enerji bazlı olarak incelenirken, enerji-ekserji,

eksergo-ekonomik, termoekonomik, ekonomik, çevre ve enerji, termoekonomik ve çevre, enerji-ekserji ve çevre bazlı çalışmalar da mevcuttur. Literatürde yer alan Carnot Batarya'ları ile ilgili çalışmaların analiz tipleri, Şekil 1.12'de verilen grafikten görülebilmektedir.



Şekil 1.12. Tezde yer verilen Carnot Batarya'ları ile ilgili yapılan çalışmaların analiz tipine göre dağılımı

Yukarıda verilen grafiklerden ve yapılan literatür taramasından hareketle, bu çalışmada yer verilen Carnot Batarya'ları ile ilgili yapılmış çalışmaların daha iyi anlaşılabilmesi için bir çizelge oluşturulmuştur. Çizelge 1.4'te, çalışmaların analiz tipi, çalışma şekli, depolama hacmi, depolama tipi, şarj prosesi için kullanılan sistem ve deşarj prosesi için kullanılan sistemle ilgili bilgilere yer verilmiştir.

Çizelge 1.4. Bu çalışmada yer alan Carnot Batarya'ları ile ilgili çalışmalar ve bu çalışmalara ait birtakım veriler

Yazar(lar)	Analiz Tipi	Çalışma Şekli	Depolama Hacmi (m ³)	Depolama Tipi	Şarj İçin Kullanılan Sistem	Deşarj İçin Kullanılan Sistem
Peterson (2011)	Enerji	Sayısal	-	Duyulur – Gizli Isı	Carnot Isı Pompası	Carnot Isı Makinesi
Morandin vd. (2012)	Enerji	Sayısal	-	Duyulur – Gizli Isı	Isı Pompası	Rankine Çevrimi
Howes (2012)	Enerji	Sayısal	-	Duyulur Isı	Joule-Brayton Çevrimi	
Kuravi vd. (2013)	Enerji	Sayısal – Deneysel	0,110 (Deneysel)	Duyulur Isı	Elektrik Isıtıcı	-
Kim vd. (2013)	Enerji	Sayısal	21,6 – 27,7	Duyulur – Gizli Isı	Transkritik CO ₂ Isı Pompası	Transkritik CO ₂ Isı Makinesi
Thess (2013)	Enerji	Sayısal	3500 – 106000	Duyulur – Gizli Isı	Carnot Isı Pompası	Carnot Isı Makinesi
Steinmann (2014)	Enerji	Sayısal	-	Duyulur – Gizli Isı	Isı Pompası	Rankine Çevrimi
McTigue vd. (2015)	Enerji	Sayısal	71 (sıcak), 117 (soğuk)	Duyulur	Joule-Brayton Çevrimi	
Ni ve Caram (2015)	Enerji	Sayısal	-	Duyulur	Elektrik Isıtıcı	Brayton Çevrimi
Ayachi vd. (2016)	Enerji	Sayısal	-	Duyulur – Gizli Isı	Isı Pompası	Rankine Çevrimi
Guo vd. (2016)	Enerji	Sayısal	-	-	Joule-Brayton Çevrimi	
Benato ve Stoppato (2017)	Enerji	Sayısal	300	Duyulur Isı	Elektrik Isıtıcı ve Brayton Çevrimi	Brayton Çevrimi
Wang ve Zhang (2017)	Enerji	Sayısal	364	Duyulur Isı	CO ₂ Isı Pompası	CO ₂ Rankine – NH ₃ Rankine
Roskoch ve Atakan (2017)	Enerji	Sayısal	-	Gizli Isı	Isı Pompası	Organik Rankine Çevrimi
Wojcik ve Wang (2017)	Enerji	Sayısal	-	Duyulur Isı	Rankine Çevrimi	
Farres-Antunez vd. (2018)	Enerji	Sayısal	-	Duyulur Isı	Brayton Çevrimi	

Çizelge 1.5. Bu çalışmada yer alan Carnot Batarya'ları ile ilgili çalışmalar ve bu çalışmalara ait birtakım veriler (devamı)

Steinmann (2019a)	Enerji	Sayısal	-	Duyulur – Gizli Isı	Brayton, Rankine, Transkritik CO ₂ Rankine	
Steinmann (2019b)	Enerji	Sayısal	-	Duyulur – Gizli Isı	Isı Pompası	Rankine Çevrimi
Dumont ve Lemort (2020)	Enerji	Sayısal	-	Duyulur – Gizli Isı	Isı Pompası	Organik Rankine Çevrimi
Zamengo vd. (2021)	Enerji	Sayısal	16,7, 50,4	Duyulur – Kimyasal Isı	Isı Pompası	Brayton Çevrimi
Yu vd. (2021)	Enerji	Sayısal	-	Duyulur Isı	Parabolik-Oluk Kolektör	Organik Rankine Çevrimi
Eppinger vd. (2021)	Enerji	Sayısal – Deneysel	8	Duyulur Isı	Isı Pompası	Organik Rankine Çevrimi
Rindt vd. (2021)	Enerji	Sayısal	-	Gizli Isı	Süperkritik CO ₂ Brayton Çevrimi	
White vd. (2014)	Enerji-Ekserji	Sayısal	-	Duyulur Isı	Kompresör-Isı Eşanjörü-Genleştirici	
Vinnemeier vd. (2016)	Enerji-Ekserji	Sayısal	-	Duyulur Isı	Elektrik Isıtıcı – Isı Pompası	-
Jockenhöfer vd. (2018)	Enerji-Ekserji	Sayısal	-	Duyulur – Gizli Isı	Isı Pompası	Organik Rankine Çevrimi
Attonaty vd. (2019)	Enerji-Ekserji	Sayısal	459, 577, 688	Duyulur Isı	Elektrik Isıtıcı	Brayton – Rankine Çevrimi
Frate vd. (2020b)	Enerji-Ekserji	Sayısal	-	Duyulur Isı	Isı Pompası	Organik Rankine Çevrimi
Bellos vd. (2022)	Enerji-Ekserji	Sayısal	-	Gizli Isı	Isı Pompası	Organik Rankine Çevrimi
Smallbone vd. (2017)	Ekonomik	Sayısal	-	Duyulur Isı	Joule-Brayton Çevrimi	
Henchoz vd. (2012)	Enerji-Ekonomik	Sayısal	-	Gizli Isı	Isı Pompası	Rankine Çevrimi
White vd. (2013)	Enerji-Ekonomik	Sayısal	-	Duyulur Isı	Kompresör-Isı Eşanjörü-Genleştirici	
Abarr vd. (2017)	Enerji-Ekonomik	Sayısal – Deneysel	2450	Gizli Isı	Brayton Çevrimi	

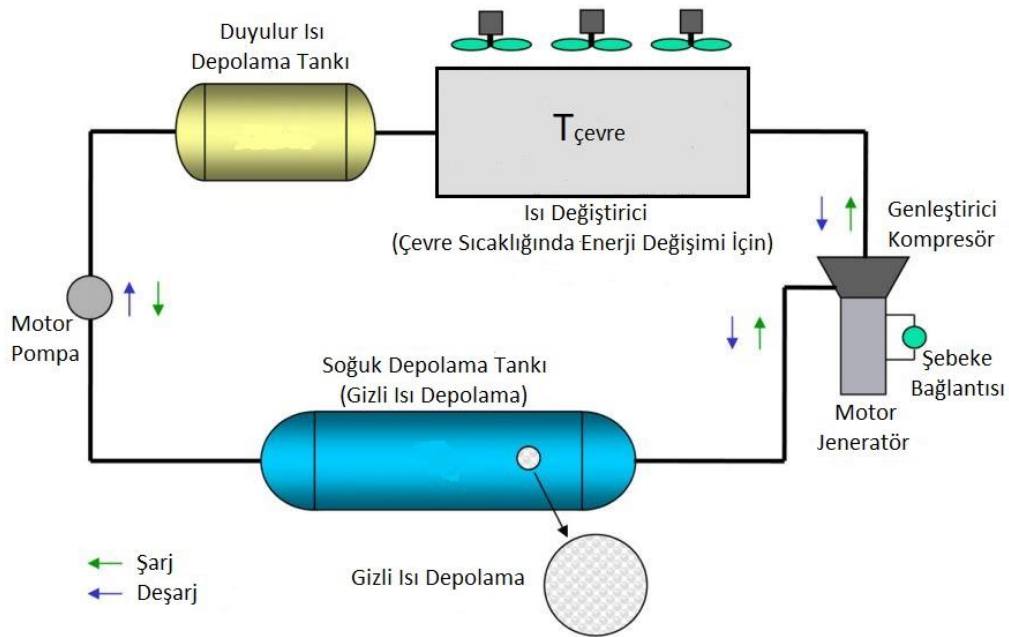
Çizelge 1.6. Bu çalışmada yer alan Carnot Batarya'ları ile ilgili çalışmalar ve bu çalışmalara ait birtakım veriler (devamı)

Benato (2017), Benato ve Stoppato (2017), Benato ve Stoppato (2018)	Enerji-Ekonomik	Sayısal	150	Duyulur Isı	Elektrik Isıtıcı – Brayton Çevrimi	Brayton Çevrimi
Georgiou vd. (2018)	Enerji-Ekonomik	Sayısal	-	Duyulur Isı	Joule-Brayton Çevrimi	
Wang vd. (2019)	Enerji-Ekonomik	Deneyisel	-	Duyulur Isı	Joule-Brayton Çevrimi	
Zhao vd. (2022)	Enerji-Ekonomik	Sayısal	3185 – 9894	Duyulur Isı	Joule-Brayton ve Transkritik Rankine Çevrimi	
Frate vd. (2020)	Enerji-Ekonomik	Sayısal	10000	Duyulur Isı	Isı Pompası	Organik Rankine Çevrimi
Dietrich vd. (2020)	Ekserji-Ekonomik	Sayısal	-	Duyulur Isı	Joule/Brayton Çevrimi	
Fan ve Xi (2022)	Ekserji-Ekonomik	Sayısal	-	Duyulur Isı	Isı Pompası	Organik Rankine Çevrimi
Okazaki vd. (2015)	Ekonomik	Sayısal	-	-	Rüzgar Türbini	
Mercangöz vd. (2012)	Enerji-Ekonomi-Çevre	Sayısal	7,1 – 25,8	Duyulur – Gizli Isı	Brayton Çevrimi	Rankine Çevrimi
Pillai vd. (2019)	Enerji-Ekserji-Çevre	Sayısal	-	Duyulur – Gizli Isı	Isı Pompası	Organik Rankine Çevrimi
Liu vd. (2022)	Enerji-Ekserji-Ekonomi	Sayısal	-	Duyulur Isı	Isı Pompası	Organik Rankine Çevrimi

Literatürde Carnot Batarya'larının enerji bazlı olarak incelendiği çalışmalar aşağıdaki gibidir:

Peterson (2011), bir ısı pompası, bir ısı makinesi ve gizli ısı depolama tankı ve duyulur ısı depolama tankından oluşan bir Termal Enerji Depolama sistemi konsepti düşünülmüş ve incelenmiştir. Öngörülen konseptte iş akışkanı olarak, yaygın bir soğutucu olarak kullanılan propan düşünülmüştür. Kompresör ve türbinin izantropik verimlerinin ve iki ana ısı transfer

prosesi sırasındaki sıcaklık farkının sistem verimi üzerine etkisinin incelendiği bu termodinamik perspektifli çalışmada, izantropik verimlerinin düşüşünün ve ana ısı değişiminin olduğu bölgelerdeki sıcaklık farkının artışının, sistem verimini büyük ölçüde düşürdüğü gözlemlenmiştir. Genleştirici ve kompresörün izantropik verimlerinin %100'den %85'e düşmesi, sistem verimini %26 düşürmüştür. Bununla birlikte, ısı pompası ve ısı makinesinin idealden uzaklaşmasıyla da verimin ciddi bir şekilde düştüğü belirtilmiştir. Ayrıca, sistemin verimini düşüren tersinmezliklerin, termal enerji depolama anında çevre sıcaklığının düşmesi ve termal enerjinin elektrik enerjisine dönüşümü sırasında çevre sıcaklığının yükselmesi ile giderilebileceği belirtmiştir. Son olarak, gizli ısı depolama tankıyla birlikte sisteme duyulur ısı depolama tankının eklenmesinin de sistem verimini artırdığını belirtmiştir. Peterson'ın çalışmasındaki sistemin şeması, Şekil 1.13'te yer almaktadır.



Şekil 1.13. Peterson'ın (2011) çalışmasındaki sistem şeması (Peterson, 2011)

Morandin ve diğerleri (2012), transkritik CO₂ çevrimlerinden (ısı pompası ve Rankine çevrimi), sıcak su ve buz depolamadan oluşan bir Termoelektrik Enerji Depolama sisteminin metodolojisini, Pinch analiziyle gerçekleştirmişlerdir. Analizlerin sonucunda, Termoelektrik Enerji Depolama sisteminin temel durum için verimi %60 olarak bulunmuştur. Ayrıca, düşük sıcaklıklarda termal entegrasyonu artırdığından dolayı, verim artışı için amonyak çevriminin de gerekli olduğunu bildirmişlerdir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise Morandin

vd., çalışmanın ilk aşamasında incelenen temel durumdaki Termoelektrik Enerji Depolama sistemini farklı konfigürasyonlarda (ısı makinesi türbinleri arasında ara-soğutmalı, 2-basınç seviyeli Rankine çevrimli, flaş rejenerasyonu ve kısılma vanası içeren ısı pompası ile ön ısıtma içeren ısı makineli ve ısı pompası kısmının kompresör girişinden önce kızdırıcılı) incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, türbinleri arasında ara-soğutma bulunan konfigürasyonun verimi %56, 2-basınç seviyeli Rankine çevrimi içeren konfigürasyonun verimi %59, flaş rejenerasyonlu ve kısılma vanalı ısı pompası ve ön ısıtmalı ısı makinesi içeren konfigürasyonun verimi %48 ve kızdırıcılı ısı pompası içeren konfigürasyonun verimi ise %62 olarak bulunmuştur. Ek olarak, çalışmanın ilk aşamasının daha umut vadeditici olduğunu belirtmişlerdir.

Howes (2012), 1833 yılında John Ericsson tarafından geliştirilen tersinir ısı/iş dönüşümüne dayalı bir ısı makinesinin termal enerji depolama ile birlikte oluşturduğu sistemin erken kavramsallaştırılmasını ele almıştır. Çalışmada, birbirleri arasında belirli sistem bazlı farklar bulunan üç prototip incelenmiştir. 2 MW depolama gücündeki makinede, yüksek depolama sıcaklığı 500 °C iken, düşük depolama sıcaklığı da -166°C'dir. İş akışkanı olarak argon düşünülmüş ve kütleli debisi 12,56 kg/s olarak belirlenmiştir. Bu bilgiler ışığında, sistem verimi %72 olarak bulunmuştur ve yaklaşık olarak verimi %74 olarak hesaplanan PHED sistemine göre TED sisteminin, iyi bir alternatif olacağı düşünülmüştür.

Kuravi vd. (2013), havanın ısı transfer akışkanı olarak kullanıldığı ve ısı depolamak için katı tuğlaların kullanıldığı bir duyulur ısı depolama sistemini, konsantre güneş santralleri için tasarlamışlardır. Sayısal ve deneysel olarak yapılan çalışmada, hava giriş sıcaklığı 300 - 600°C, havanın hacimsel debisi 84,50 – 152,10 m³/h'tir. Çalışmanın sonucunda, hava debisinin artışının, enerji depolama zamanını düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Ayrıca, taşınım ve iletimle olan ısı transferleri 1-boyutlu modelleme ile birlikte nümerik olarak çözülmüş ve sonuçlar laboratuvar ölçeğindeki bir sistemle birlikte deneysel verilerle doğrulanmıştır.

Kim vd. (2013), transkritik CO₂ çevrimlerine dayalı ısı pompası ve ısı makinesinden oluşan bir izotermal Termoelektrik Enerji Depolama sistemini önermişlerdir. Yapılan teorik çalışmada, enerji depolama sisteminin verimini etkileyen faktörleri incelemişler ve hesaplamışlardır. Sonuç olarak, turbomakinelerin izantropik verimlerinin ve ısı makinesinin geri iş oranının ve sıcak depolama tanının sıcaklığının, enerji depolama sisteminin verimi

üzerinde oldukça etkili olduğunu gözlemlemişlerdir. Geri iş oranının ve sıcak depolama sıcaklığının artışları sistem verimini düşürmüş, izantropik verimin artışı ise sistem verimini artırmıştır. Çalışmada gözlemlenen maksimum sistem verimi, geri iş oranı 0,123 – 0,148, izantropik turbomakine verimleri ise %85 – 90 aralığında iken, %74,5 olmuştur.

Thess (2013), geniş ölçekli bir Pompalanmış Isıl Enerji Depolama sistemi olmadığı için sistem verimi bilinmediğinden, maksimum çıkış gücünde termal enerji depolama sıcaklığının bir fonksiyonu olarak enerji depolama sisteminin verimini tahmin eden bir termodinamik model geliştirmiştir. Thess, Carnot formülü kadar basit bir denklem elde etmiş ve bu teoriye göre, 400°C üzerindeki depolama sıcaklıkları için Pompalanmış Isıl Enerji Depolama sisteminin mevcut Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama sistemlerinden daha verimli olduğu sonucuna ulaşmıştır. Thess çalışmasında Carnot çevriminden oluşan bir Carnot Batarya'yı incelemiştir. Katı ve sıvı depolama malzemelerinin kullanıldığı çalışmada, şarj-deşarj verimi %34 – 61 olmuştur.

Steinmann (2014), Pompalanmış Termal Enerji Depolama sistemi gibi bir Carnot Bataryası çeşidi olan, konvansiyonel Rankine çevrimiyle birlikte çalışan bir termal enerji depolama sistemini incelemiş ve bu konsepti, Sıkıştırılmış Isı Enerjisi Depolama sistemi olarak adlandırmıştır. Maksimum sıcaklığı 400°C'nin altında olan ve %70 verime ulaşan bu konseptte, verimli turbomakinelerin büyük bir öneme sahip oldukları gözlemlenmiştir. Ayrıca Steinmann, Sıkıştırılmış Isı Enerjisi Depolama konseptinde düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarının kullanımı halinde tersinmezliklerin azalacağını ve verimin daha fazla yükseleceğini bildirmiştir.

McTigue vd. (2015), ısı pompası ve ısı makinesinin pistonlu Joule çevrimine ve termal enerji depolamanın paketlenmiş yatak depolamaya dayalı olduğu bir Pompalanmış Termal Enerji Depolama sistemini incelemişlerdir. İş akışkanı olarak Argon'u seçtikleri ve paketlenmiş yatakların Schuman-tipi modeli ile geleneksel çevrim hesaplarını birleştirerek bir termodinamik analiz yaptıkları bu çalışmada, termal rezervuarlardaki basınç düşüşü ve tersinmez ısı transferine dayalı olan kayıpların verimi yalnızca yüzde birkaç miktar düşürdüğünü, ancak sıkıştırma ve genleştirme işlemlerinin verimlerinin (izentropik verim), sistem verimini bir hayli etkilediği sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte, McTigue ve diğerleri, uygun parametrelerin seçimi ve pistonlu sistemlerin kullanımıyla, enerji depolama veriminin %85'i aşabileceğini belirtmişlerdir.

Ni ve Caram (2015), Pompalanmış Isıl Enerji Depolama sisteminin performansının termal enerji depolama ve turbomakineler kısmıyla ilgilenmişlerdir. Enerji depolama sisteminin termal depolama kısmıyla ilgili verimini boyutsuz uzunluk ve boyutsuz adım süresine bağladıkları ve turbomakineler tarafında ise verimi basınç oranı, politropik verim ve gaz ısı kapasitesi oranına bağladıkları çalışmalarında, tipik bir Pompalanmış Isıl Enerji Depolama prosesinin ayrıklaştırılmış ısı transfer modeli için üstel matris çözümlerini elde etmişlerdir ve turbomakine veriminin, enerji depolama sistemi verimi üzerinde limitleyici bir faktör olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Ayachi ve diğerleri (2016), transkritik CO₂ çevrimlerinden, jeotermal enerji depolama konseptinden ve zemin ısı eşanjöründen oluşan bir Termoelektrik Enerji Depolama sistemini incelemesini kararlı rejim için termodinamik bir model olarak yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre sistem veriminin %50 olduğunu ancak, daha karmaşık sistemlerle bu değerin %66'ya kadar ulaşabileceğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca bir diğer önemli sonuç da şarj ve deşarj anları için ısı rejenerasyonunun kullanımının, sistem verimini artırdığı ve maliyetlerini düşürdüğüdür.

Guo ve diğerleri (2016a), Brayton çevrimi ile ters Brayton çevriminden oluşan bir Pompalanmış Termal Enerji Depolama sistemini, iç ve dış tersinmezlik kayıplarını hesaba katarak incelemişlerdir. Oluşturdukları gerçekçi bir termodinamik model ile yaptıkları bu çalışmalarında, sistem verimini ve enerji depolama sisteminin güç çıkışını analitik olarak türetmişler, sistemin genel performans karakteristiklerini açıklamışlar ve verim ile güç çıkışı arasındaki optimal ilişkiyi elde etmişlerdir.

Guo ve diğerleri (2016b), Pompalanmış Termal Enerji Depolama ve Pompalanmış Kriyojenik Enerji Depolama sistemlerini, sonlu-oranlı ısı transferi ve dış ısı sızıntı kayıplarını göz önünde bulundurarak incelemişlerdir. Yaptıkları analitik çalışmalarında, her iki sistemin de verimlerini ve güç çıkışlarını türetmişler, yine her iki sistemin de performans karakteristiklerini ve optimal çalışma bölgelerini belirlemişler ve bu iki sistemi birbirleriyle karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, Pompalanmış Termal Enerji Depolama sisteminin genel performansının, Pompalanmış Kriyojenik Enerji Depolama sisteminin genel performansından daha iyi olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca, literatürde çok sık bir şekilde ihmal edilen ısı sızıntı kayıplarının hesaba katmanın oldukça önemli olduğunu gözlemlemişlerdir.

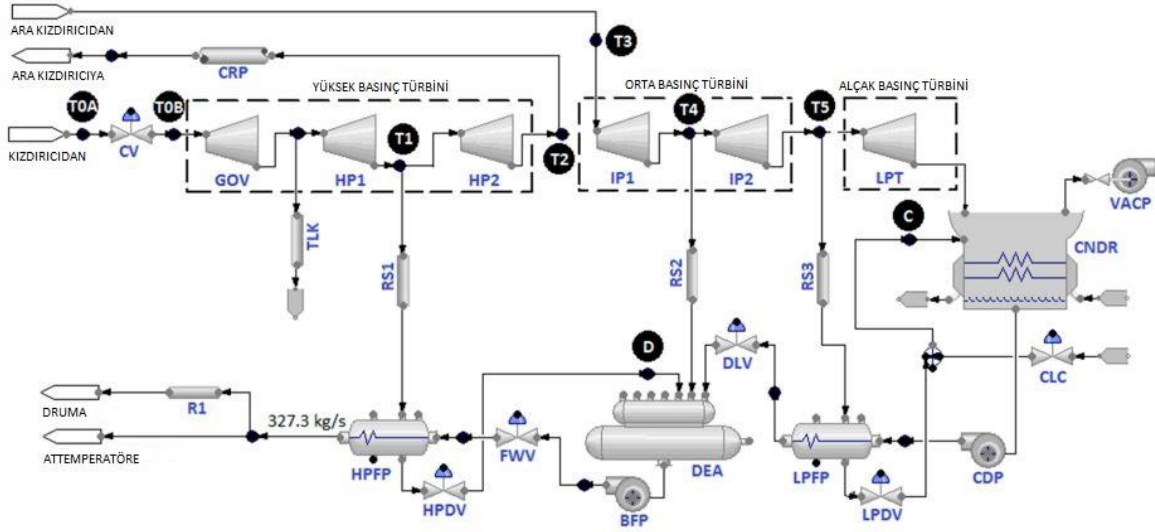
Benato ve Stoppato (2017), yeni bir Pompalanmış Termal Enerji Depolama sistemi planı sunmuşlardır ve bu yeni sistemin matematiksel modelini oluşturmuşlardır. Yaptıkları çalışmada paketlenmiş yatağın davranışını tahmin etmek için sıcak ve soğuk depoların 1 boyutlu ve 2 fazlı model oluşturmuşlardır. Ayrıca, paketlenmiş yatak içerisinde 4 farklı termal depolama malzemesini denemişlerdir. Sonuç olarak, en yüksek miktarda enerjiye ve verime manyetitten ve titanyum-oksitten oluşan paketlenmiş yatak ile ulaşmışlardır. Bununla birlikte, depolama anı için özgül bir ısı eşanjörü kullanarak ve boşaltma anı için herhangi bir ısı eşanjörü kullanmayarak, sistem tersinmezliklerini ve kayıplarını azaltmışlardır.

Wang ve Zhang (2017), Pompalanmış Termal Enerji Depolama sisteminin verimini artıran ancak her bölgede uygun olmayan ve sistemin maliyetini de artıran dış kaynakları çevresel termal enerji olarak sisteme entegre etmişler ve sıvılaştırılmış doğalgazı da ısı kuyusu olarak kullanarak yeni bir sistem önermişlerdir. Depolama ünitesinde transkritik CO₂ ısı pompası, iletim ünitesinde ise transkritik CO₂ Rankine çevriminden ve kritik altı NH₃ Rankine çevriminden oluşan kademeli bir sistem kullanarak termodinamik modelleme yaptıkları çalışmalarında, önerilen yeni sistemin yükselen çevre sıcaklığı ve artan NH₃ kütle debisiyle veriminin ve güç çıkışının arttığını gözlemlemişlerdir. 7,4 kg/s'lik kütle debisine sahip NH₃ ve CO₂ ile %139'luk bir sistem verimi ve 1 MW güç çıkışı elde etmişlerdir.

Roskoch ve Atakan (2017), sıkıştırmalı ısı pompası, gizli ısı enerji depolama ve organik Rankine çevriminden oluşan bir Pompalanmış Isıl Enerji Depolama sisteminin termodinamik potansiyelini ve limitlerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, artan depolama sıcaklığı ve genişletirici girişindeki artan kızdırma etkisiyle birlikte sistem veriminin de arttığını gözlemlemişlerdir.

Wojcik ve Wang (2017), 375 MW'lık kritik-altı yağ yakmalı konvansiyonel bir enerji santraline Termal Enerji Depolama sisteminin entegrasyonunun teknik fizibilitesi üzerine çalışmışlardır. Bir yazılımda modellenen bu çalışmada sabit ve değişken olmak üzere iki farklı basınç kontrol sistemlerinin, Termal Enerji Depolama sistemine entegrasyonunun olduğu senaryolar denenmiştir. Sonuç olarak, Termal Enerji Depolama sisteminin konvansiyonel enerji santraline entegrasyonunun uygun olduğu, üstelik enerji santralinin verimini artırdığı gözlemlenmiştir. Wojcik ve Wang'ın inceledikleri sistemin şeması, Şekil

1.14'te yer almaktadır.



Şekil 1.14. Wojcik ve Wang'ın çalışmalarında inceledikleri sistemin şeması (Wojcik ve Wang, 2017)

Farres-Antunez ve diğerleri (2018), Sıvılaştırılmış Hava ile Enerji Depolama ve Pompalanmış Termal Enerji Depolama sistemlerinin birleşiminden oluşan ve birbirlerine tek bir ısı eşanjörü ile bağlı olan bir hibrit sistemin termodinamik analizini yapmışlardır. Pompalanmış Termal Enerji Depolama kısmında helyumun, Sıvılaştırılmış Hava ile Enerji Depolama kısmında ise süperkritik havanın (150 bar civarında) düşünüldüğü çalışmada hibrit sistemin, Sıvılaştırılmış Hava ile Enerji Depolama sisteminin nispeten yüksek verimi (%80 civarında) sayesinde, tek başına verimi %60 olan Pompalanmış Termal Enerji Depolama sistemine göre daha verimli olduğu (%70 civarında) sonucuna ulaşmışlardır. Bununla birlikte, hibrit sistemin enerji yoğunluğu (60-80 kWh/m³), hibrit sistemi oluşturan iki sistemin de bağımsız enerji yoğunluklarından (Sıvılaştırılmış Hava ile Enerji Depolama için 30 kWh/m³, Pompalanmış Termal Enerji Depolama için ise 45 kWh/m³) yüksek çıkmıştır.

Steinmann ve diğerleri (2019a), Brayton, reküperatörlü Brayton, kritik-altı Rankine, transkritik Rankine ve Rankine ile Brayton çevrimlerinden oluşan bir hibrit sisteme dayalı olan beş farklı Carnot Bataryalarının termodinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda, en yüksek verime kritik-altı Rankine çevriminden oluşan Carnot Bataryası'nın, yani Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama sisteminin ulaştığını (%72 civarı) gözlemlemişlerdir. Ayrıca izantropik makine verimlerinin de sistem için oldukça önemli

olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Brayton'a dayalı Carnot Batarya'nın verimi %50 – 60 civarlarından, izantropik makine veriminin %90'dan %80'e düşmesi ile %10'a düşebilmektedir. Ancak Rankine'e dayalı olan Carnot bataryaları ve Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama sistemi, izantropik makine verimlerinden pek etkilenmemişlerdir.

Steinmann ve diğerleri (2019b), iş akışkanı bütün olan ve düşük sıcaklıklı ısı entegrasyona sahip olan kritik altı bir Sıkıştırılmış Isı ile Enerji Depolama sistemini nümerik olarak incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, ısı kaynağının sıcaklığının artmasıyla ve ısı kuyusunun sıcaklığının düşmesiyle birlikte net güç oranının arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, enerji depolama sistemindeki sıcaklık farkının 10 K'den 5K'e düşmesiyle birlikte net güç oranı büyük oranda arttığını gözlemlemişlerdir.

Dumont ve Lemort (2020a), atık ısıdan ve çevre havadan faydalanan bir Carnot Bataryası'nın performans analizini yapmışlardır. Yapılan performans analizinde, çevre havanın şartları, atık ısı şartları ve 16 farklı iş akışkanı dikkate alınmıştır. Sonuç olarak performans açısından en iyi sonucun, yüksek atık ısı sıcaklığı, düşük hava sıcaklığı ve ısı pompasının düşük yüksekliklerde olmasıyla sağlandığını gözlemlemişler ve 16 iş akışkanı arasından yalnızca beşiyle (R1233zd(e), R1234yf, R11, R236ea, R245fa) sistemde yüksek bir performans elde edildiğini bulmuşlardır.

Dumont ve Lemort (2020b), tersinir bir ısı pompası ve Organik Rankine çevriminden oluşan bir termal entegrasyonlu Carnot Batarya'yı incelemişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışmanın sonucunda, ısı pompası performans katsayısı 14, organik Rankine çevrimi verimi ise %7 çıkmıştır. Carnot Batarya'nın verimi ise %100 civarında bulunmuştur. Ayrıca termal entegrasyon sisteminin irtifasının artmasıyla kompaktlığın ve atık ısıdan faydalanma miktarının arttığını ancak verimin düştüğünü gözlemlemişlerdir.

Zamengo ve diğerleri (2021), kimyasal ısı depolama tankı, ısı pompası ve süperkritik CO₂ Brayton çevriminden oluşan bir Carnot Batarya'sını incelemişlerdir. Analitik olarak yaptıkları çalışmada sistem verimini %41,7 olarak bulmuşlar ve duyulur ısı tankının kullanımıyla %40,3'lük bir verime ulaşmışlardır. Ayrıca, kimyasal ısı depolama tankıyla birlikte, duyulur ısı depolama tankına göre gerekli depolama hacmini %66 daha küçük bulmuşlardır.

Yu ve diğerleri (2021), parabolik oluk kolektörlerden, soğuk ve sıcak depolama

tanklarından ve Organik Rankine Çevriminden oluşan bir enerji depolama sistemini incelemişlerdir. Farklı iş akışkanlarını ve temel Organik Rankine Çevrimi ile reküperatörlü Organik Rankine Çevrimini kıyasladıkları çalışmada, reküperatörün çevrim verimini %11,2 – 18,7 arasında artırdığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca iş akışkanı olarak n-pentan kullanıldığında, vakum buharlaşmasının önüne geçildiği ve kritik üstü Organik Rankine Çevriminin kritik altı Organik Rankine Çevrimine göre %11,3 daha verimli olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Eppinger ve diğerleri (2021), tersinir ısı pompası – Organik Rankine çevriminden oluşan bir Pompalanmış Isıl Enerji Depolama sisteminin akışkan ve komponentlerin seçimi, başlangıç çevrim dizaynı ve CAD dizaynı üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında inceledikleri akışkanlardan 4 tanesini gelecek araştırmalar için uygun bulmuşlardır ve bu akışkanlardan biri, iç ısı değiştiricisindeki gerekli alanı düşüren R1233zd(E)'dir. Ayrıca, simülasyon sonucu incelenen sistemin verimini %59 bulmuşlardır.

Rindt ve diğerleri (2021), reküperatörlü ve yeniden sıkıştırmalı bir süperkritik CO₂ Brayton çevrimine dayalı Pompalanmış Isıl Enerji Depolama sistemini modellemişler ve fizibilitesini incelemişlerdir. Modelde sistem 16 – 513°C aralığında çalışmış ve verimi %38,9 olarak bulunmuştur. Ayrıca, inceledikleri sistem itibarıyla kabul edilebilir bir verim elde edildiğini ancak sistemin kompleksliği düşünüldüğünde daha yüksek bir verime ulaşılması beklentisinin olduğunu da belirtmişlerdir. Bununla birlikte, Carnot Bataryaları ile alakalı diğer konfigürasyonların ve çalışma ortamlarının incelenmesi gerektiğini de açıklamışlardır.

Buraya kadar literatür incelemesi sonucu bahsedilen çalışmalar enerji bazlı veya termodinamik incelemeyle yapılmış çalışmalardır. Enerji-ekserji bazlı olarak yapılan çalışmalar da aşağıda yer almaktadır:

White ve diğerleri (2014), enerji depolama için paketlenmiş yataklı termal rezervuarlardaki ekserji kayıplarını ve tersinmezliklerini irdelenmişlerdir. Yaptıkları nümerik ve teorik çalışmada, enerji depolama tankı ile çevre arasındaki basınç ve ısı sızıntı kayıpları her ne kadar önemli olsa da dikkate alınmamış ancak, depo malzemeleri ve parça boyutları hesaba katılmıştır. 20 mm çaplı parçacıkların soğuk rezervuardaki termodinamik kayıpları incelendiğinde, Fe₂O₃'ün, Fe₃O₄'e göre daha fazla kayba sebep olduğu görülmüştür. Ayrıca özgül ısılar, değişken olarak incelendiğinde termodinamik kayıplar daha fazla çıkmıştır.

Vinnemeier ve diğerleri (2016), farklı termal santrallere entegre Pompalanmış Isıl Enerji Depolama sisteminin termodinamik potansiyellerini değerlendirmişlerdir. Önerilen sistem, çevreyi ısı kaynağı olarak kullanan ve reküperatörlü bir ısı pompası içeren Pompalanmış Isıl Enerji Depolama sistemidir. Ayrıca, sistem içerisindeki ısı pompasında üç farklı iş akışkanı da (CO_2 , Hava ve Argon) dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır. Sonuç olarak sistemin maksimum ekserjisi, ısı pompasına sağlanan ısıнын sıcaklığının $300 - 600^\circ\text{C}$, reküperasyon oranının $0,25 - 0,6$ aralığında olması ve minimum sıcaklığın artırılması şartıyla %70 olarak bulunmuştur. Üstelik, ısı pompası ile birlikte elektrikli ısıtıcının kullanımıyla sistem veriminin %2 – 5 düşeceğini, fakat bu kullanımın yüksek sıcaklıklı ısı pompasının çıkaracağı zorlukları azaltacağını bildirmişlerdir.

Jockenhöfer ve diğerleri (2018), Pompalanmış Termal Enerji Depolama sistemlerinin, tersinmezliklerden dolayı verimlerinin düştüğü için tam ısı entegrasyonlu bir Organik Rankine çevrimi-Sıkıştırılmış Isı ile Enerji Depolama sistemini nümerik olarak incelemişlerdir. Sistem elemanlarının izantropik, mekanik, elektrik verimlerini ve ısı eşanjörlerinin basınç kaybını dikkate aldıkları çalışmalarında, 100°C 'lik bir ısı kaynağı ve 15°C 'lik bir ısı kuyusu ile birlikte, bütünleşik enerji depolama sisteminin net elektrik güç çıkışı oranını 1,25 olarak bulmuşlardır. Ayrıca, deşarj durumunda termal ve elektrik enerjilerin kullanımıyla maksimum ekserji verimini %59, termal enerjinin kullanılmadığı durumda ise maksimum ekserji verimini %52 olarak bulmuşlardır ve gelecekte, gerekli minimum sıcaklık farkını minimize edecek ısı eşanjörleri üzerine çalışılması gerektiğini bildirmişlerdir.

Attonaty ve diğerleri (2019), duyulur ısı tankından, depolama için elektrik ısıtıcı ve fanlardan oluşan ve elektrik üretimi için Brayton-Rankine hibrit çevriminden oluşan bir 200 MWh'lik Termal Enerji Depolama sistemini incelemişlerdir. Birinci ve ikinci yasa analizi yaptıkları ve termodinamik bir model oluşturdukları bu çalışmada, deşarj çevriminin seçiminin depolama boyutları üzerine çok önemli bir etkisi olduğunu ve deşarj anında yanma odasının kullanımının verimi artırdığı ve depolama boyutlarını düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Üstelik, 900°C depolama sıcaklığı için sistem verimini %50 olarak bulmuşlardır. Bunlara ek olarak, deşarj anında hibrit çevrim yerine Brayton çevriminin kullanımıyla çıkış gücünün %20 düşeceğini ve böyle bir kullanım için Brayton çevrimi basınç seviyesinin, hibrit çevrimin optimum basınç seviyesinden yüksek olması gerektiğini

vurgulamışlardır.

Frate ve diğerleri (2020), Organik Rankine çevrimi ve yüksek sıcaklıklı bir ısı pompasından oluşan, düşük derecede termal entegrasyonlu bir Pompalanmış Termal Enerji Depolama sisteminin çoklu-kriter incelemesini yapmışlar ve iç rejenerasyonlu ve rejenerasyonsuz Termal Enerji Depolama sistemlerini analiz edip kıyaslamışlardır. Çoklu-kriter bazlı çalışmalarını elektrik-elektrik enerjisi oranı, toplam ekserji verimi ve enerji yoğunluğu gibi farklı performans parametreleri üzerine ve Termal Enerji Depolama sistemi için uygun iş akışkanlarını belirleme üzerine yapmışlardır. Sonuç olarak, rejenerasyonlu sistemde elektrik-elektrik enerjisi oranı 1,08, toplam ekserji verimini 0,23 ve enerji yoğunluğu 17,28 kWh/m³ iken rejenerasyonsuz sistemde elektrik-elektrik enerjisi oranı 1,08, toplam ekserji verimi 0,2 ve enerji yoğunluğu 16,87 kWh/m³ olarak bulunmuştur. Ayrıca rejenerasyonlu ve rejenerasyonsuz sistemler için, yüksek sıcaklıklı ısı pompası ve organik Rankine çevrimi için en uygun akışkan çiftleri siklopentan-siklopentan ve pentan-R245fa olmuştur.

Bellos ve diğerleri (2022), trijenerasyon için kullanılması düşünülen ve reküperatörlü Organik Rankine çevrimi ve çok aşamalı ısı pompası sisteminden oluşan Carnot Batarya'yı termodinamik ve ekserjik analizle incelemişlerdir. Ayrıca batarya sisteminde bir adet soğuk ve iki adet sıcak depolama tankları bulunmaktadır. Soğuk depolama tankıyla ortam soğutması (0 °C), sıcak depolama tanklarının biriyle ortam ısıtması (50 °C) ve evlere sıcak su ve diğer sıcak depolama tankıyla (115 °C) da Organik Rankine çevriminin çalıştırılması düşünülmüştür. Çalışmanın sonucunda maksimum ekserjik verim %45,28 ve buna karşılık enerji verimi ise %322,16 olarak bulunmuştur.

Literatürde bulunan çalışmalar içerisinde enerji bazlı çalışmalardan sonra en yaygın olan çalışma, termoekonomik bazlı çalışmalardır. Bu çalışmalar da aşağıda yer almaktadır:

Henchoz ve diğerleri (2012), solar termal kolektörlerini kullanan ve ABB Switzerland Ltd. Kurumsal Araştırma tarafından geliştirilen bir enerji depolama sisteminin termo-ekonomik analizini yapmışlardır. İncelenen sistem içerisindeki ısı pompası ve ısı makinesi çevrimlerinin ikisinde de iş akışkanı amonyaktır. Ayrıca, Isı pompasının ve ısı makinesinin soğuk kaynakları termal enerji depolama tankı olarak birleştirilmiş ve ısı pompasının sıcak kaynağı olarak çevre hava, ısı makinesinin sıcak kaynağı olarak da solar termal kolektörlerden elde edilen sıcak su kullanılmıştır. Optimizasyon sonucunda sistem gücü, şarj ve deşarj anları için 50 MW olmuştur. Bununla beraber, optimum sistem maliyeti 982 – 3192

USD/kW, optimum sistem verimi de %43,8 – 84,4 olmuştur. Çalışmada önerilen sistemin, veriminin %56 – 65 aralığında olduğu durumda da, Pompalanmış Hidroelektrik Enerji Depolama sistemi ile ekonomik olarak rekabet edebileceği bildirilmiştir. Ayrıca Henchoz ve arkadaşları, sistem verimi %57 ve maliyeti 1189 USD/kW olan bir sistemde toplam maliyetin %56'sını güneş enerjisi hasatı ve depolanmasının oluşturduğunu, %22'sini ise soğuk depolamanın oluşturduğunu bildirmişlerdir ve aynı sistem için, sistemin 1 yıllık çalışması sonucunda %78 – 84 arası bir kullanılabilirliğe sahip olacağını açıklamışlardır.

White ve diğerleri (2013), Pompalanmış Termal Enerji Depolama sistemi ile ilgilenmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, sistemin verimini etkileyen parametreleri incelemişlerdir ve kompresör sıcaklık oranının, sistem verimini ve depolama kapasitesini artırdığını gözlemlemişlerdir ancak, artan kompresör sıcaklık oranının beraberinde yüksek basınç oranı getireceği için bu durumun sistemin maliyetini artıracağını bildirmişlerdir ve bu maliyet artışının, iş akışkanı olarak argon gibi tek atomlu gazların kullanımıyla giderilebileceğini de belirtmişlerdir. Ayrıca, türbin ve kompresör izantropik verimlerinin, enerji depolama sisteminin verimi üzerinde oldukça etkili olduğunu görmüşlerdir. Bunun yanı sıra, türbin ve kompresör gibi turbomakinelerin kullanımının yerine, pistonlu makinelerin kullanımının, enerji depolama sisteminin verimini artırdığını gözlemlemişler ve bildirmişlerdir. Son olarak, sıcak-soğuk depolama deşarj sıcaklık oranının düşürülmesiyle birlikte genleşme ve sıkışma tersinmezliklerinin azalacağını iddia etmişlerdir.

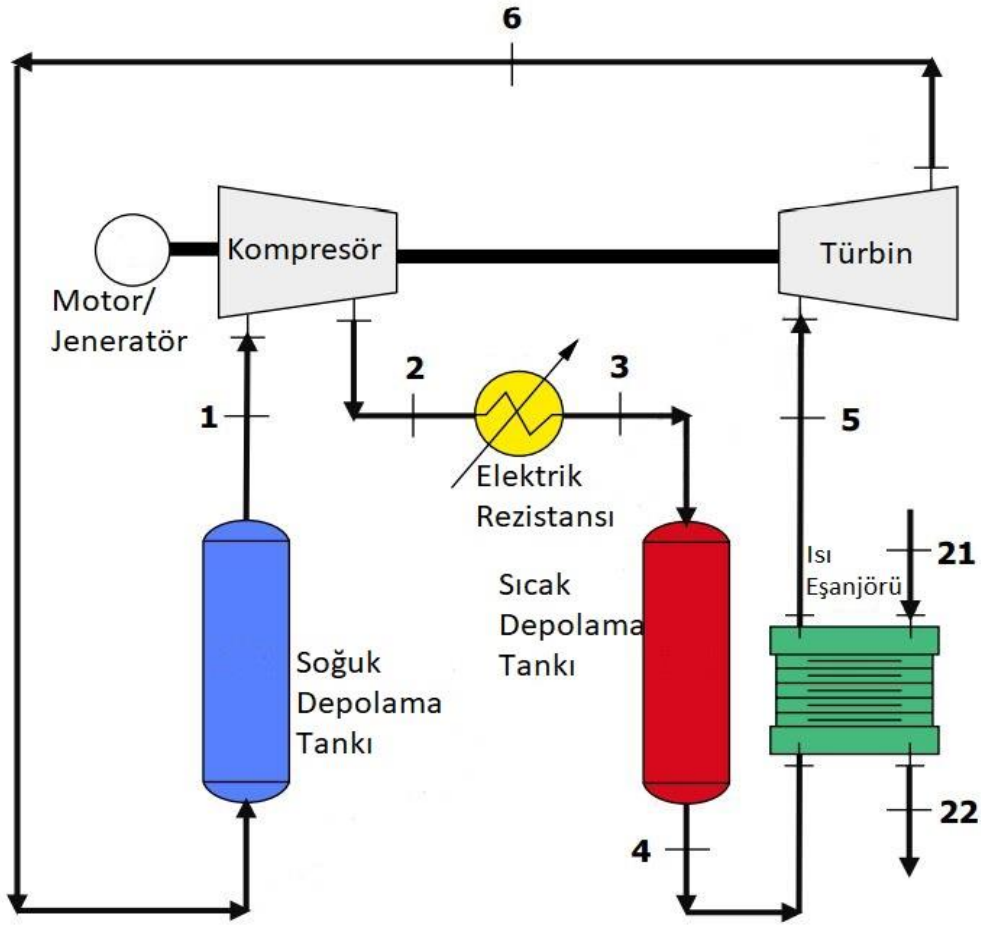
Abarr ve diğerleri (2016), bir doğal pik yük santralinin atık ısısından yararlanan Pompalanmış Termal Enerji Depolama sistemini nümerik olarak incelemişlerdir. Amonyumu iş akışkanı olarak kullandıkları bu nümerik çalışmada, sistemin bağımsız enerji depolama veriminin, farklı güç seviyeleri ve şarj durumu için %51 – 66 aralığında olduğu sonucunu gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, atık ısısından faydalanan sistemin bağımsız verimini de %24 olarak hesaplamışlardır. Bununla beraber, atık ısıdan faydalanan enerji depolama sisteminin 91 – 197 \$/MWh aralığındaki kapasite faktörü ile, bataryalardan (262 – 284 \$/MWh) ve Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama sisteminden (172 – 254 \$/MWh) daha ekonomik olduğunu bildirmişlerdir.

Benato (2017), ilk olarak Pompalanmış Termal Enerji Depolama sistemi ve bu sistemde depolanan malzemeler üzerine derinlemesine bir genel inceleme çalışması yapmış ve elektrik ısıtıcı ve bir adet ısı eşanjörü içeren yeni bir Pompalanmış Termal Enerji Depolama

konfigürasyonunu önermiş ve test etmiştir. Benato, çalışmasında havayı iş akışkanı olarak kullanmış ve 1 boyutlu paketlenmiş yatak modeli kullanarak ve basınç düşüşünü hesaba katarak, sıcak ve soğuk depoların ısı performansının simülasyonunu gerçekleştirmiştir. Beş farklı yüksek depolama yoğunluğuna sahip malzemelerin, iki yatak malzemesi şekli ve farklı maksimum sistem sıcaklıklarının test edildiği bu çalışmada Benato, alüminyum oksit kürelerini içeren paketlenmiş yatağın en düşük spesifik maliyete ve en yüksek enerji yoğunluğuna sahip konfigürasyon olduğunu ve maksimum çevrim sıcaklığının artmasıyla spesifik maliyetin azaldığını gözlemlemiştir.

Benato ve diğerleri (2017), Pompalanmış Termal Enerji Depolama sisteminin avantajlarını, dezavantajlarını ve gelecekteki gelişmelerini içeren detaylı bir analiz yapmışlar ve bu sistemi hali hazırda kullanılan diğer sistemlerle karşılaştırmışlardır. Yapılan analiz sonucunda Pompalanmış Termal Enerji Depolama sisteminin, Pompalanmış Hidroelektrik Enerji Depolama sistemi, Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama sistemi ve bataryalarla, spesifik maliyet ve enerji yoğunluğu açısından rekabet edebileceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca yenilikçi bir Pompalanmış Termal Enerji Depolama sistemini incelemişler ve önermişlerdir. Bu sistemde maksimum çevrim sıcaklığı 550 – 1050 °C aralığındayken, minimum çevrim sıcaklığı -70 °C'dir. Enerji yoğunluğu ise 70 – 430 kWh/m³ aralığındadır ve birim enerji başına maliyet ise 50 – 180 €/kWh'tir.

Benato ve Stoppato (2018), Pompalanmış Termal Enerji Depolama sisteminin birtakım tersinmezlikleri ve kayıpları olduğundan, elektrik enerjisinin termal enerjiye dönüşümünde bir elektrikli ısıtıcıdan yararlanan yeni bir sistem üzerine çalışmışlardır. Sıcak ve soğuk depoların 1 boyutlu simülasyonunu yaptıkları çalışmalarında, iki farklı ısı transfer akışkanı, 9 farklı depolama malzemesi ve farklı kontrol stratejilerini test etmişlerdir. Çalışmanın sonucu olarak, havanın argon gazına göre daha yüksek performans sağladığı, depolamada kullanılan bakır kürelerin ise en yüksek enerji yoğunluğu sağladığı ve spesifik maliyete yol açtığı yazarlar tarafından gözlemlenmiştir. Ayrıca, çevrim maksimum sıcaklığının artışının da, depolanan enerjinin artmasına ve spesifik maliyetin düşmesine yardımcı olduğu da gözlemlenmiştir. Benato ve Stoppato'nun incelediği Carnot Batarya'nın sistem şeması, Şekil 1.15'te yer almaktadır.



Şekil 1.15. Benato ve Stoppato'nun (2018) inceledikleri Carnot Batarya sistemi (Benato ve Stoppato, 2018)

Georgiou ve diğerleri (2018), Sıvılaştırılmış Hava ile Enerji Depolama sistemini ve Pompalanmış Termal Enerji Depolama sistemini termo-ekonomik olarak analiz edip kıyaslamışlardır. Yapılan termodinamik modelleme ve maliyet analizi sonucunda, Pompalanmış Termal Enerji Depolama sisteminin veriminin daha yüksek olduğu ancak, Sıvılaştırılmış Hava ile Enerji Depolama sisteminin daha düşük sermaye ve seviyelendirilmiş maliyete sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Üstelik, gerekli satış-satın alma fiyatı oranı düşünüldüğünde (0,15 \$/kWh), daha yüksek veriminden dolayı Pompalanmış Termal Enerji Depolama bir adım daha öne çıkmaktadır. Çalışmada incelenen Pompalanmış Termal Enerji Depolama sistemi 2 MW kapasitede iken, Sıvılaştırılmış Hava ile Enerji Depolama sistemi ise, 12 MW'tır.

Wang ve diğerleri (2019), Joule/Brayton çevriminden oluşan bir Pompalanmış Termal Enerji Depolama sisteminin sabit basınç altında dolgulu yataklarındaki giriş ve çıkış

akışlarındaki kütle debisi dengesizliğini irdelemişlerdir. 6,5 MPa basınç altında ve iş akışkanı olarak azotun kullanıldığı dolgulu yatağın kriyojenik Termal Enerji Depolama deneyinin gerçekleştirildiği çalışmada, kendinden dengelemeli bir sistemin verimi %0,12 artıracağını ve basınçlı boru hatları, vanalar ve kontrolörleri gibi elemanlara ihtiyaç olmayacağı için ilk maliyetten tasarruf edeceğini gözlemlemişlerdir.

Frate ve diğerleri (2020), yüksek sıcaklık buhar sıkıştırırmalı ısı pompası ve organik Rankine çevriminden oluşan sekiz farklı Carnot Batarya konfigürasyonunun termo-ekonomik analizini yapmışlar ve bu Carnot Batarya'yı elektrik ve atık ısı ile güçlendirmişlerdir. Analitik olarak yaptıkları çalışmada, verimin %50'yi geçmesi için ısı kaynağı sıcaklığının en fazla 60°C olması gerektiğini ve küçük ölçek ve düşük verimlerde (%50 – 70), maliyetin %40'ını Termal Enerji Depolama, %35'ini ise organik Rankine çevriminin oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca incelenen sekiz farklı konfigürasyon içinden Termal Enerji Depolama sisteminin maliyeti 0,74 – 8,25 milyon €, ısı pompasının maliyeti 0,5 – 9,39 milyon € ve Organik Rankine çevriminin maliyeti ise 0,85 – 6,77 milyon € aralığında olmuştur.

Zhao ve diğerleri (2022), katı termal rezervuarlı Joule-Brayton, sıvı termal depolamalı Joule-Brayton ve sıvı termal depolamalı transkritik Rankine çevrimlerinden oluşan üç farklı Carnot Batarya sistemini termo-ekonomik olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, depolama malzemelerinin, iş akışkanlarının ve farklı konfigürasyonlardaki sistemlerin etkilerini gözlemlemişlerdir. İncelenen sistemler arasında iş akışkanı olarak karbondioksitin, depolama malzemesi olarak Therminol VP-1'in kullanıldığı transkritik Rankine çevrimiyle en yüksek şarj-deşarj verimine (%68) ulaşmışlardır. Ayrıca sermaye maliyetlerinin incelendiği çalışmada en düşük maliyetin en yüksek şarj-deşarj veriminin elde edildiği konfigürasyonla oluştuğunu bildirmişlerdir. Bu maliyet, 50 MW güç kapasitesi ve 6 saatlikdeşarj periyodu için 209 milyon \$ olmuştur.

Carnot Batarya'ları hakkında eksergoekonomik analizin yapıldığı üç adet çalışmaya rastlanmıştır. Bu çalışmalar aşağıda yer almaktadır:

Dietrich ve diğerleri (2016), bir Pompalanmış Isıl Enerji Depolama sisteminin eksergo-ekonomik incelemesini yapmışlar ve mevcut kullanılan sistemlerle karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada, sistemin ekserjik verimini %27,3 olarak bulmuşlardır. Pompalanmış

Hidroelektrik ve Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama sistemlerinin ekserjik verimlerinin Pompalanmış Isıl Enerji Depolama sisteminin ekserjik veriminin iki katından fazla olmasına rağmen, Pompalanmış Isıl Enerji Depolama sisteminin, herhangi coğrafik şartlar gerektirmeden devasa depolamalara imkân sağladığı için diğer mevcut sistemlere göre avantajlı olduğunu belirtmişlerdir.

Dietrich ve diğerleri (2020), Joule/Brayton çevriminden oluşan bir Pompalanmış Isıl Enerji Depolama sisteminin ekserjik ve ekonomik analizini yapmışlardır. Süreksiz zamanda nümerik olarak modelleme yaptıkları çalışmada, sistemin tüm elemanlarını son teknoloji seviyesinde ve günümüz şartlarında kullanıma elverişli olarak belirlemişlerdir. Sonuç olarak, Pompalanmış Isıl Enerji Depolama sisteminin verimini %42,9 olarak bulmuşlar (Gerçek bir Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama sisteminden %10 daha düşük) ve bu sistemin, kurulu diğer enerji depolama sistemlerine göre en yüksek güç-spesifik maliyete sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Fan ve Xi (2022), rejenerasyonlu yüksek sıcaklıklı buhar sıkıştırılmalı ısı pompası-Organik Rankine çevrimi ve rejenerasyonlu yüksek sıcaklıklı buhar sıkıştırılmalı ısı pompası-rejenerasyonlu Organik Rankine çevriminden oluşan iki farklı konfigürasyondaki Carnot Bataryayı eksergoekonomik olarak incelemişlerdir. Depolama malzemesi olarak sıcak suyu düşünmüşlerdir ve depolama sıcaklığı 130 °C olduğu durumda, R245fa-HFO-1336mzz(Z) iş akışkanı çifti ile en iyi ekonomik sonuca ulaşmışlardır. Ayrıca yazarların ulaştıkları şarj-deşarj veriminin en optimum değeri % 42,63 olmuştur ve bu değere R245fa-HFO-1336mzz(Z) ve HFO-1336mzz(Z)-HFO-1336mzz(Z) iş akışkanı çiftleri ile ulaşmışlardır.

Carnot Batarya'ları ile ilgili yalnızca ekonomik bazlı yapılan iki adet çalışma vardır. Bu çalışmalardan da aşağıda bahsedilmiştir:

Okazaki ve diğerleri (2015), rüzgar enerjisi ile entegre bir şekilde çalışan enerji depolama sistemlerini incelemişler ve birbirleriyle kıyaslamışlardır. Üç farklı sistemi inceledikleri çalışmalarında (Termal destekli rüzgar, batarya enerji depolama ile rüzgar ve rüzgar ile güçlendirilmiş Termal Enerji Depolama sistemleri), ısı jeneratörü kullanan rüzgar ile güçlendirilmiş Termal Enerji Depolama sisteminin diğer sistemlerden daha ekonomik olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, rüzgar ile güçlendirilmiş Termal Enerji Depolama sisteminin, konsantre güneş panelleri ve/veya biyo-yakıt ile beraber kullanımının, sistem

elemanlarının ortak olarak kullanılabileceğinden dolayı daha cazip olabileceğini bildirmişlerdir.

Smallbone ve diğerleri (2017), gelişme halinde olan dünyanın ilk şebeke ölçekli projesinden alınan bilgilerle Pompalanmış Isıl Enerji Depolama sisteminin ekonomik analizini yapmışlar ve ekonomik olarak Pompalanmış Isıl Enerji Depolama sistemini diğer enerji depolama sistemleriyle karşılaştırmışlardır. Depolamanın aşamalı olarak maliyetini inceledikleri bu çalışmada, Pompalanmış Isıl Enerji Depolama sisteminin, Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama sistemi ile maliyet açısından rekabet edebileceğini, ayrıca coğrafik bağımsızlığından dolayı Pompalanmış Isıl Enerji Depolama sisteminin, Pompalanmış Hidroelektrik Enerji Depolama sistemine bile rakip olabileceğini gözlemlemişlerdir.

Literatürde, enerji ve çevre bazlı bir adet çalışma bulunmuştur. Bu çalışma aşağıda yer almaktadır:

Frate ve diğerleri (2017), düşük dereceli bir ısı kaynağından yararlanarak verimi %100'ü aşan hibrit bir Pompalanmış Termal Enerji Depolama sistemi üzerine çalışmışlardır. Matlab ile nümerik model geliştirdikleri çalışmalarında, farklı iş akışkanlarını denemişler ve 80 - 110°C aralığındaki bir ısı kaynağını göz önünde bulundurmuşlardır. Yapılan bu çalışmada sonuç olarak, düşük dereceli bir ısı kaynağından istifade eden bir Pompalanmış Termal Enerji Depolama sisteminin veriminin bu sayede ve ısı pompasının çalışma sıcaklık farkının düşürülmesi sayesinde oldukça arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, test edilen iş akışkanları arasında en uygun olan iş akışkanının Avrupa Çevre Mevzuatı'na da uyan R1233zd(E) olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Literatürde Carnot Batarya'larıyla ilgili 3E analizinin yapıldığı üç adet çalışma bulunmuştur. Bu 3E analizlerinden biri enerji-ekonomi-çevre, diğeri enerji-ekserji-çevre ve sonuncusu ise enerji-ekserji-ekonomi bazlı bir çalışmadır. Mercangöz ve diğerleri (2012), Carnot Batarya'nın enerji ve ekonomi analizini yapmışlardır ve bataryanın çevreye olan etkilerini incelemişlerdir. Pillai ve diğerleri (2019) ise, Carnot Batarya'nın enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır ve bununla birlikte bataryanın çevreye yaptığı etkileri de gözlemlemişlerdir. Liu ve diğerleri de (2022), Carnot Batarya'nın enerji, ekserji ve ekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu üç çalışma aşağıda açıklanmıştır:

Mercangöz ve diğerleri (2012), transkritik CO₂ çevrimine dayalı bir ısı pompası ve ısı makinesinden ve gizli ısı depolama tankından oluşan bir Elektrotermal Enerji Depolama sistemini incelemişler ve bu sistem hakkında kısa bir literatür incelemesi oluşturmuşlardır. Sistemin incelenmesinin, enerji depolama verimi, ölçeklenebilirliği, yerleşim bağımsızlığı ve asgari çevre etkisi üzerinden yapıldığı çalışmada, yüksek güç ölçeklerinde (100 MW civarı) Elektrotermal Enerji Depolama sisteminin Pompalanmış Hidroelektrik Enerji Depolama sistemine alternatif olabileceği gözlemlenmiştir. Çünkü, Elektrotermal Enerji Depolama sistemi verim bazında, Pompalanmış Hidroelektrik Enerji Depolama sistemini geçemese bile bu sisteme oldukça yaklaşmıştır. Ayrıca maliyet olarak, yine 100 MW civarındaki güç ölçeklerinde ise, Elektrotermal Enerji Depolama sistemi daha düşük maliyetler sunmuştur. Bunun yanında, çevresel incelemenin 6 farklı iş akışkanının yanma, toksisite, küresel ısınma potansiyeli, ozon tabakası inceltme potansiyeli gibi değişkenler üzerinden yapıldığı çalışmada CO₂, diğer akışkanlara göre iyi sonuçlar vermiştir.

Pillai ve diğerleri (2019), yüksek sıcaklıklı ısı pompası, Organik Rankine çevrimi ve gizli ve duyulur ısı depolama tanklarını kapsayan bir Carnot Bataryası'nın performansını, farklı iş akışkanlarını dikkate alarak simüle etmişlerdir. Çalışmalarında 16 farklı iş akışkanı denemişlerdir ve bu akışkanların küresel ısınma ve ozon tabakası inceltme potansiyellerini de hesaba katmışlardır. Yaptıkları termodinamik simülasyon bazlı çalışmada, HFO-1335mzz(E) ve R1234ze(Z) akışkanlarının, incelenen akışkanlar arasında çevreye en zararsız akışkanlar olduğunu ve bu iki akışkan arasından genleştirici ve yoğunlaştırıcı ve dolayısıyla sistemin tamamında, ekserji kaybının en fazla R1234ze(Z) akışkanında, en az da HFO-1336mzz(E) akışkanında olduğunu gözlemlemişlerdir.

Liu ve diğerleri (2022), rejenerasyonlu ve rejenerasyonsuz olmak üzere ısı pompası ve Organik Rankine çevrimlerinden oluşan Carnot Batarya sistemini incelemişlerdir. Yapılan sayısal çalışmada ısı depolama sıcaklığı 90 – 130 °C, toplam yatırım maliyeti 50 – 82 milyon \$, şarj-deşarj verimi %17 – 25, Organik Rankine çevrimi verimi %7 – 11, ve performans katsayısı 1,6 – 3,8 aralığında olmuştur. Rejenerasyonun, şarj-deşarj verimini artırdığını da gözlemlemişlerdir.

Son olarak, Carnot Batarya'ları ile ilgili literatürde iki adet derleme çalışmasıyla karşılaşılmıştır. Bu çalışmalar da özetli bir şekilde aşağıda açıklanmıştır:

Hasnain (1998), TED teknolojilerini avantajları ve dezavantajları ile ele almıştır. Hasnain TED sistemlerini, ısı depolama çeşitleri olan duyulur ısı ve o tarihlerde gelişen bir teknoloji olan gizli ısı depolama sistemini ele alarak araştırmıştır. Yazar araştırması sonucunda gizli ısı depolama sistemi için faz değiştiren maddenin seçiminin, depolama performansında oldukça etkili olduğuna dikkat çekmiştir ve gizli ısı depolama sisteminin yaygınlaşması için, teknik ve ekonomik olarak birtakım problemlerin çözülmesi gerektiğini bildirmiştir. Ayrıca yazar o tarihlerde, faz değiştiren maddelerin katı ve sıvı fazları için yoğunluk, özgül ısı ve termal kondüktivite gibi termodinamik özellikleriyle alakalı bilgilerin literatürde yetersiz olduğunu gözlemlemiştir.

Salem ve diğerleri (2021), solar Organik Rankine çevrimiyle entegre çalışan termal enerji depolama sistemleriyle ilgili literatürde yapılmış olan çalışmaları derlemişlerdir. Sonuç olarak, depolama ünitesinin optimum ölçülerinin solar radyasyon ve talebe bağlı olduğu, termal depolama üniteli solar Organik Rankine çevrimlerinin performans artışının sistem konfigürasyonuna bağlı olduğu ve depolama ünitesinin türü ve malzemesinin, sistem performansını önemli ölçüde etkilediği çıkarımını yapmışlardır.

Termal depolama literatürde karşılaşılabilecek bir konu olsa da akıllı şehirler konsepti ve elektrik enerjisinin arz talep dengesi Carnot Bataryalarını güncel araştırma konuları arasına sokmuştur. Dolayısıyla literatürde, Carnot Batarya'ları ile ilgili belirli eksiklikler yer almaktadır. Yapılan literatür taraması sonucu en göze çarpan eksiklikler, Carnot Batarya'larının tepki süreleri ve bu sistemlerde depolanan malzemelerin verime olan etkileridir. Carnot Batarya'larında depolanan malzemelerin verime olan etkileriyle ilgili çalışmalar vardır ama bu çalışmalar yeteri kadar derinlemesine yapılmamıştır. Ayrıca Carnot Batarya'larında, güneş enerjisiyle ilgili çok çalışma yoktur ve bu çalışmalar yeteri kadar kapsamlı ve gerçekçi olmamıştır. Bu çalışmada da şarj prosesinde fotovoltaik panel ve elektrik direnci bulunan bir Carnot Batarya konfigürasyonunun çalışması test edilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmanın gerçekçi ve kapsamlı olması adına, bölge koordinatları ve yılın gününe göre saatlik güneş radyasyonu değeri veren bir güneş adımı oluşturulmuştur. Yine gerçekçi bir senaryonun oluşturulması amacıyla, bir evin elektrik tüketim profili bulunmuş ve bu profile ve elde edilen güneş yoluna göre bir ördek eğrisi oluşturulmuştur. Carnot Batarya, arzın talebi geçtiği durumlarda şarj edilmiştir ve talebin arzı geçtiği anda da deşarj edilmiştir. Bu çalışmada bir gaz türbini ve iki farklı konfigürasyondaki Carnot Batarya sistemi incelenmiştir. İncelenen gaz türbini Model 1 olarak adlandırılırken, diğer iki Carnot

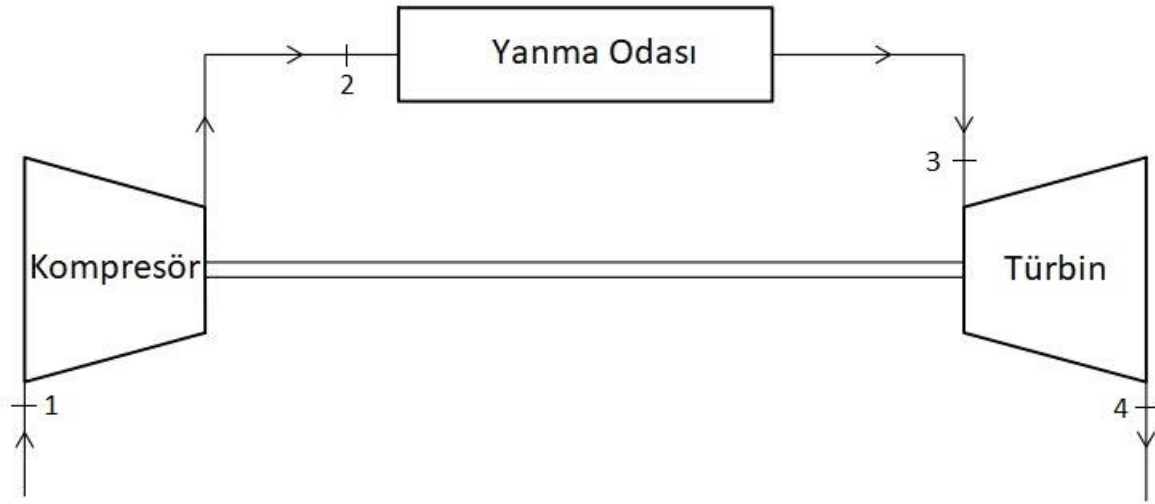
Batarya sistemleri de Model 2 ve Model 3 olarak adlandırılmıştır. Her bir model için 4 farklı basınç oranının etkisi incelenmiştir ve Carnot Batarya sistemleri için 4 farklı enerji depolama malzemesinin etkileri analiz edilmiştir. İncelenen basınç oranları sırasıyla 6,9, 7,4, 8,5 ve 10,4 iken, incelenen malzemeler de sırasıyla tuğla, kireç taşı, beton ve silikondur. Çalışma kapsamında her bir modelin, enerji, ekserji ve ekonomik analizleri yapılmıştır. Çalışma sonunda hangi sistemlerin fizibil olduğu gösterilmiştir.



2. MATERYAL VE METOT

Literatürde Termal Enerji Depolama sistemleriyle veya daha spesifik olarak Carnot Batarya'ları ile ilgili yapılan çalışmalarda bu sistemlerin birçok çeşitli konfigürasyonlarda incelendikleri görülmüştür. Bu konfigürasyonları birbirinden ayıran, genel olarak şarj prosesi, enerji depolama tankı ve deşarj prosesi olmuştur. Carnot Batarya'larında şarj prosesi için genellikle farklı konfigürasyonlara sahip ısı pompaları, rezistif ısıtma elemanları, güneş kolektörleri veya fotovoltaik güneş panellerinin kullanıldığı veya bu elemanların ortak bir şekilde kullanıldığı görülmüştür. Yalnızca güneş kolektörlerinin kullanımı durumunda enerji depolama tankının depolama sıcaklığı, belirli sıcaklık değerlerine kısıtlı olmaktadır. Diğer alternatiflerde ise daha yüksek sıcaklıklara çıkılabilmektedir. Carnot Batarya'larında deşarj prosesini çeşitlendiren düzenlemeler ise, Rankine çevrimi, Brayton çevrimi ve bu çevrimlerin ortak kullanıldıkları hibrit çevrimler olabilmektedir. Carnot Batarya'larının deşarj prosesi için Organik Rankine çevriminin kullanıldığı çalışmalar da oldukça yaygındır ancak bu çevrim, nispeten düşük depolama sıcaklığına sahip sistemler için uygundur. Literatürde Termal Enerji Depolama sistemlerini birbirinden ayıran bir diğer madde ise enerji depolama tankıdır. Enerji depolama tankları bu sistemlerde genel olarak üçe ayrılmaktadır. Bu tanklar, duyulur ısı depolama tankı, gizli ısı depolama tankı ve termokimyasal ısı depolama tankıdır. Düşük maliyetinden dolayı duyulur ısı depolama tankının ve yüksek miktarda enerji depolanmasına imkân sağladığından dolayı gizli ısı depolama tanklarının bir arada kullanıldıkları çalışmalar da mevcuttur.

Bu çalışmada, üç farklı sistem konfigürasyonu incelenmiştir. İncelenen sistemler, Brayton çevrimi, Termal Enerji Depolama sistemi ve bir yanma odası içeren Termal Enerji Depolama sistemidir. Çalışmada incelenen Brayton çevrimi Model 1 olarak adlandırılırken, Termal Enerji Depolama sistemi Model 2, yanma odası içeren Termal Enerji Depolama sistemi ise Model 3 olarak adlandırılmıştır. İncelenen Brayton çevrimi (Model 1), Şekil 2.1'de görüldüğü üzere kompresör, türbin ve yanma odasından oluşmaktadır. Burada, atmosferden çekilen havanın belirli bir miktar yakıtla yakılarak türbinde gücün elde edilmesi simüle edilmiştir.



Şekil 2.1. Çalışmada incelenen Brayton çevriminin (Model 1) şematik görünümü

Şekil 2.1’de şematiği görünen Brayton çevriminin analizi, belirli girdilerin tanımlanması ve bu girdilerin çözdürülmesi ile birlikte elde edilen birtakım parametreler sayesinde yapılmıştır. Model 1, çalışmada incelenen diğer iki sistem ile karşılaştırma yapılmak üzere incelenmiştir. Model 1, dört farklı özellikte incelenmiştir. Model 1’de kullanılmak üzere, dört farklı basınç oranı ve kurulu güç değerindeki Pratt&Whitney markalı gaz türbinlerinin özellikleri seçilmiştir. Bu gaz türbinlerinin özellikleri, Çizelge 2.1’de verilmiştir. Özellikleri bu şekilde belirlenmiş olan Model 1’de kullanılan parametreler ise, Çizelge 2.2’de verilmiştir. Ayrıca Model 1’de yakıt olarak metan kullanılmıştır.

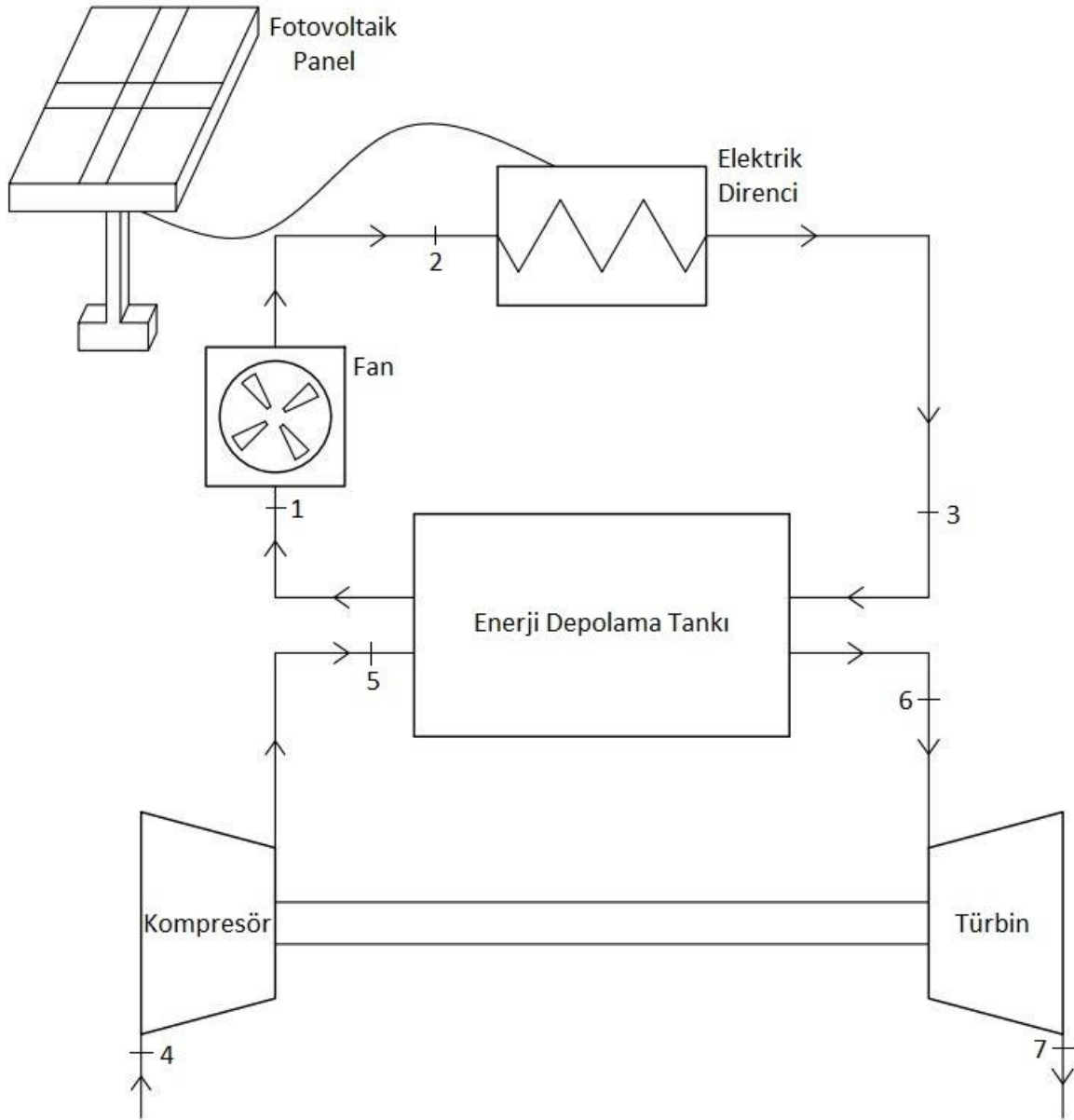
Çizelge 2.1. Model 1’de kullanılan parametrelerin örnek alındığı gaz türbinlerinin özellikleri

Model	Basınç Oranı	Kütle Debisi (kg/s)	Kurulu Güç (kWe)
P+W ST6L-721	6,9	3	486
P+W ST6L-795	7,4	3	650
P+W ST6L-813	8,5	4	808
P+W ST6L-90	10,4	5	1089

Çizelge 2.2. Brayton çevriminde (Model 1) kullanılan parametreler

Parametreler	Değerler ve Birimler
Kütleli Hava Debisi [kg/s]	3; 3; 4; 5
Atmosferik Hava Sıcaklığı [°C]	25
Atmosferik Hava Basıncı [bar]	1,01325
Basınç Oranı	6,9; 7,4; 8,5; 10,4
Kompresör İzantropik Verimi [%]	85
Türbin İzantropik Verimi [%]	85
Yanma Odası Basınç Kaybı [bar]	0,05
Yakıt Alt Isıl Değeri [kJ/kmol]	802361
Yakıtın Moleküler Ağırlığı [kg/kmol]	16,043
Havanın Moleküler Ağırlığı [kg/kmol]	28,649

İncelenen bir başka system olan Model 2’de ise, şarj prosesinde fotovoltaiik panel, deşarj prosesinde ise Brayton çevrimi bulunmakla birlikte, enerji depolama tankı ise duyulur ısı depolama tankıdır. Ayrıca şarj ve deşarj prosesleri için iş akışkanı olarak hava düşünülmüştür. Çalışma için düşünülen sistemin analizi MATLAB yazılımı üzerinden 1-boyutlu olarak yapılmıştır. Oluşturulan bu enerji depolama sistemi şematik olarak Şekil 2.2’de görülmektedir.

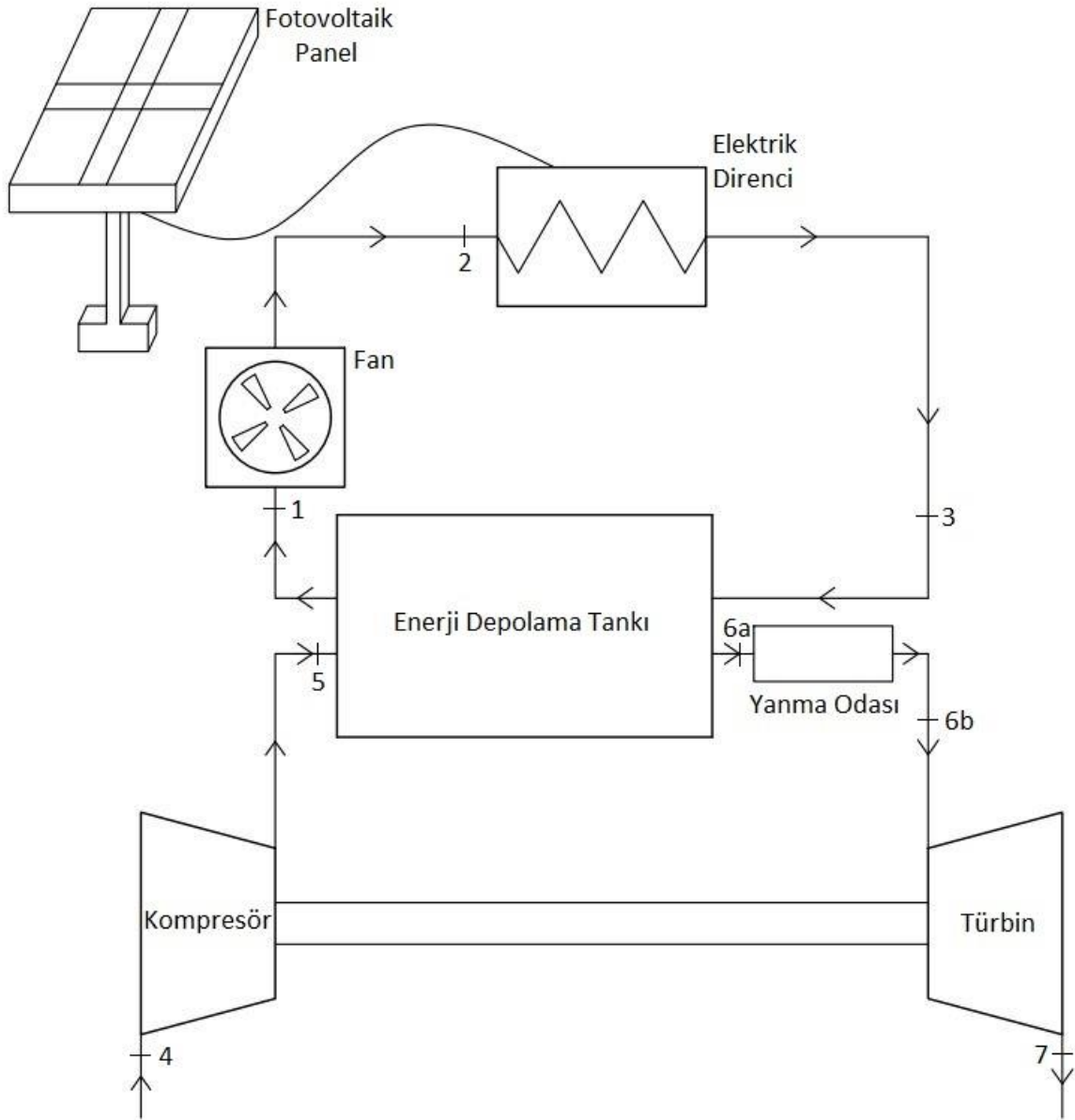


Şekil 2.2. Çalışmada incelenen Termal Enerji Depolama sisteminin (Model 2) şematik görünümü

Çalışma kapsamında oluşturulan enerji depolama sistemi (Model 2), fan, fotovoltaik panel, elektrik direnci, iş akışkanı akış kanalı, enerji depolama tankı, kompresör ve türbinden oluşmaktadır. Öncelikle şarj prosesi için iş akışkanı olarak seçilmiş olan hava, fan tarafından elektrik direncine doğru çekilir. Bu elektrik direnci, gücünü fotovoltaik panelden almaktadır. Arz fazlası olan elektrik enerjisi bu adımda ısısal enerjiye dönüştürülmektedir. Isınan hava buradan sonra enerji depolama tankına geçer ve burada termofiziksel özellikleri bilinen taşlar (enerji depolama ortamı) ısıtır. Tankın içerisindeki taşlar küresel veya küresele yakın geometriye sahiptirler ve özgül ısı ve ısı iletkenlik gibi termofiziksel özellikleri enerji

depolamaya yatkındır. Hava, şarj periyodu süresince bu işlemleri tekrarlar ve şarj periyodunun sonunda bu işlemler sona ermiş olur. Deşarj prosesine geçildiğinde ise, enerji depolama tankı sıcaktır ve bir Brayton çevriminin yanma odası gibi görev görür. Deşarj prosesinde ise, iş akışkanı olan hava, kompresör vasıtasıyla atmosferden çekilir. Çekilen hava kompresörde sıkışır ve havanın burada basıncı artar. Ardından basıncı ve bir miktar da sıcaklığı artan hava, enerji depolama tankına girer ve tank içerisindeki taşlardan ısı alır. Hava tanktan çıkarken ısınmış olur ve buradan türbine geçer. Hava, türbinde belirli miktarda iş yaptıktan sonra türbini terk eder ve atmosfere verilir. Bu sırada, atmosferik hava kompresör tarafından çekilip basınçlandırılarak döngü devam ettirilir. Bu döngü deşarj periyodu sona erene kadar yani enerji depolama tankındaki ısı, kullanışsız hale gelene kadar devam eder.

İncelenen üçüncü ve son system olan Model 3'te ise, fan, fotovoltaik panel, elektrik direnci, iş akışkanı akış kanalı, enerji depolama tankı, yanma odası, kompresör ve türbin bulunmaktadır. Bu sistemde de iş akışkanı havadır ve döngü şarj prosesiyle başlamaktadır. Şarj prosesi, havanın fan tarafından çekilmesiyle başlar. Fan tarafından çekilen hava, fotovoltaik panele bağlanmış olan elektrik direncinin üstünden akarak ısınır ve buradan enerji depolama tankına geçer ve tankı ve tank içerisindeki enerji depolama malzemelerini de ısıtır. Bu kısma kadar sistemin işleyişi, incelenen ikinci sistem olan Model 2 ile aynıdır. Model 2 ile Model 3 arasındaki fark ise, deşarj periyodunda başlamaktadır. Model 3'te deşarj periyodu, havanın kompresör tarafından çekilmesi ve basınçlandırılması ile başlar. Ardından hava, termal enerji depolama tankına girer ve buradan ısınarak çıkar. Buradan çıkan hava, yanma odasına girer. Enerji depolama tankı ile yanma odasının beraber kullanılmalarının amacı, havanın türbin giriş sıcaklığını sabit tutmak ve hem yanma odasının yakılacak yakıt miktarını azaltmak, hem de üretilecek elektrik gücü miktarını artırmaktır. Model 3'ün sistem şeması, Şekil 2.3'te görülmektedir.



Şekil 2.3. Çalışmada incelenen hibrit sistemin (Model 3) şematik görünümü

Çalışma kapsamında incelenen sistemlerden Model 2 ve Model 3, Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'ten görüleceği üzere yapıları ve elemanları itibarıyla oldukça benzer sistemlerdir. Bu sistemlerin aralarındaki tek fark, Model 3'te yanma odasının yer almasıdır. Model 3'te enerji depolama tankı ve yanma odasının birlikte kullanımıyla sistemin net enerji potansiyelini ne kadar artıracakı ele alınmıştır. Model 2 ve Model 3'ün analizlerinde kullanılan parametreler Çizelge 2.3'te verilmiştir.

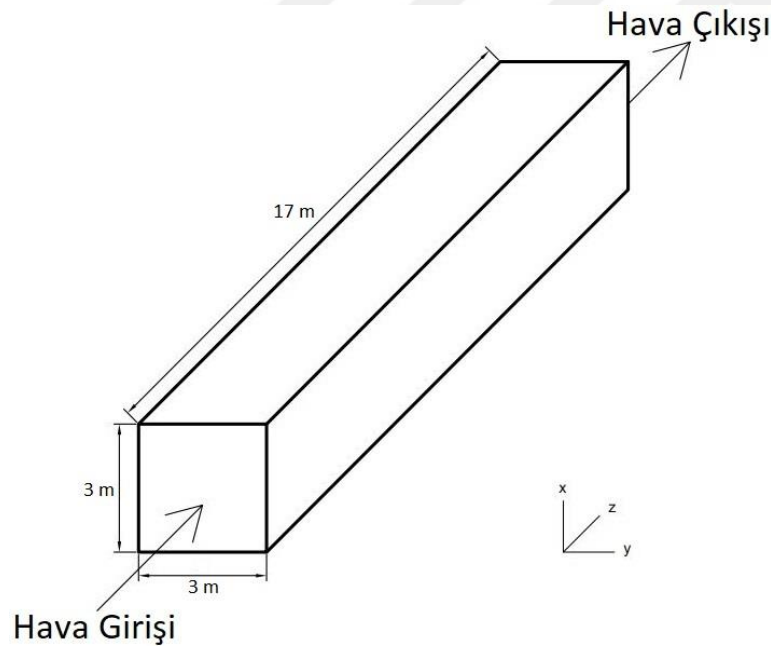
Çizelge 2.3. Model 2 ve Model 3'te kullanılan parametreler

Parametreler	Değerler ve Birimler
Kütleli Hava Debisi [kg/s]	3; 3; 4; 5
Atmosferik Hava Sıcaklığı [°C]	25
Atmosferik Hava Basıncı [bar]	1,01325
Basınç Oranı	6,9; 7,4; 8,5; 10,4
Kompresör İzantropik Verimi [%]	85
Türbin İzantropik Verimi [%]	85
Yanma Odası Çıkış Sıcaklığı [°C]	1100
Yakıt Alt Isıl Değeri [kJ/kmol]	802361
Yakıtın Moleküler Ağırlığı [kg/kmol]	16,043
Havanın Moleküler Ağırlığı [kg/kmol]	28,649

Şarj prosesinin vedeşarj prosesinin kesişimi olan ve ayrıca, Model 2 ve Model 3 için önemli bir eleman olan enerji depolama tankı, Şekil 2.4'te görülmektedir. Tankın içinde yerleşimi homojen ve tankın boyu boyunca olan taşlar bulunmaktadır. Bu taşların malzemesi tuğladır. Şarj periyodu sırasında hava ısınmak üzere tankın ön yüzeyinden tanka girdiğinde taşlara doğrudan temas ederek geçer. Bu durum, taşlarla hava arasındaki ısı transferini sağlamaktadır. Taşlarla hava arasında gerçekleşen ısı transferi konveksiyon yoluyla olmaktadır. Deşarj periyodu sırasında ise hava, şarj periyodunda havanın tanktan çıktığı bölgeden girer ve yine şarj periyodunda havanın girdiği bölgeden çıkarak tankı terk eder. Bu periyotta da ısı, taşlardan havaya doğru taşınır ve hava tankı terk ettiğinde ısınmış bir vaziyette olmaktadır. Enerji depolama tankında kullanılan malzemenin özellikleri, sistemin depolama malzemesi ve depolama tankına ait birtakım özellikler Çizelge 2.4'te yer almaktadır. Şarj prosesi için havanın tanka giriş sıcaklığı sabit 900 °C'dir. Ayrıca fotovoltaik panel alanı 40.000 m²'dir ve bu panelin verimi %20 olarak kabul edilmiştir. Çalışmadaki zaman adımı da 0,5 dk olarak belirlenmiştir. Depolama malzemesi olan tuğlanın özellikleri, çalışma boyunca sabit kabul edilmiştir. Ancak iş akışkanı olan havanın özellikleri, sıcaklık değişimine göre değişmektedir.

Çizelge 2.4. Depolama malzemesi ve tanka ait birtakım özellikler

Parametreler	Değerler ve Birimler
Tank Hacmi [m^3]	153
Tank Uzunluğu [m]	17
Hücre Sayısı	40
Tank Başlangıç Sıcaklığı [$^{\circ}C$]	25
Depolama Malzemesinin Yoğunluğu [kg/m^3]	1920 (Tuğla); 2240 (Beton); 2500 (Kireç Taşı); 2400 (Silikon)
Depolama Malzemesinin Özgül Isısı [J/kgK]	835 (Tuğla); 1130 (Beton); 900 (Kireç Taşı); 700 (Silikon)
Çevre Sıcaklığı [$^{\circ}C$]	25
Tanktaki Boşluk Oranı	0,4 (Tuğla); 0,42 (Silikon); 0,57 (Kireç Taşı); 0,62 (Beton)
Depolama Malzemelerinin Küreselliği	1,0



Şekil 2.4. Enerji Depolama Tankının şematik görseli

2.1. Matematiksel Model ve Parametreler

MATLAB yazılımında 1-boyutlu simülasyonlar gerçekleştirilmeden önce Termal Enerji Depolama sisteminin şarj ve deşarj prosesini kapsayan fiziksel süreci temsil eden

matematiksel bir model oluşturulmuştur. Bu model, literatürde Mumma-Marvin modeli olarak bilinen bir modeldir. Mumma-Marvin modeli, paketlenmiş yatak şeklindeki tanklarda ve bu tanklarda büyük taneciklere sahip malzemeler olduğunda sıkça kullanılan ve yaygın kabul görmüş bir modeldir (Benato, 2017). Mumma-Marvin modeli, katı bir cisim ve etrafındaki akışkan arasındaki ısı taşınım denklemlerinden yola çıkılarak ortaya çıkmış bir modeldir ve yığık sistem prensibine dayanmaktadır.

Oluşturulan Carnot Batarya konfigürasyonları kapsamında tankın 1-boyutlu simülasyonunu gerçekleştirmek için, tank uzunluğu boyunca 40 adet bölmeye ayrılarak diskritize edilmiştir. Tankın diskritize edilmiş temsili görseli Şekil 2.7’de verilmiştir. Çalışma için düşünülen model sonucu oluşturulan denklemler 40 bölmenin her biri için, yani her bir kontrol hacmi için çözülmüştür. Mumma-Marvin modeli ile, tank ve iş akışkanı olan havanın sıcaklıkları hesaplanmıştır. Ayrıca, tankta gerçekleşen basınç kaybı da bu model sayesinde hesaplanmıştır. Sıcaklık ve basınç kaybı ile birlikte iş akışkanının termofiziksel özellikleri de her bir kontrol hacmi ve her bir zaman adımı için hesaplanmıştır. Havanın termofiziksel özellikleri, belirli sıcaklık ve basınç değerlerine göre tablolaştırılmıştır ve ardından eğri uydurma yöntemiyle eğri uydurulmuş ve bu eğrinin denklemi elde edilerek hesaplanmıştır. Mumma-Marvin modeli ve havanın termofiziksel özelliklerinin denklemleri sayesinde sıcaklık ve basınç verileri elde edilmiş ve elde edilen bu veriler sayesinde incelenen sistemlerin elemanlarında enerji korunum hesapları yapılmıştır. Ayrıca enerji korunum hesaplarıyla beraber, sistemlerin önemli elemanları için ekserji hesapları da yapılmıştır. Bu çalışmanın özgün yanı zamana bağlı olarak hem şarj hem de deşarj prosesinde enerji ve ekserji sonuçlarının elde edilmesidir.

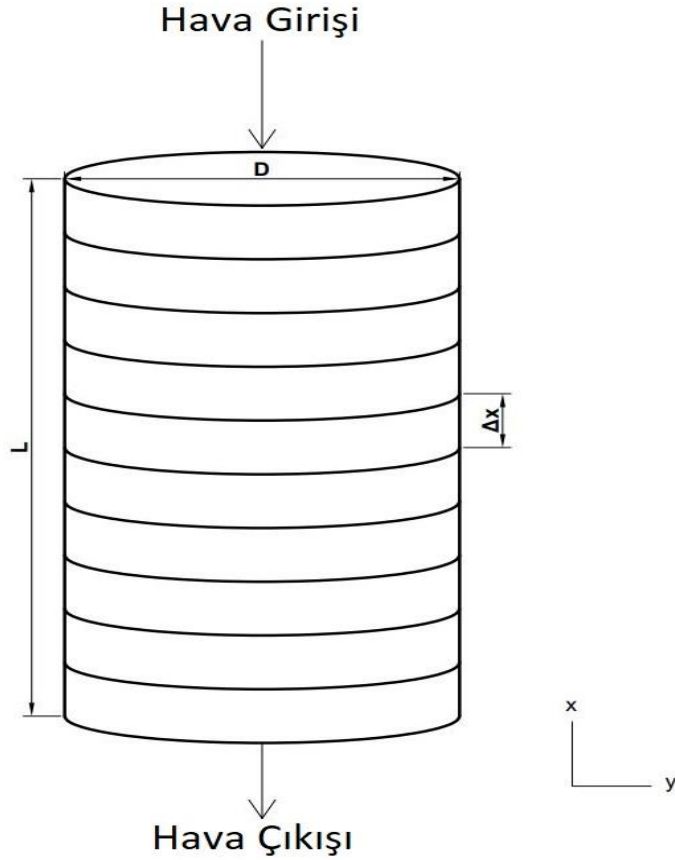
2.1.1. Model Validasyonu

Mumma-Marvin modeli çalışma boyunca kullanılmıştır ve dolayısıyla, çalışma için oldukça önem arz etmektedir. Ancak bu modelin güvenilirliğini görmek adına, bir validasyon çalışması yapılmıştır. Validasyon için, bu modelin kullanıldığı bir çalışma (Singh ve diğerleri, 2008) seçilmiştir. Seçilen çalışmada, malzemesi tuğla olan taşlarla dolu bir termal enerji depolama tankının şarj prosesinin simülasyonu yapılmıştır. Bu termal enerji depolama tankını, gücünü solar kolektörlerden alarak şarj olmuştur. Solar kolektörle termal enerji depolama tankı arasındaki bağlantı elemanı da fan olmuştur. Fan, kolektörde ısınan havayı çekmiş ve buradan termal enerji depolama tankına taşımıştır. Böylelikle doğrulama için

seçilen çalışmanın şarj prosesi tamamlanmış olur. Bu çalışmada da şarj prosesi 8 saat düşünülmüştür. Validasyon için seçilen çalışmadaki tankın geometrisi ve diskritizasyonu Şekil 2.5'te görülmektedir. Ayrıca, çalışmada farklı boşluk oranı değerleri için ve farklı küresellik değerleri için şarj prosesinin simülasyonu tamamlanmıştır. Aynı şekilde doğrulama çalışmasında da farklı boşluk oranı ve küresellik değerleri için şarj prosesi tekrarlanmıştır. Validasyonun yapılması için kullanılan parametreler, yani validasyon çalışması için seçilen çalışmada kullanılan parametreler Çizelge 2.5'te verilmiştir.

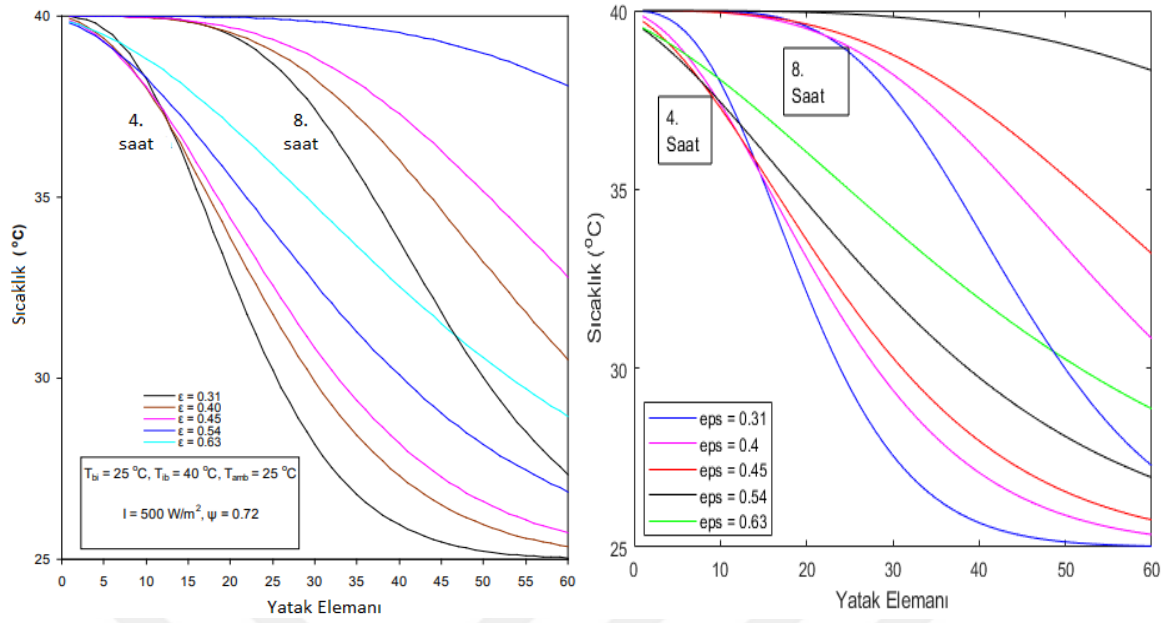
Çizelge 2.5. Doğrulama çalışmasında kullanılan parametreler

Parametre	Değer/Aralık
Tank Hacmi [m^3]	15
Tank Yüksekliği [m]	6
Tank Elemanı Sayısı	60
Tankın Başlangıç Sıcaklığı [$^{\circ}C$]	25
Depolama Malzemesinin Küreselliği	0,55 – 1,00
Boşluk Oranı	0,31 – 0,63
Depolama Malzemesinin Yoğunluğu [kg/m^3]	1920
Havanın Yoğunluğu [kg/m^3]	1,1
Depolama Malzemesinin Özgül Isısı [kJ/kgK]	0,835
Havanın Özgül Isısı [kJ/kgK]	1,008
Depolama Malzemesinin Termal Kondüktivitesi [W/mK]	0,70
Havanın Dinamik Viskozitesi [kg/ms]	0,0000185
Çevre Sıcaklığı [$^{\circ}C$]	25
Havanın Tankı Giriş Sıcaklığı [$^{\circ}C$]	40
Radyasyon [W/m^2]	500



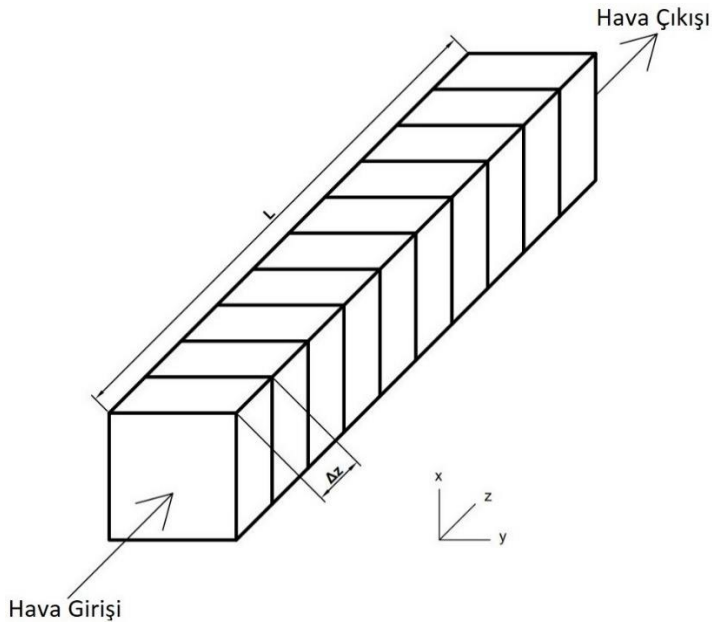
Şekil 2.5. Validasyon için seçilen çalışmadaki tank geometrisi ve diskritizasyonu

Çizelge 2.5'te yer alan bilgiler ve Mumma-Marvin modeli kullanılarak, Singh ve arkadaşlarının ulaştıkları sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmek için MATLAB'de simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar, şarj prosesinin 4. ve 8. saatinin sonundaki verileri gösterecek şekilde elde edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca simülasyonlar, farklı boşluk oranları ve küresellik değerleri için tekrarlanmıştır. Simülasyonlar sonucunda tank içerisindeki 4. saat ve 8. saat sonundaki sıcaklık dağılımı Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Singh ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada elde ettikleri 4. ve 8. saat sonundaki tankın sıcaklık dağılımları (sol), validasyon çalışmasında ulaşılan 4. ve 8. saatin sonundaki sıcaklık dağılımları (sağ).

Şekil 2.6'da ayrıca, Singh ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalarında ulaştığı sonuç da yer almaktadır. Şekil 2.6'daki iki sonuç, birbirine oldukça benzerlerdir. Elde edilen sonuçlar ile Singh ve arkadaşlarının ulaştığı sonuçların benzerliği, validasyon çalışmasının başarılı olduğunu gösteriyor ve Mumma-Marvin modelinin doğrulamasını göstermektedir.



Şekil 2.7. Enerji Depolama Tankının diskritize edilmiş görseli

Mumma-Marvin modeli kapsamında tanktaki her bir kontrol hacmi içerisinde çözölen denklemler aşağıdaki gibidir;

$$Q_u = A_{pv} S_t \eta_{st} \quad (2.1)$$

“Eş. 2.1”de yer alan, A_{pv} fotovoltaiik panel yüzey alanı (m^2), S_t radyasyon miktarı (W/m^2), η_{st} , fotovoltaiik panelin verimi, Q_u ise yararlanılabilir ısı transferidir (W). Ayrıca, yararlanılabilir ısı transferi aşağıdaki denklemde de yer almaktadır;

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_o - T_i) \quad (2.2)$$

“Eş. 2.2”de ise, $\dot{m}$ havanın kütle debisi (kg/s), ve C_p havanın özgül ısısıdır (kJ/kgK). T_o , havanın tanka giriş sıcaklığıdır. Tank içindeki tüm kontrol hacimlerinde, belirlenen zaman adımına göre tekrarlanarak çözölen sıcaklık denklemleri aşağıdaki gibidir;

$$\frac{h_v AL}{N} (T_{s,m} - T_a) = m c_p \frac{dT}{dt} \quad (2.3)$$

$$dT = d(T_a - T_{s,m}) \quad (2.4)$$

$$\int_{T_a=T_{a,m}}^{T_a=T_{a,m+1}} \frac{d(T_a - T_{s,m})}{(T_a - T_{s,m})} = \int_{t=0}^{t=t} \frac{h_v AL}{N m c_p} dt \quad (2.5)$$

$$\ln \frac{T_{a,m+1} - T_{s,m}}{T_{a,m} - T_{s,m}} = - \frac{h_v AL}{N \dot{m} c_p} \quad (2.6)$$

$$\frac{T_{a,m+1} - T_{s,m}}{T_{a,m} - T_{s,m}} = e^{-\phi_1 t} \quad (2.7)$$

$$T_{a,m+1} = T_{s,m} + (T_{a,m} - T_{s,m}) e^{-\phi_1} \quad (2.8)$$

$$T_{s,m}(t+\Delta t) = T_{s,m}(t) + \Delta t [\phi_2 (T_{a,m} - T_{a,m+1}) - \phi_3 (T_{s,m}(t) - T_{amb})] \quad (2.9)$$

2.8 numaralı eşitlik, 2.3 – 2.7 arasındaki eşitliklerden türemiştir. Burada, $T_{a,m+1}$ havanın “m” numaralı kontrol hacminden çıkış sıcaklığı ($^{\circ}C$), $T_{a,m}$ havanın “m” numaralı kontrol hacmine giriş sıcaklığı ($^{\circ}C$), $T_{s,m}(t)$ “m” numaralı kontrol hacminin “t” zamanındaki ortalama sıcaklığı

(°C), $T_{s,m(t+\Delta t)}$ “m” numaralı kontrol hacminin “ Δt ” zaman sonraki sıcaklığı (°C). Burada, Δt zaman adımıdır (s). Eş. 2.9, taşların bir sonraki zaman adımıdaki sıcaklıklarının hesaplanması için kullanılmaktadır. Bu eşitlikteki ilk terim taşların “t” zamanındaki sıcaklığı, ikinci terim havanın kontrol hacmine aktardığı ısı transferini ve üçüncü terim ise tanktan çevreye olan ısı transferini temsil etmektedir. $\emptyset_1$, $\emptyset_2$, $\emptyset_3$; empirik katsayılardır ve bu katsayıların denklemleri aşağıda yer almaktadır;

$$\emptyset_1 = \frac{h_v AL}{N(\dot{m}C_p)} \quad (2.10)$$

$$\emptyset_2 = \frac{N(\dot{m}C_p)}{\rho_s AL(1-\varepsilon)C_s} \quad (2.11)$$

$$\emptyset_3 = \frac{(UA_s)}{N(\dot{m}C_p)} \emptyset_2 \quad (2.12)$$

burada, A tankın kesit alanı (m²), L tankın uzunluğu (m), N diskritize edilen tankın toplam bölme sayısı, ρ_s depolama malzemesinin yoğunluğu (kg/m³), C_s depolama malzemesinin özgül ısısı (kJ/kgK), ve ε boşluk oranıdır. h_v hacimsel ısı transfer katsayısıdır (W/m³K) ve hacimsel ısı katsayısı, Nusselt sayısı ve Reynolds sayısı gibi değerler de aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

$$h_v = \frac{kNu}{D_e^2} \quad (2.13)$$

$$Nu = 0.437(Re^{0.75})(\Psi^{3.35})(\varepsilon^{-1.62})\{\exp[29.03((\log\Psi)^2)]\} \quad (2.14)$$

$$Re = \frac{\rho V D_e}{\mu} \quad (2.15)$$

burada, ρ_a havanın yoğunluğu (kg/m³), D_e depolama malzemesinin eşdeğer çapı (m), k havanın ısı iletim katsayısı (W/mK), ve Ψ küresellik değeridir. Eş. 2.16’da basınç kaybı denklemi verilmiştir;

$$\Delta P = \frac{fG^2}{\rho_a D_e} \quad (2.16)$$

burada, ΔP basınç kaybı (Pa), G havanın kütle hızı ($\text{kg/m}^2\text{s}$), f ise sürtünme katsayısıdır. Basınç kaybından yola çıkılarak fan gücü ise, aşağıdaki denklemden hesaplanmaktadır:

$$W_{fan} = \frac{\dot{m}\Delta P}{\rho_a} \quad (2.17)$$

Ayrıca, sürtünme katsayısı aşağıdaki denklemden hesaplanabilmektedir;

$$f = 4.466(Re^{-0.2})(\Psi^{0.696})(\varepsilon^{-2.945})\{\exp[11.85(\log\Psi)^2]\} \quad (2.18)$$

Küresellik ve boşluk oranı değerleri de aşağıdaki iki denklemden hesaplanmaktadır;

$$\Psi = \frac{a_s}{a_e} \quad (2.19)$$

$$\varepsilon = \frac{V_t - V_s}{V_t} \quad (2.20)$$

“Eş. 2.14” ve “Eş. 2.15”te, a_s hacmi depolama malzemesinin hacmine eşit olan bir kürenin yüzey alanıdır (m^2), a_e ise, depolama malzemesinin yüzey alanıdır (m^2).

2.1.2. Enerji Korunum Denklemleri

Mumma-Marvin modeli kapsamında yapılan hesaplamalar sonucunda ortaya çıkan değişkenlerden yola çıkılarak, sistemlerin enerji analizleri yapılmıştır. Enerji analizleri, eleman bazında yapılmıştır. Yani sistemin her bir elemanı, kontrol hacmi gibi düşünülerek yapılmıştır. Bu kontrol hacimlerinde, termodinamiğin 1. yasası uygulanarak ve hava molar olarak analiz edilerek enerji analizi yapılmıştır. Açık bir kontrol hacmi için termodinamiğin 1. yasası,

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e \quad (2.21)$$

şeklinde. Burada $\dot{Q}$, ısı transferi (kW), $\dot{W}$, güç (kW), $\dot{m}_i$, kontrol hacmine giren kütle debisi (kg/s), $\dot{m}_e$ kontrol hacminden çıkan kütle debisi (kg/s), h_i , akışkanın kontrol hacmine girerken sahip olduğu entalpi (kJ/kg) ve h_e ise, akışkanın kontrol hacminden çıkarken sahip

olduğu entalpi (kJ/kg) değeridir. Enerji analizinin yapılması için bir diğer önemli denklemler, havanın molar denklemleri olmuştur. Öncelikle bu molar denklemler

$$\bar{h}_{hava} = x_{N_2}\bar{h}_{N_2} + x_{O_2}\bar{h}_{O_2} + x_{CO_2}\bar{h}_{CO_2} + x_{H_2O}\bar{h}_{H_2O} \quad (2.22)$$

şeklindedir. Burada $\bar{h}_{hava}$, havanın molar entalpi değeridir (kJ/kmol), x değerleri ise, hava içerisindeki maddelerin molar yüzdesidir. Havayı oluşturan bütün maddelerin, hava içerisindeki molar yüzdeleri başlangıçta sırasıyla; %77,48 N₂, %20,59 O₂, %0,03 CO₂ ve %1,19 H₂O'dur. Hava içeriği, yanma odasında yanma gerçekleştiği sürece değişime uğramaktadır.

Termodinamiğin 1. yasası ve havanın molar entalpi denklemleri birlikte kullanıldığında, incelenen sistemlerde yer alan önemli elemanların enerji analizleri yapılmıştır. Yapılan her bir enerji analizleri aşağıdaki gibidir:

$$\dot{Q}_{tank} = \dot{m}_e h_e - \dot{m}_i h_i = \dot{m}(h_6 - h_5) \quad (2.23)$$

“Eş. 2.23”, enerji depolama tankının enerji korunum denklemidir. Enerji depolama tankından havaya olan ısı transferi bu şekilde hesaplanır. Kompresör için yapılan 1. yasa hesabı da aşağıdaki gibidir:

$$\dot{W}_C = \dot{m}_e h_e - \dot{m}_i h_i = \dot{m}(h_5 - h_4) \quad (2.24)$$

“Eş. 2.24” ise, kontrol hacminin kompresörü kapsadığında oluşan enerji korunum denklemidir. Bu denklemden, havanın kompresör çıkış ve girişindeki entalpi değerleri ve havanın kütle debisi kullanılarak kompresörde sarfedilecek güç değeri bulunabilir.

$$\dot{Q}_{cc} = \dot{m}_e h_e - \dot{m}_i h_i = \dot{m}(h_{6b} - h_{6a}) \quad (2.25)$$

“Eş. 2.25”te kontrol hacmi yanma odası olmuştur. Bu enerji korunumu denklemi yardımıyla, yanma odasından havaya aktarılan ısı transferi bulunabilir. Ayrıca bu denklemden, yakıt debisi de hesaplanabilir. Yakıt debisi,

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{\dot{Q}_{cc}}{LHV} \quad (2.26)$$

şeklinde bulunabilir. Enerji analizinin yapıldığı son eleman olan türbin için kurulan enerji korunum denklemi,

$$\dot{W}_T = \dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e = \dot{m}(h_7 - h_{6b}) \quad (2.27)$$

şeklindedir.

2.1.3. Ekserji Analizi

Enerji analizinin yanı sıra bu çalışmada ekserji analizi de yapılmıştır. Ekserji analizi, sistemin deşarj prosesinde yer alan her bir eleman için ayrı ayrı yapılmıştır. Açık sistemler için genel ekserji denklemi aşağıdaki gibidir:

$$\frac{dEx_{cv}}{dt} = \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{cv} + \dot{m}_i ex_i - \dot{m}_e ex_e - \dot{E}_d \quad (2.28)$$

Burada denklemin sol tarafında yer alan terim, kontrol hacmindeki ekserji değişimidir (kW). Denklemin sağ tarafında yer alan terim ise, ısı transferi şeklinde aktarılan ekserji değeridir. $\dot{W}_{cv}$ ise, güçle aktarılan ekserji değeridir. ex_i ve ex_e ise sırasıyla, kontrol hacmi giriş ve çıkışlarındaki spesifik ekserji değerleridir (kJ/kg). “Eş. 2.23”teki son değişken olan $\dot{E}_d$ ise, birim zamanda yok olan ekserjidir (kW). Açık sistemler için spesifik ekserji ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$ex = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (2.29)$$

“Eş. 2.28” ve “Eş. 2.29” kullanılarak, deşarj prosesinde yer alan elemanların ekserji analizleri yapılmıştır. Kompresör için yapılan ekserji analizi aşağıdaki gibidir:

$$\dot{E}_{d,c} = \dot{E}x_4 - \dot{E}x_5 - \dot{W}_c \quad (2.30)$$

ayrıca kompresörün ekserjik verimi de aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\eta_{ex,c} = \frac{\dot{E}x_5 - \dot{E}x_4}{\dot{W}_c} \quad (2.31)$$

Aynı şekilde enerji depolama tankının ekserji analizi de,

$$\dot{E}_{d,tank} = \dot{E}_Q + \dot{E}x_5 - \dot{E}x_6 - \dot{E}_{d,c} \quad (2.32)$$

şeklindedir. Enerji depolama tankının ekserjik verimi de aşağıda hesaplanmıştır:

$$\eta_{ex,tank} = \frac{\dot{E}x_6 - \dot{E}x_5}{(\dot{E}x_6 - \dot{E}x_5) + \dot{E}_{d,tank}} \quad (2.33)$$

Aynı şekilde, yanma odasının ekserjik analizi de aşağıda verilmiştir;

$$\dot{E}_{d,cc} = \dot{E}x_{6a} - \dot{E}x_{6b} + \dot{E}x_f \quad (2.34)$$

“Eş. 2.34”teki $\dot{E}x_f$ değeri, yakıtın ekserjisini temsil etmektedir (kW). Yakıt ekserjisi ise,

$$\dot{E}x_f = \dot{m}_f \frac{\overline{ex}_f^{ch}}{M_{a,f}} \quad (2.35)$$

şeklinde bulunabilmektedir. Yanma odası için ekserjik verim ise,

$$\eta_{ex,cc} = \frac{\dot{E}x_{6b}}{\dot{E}x_{6a} + \dot{E}x_f} \quad (2.36)$$

“Eş. 2.36”dan bulunabilir. Ekserji analizi kapsamında yine aynı denklemler türbin için de oluşturulduğunda,

$$\dot{E}_{d,t} = \dot{E}x_6 - \dot{E}x_7 - \dot{W}_t \quad (2.37)$$

$$\eta_{ex,t} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{E}x_i - \dot{E}x_e} \quad (2.38)$$

“Eş. 2.37” ve “Eş. 2.38” ortaya çıkmaktadır. Böylelikle “Eş. 2.28” ve “Eş. 2.38” arasında yer alan eşitlikler sayesinde, çalışmada incelenen sistemlerin ekserjik analizleri yapılmıştır.

Enerji ve ekserji analizleri dışında, sistemlerin performanslarının belirlenmesi açısından çevrim verimi, geri-iş oranı, şarj-deşarj verimi ve enerji yoğunluğunun da hesaplanması önem arz etmektedir. Bu yüzden, bu değerler de aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\eta = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_c}{\dot{Q}_{cc}} \quad (2.39)$$

$$bwr = \frac{\dot{W}_c}{\dot{W}_t} \quad (2.40)$$

$$\eta_{rt} = \frac{Q_{ch}}{Q_{dis}} \quad (2.41)$$

$$E_y = \frac{Q_{ch}}{V_b} \quad (2.42)$$

Burada η ,deşarj çevrimin verimi, “bwr”, geri iş oranı, η_{rt} , şarj-deşarj verimi ve E_y , enerji yoğunluğudur (kWh/m³). Ayrıca Q_{ch} , şarj edilen ısı transferi miktarı (kWh) iken, Q_{dis} ,deşarj edilen ısı transferi miktarıdır (kWh). Yukarıda bahsedilen model ve yukarıdaki eşitliklerin kullanılarak yapıldığı çalışmayı özetler nitelikte bir akış şeması oluşturulmuştur. Bu akış şeması aşağıda yer almaktadır.



Şekil 2.8. Tez çalışmasının akış şeması

2.1.4. Maliyet Analizi

Çalışma kapsamında, enerji ve ekserji analizlerinin beraberinde maliyet analizi de yapılmıştır. Maliyet analizi yapılırken, yatırım maliyetleri, işletme maliyetleri, bakım maliyetleri, maaşlar, hurda değer ve elektrik üretiminden elde edilen kazanç göz önünde bulundurulmuştur. Yine maliyet analizi yapılırken yakın geçmişe dayalı birtakım bilgiler kullanılmış ve bu bilgilerle hesap yapılırken o tarihlerden itibaren günümüze kadar olan

enflasyon farkı da hesabı katılmıştır. Bu çalışmada maliyet analizi kapsamında dört farklı proje değerlendirme metotları hesaplanmıştır. Bu metotlar, geri ödeme süresi metodu, net bugünkü değer metodu, fayda-masraf oranı metodu ve net fayda-masraf oranı metodudur. Bu çalışmada incelenen sistemlerin fizibiliteleri bu metotlar üzerinden yapılmıştır. Maliyet analizinin önemli bir elemanı olan toplam yatırım maliyeti, aşağıdaki eşitlikten bulunabilmektedir:

$$\dot{Z}_{top} = \dot{Z}_{komp} + \dot{Z}_{tank} + \dot{Z}_{türb} + \dot{Z}_{yo} + \dot{Z}_{mat} \quad (2.43)$$

Eş. 2.43'te yer alan $\dot{Z}_{komp}$, kompresörün yatırım maliyeti iken (\$), $\dot{Z}_{tank}$, $\dot{Z}_{türb}$, $\dot{Z}_{yo}$ ve $\dot{Z}_{mat}$ sırasıyla tankın, türbinin, yanma odasının ve depolama malzemesinin yatırım maliyetleridir (\$). Model 1 için toplam yatırım maliyeti hesaplanırken tankın yatırım maliyeti hesaba katılmamıştır çünkü Model 1'de enerji depolama tankı yer almamaktadır. Aynı şekilde Model 2'de de yanma odası yer almadığından, bu model için yanma odasının yatırım maliyeti dikkate alınmamıştır. Toplam yatırım maliyetlerini oluşturan eleman yatırım maliyetleri, sırasıyla aşağıdaki eşitliklerden hesaplanmıştır:

$$\dot{Z}_{tank} = 17400 + 79(W_{tank}^{0,85}) \quad (2.44)$$

$$\dot{Z}_{komp} = \frac{75\dot{m}_a}{0,9-\eta_{komp}} (PR \cdot \ln(PR)) \quad (2.45)$$

$$\dot{Z}_{türb} = \frac{1536\dot{m}_a}{0,92-\eta_{türb}} \ln(PR) \left(1 + \exp(0,036 \cdot T_{türb,g} - 54,4) \right) \quad (2.46)$$

$$\dot{Z}_{yo} = \frac{48,64\dot{m}_a}{0,995-\frac{P_{yo,s}}{P_{yo,g}}} \left(1 + \exp(0,018 \cdot T_{türb,g} - 26,4) \right) \quad (2.47)$$

$$\dot{Z}_{mat} = z_{mat}\rho_s V_s \quad (2.48)$$

Eş. 2.44 ile Eş. 2.48 arasındaki eşitliklerde Model 1, Model 2 ve Model 3'te yer alan sistem elemanlarının yatırım maliyetleri verilmiştir. Bu eşitliklerde yer alan değişkenlerden PR, basınç oranı, η_{komp} , kompresörün izantropik verimi, W_{tank} , enerji depolama tankının ağırlığı (ton), $T_{türb,g}$, havanın türbin girişindeki sıcaklığı (K), $\eta_{türb}$, türbinin izantropik

verimi, $P_{yo,g}$, havanın yanma odası girişindeki basıncı, $P_{yo,\zeta}$, havanın yanma odası çıkışında sahip olduğu basınç ve z_{mat} , malzemenin ton başına fiyatıdır (\$/ton). Bu çalışmada kullanılan malzemeler ve ton başına fiyatları Çizelge 2.6'da verilmiştir (Benato ve Stoppato, 2018). Eş. 2.45 ile Eş. 2.47 arasındaki eşitlikler 1995 yılında, Lazaretto ve Macor tarafından kullanılmış olan eşitliklerdir (Lazaretto ve Macor, 1995). Eş. 2.44'te yer alan tankın yatırım maliyeti denklemi ise, Benato ve Stoppato tarafından kullanılmıştır (Benato ve Stoppato, 2018). Bu eşitliklerin ortaya atıldığı tarihten bu yana enflasyonun artmasından dolayı, bu eşitliklerin doğrudan kullanılarak maliyet hesabının yapılması doğru olmaz. Bu durum için, Kimya Mühendisleri Tesis Maliyet Endeksi'nden faydalanılmıştır. Bu endeks, aşağıdaki eşitlikte yer almaktadır:

$$\dot{Z}_{2022} = (\dot{Z}_{komp} + \dot{Z}_{turb} + \dot{Z}_{yo}) \frac{CEPCI_{2022}}{CEPCI_{1995}} \quad (2.49)$$

Maliyet endeksinin yer aldığı bu denklemde, $CEPCI_{1995}$ değeri 381,1 iken, $CEPCI_{2022}$ değeri ise, 806,9'dur (Annual 2021 Chemical Engineering Plant Cost Index). Maliyet endeksi yalnızca kompresör, türbin ve yanma odasının yatırım maliyetleri için kullanılmıştır çünkü yalnızca bu makinelerin yatırım maliyeti denklemleri 1995 yılına aittir. Maliyet analizi için bir diğer önemli parametre olan ve yalnızca Model 3 için hesaba katılan işletme maliyeti ise, aşağıdaki eşitlikten hesaplanmaktadır:

$$\dot{Z}_{op} = c_f m_f LHV \quad (2.50)$$

Burada c_f , birim enerji başına yakıt maliyetidir (\$/MJ) ve değeri 0,004 olarak seçilmiştir (Valero ve diğerleri, 1994). m_f , bir yılda kullanılan toplam yakıt miktarıdır (kg) ve LHV ise, yakıtın alt ısı değeridir (MJ/kg). Maliyet analizinin kazanç faktörlerinden olan hurda değer ise, aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$\dot{Z}_{hur} = \dot{Z}_{top}(1 - dr)^n \quad (2.51)$$

Bu eşitlikte (Eş. 2.51) dr, aşınma oranı iken n ise, enerji depolama sistemi için öngörülen kullanım süresidir. Aşınma oranı %8 alınmıştır ve öngörülen kullanım süresi ise 25 yıl olarak

seçilmiştir. Hurda değer dışındaki diğer kazanç faktörü de, elektrik üretiminden sağlanacak kazançtır. Bu kazanç,

$$\dot{Z}_{rev} = C_{el}(YEP) \quad (2.52)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte C_{el} , elektrik enerjisi alım fiyatıdır (\$/kWh) ve değeri 0,053 \$/kWh'tir (<https://www.aa.com.tr>). YEP ise, üretilen yıllık elektrik enerjisidir (kWh). Maliyet analizinin gider kalemlerinden olan bakım maliyeti ve maaşlar sırasıyla, yatırım maliyetinin %2'si ve %3'ü olarak seçilmiştir. Proje değerlendirme metotlarından geri ödeme süresi metodu aşağıdaki eşitlikten hesaplanmaktadır:

$$GÖS = \frac{\text{Toplam Yatırım}}{\text{Yıllık Fayda}} \quad (2.53)$$

Bir diğer proje değerlendirme metodu olan net bugünkü değer yöntemi de aşağıdaki eşitlikten hesaplanmaktadır:

$$NBD = \sum_{m=m+1}^t \frac{F_n}{(1+i)^n} - \sum_{n=0}^m \frac{M_n}{(1+i)^n} \quad (2.54)$$

Bu eşitlikte m, yatırımın tamamlanma yılı, M_n , n. yıldaki yatırım, F_n , n. yıldaki fayda, i ise faiz oranıdır. Faiz oranı bu çalışmada %2,5 olarak seçilmiştir. Fayda-masraf oranı ve net fayda-masraf oranı değerleri de sırasıyla, aşağıdaki eşitliklerden hesaplanmıştır (Eş. 2.55 ve Eş. 2.56):

$$FMO = \sum_{m=m+1}^t \frac{F_n}{(1+i)^n} / \sum_{n=0}^m \frac{M_n}{(1+i)^n} \quad (2.55)$$

$$NFMO = NBD / \sum_{n=0}^m \frac{M_n}{(1+i)^n} \quad (2.56)$$

İncelenen sistemlerin fizibil olup olmadıkları, çalışmada hesaplanan dört farklı proje değerlendirme metoduna göre belirlenecektir. Sistemin fizibil olması için, geri ödeme

süresinin olabildiğince düşük olması, net bugünkü değerin ve net fayda-masraf oranının pozitif olması ve fayda-masraf oranının da %100'den fazla olması gerekmektedir.

Çizelge 2.6. Çalışmada kullanılan malzemeler ve tonaj fiyatları (Benato ve Stoppato, 2018)

Malzeme	Tonaj Fiyatı (\$/ton)
Tuğla	500
Beton	900
Kireç Taşı	340
Silikon	150

3. SONUÇLAR

3.1. Brayton Çevriminin (Model 1) Sonuçları

Çalışmada incelenen üç farklı sistem (Model 1, Model 2 ve Model 3), MATLAB ortamında 1 boyutlu olarak test edilmiştir. Bu üç sistemin performansları incelenmiş, aynı zamanda da bu sistemler, belirli kıstaslar göz önünde bulundurularak birbirleriyle kıyaslanmışlardır. Model 1 bir gaz türbinidir ve kompresör, yanma odası ve türbinden oluşmaktadır. Model 2 ve Model 3, bu çalışmada incelenen iki farklı Carnot Batarya konfigürasyonunu oluşturmaktadır. Model 2 ve Model 3 arasındaki tek fark, Model 3'te yanma odasının bulunmasıdır. Model 2 ve Model 3'te enerji depolama tankı bulunmaktadır ve bu enerji depolama tankının enerjisi zamanla azaldığından, bu sistemlerdeki parametreler de zamanla değişebilmektedir. Ancak Model 1'de böyle bir durum söz konusu değildir. Model 2 ve Model 3'te bazı parametreler zamanla değiştiği için bu parametrelerin saatlik olarak değişimlerinin grafikleri oluşturulmuş ve bu grafikler gözlemlenmiştir. Model 1'de elde edilen sabit değerler için çizelge oluşturulmuştur. Model 1'in çalışması sonucunda elde edilen bazı sonuçlar, Çizelge 3.1'de verilmiştir. Çizelge 3.1'de verilen parametrelerin dört farklı değerleri vardır ve bu değerler sırasıyla 6,9, 7,4, 8,5 ve 10,4 değerindeki basınç oranına karşılık gelmektedir. Bunun dışında bu çalışmada, Model 1 ile ilgili bazı grafikler de elde edilmiştir. Bu grafikler, net enerji, çevrim verimi ve geri-iş oranının ortalama değerlerinin ve proje değerlendirme metotlarının tüm modeller için kıyaslandığı grafiklerdir.

Çizelge 3.1 Brayton çevrimine (Model 1) ait sonuçlar

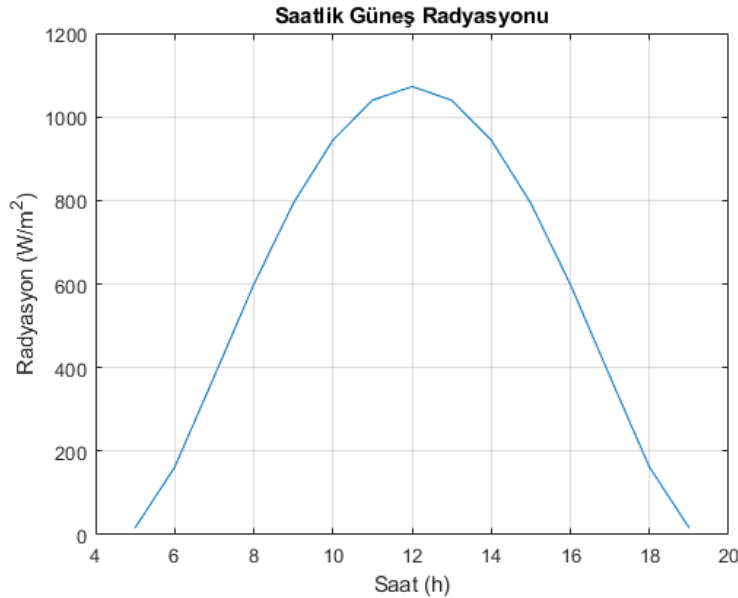
Parametreler	Değerler
Kompresör Gücü [kW]	831,79; 844,08; 1228,6; 1733,4
Yanma Odasından Havaya Aktarılan Birim Zamandaki Isı Transferi [kW]	2296,7; 2743; 3543,3; 4443,7
Türbin Gücü [kW]	1914,5; 1709,2; 2485,2; 3358,3
Kompresördeki Ekserji Değişimi [kW]	128,65; 164,35; 316,59; 582,68
Yanma Odasındaki Ekserji Değişimi [kW]	1416,5; 1751,7; 2280,7; 2912,9
Türbindeki Ekserji Değişimi [kW]	2042,7; 1816,6; 2645,7; 3579,4
Birim Zamanda Kompresörde Yok Edilen Ekserji [kW]	677,6; 679,72; 912,03; 1150,7
Birim Zamanda Yanma Odasında Yok Edilen Ekserji [kW]	943,12; 1066,5; 1359,7; 1652,6
Birim Zamanda Türbinde Yok Edilen Ekserji [kW]	128,23; 107,38; 160,45; 221,02
Kompresörün Ekserjik Verimi [%]	15,96; 19,47; 25,77; 33,62
Yanma Odasının Ekserjik Verimi [%]	62,1; 64,24; 65,64; 67,9
Türbinin Ekserjik Verimi [%]	93,72; 94,09; 93,94; 93,83
Yakıt Ekserjisi [kW]	2359,6; 2818,2; 3640,4; 4565,4
Yakıtın Kütlesel Debisi [kg/s]	0,0459; 0,0548; 0,0708; 0,0889
Çevrim Verimi [%]	48,25; 31,54; 35,46; 36,57
Geri-İş Oranı [%]	42,11; 49,38; 49,44; 51,61
Net Çevrim Enerjisi [kWh]	1108,2; 865,11; 1256,6; 1625,0
Toplam Yatırım Maliyeti [\$]	417.320; 442.330; 660.890; 976.600
Toplam İşletme Maliyeti [\$]	120.710; 144.170; 148.990; 140.140
Elektrik Üretiminden Elde Edilen Toplam Kazanç [\$]	213.960; 167.020; 194.090; 188.240
Geri Ödeme Süresi [yıl]	3,36; 7,93; 7,01; 8,09
Net Bugünkü Değer [\$]	944.310; -399.090; -394.400; -924.460
Fayda-Masraf Oranı [%]	131,21; 88,62; 90,18; 79,26
Net Fayda-Masraf Oranı [%]	31,21; -11,38; -9,82; -20,74

Çizelge 3.1’de verilen Model 1’e ait bazı sonuçlar hesaplanırken Model 1 ve Model 3’ün rahat bir şekilde kıyaslanması için Model 1, Model 3 ile aynı süre çalışmış gibi düşünülmüştür. Çizelgeden görüldüğü üzere Model 1 için fizibil olan tek durum, basınç oranının 6,9 olduğu durumdur çünkü yalnızca bu basınç oranı değeri için net bugünkü değer ve net fayda-masraf oranı değerleri pozitif olmuştur ve fayda-masraf oranı %100’ü geçmiştir. Ayrıca basınç oranının 6,9 olduğu durumda geri ödeme süresi de kısa çıkmıştır.

3.2. Model 2 ve Model 3'ün Ortak Sonuçları

3.2.1. Şarj Prosesi Sonuçları

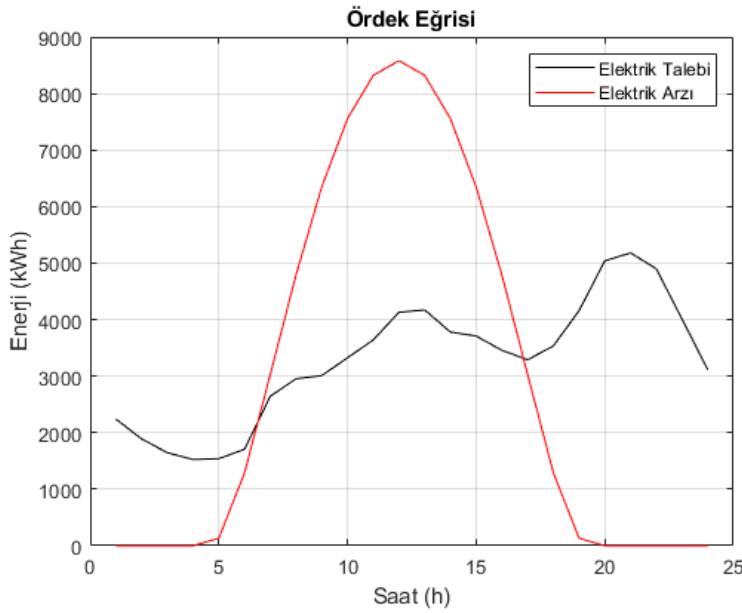
Mumma-Marvin modelinde yer alan denklemler ve eğri uydurma yöntemiyle elde edilen havanın termofiziksel özellik denklemleri kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Hesaplar, şarj prosesinin ana elemanlarından olan fotovoltaik panellerle birlikte başlamıştır. Fotovoltaik panelden elde edilecek olan enerjiyi hesaplamak için saatlik güneş ışıını oluşturulmuştur. Saatlik güneş ışıını bölgenin koordinatları ve yılın günü baz alınarak oluşturulmuştur. Bu ışıını değeri hesaplamak için seçilen bölge koordinatları Ankara ilinin koordinatlarıdır. En yüksek güneş ışıını değeri için 21 Temmuz günü seçilmiştir. Seçilen bölge ve güne göre oluşturulan güneş ışıını, saat 12 civarlarında maksimum değeri görmektedir. Bu değeri yaklaşık 1070 W/m^2 'dir. Bununla birlikte, seçilen bölge ve gün için oluşturulan saatlik güneş ışıını değerlerine göre güneş ışıınından yaklaşık 15 saat boyunca yararlanılabilmektedir, buna karşın, ışıını değeri, güneşin doğmasına ve batmasına yakın saatler olan 04:00 ve 19:00 civarı oldukça düşüktür. Elde edilen saatlik güneş ışıını grafiği Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1. Güneş ışıını saatlik değışim grafiği

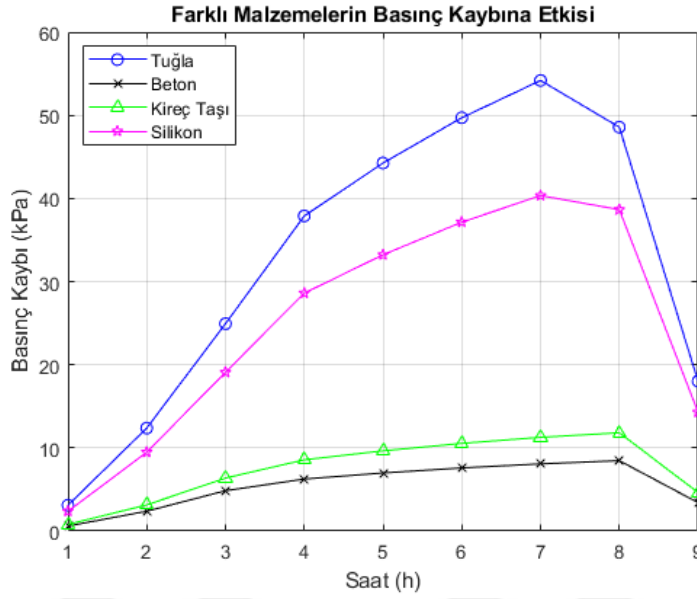
Bu çalışmada şarj prosesinde arz fazlası olan enerjinin depolanması hedeflendiği için, bir evin elektrik tüketim profili elde edilmiştir. Elektrik tüketim profili elde edilen evden 7000

adet olduğu düşünülmüştür ve buna göre bir ördek eğrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu ördek eğrisine, Şekil 3.2’de yer verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, gün başlangıcından belli zaman dilimi geçtikten sonra elektrik arzı elektrik talebini geçmiştir. Arzın talebi geçtiği durumda enerji depolama ünitesi şarj edilmeye başlanmıştır. Bu şarj periyodu, elektrik talebinin elektrik arzını geçtiği zamana kadar olmuştur.



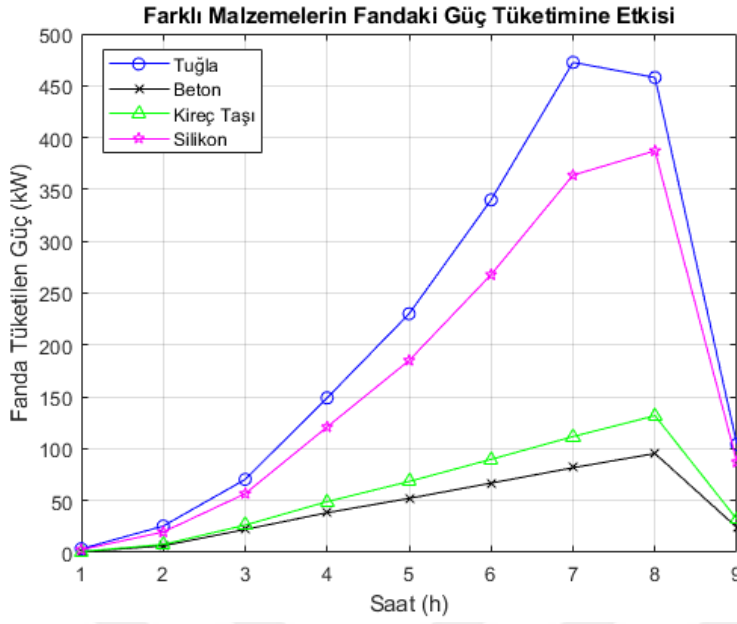
Şekil 3.2. Çalışmada oluşturulan ördek eğrisi

Şarj prosesinin devamlılığını sağlayan elemanların başında gelen fan, havanın tank içindeki basınç kaybını karşılayarak bu devamlılığı sağlar. Bu yüzden, fan gücünün hesaplanması için tanktaki basınç kaybının da elde edilmesi gerekmektedir. Havanın tank içerisinde maruz kaldığı basınç kaybı, Mumma-Marvin modelinde yer alan Reynolds ve sürüklenme katsayısı denklemlerinin kullanılmasıyla hesaplanmıştır. Buna göre hesaplanan basınç kaybının farklı depolama malzemelerine göre grafiği oluşturulmuştur. Bu grafik, Şekil 3.3'ten rahatça görülebilmektedir.



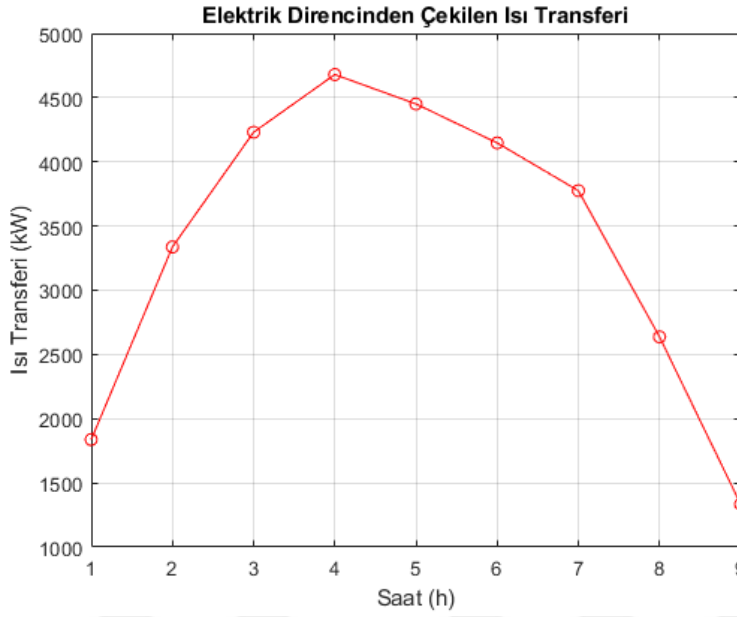
Şekil 3.3. Şarj periyodu için tanktaki basınç kaybının zamana göre değişimi

Şekil 3.3'ten görüldüğü üzere basınç kaybı şarj periyodu devam ettikçe artarken, şarj periyodunun sonlarına doğru bu artış eğilimi aksine dönmeye başlamıştır. Basınç kaybı, tanka verilen enerjinin başlarda artış göstermesinden dolayı artmıştır. Tanka verilen enerjinin artmasıyla hava kütle debisi artmıştır ve böylelikle havanın tank içinde aktığı hızı da artmıştır. Basınç kaybının artışı, hızın karesiyle doğru orantılı olduğu için belirli bir şarj zamanına kadar devam etmiştir. Daha sonra da tanka aktarılan enerji yavaş yavaş azalmıştır ve dolayısıyla hava kütle debisi değeri de zamanla azalmıştır. İncelenen dört farklı depolama malzemeleri arasında tuğla ve silikondaki basınç kaybı, kireç taşı ve betonunkine göre oldukça fazla olmuştur. Hesaplanan basınç kaybı değerlerine göre fanda tüketilen güç değerleri de hesaplanmıştır. Fanda tüketilen gücün zamana göre değişimi de Şekil 3.4'te yer almaktadır.



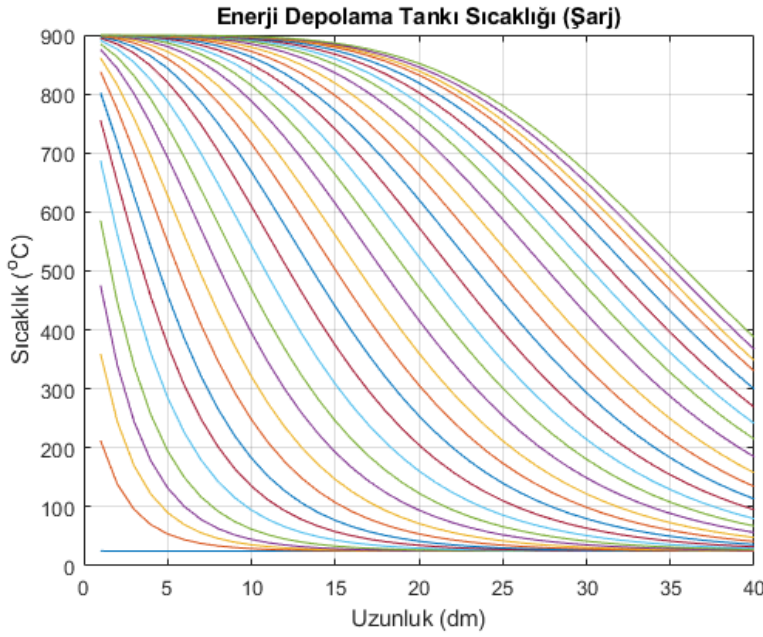
Şekil 3.4. Fanda tüketilen gücün zamana göre değişimi

Şekilden görüldüğü üzere fanda tüketilen güç grafiği, basınç kaybı grafiğine oldukça benzemektedir. Basınç kaybıyla benzer şekilde tanka aktarılan enerjinin belirli bir şarj süresine kadar artmasından dolayı fanda tüketilen güç de belirli bir süreye kadar artış göstermiştir. Bu artışın sebebi, sıcaklığı arttıkça havanın yoğunluğunun düşmesi, basınç kaybının artışı ve hava kütle debisinin artışıdır. Yine basınç kaybı grafiğine benzer şekilde fanda tüketilen güç değerlerinin maksimum olduğu malzemeler, tuğla ve silikondur. Fandan çekilen hava, her iki sistemde de (Model 2 ve Model 3) gücünü fotovoltaik panellerden alan elektrik direncinden geçmektedir. Elektrik direncinin üzerinden akan hava, tanka girmeden önce burada ısınır. Hava tarafından elektrik direncinden çekilen ısıнын zamana göre değişimi ise Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Elektrik direncinden hava tarafından çekilen birim zamandaki ısı transferinin zamana göre değişimi

Grafiğe göre ısı transfer miktarı, 4. saate kadar artmış ve bu saatten sonra düşmüştür. Bunun sebebi, 4. saatte arz-talep farkı maksimuma ulaşmıştır ve 4. saatten sonra arz-talep arasındaki fark giderek azalmıştır. Elde edilen ördek eğrisi grafiğine göre, Şarj prosesi 9 saat sürmüştür. Şarj prosesinin gerçekleştiği zaman dilimi ise, 08:00 - 17:00 saat aralığında olmuştur. Hava, bu zaman aralığında değişken radyasyon değeri yüzünden değişken elektrik gücü üreten fotovoltaiik paneller sayesinde ısınan elektrik direnci ile ısıtılmış ve ısınan hava tanka girmiştir. Havanın, tanktaki taşların üzerinden akarak geçmesi ve sahip olduğu ısıyı bu taşlara aktarmasıyla birlikte taşlar ısınmıştır. Tankın şarj periyodu için, zamana göre ve kontrol hacmine göre değişen sıcaklığı Şekil 3.6’da görülmektedir. Bu grafikte, yatay eksen kontrol hacim elemanlarıyken, dikey eksen de sıcaklıktır. Çizgilerin her biri ise, çalışmada kullanılan her bir zaman adımını temsil etmektedir. Şarj periyodunun sonunda, tankın giriş bölgesi sıcaklığı 900°C iken, çıkış bölgesinin sıcaklığı yaklaşık 400°C olmuştur.

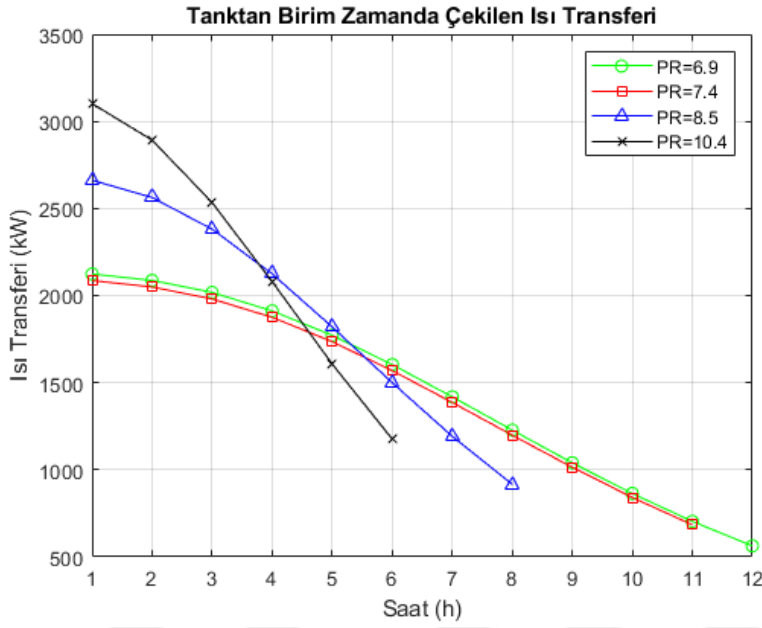


Şekil 3.6. Şarj prosesi için enerji depolama tankındaki sıcaklık dağılımı

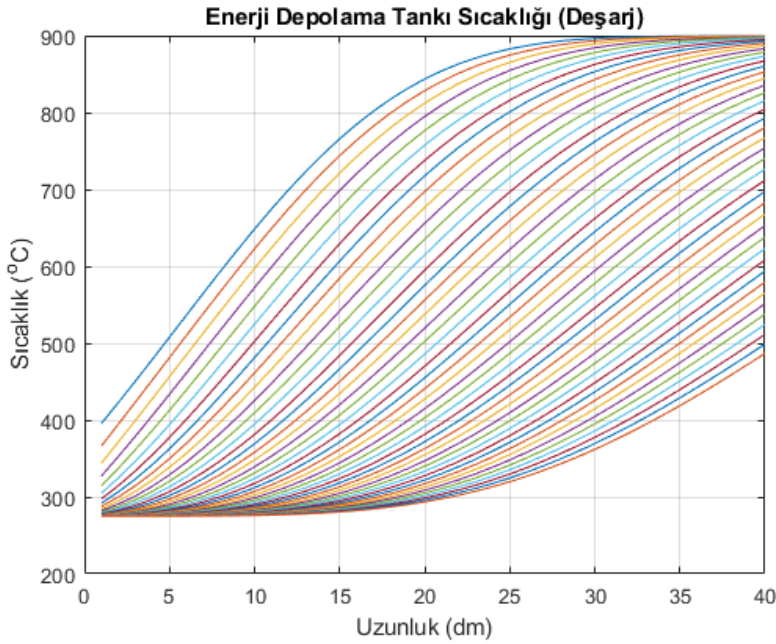
3.2.2. Deşarj Prosesi Sonuçları

Şarj prosesi, Model 2 ve Model 3 için birebir aynı olarak tamamlanmıştır. Ayrıca şarj prosesi için verilen sonuçlar, basınç oranının değişmesinden etkilenmemiştir. Bu kısma kadar elde edilen sonuçlar şarj prosesine özgüdür ve her iki sistem için de (Model 2 ve Model 3) geçerlidir. Şarj prosesi tamamlandıktan sonra, Model 2 ve Model 3 için deşarj prosesi başlamaktadır. Deşarj prosesi, kompresörün atmosferik havayı basınçlandırmasıyla başlamaktadır. Kompresörden basınçlanarak çıkan hava, sıkışmaya uğradığı için sıcaklığı bir miktar artmıştır ve bazı özellikleri değişmiştir.

Kompresör tarafından basınçlandırılan hava, kompresörden çıktıktan sonra enerji depolama tankına girmektedir. Enerji depolama tankına giren hava, kendisinden daha sıcak olan taşlardan ısı çekerek bu ortamdan çıkar. Deşarj prosesi sırasında havanın sıcak tanktan çektiği ısı transferi miktarının zamana göre değişimi farklı basınç oranları için Şekil 3.7’de verilmiştir. Ayrıca, tankın deşarj periyodu süresince sıcaklığının değişim grafiği de, Şekil 3.8’de verilmiştir.



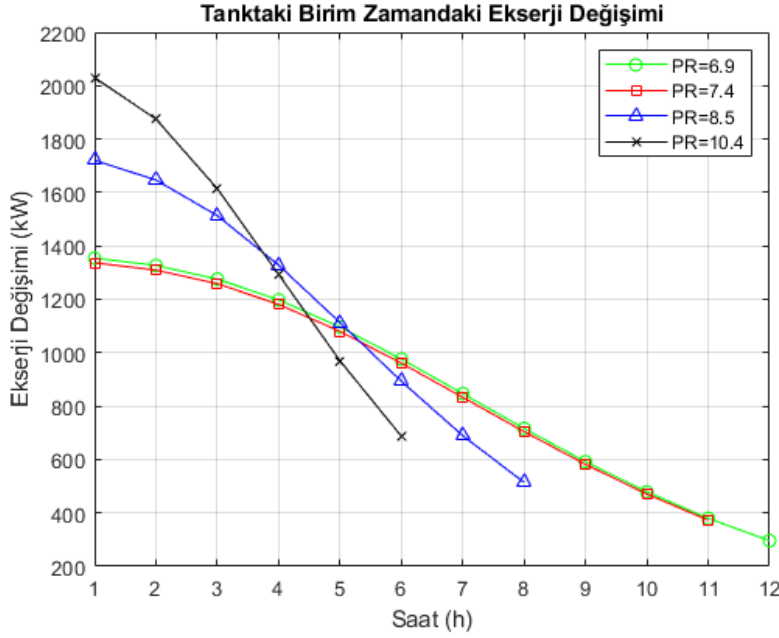
Şekil 3.7. Havanın deşarj periyodu sırasında tanktan çektiği birim zamandaki ısı transferinin zamana göre değişimi



Şekil 3.8. Deşarj prosesi için enerji depolama tankındaki sıcaklık dağılımı

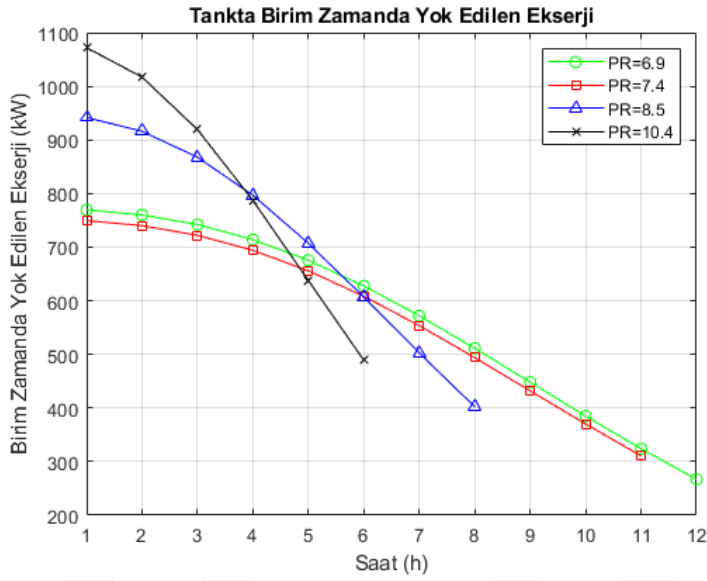
Şekilden görüldüğü üzere havadan taşlara geçen ısı transferinin maksimum değeri ilk saatlerde olmuş ve bu saatlerden sonra giderek düşmüştür. Hava her bir saat sonunda tanktan ısı çektiği için böyle bir grafik elde edilmiştir. Havanın tanktan çektiği ısı, beklendiği üzere deşarj prosesinin son saatlerinde minimum değerini görmüştür. Çalışma kapsamında yapılan ekserji analizi sonucunda, kompresörün ekserjisinin hesaplandığı gibi, diğer deşarj

elemanlarının da ekserji değerleri hesaplanmıştır. Tank için yapılan ekserji analizinin sonucu Şekil 3.9’da görüldüğü gibidir.



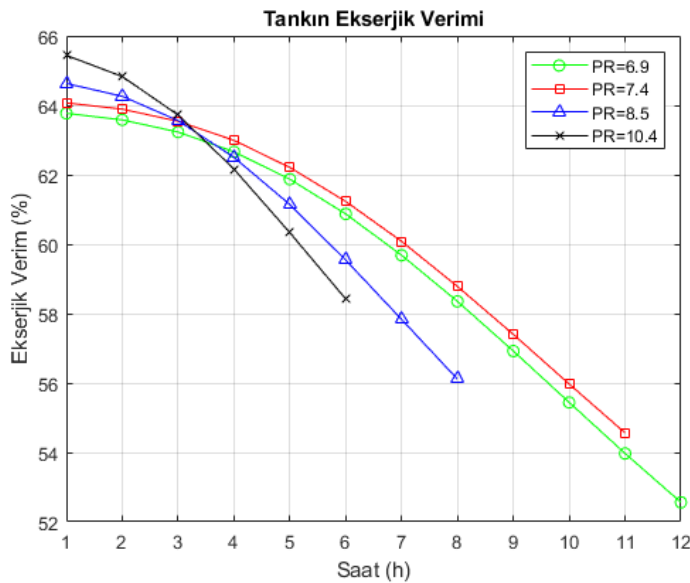
Şekil 3.9. Tantaki ekserjinin zamana göre değişimi

Grafikten görüldüğü üzere ve beklenen şekilde, ekserji değeri ilk saatler maksimum değerindeyken deşarj prosesi devam ettikçe azalmıştır. İlk saatler 10,4'lük basınç oranı için tantaki ekserji değişimi maksimum olmuştur. Çalışma kapsamında yapılan ekserji analizi sonucunda incelenen bir diğer değişken ise birim zamanda yok edilen ekserjidir. Tank için birim zamanda yok edilen ekserjidir değişimi Şekil 3.10'da yer almaktadır.



Şekil 3.10. Tanktaki birim zamanda yok edilen ekserjinin zamana göre değişimi

Grafik incelendiğinde, tanktaki ekserji yıkımındaki değişim ile tanktaki ekserji değişimi birbirlerine oldukça benzemektedir. Tankta yok edilen ekserji 1. saatte maksimum değerindedir ve bu saatten itibaren de düşme eğiliminde olmuştur. Yapılan ekserji analizi sonucunda tank için incelenen ekserji ve birim zamanda yok edilen ekserji değerlerinden yola çıkılarak tankın ekserjik verimi veya bir diğer adıyla tankın ikinci yasa verimi hesaplanmıştır. Hesaplanan tankın ekserjik verimi Şekil 3.11’de görüldüğü gibidir.

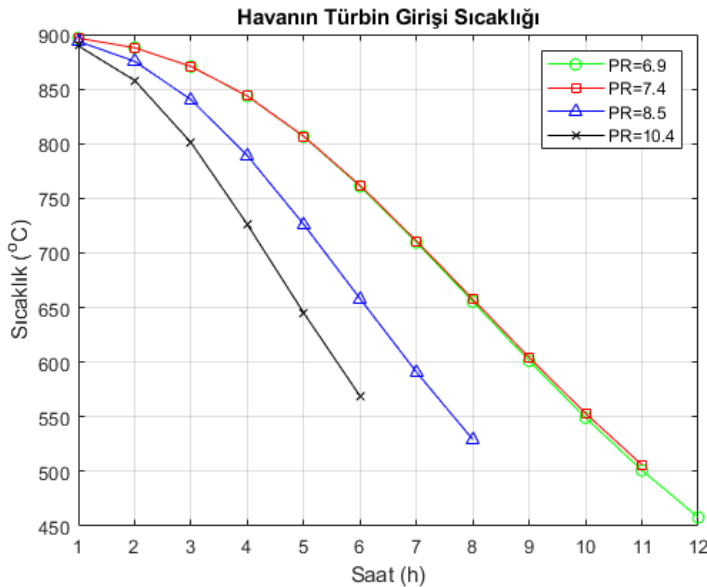


Şekil 3.11. Tankın ekserjik veriminin zamana göre değişimi

Ekserjik verim grafiği doğal olarak, ekserji grafiği ve birim zamanda yok edilen ekserji grafiğine oldukça benzerdir. 6,9 ve 7,4 basınç oranı için ekserjik verim birbirine yakın seyretmişlerdir. Diğer basınç oranı değerlerinde deşarj prosesi daha kısa sürdüğü için grafikte daha ayırt edicilerdir. Bu kısma kadar verilmiş olan sonuçlar, Model 2 ve Model 3 için aynı olmuştur. Bu iki sistem için aynı olan sonuçlar, şarj proseslerinin tamamını ve deşarj prosesinin yalnızca kompresör ve enerji depolama tankını içeren kısımları içindir. Bu kısımdan sonra verilen sonuçlar, her iki sistemin kendilerine özgü olan sonuçlarıdır. İki sistem arasında, sistemlerde yer alan elemanlar itibarıyla tek fark yanma odasıdır. Yanma odası hibrit sistemde yer alırken, Termal Enerji Depolama sisteminde yer almamaktadır. Dolayısıyla, yanma odası bulunduğu için türbine giriş sıcaklığı her iki sistemde farklıdır. Bundan ötürü, iki sistem için elde edilen sonuçların bir kısmı birbirlerinden farklı olmuştur.

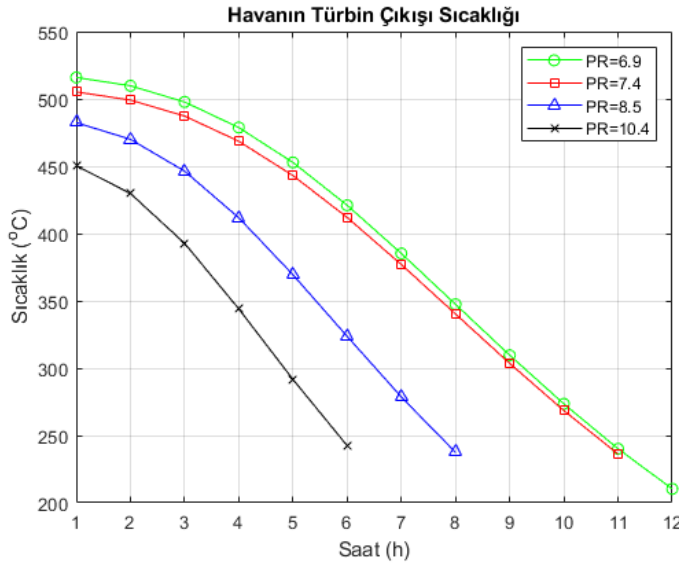
3.3. Model 2'ye özgü Olan Sonuçlar

Model 2'de bir yanma odası olmadığı için, hava tankı terk ettiğinde türbine giriş yapmaktadır. Havanın tanktan çıkarken sahip olduğu sıcaklığı her bir saat sonunda değiştiği için, türbine giren havanın sıcaklığı hiçbir saat diliminde aynı kalmamıştır. Bahsedildiği üzere her bir saat sonunda değişen türbine giriş sıcaklığı, farklı basınç oranları için şekil 3.12'de verilmiştir.



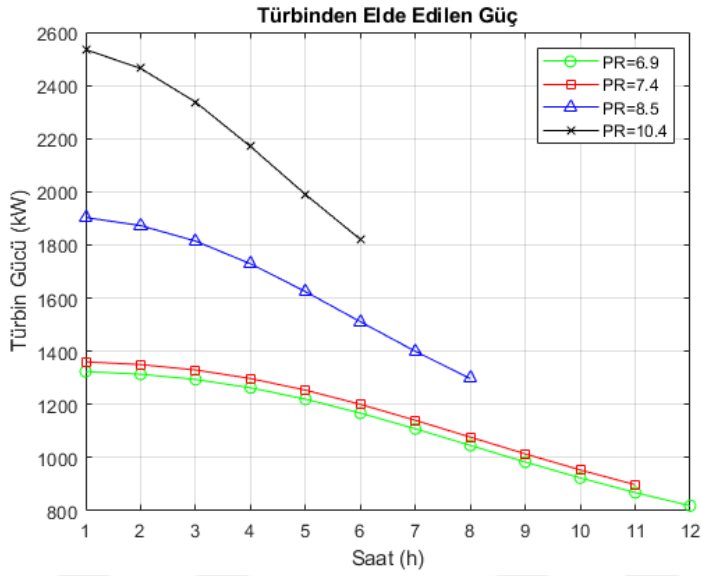
şekil 3.12. Türbine giriş sıcaklığının zamana göre değişimi

Türbin giriş sıcaklığı beklenildiği gibi, ilk saat sonunda en yüksek değerindeyken saat ilerledikçe düşmüştür ve son saat en düşük değerine ulaşmıştır. Bu düşüşün sebebi, tanktaki enerjinin her bir saat sonunda belirli miktarda çekilmesinden dolayı azalmasındandır. Tanktan çekilen enerji azaldığı için de havanın türbine giriş sıcaklığı zamanla azalmaktadır. Türbin giriş sıcaklığının hesaplanmasından sonra türbin çıkış sıcaklığının hesaplanması için, türbin giriş sıcaklığı verileri kullanılarak havanın entropisi hesaplanmıştır. Havanın entropisi, izantropik koşullara göre hesaplanmıştır. Ardından bu izantropik koşullara göre hesaplanan entropiye ve türbinin izantropik verimine göre türbin çıkış sıcaklığı hesaplanmıştır. Türbin çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 3.13'te yer almaktadır.



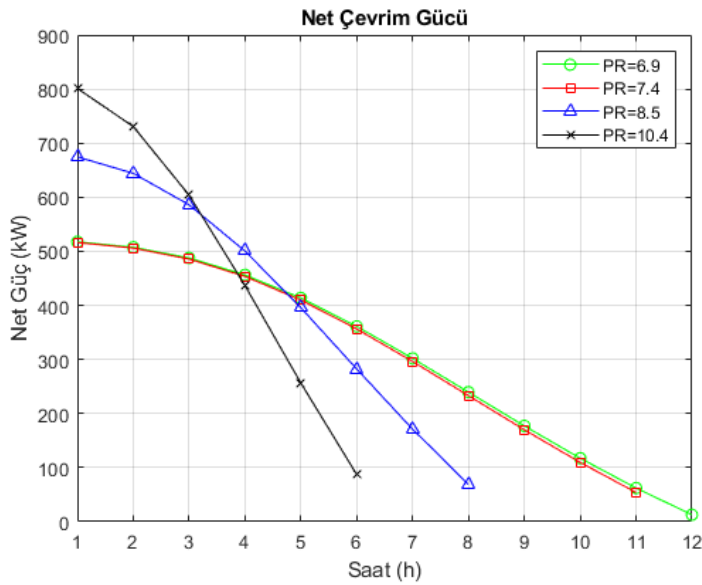
Şekil 3.13. Türbin çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi

Şekil 3.13'te ilgi çeken detay, türbin çıkış sıcaklığı grafiğinin türbin giriş sıcaklığı grafiğinden farklı olmasıdır. Elde edilen türbin giriş ve çıkış sıcaklıklarına göre ve havanın molar entalpi ve entropi analizlerine göre türbinden elde edilebilecek güç hesaplanmıştır. Bu güç değerinin zamana göre değişimi Şekil 3.14'teki gibidir.



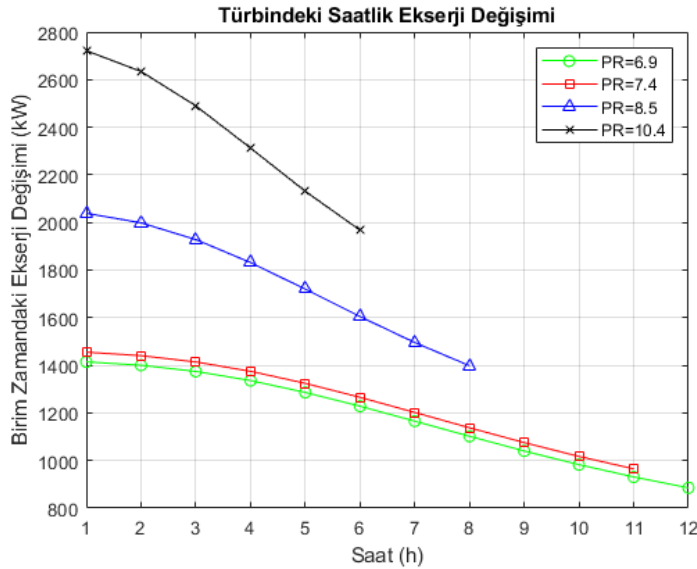
Şekil 3.14. Türbinden elde edilebilecek gücün zamana göre değişimi

Türbin gücü grafiği, türbin giriş sıcaklığı ve türbin çıkış sıcaklığı grafiklerinden farklı çıkmıştır. Şekil 3.14'e göre maksimum güç, 10,4'lük basınç oranında sağlanmıştır ancak bu durum 6 saat sürmektedir. Türbin gücünün yanı sıra, çalışma kapsamında bir diğer önemli parametre olan net çevrim gücü de hesaplanmıştır. Net çevrim gücü, türbin gücü ile kompresör gücü arasındaki fark olmaktadır. Yani doğrudan elektriğe dönüştürülebilecek enerji potansiyelidir. Bu yüzden, net gücü görmek de faydalı olacaktır. Kompresör gücü ve türbin gücü değerleri kullanılarak hesaplanan net gücün grafiği elde edilmiştir (Şekil 3.15).



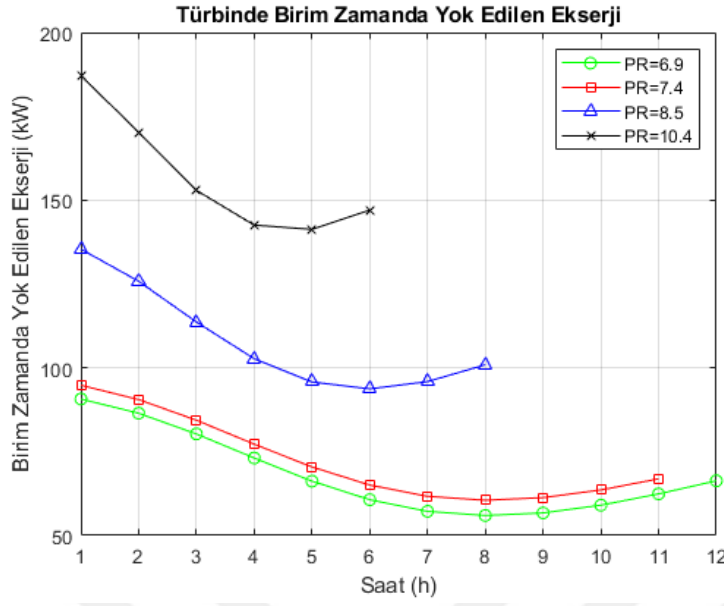
Şekil 3.15. Net çevrim gücünün zamana göre değişimi

Net çevrim gücü grafiği, türbin gücü grafiğine göre farklı olmuştur. Burada çevrim gücü, beklenildiği üzere ilk saatin sonunda maksimum değerinde iken son saatlere gidildikçe düşmektedir. Türbinden elde edilebilecek güç değerinin hesaplandığı gibi havanın, türbin giriş ve çıkış sıcaklıklarına karşılık gelen molar entalpi ve entropi analizlerinden elde edilen bilgilerle birlikte türbindeki ekserjinin zamana göre değişimi de hesaplanmıştır. Türbin giriş ve çıkış sıcaklıklarıyla birlikte havanın çevre şartlarındaki molar entalpi ve entropi analizlerinden ortaya çıkan sonuçlar da türbindeki ekserjinin değişim hesabında kullanılmıştır. Tüm bu bilgiler ışığında hesaplanan türbindeki ekserji değişimi Şekil 3.16'da görülmektedir.



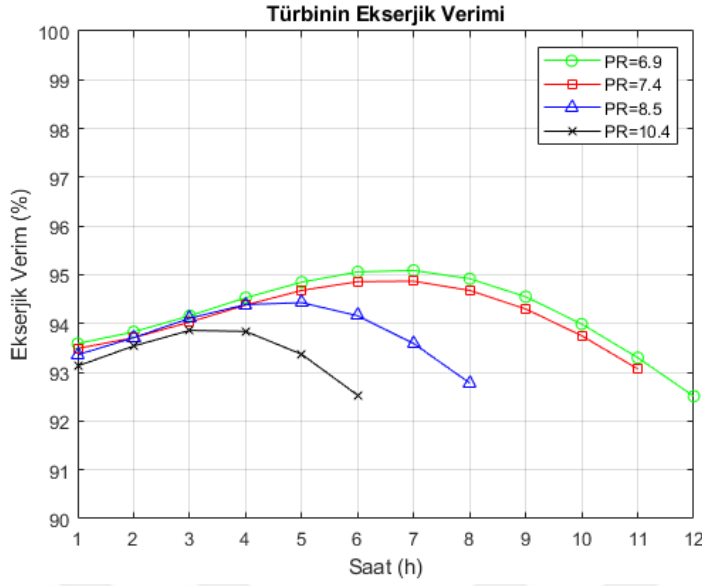
Şekil 3.16. Türbindeki ekserjinin zamana göre değişimi

Türbinde birim zamandaki ekserji değişimi grafiği, türbin gücü grafiğiyle oldukça benzerdir. Türbindeki ekserji hesabında kullanılan bilgiler ve türbin gücünün elde edilen hesaplarıyla birlikte, türbinde yok edilen ekserji değeri de hesaplanmıştır. Türbinde yıkıma uğrayan ekserjinin değişimi Şekil 3.17'de görülmektedir.



Şekil 3.17. Türbinde birim zamanda yok edilen ekserjinin zamana göre değişimi

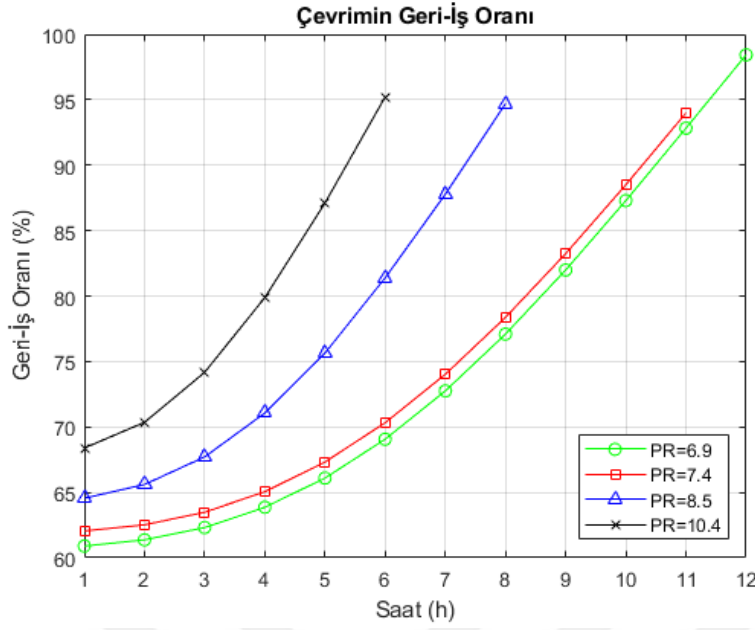
Bu grafikte önceki ekserji grafiklerinin aksine hem azalış hem de artış trendleri vardır ve bu trendler her bir basınç oranı için olmuştur. Türbinde yok edilen ekserji değeri her bir basınç oranı için belirli bir zaman dilimine kadar düşerken bu zaman diliminden sonra artışa geçmiştir. Bu artışın sebebi, türbinde birim zamandaki ekserji düşüşünün türbin gücündeki düşüşten daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Türbin gücü, türbindeki ekserji ve türbindeki birim zamanda yok edilen ekserji hesapları sonucu elde edilen bilgiler kullanılarak türbinin ekserjik verimi de hesaplanmıştır. Yapılan bu hesap sonucunda türbinin ekserjik veriminin zamana göre değişim grafiği elde edilmiştir. Bu grafik, Şekil 3.18’de görülebilmektedir.



Şekil 3.18. Türbinin ekserjik veriminin zamana göre değişimi

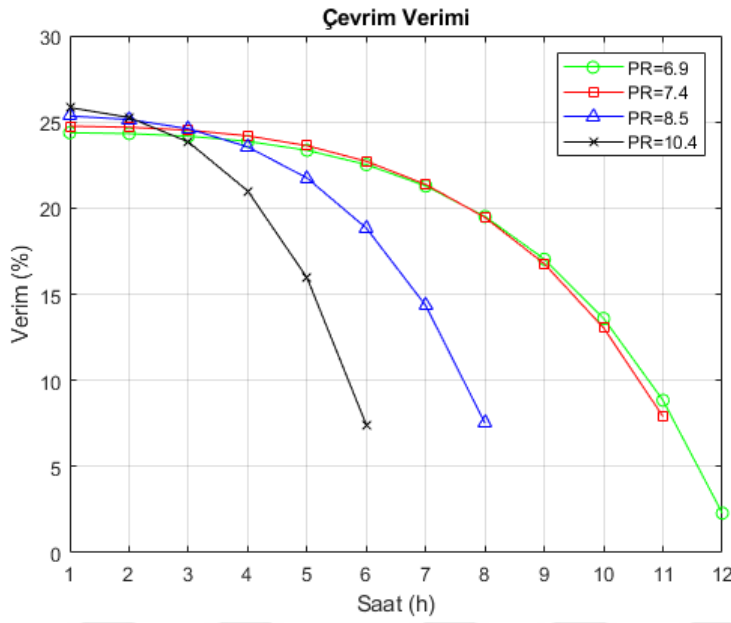
Türbinin ekserjik verim grafiği de, türbinde birim zamanda yok edilen ekserji grafiği gibi artış ve azalış eğilimleri göstermiştir. Türbindeki ekserjik verim her bir basınç oranı için belirli bir zamana kadar artış gösterirken, sonra düşüş göstermiştir. Bu durumun sebebi, birim zamanda yok edilen ekserjideki değişimden kaynaklıdır. Ancak ekserjik verimdeki artış ve azalışlar çok şiddetli olmamıştır. Buraya kadar incelenmiş ve sonuçları verilerek değerlendirilmiş olan parametreler, tek tek sistemde yer alan elemanlar bazında olmuştur. Bu sonuçlar, elemanlar özelinde ortaya çıktığından ötürü tek tek elemanların performanslarını ve özelliklerini görmek açısından önemli olmuştur. Sonucu verilen bu değişkenlerin hesaplanmasının ardından, sistemin bir bütün halinde incelenerek birtakım hesapların yapılması da elzem olmuştur. Sistemin genel performansını görmek adına birtakım değişkenlerin hesaplanması da yapılmıştır. Bu değişkenler şarj-deşarj verimi,deşarj çevrimi verimi ve geri-iş oranıdır.

Sistemin genel performansı hakkında bilgi sahibi olunmasını sağlayacak önemli parametrelerden biri olan geri-iş oranı değeri hesaplanmış ve bu hesaplama sonucunda, geri-iş oranının zamana göre değişim grafiği elde edilmiştir. Model 2 sisteminin geri-iş oranı grafiği Şekil 3.19’da yer almaktadır.



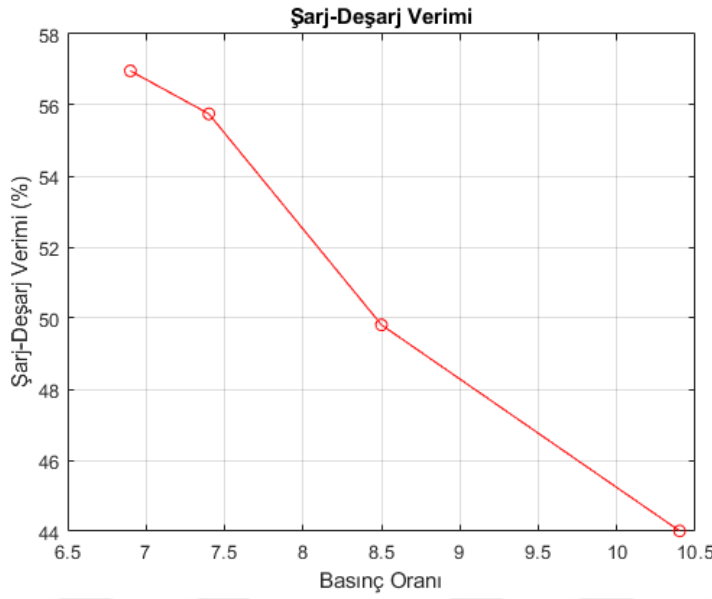
Şekil 3.19. Geri-iş oranının zamana göre değişimi

Geri-iş oranının kompresör gücünün türbin gücüne oranından yola çıkılarak hesaplandığı düşünüldüğünde, grafikte ortaya çıkan sonuç beklenen bir sonuçtur. Deşarj prosesinin sonunda ise geri-iş oranı, her bir basınç oranı için %100'e yaklaşmıştır. Zaten geri-iş oranının %100 olması durumunda, sistemden elde edilebilecek net güç "0" olmaktadır çünkü türbin gücü kompresör gücüne eşit olmuş olur. Sistem performansı hakkında bilgi verecek önemli bir diğer parametre ise, deşarj çevriminin verimidir. Burada verimi hesaplanırken, tankta bulunan taşlardan havaya geçen ısı transferi başına sistemden elde edilebilecek net güç esas alınmıştır. Yani burada enerji depolama tankı, gaz türbini çevrimindeki yanma odası gibi düşünülerek verim hesaplanmıştır. Elde edilen çevrim veriminin zamana göre değişiminin grafiği Şekil 3.20'de yer almaktadır.



Şekil 3.20. Çevrim veriminin zamana göre değişimi

Grafikten görüldüğü üzere çevrimin enerji verimi, her bir basınç oranında deşarj prosesinin başlarında %25'lik bir değere sahipken deşarj prosesinin sonlarına doğru giderek düşmüştür. Model 2 sisteminin ortalama verimi 6,9, 7,4, 8,5 ve 10,4 basınç oranlarına karşılık olarak sırasıyla, %18,76, %20,27, %20,13 ve %19,88 olarak elde edilmiştir. Enerji Depolama sisteminin en önemli parametrelerinden olan şarj-deşarj veriminin basınç oranlarına göre değişim grafiği de, Şekil 3.21'de verilmiştir.



Şekil 3.21. Şarj-deşarj veriminin basınç oranlarına göre değişimi

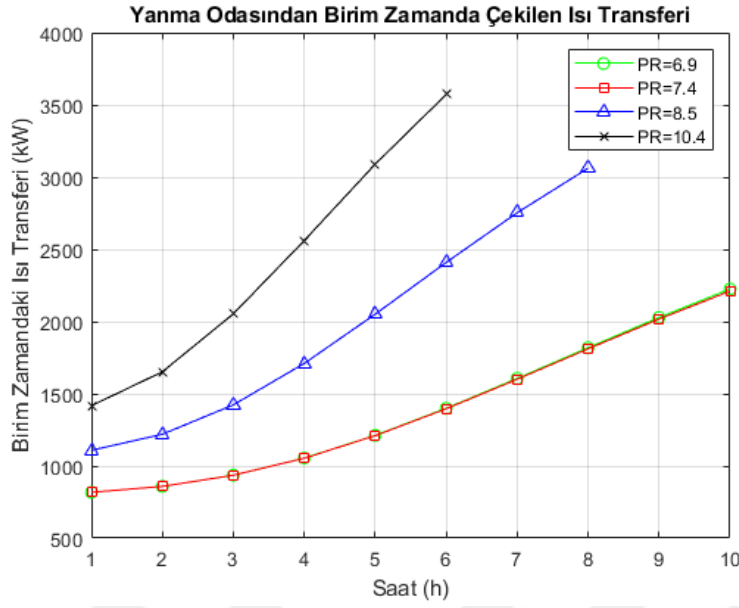
Şekil 3.21 incelendiğinde, basınç oranının artışıyla şarj-deşarj veriminin düştüğü görülmektedir. En yüksek şarj-deşarj verimi, 6,9 basınç oranında %56,96 olmuştur. Ardından şarj-deşarj verimi, 7,4, 8,5 ve 10,4 basınç oranları için sırasıyla %55,75, %49,81 ve %44,01 olmuştur. Buraya kadar, Termal Enerji Depolama sistemine (Model 2) özgü olan elemanların her biri ile ilgili ve sistemin bütünüyle ilgili sonuçlar verilmiş ve bu sonuçlar değerlendirilerek yorumlanmıştır. Bu sonuçlar grafik halinde verilmiş ve bu grafikler,deşarj prosesi içerisindeki değişimler olarak oluşturulmuşlardır. Bu grafiklerden çıkarılabilecek sonuç, her ne kadar Model 2'nin verimi Model 1'e göre düşük olsa da, Model 2'de herhangi bir yakıt kullanımı söz konusu değildir. Model 1 ve Model 2'nin aynı süre çalıştığı düşünüldüğünde Model 1'in yerine Model 2'nin kullanımıyla ciddi seviyelerde yakıt tasarrufu yapılabilmektedir. Bu durumda 6,9, 7,4, 8,5 ve 10,4 basınç oranları için günlük yakıt tasarrufu sırasıyla, 1.982,88 kg/s, 2.170,8 kg/s, 2.039,4 kg/s ve 1.920,24 kg/s olur. Bu değerler yıllık olarak sırasıyla, 723,75 ton/yıl, 792,34 ton/yıl, 744,38 ton/yıl ve 700,89 ton/yıl'dır.

3.4. Model 3'e Özgü Olan Sonuçlar

Model 3 ile Model 2 arasında, sistemlerin bünyelerinde bulunan elemanlar göz önüne alınarak bir kıyaslama yapıldığında tek fark, Model 3'te yanma odasının bulunmasıydı. Yanma odası Model 3 içerisinde enerji depolama tankının çıkışında olduğu için, havanın şarj

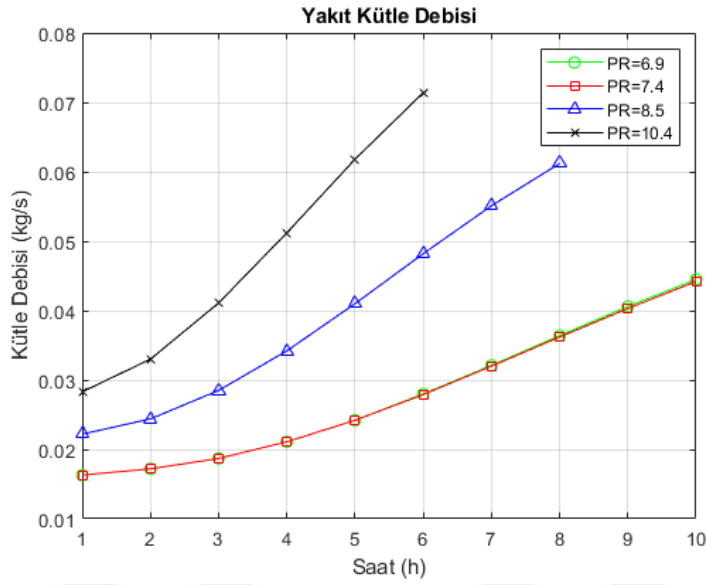
prosesinin başından deşarj prosesi içerisinde enerji depolama tankını terk edene kadar, Model 3'ün analiz sonuçları ile Model 2'nin analiz sonuçları aynı çıkmıştır. Bu iki sistemin ortak sonuçlarından önceden bahsedilmişti. Dolayısıyla, deşarj prosesinin kalan kısımlarında iki sistemden de elde edilecek sonuçlar farklı olacaktır. Bu yüzden, sadece Model 3'e özgü olan sonuçlar yanma odası, türbin ve Model 3 sisteminin geneliyle alakalı olacaktır. Yine bu sonuçlar önceki sonuçlarda olduğu gibi, deşarj sistemi için kronolojik olarak verilecektir.

Model 3'te deşarj prosesi, havanın kompresör tarafından atmosferden çekilmesi ve basınçlandırmasıyla başlamaktaydı. Ardından kompresör tarafından çekilen hava, enerji depolama tankına gönderilmekte ve burada ısınmaktaydı. Tankta ısınan hava da, yanma odasında yakılan yakıt sayesinde fazladan bir ısı transferine maruz kalmakta ve buradan türbine, Model 2 sistemine nazaran daha sıcak bir şekilde girmektedir. Yanma odasında hava, enerji depolama tankı çıkış sıcaklığından 1100 °C'lik bir sıcaklığa sahip olmaktadır. Dolayısıyla havanın yanma odasına giriş sıcaklığı, enerji depolama tankından çıkış sıcaklığına eşittir. Havanın yanma odasına giriş sıcaklığı, Şekil 3.12'de yer alan Model 2 için türbin giriş sıcaklığı grafiği ile birebir aynıdır. Çünkü Model 3 ve Model 2 sistemleri, hava enerji depolama tankını terk edene kadar aynı şekilde işlemektedirler. Yanma odasına Şekil 3.12'deki değerlerle giren ve 1100°C sıcaklıkta çıkan hava, yanma odasından belirli düzeyde bir ısı çekmektedir. Çekilen ısı transferi, havanın 1100°C'de ve enerji depolama tankı çıkış sıcaklıklarında molar entalpi ve molar entropi analizinin yapılmasıyla hesaplanmıştır. Yanma odası için hesaplanan ısı transferi, Şekil 3.22'de olduğu gibidir.



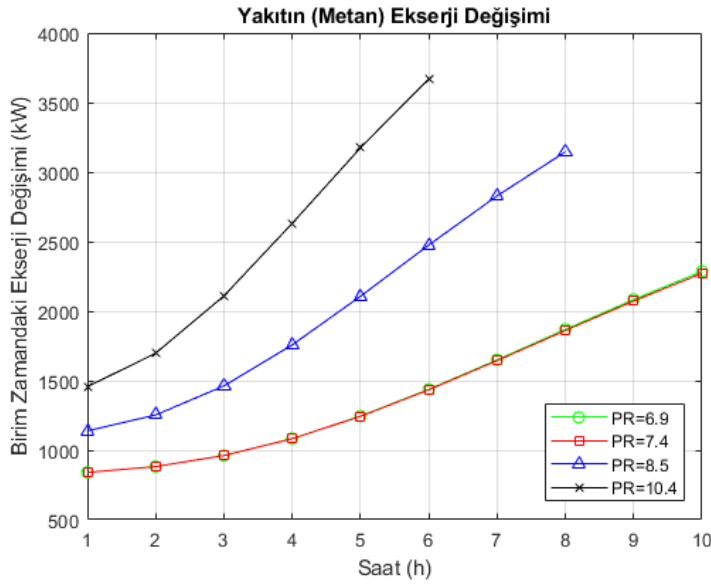
Şekil 3.22. Yanma odasından havaya geçen birim zamandaki ısı transferinin zamana göre değişimi

Şekilde görüldüğü üzere yanma odasından havaya aktarılan ısı transferi, zaman geçtikçe artmaktadır. Bunun sebebi, enerji depolama tankının zaman geçtikçe enerjisinin azalması ve yanma odası çıkış sıcaklığının sabit 1100°C olmasıdır. Yani yanma odasının ısı transferi yükü, deşarj periyodu devam ettikçe artmaktadır. Yanma odasında oluşan ve havaya aktarılan ısının kaynağı, yanma odasında yakılan yakıttır. Bu yakıt metandır. Yanma odasının ısı yükü zaman geçtikçe arttığından dolayı burada tüketilen yakıt miktarı da zamanla artmalıdır. Yanma odasında tüketilen yakıtın kütleli debisi ise Şekil 3.23'te görülmektedir.



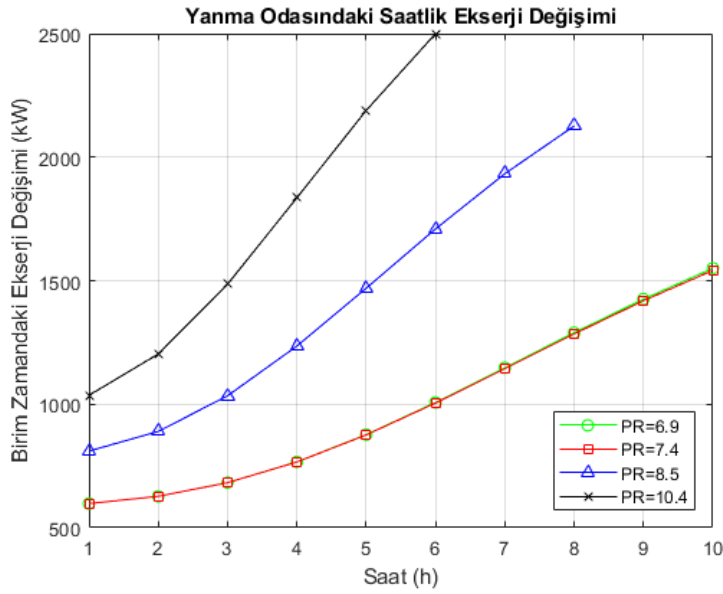
Şekil 3.23. Yanma odasında yakılmak üzere kullanılan yakıtın kütleli debisinin zamana göre değişimi

Yakıt debisinin değişim grafiği, yanma odasından havaya aktarılan birim zamandaki ısı transferindeki değişim grafiği ile oldukça benzerdir. Bu durum beklenen bir durumdur. Zira yakıtın kütleli debisi, yanma odasından havaya aktarılan birim zamandaki ısı transferi yakıtın alt ısı değerine oranıyla bulunur ve yakıtın alt ısı değeri, yakıt daima 25°C’de yanma odasına verildiği için sabit kalmıştır. Yanma odası için bir diğer önemli bir parametre olan birim zamanda yok eilden ekserji ve ekserjik verim değerlerinin hesaplanması için, öncelikle yakıtın ekserji analizi yapılmıştır. Yakıt için yapılan ekserji analizinin sonucunda elde edilen yakıt ekserjisinin zamana göre değişim grafiği de Şekil 3.24’te yer almaktadır.



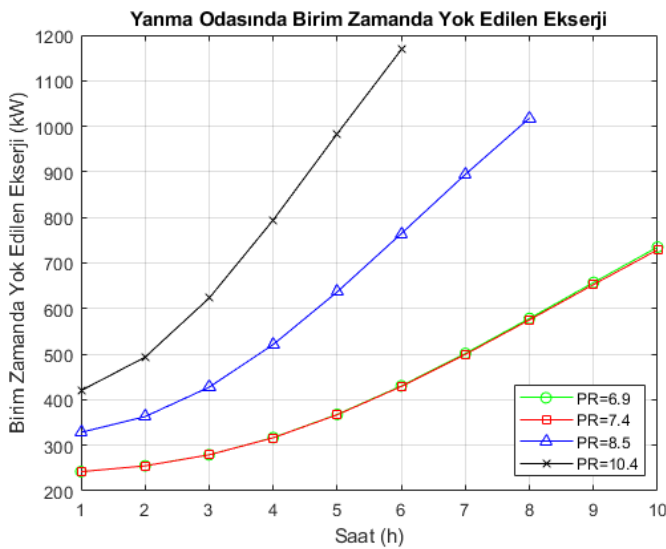
Şekil 3.24. Yakıtın ekserjisinin zamana göre değişimi

Yakıtın ekserjisi hesaplanırken, yakıtın kimyasal ekserjisi baz alınmıştır. Yakıtın fiziksel ekserjisi, yakıtın kimyasal ekserjisine nazaran oldukça düşük olduğu için ihmal edilmiştir. Dolayısıyla yakıtın ekserjisi hesaplanırken, yakıtın kimyasal ekserjisi, yakıtın kütle debisi ve yakıtın moleküler ağırlığı hesaba katılmıştır. Yanma odasındaki birim zamanda yok edilen ekserji ve ekserjik verimlerin hesaplanması için, yakıt ekserjisi dışında gerekli olan bir diğer parametre de yanma odasındaki ekserji değişimidir. Bu bağlamda, yanma odasının ekserji değişiminin hesaplanması için birtakım değişkenler kullanılmıştır. Bu değişkenler, yanma odası çıkış sıcaklığı ve enerji depolama tankı çıkış sıcaklıklarına karşılık gelen molar entalpi ve molar entropi analizleri sonucunda hesaplanmıştır ve böylelikle yanma odasında gerçekleşen ekserji değişimi de bulunmuştur. Yanma odasındaki ekserji değişiminin zamana göre değişim grafiği de Şekil 3.25'te yer almaktadır.



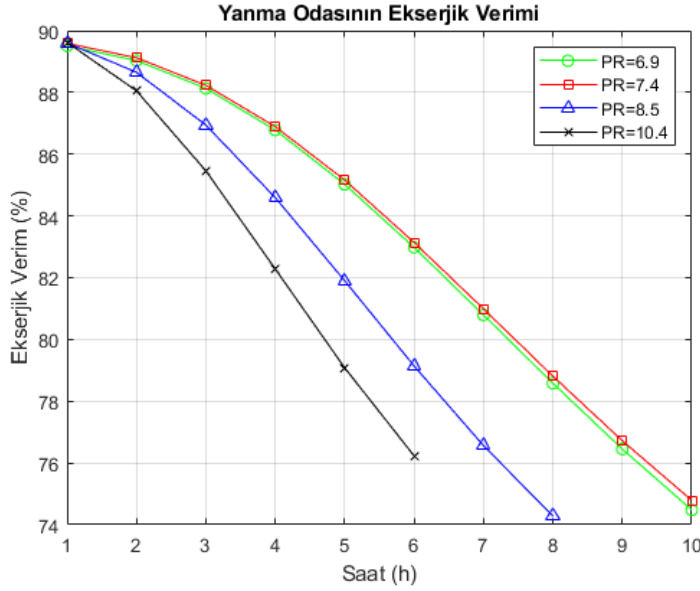
Şekil 3.25. Yanma odasında birim zamandaki ekserji değişimi

Yanma odası için yapılan ekserji analizinin bir diğer önemli parametresi de yanma odasında gerçekleşen birim zamanda yok edilen ekserji değeridir. Birim zamanda yok edilen ekserji değeri hesaplanırken, yanma odasının giriş ve çıkışındaki ekserji farkı ve yakıt ekserjisinden yararlanılmıştır. Bu bağlamda hesaplanan birim zamanda yok edilen ekserji değerinin sonucu olarak oluşturulan grafik, Şekil 3.26'da görülmektedir.



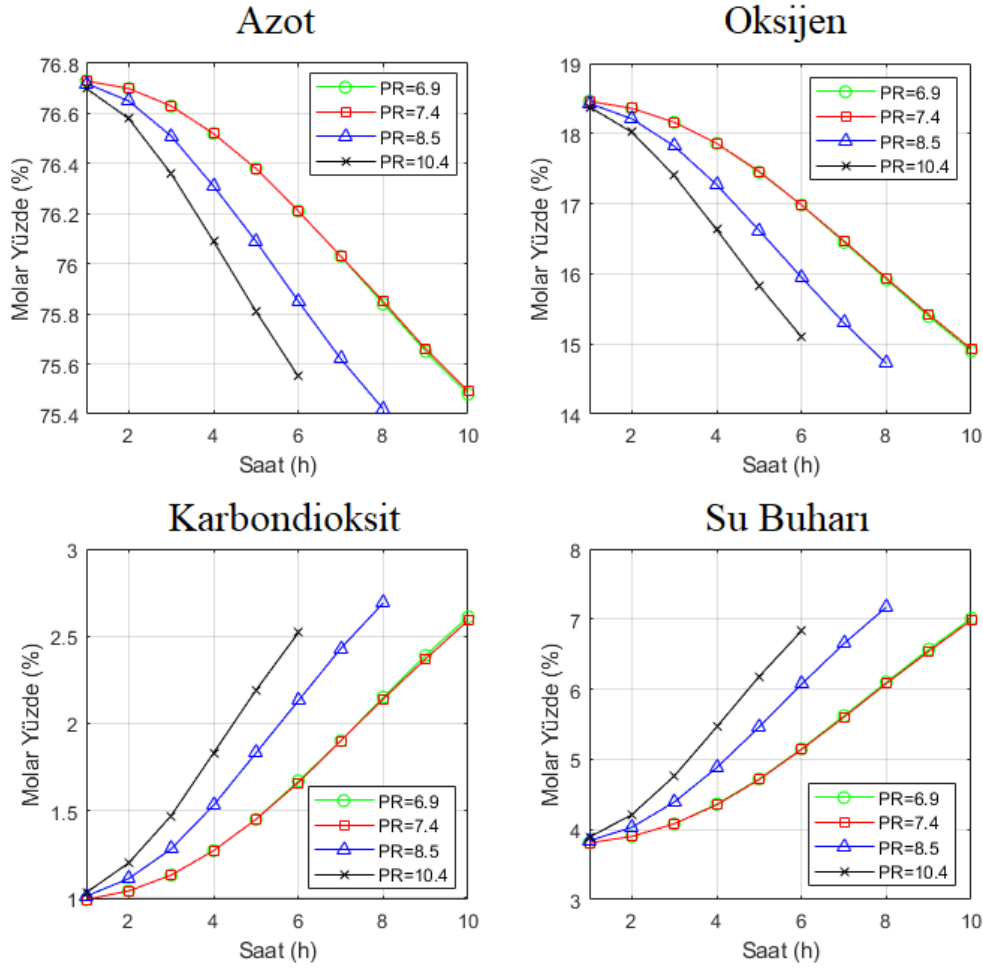
Şekil 3.26. Yanma odasında gerçekleşen birim zamanda yok edilen ekserjinin zamana göre değişimi

Yanma odasındaki ekserji değişimi ve yakıt ekserjisi bilgileri sayesinde hesaplanan bir diğer önemli ekserji parametresi ise, yanma odasının ekserjik verimidir. Yanma odasının ekserjik verimi, yani ikinci yasa verimi Şekil 3.27’de verilmiştir.



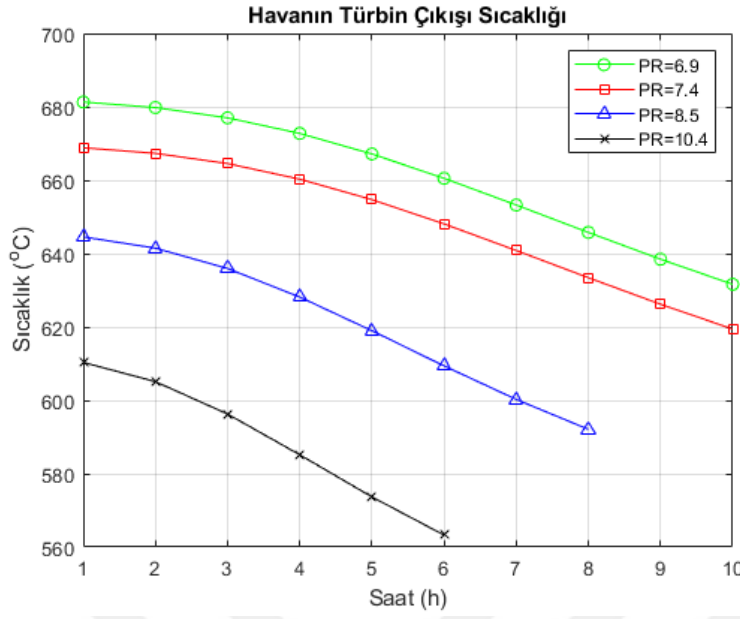
Şekil 3.27. Yanma odasının ekserjik veriminin zamana göre değişimi

Yanma odasında hava sıcaklığı, yanma odası çıkışında sabit tutulmasına rağmen ekserjik verimin düşmesinin sebebi havanın içeriğinin değişmesinden dolayıdır. Deşarj prosesinin başlangıcında, havanın içeriği %77,48 nitrojen, %20,59 oksijen, %0,03 karbondioksit ve %1,19 su buharı olarak düşünülmüştü. Bu değerler deşarj prosesi devam ettikçe değişmiştir ve hava içeriğindeki nitrojen ve oksijen yüzde olarak azalmış, karbondioksit ve su buharı ise yüzde olarak artmıştır. Karbondioksit ve su buharının molar entalpileri negatif değere sahip oldukları için bu bileşenlerin hava içerisindeki yüzdelerinin artması, havanın toplam entalpisinin düşmesine sebep olmaktadır. Bu durumdan ötürü, hava içeriğindeki değişimin incelenmesi de önemli bir ihtiyaca dönüşmüştür. Dolayısıyla hava adı verilen karışımı oluşturan maddelerin zamana göre değişimleri teker teker hesaplanmıştır. Havayı oluşturan maddelerden analizi yapılan ve zamana göre değişimi yüzde olarak hesaplanan azotun, oksijenin, karbondioksitin ve su buharının zamana göre miktarlarının değişiminin grafiği Şekil 3.28’de verilmiştir.



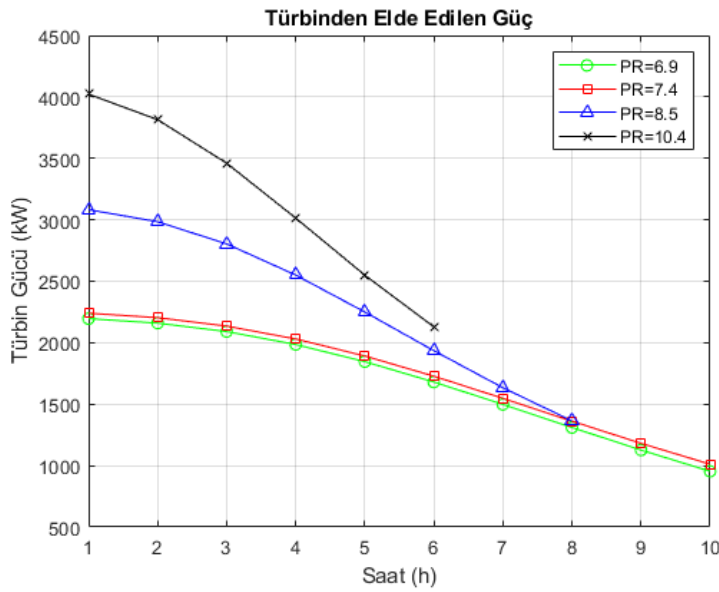
Şekil 3.28. Hava içerisindeki azotun, oksijenin, karbondioksitin ve su buharının molar yüzdesinin zamana göre değişimi

Yanma odası içerisinde yanma analizi yapılan hava, yanma odasının ardından ısınmış bir şekilde türbine geçer. Hava türbine sabit 1100 °C’de girer. Dolayısıyla, enerji depolama sisteminde verilen türbin giriş sıcaklığı grafiği gibi bir grafiği Model 3 için vermek anlamsız olur. Fakat havanın her çevrim sonunda içeriğinin değişmesinden dolayı, türbin çıkış entalpisi ve dolayısıyla türbin çıkış sıcaklığı her çevrim sonucunda değişmektedir. Türbin çıkış sıcaklığı her çevrim sonunda değiştiğinden dolayı, bu değişkeni bir grafikte incelemek faydalı olacaktır. Bu yüzden, türbin çıkış sıcaklığının zamana göre değişim grafiğine Şekil 3.29’da yer verilmiştir.



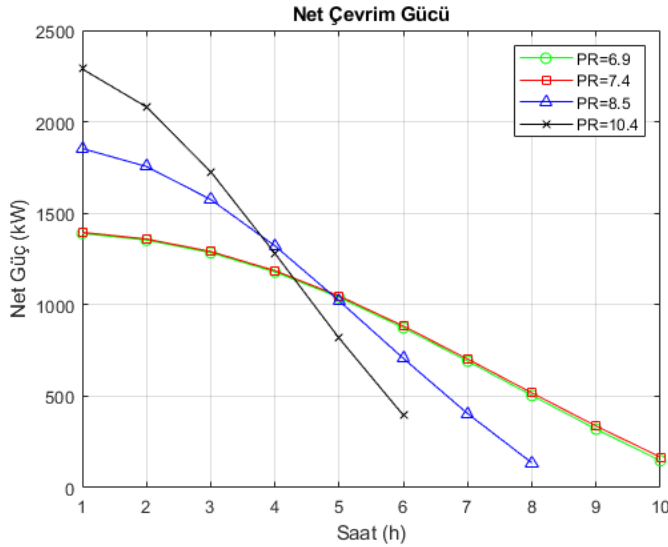
Şekil 3.29. Türbin çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi

Çevrim boyunca sabit olan türbin giriş sıcaklığı değeri ve her çevrim sonunda değişen türbin çıkış sıcaklığı değerleri kullanılarak türbinin gücü hesaplanmıştır. Türbinin gücü hesaplanırken, türbin giriş ve çıkış sıcaklıklarına karşılık gelen molar entalpi ve molar entropi değerlerinden yardım alınmıştır. Bu bağlamda hesaplanan türbin gücünün grafiği Şekil 3.30’da verilmiştir.



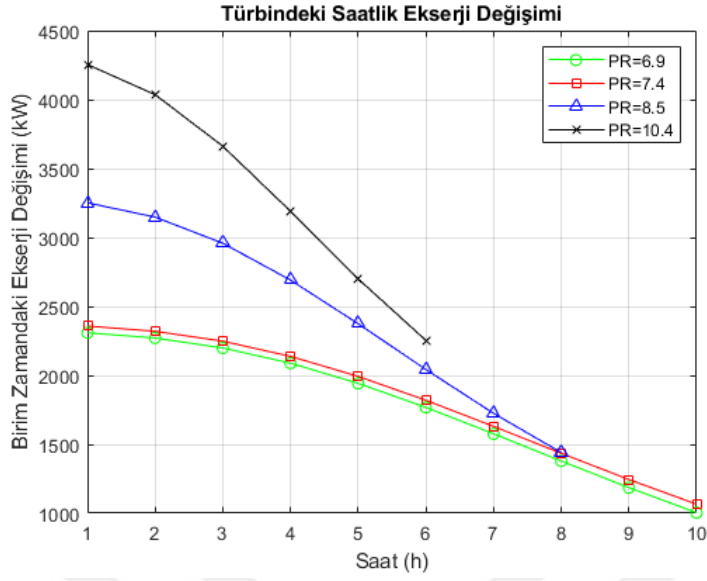
Şekil 3.30. Türbin gücünün zamana göre değişimi

Şekil 3.30 incelendiğinde türbin gücünün değişiminin, Model 2 içindeki türbin gücündeki değişime benzer olduğu görülmektedir. Türbindeki güç değeri, deşarj prosesi devam ettikçe beklenildiği üzere azalmaktadır. Çünkü türbindeki entropi artmaktadır. Türbin gücüne ek olarak Model 3 için ayrıca net çevrim gücü değeri de hesaplanmıştır. Hesaplanan net çevrim gücü değerinin grafiği oluşturulmuştur ve bu grafik Şekil 3.31’de görülebilmektedir.



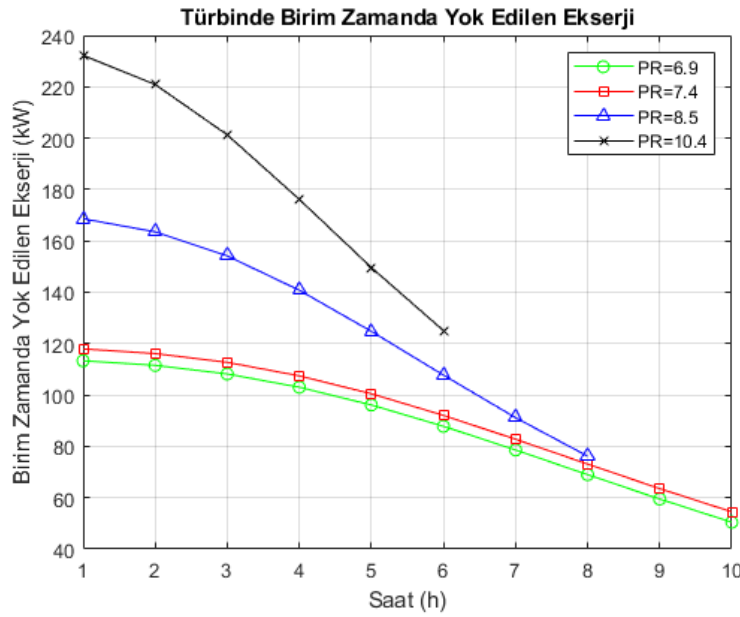
Şekil 3.31. Net çevrim gücünün zamana göre değişimi

Grafiğe bakıldığında 6,9, 7,4, 8,5 ve 10,4'lük basınç oranları için toplam üretilebilecek enerji sırasıyla, 8,78 MWh, 8,89 MWh, 8,77 MWh ve 8,59 MWh'tir. Türbin için bir diğer önemli performans parametresi de ekserji değişimidir. Türbindeki ekserji değişimi hesaplanırken, türbindeki gücün hesaplanmasında kullanılan değişkenlerle birlikte ölü durum entalpi ve ölü durum entropi değerleri de kullanılmıştır. Bu çalışmada ölü durum için basınç 1,01325 kPa, sıcaklık da 25 °C kabul edilmiştir. Dolayısıyla, bu bilgiler ışığında türbinin ekserji analizi yapılmıştır. Türbinde yapılan ekserji analizi sonucunda türbindeki ekserji değişimi, türbinde meydana gelen birim zamanda yok edilen ekserji ve türbinin ikinci yasa verimi değerleri hesaplanmıştır. Ekserji analizi sonucu hesaplanan bu üç değişkenden ilki olan türbindeki ekserji değişiminin zamana göre değişiminin grafiği elde edilmiş ve bu grafik Şekil 3.32’de verilmiştir.



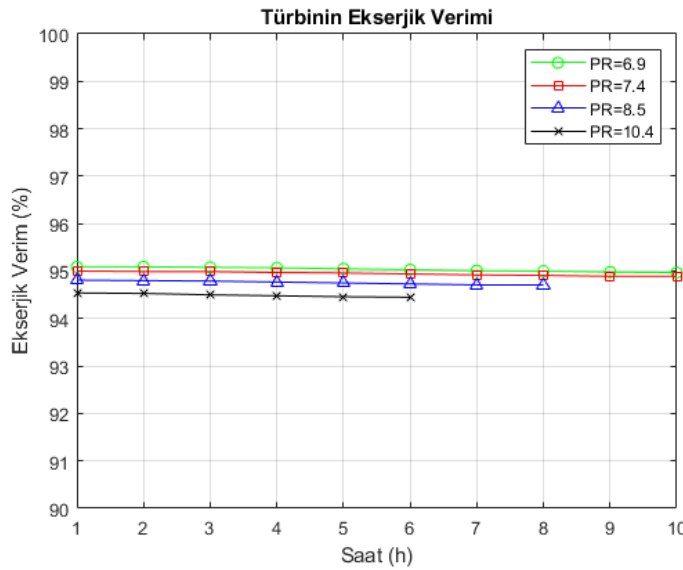
Şekil 3.32. Türbindeki ekserjinin zamana göre değişimi

Türbin için yapılan ekserji analizi sonucunda incelenen bir diğer değişken de birim zamanda yok edilen ekserjidir. Birim zamanda yok edilen ekserji, entropi artışından kaynaklanan bir değerdir. Birim zamanda yok edilen ekserji değeri arttıkça, sistem ideal performanstan o kadar uzaklaşır. Dolayısıyla bu değişken oldukça önemli bir değişkendir ve türbin için ayrıca bir önem arz etmektedir. Türbindeki birim zamanda yok edilen ekserjinin zamana göre değişimi de Şekil 3.33'te verilmiştir.



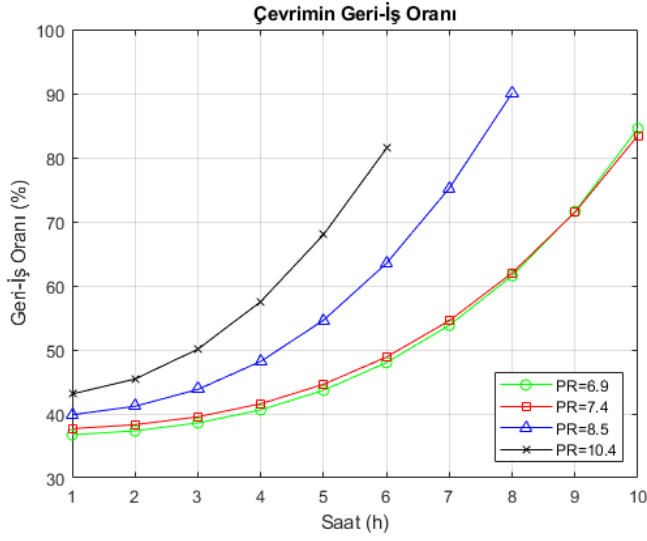
Şekil 3.33. Türbinde birim zamanda yok edilen ekserjinin zamana göre değişimi

Model 3'te yer alan türbinde birim zamanda yok edilen ekserji grafiği, Model 2'de yer alan türbindeki birim zamanda yok edilen ekserji grafiğiyle karşılaştırıldığında bu grafiklerin benzer olmadıkları göze çarpmaktadır. Model 2 için türbinde birim zamanda yok edilen ekserji değeri hem artış hem de azalış trendi gösterirken bu durum Model 3 için aynı değildir. Model 3 için birim zamanda yok edilen ekserji değerinde yalnızca azalma olmuştur. Türbin için yapılan ekserji analizinin son önemli parametresi ise, ekserjik verim veya ikinci yasa verimidir. Türbinin ikinci yasa verimi hesaplanırken, türbinde üretilen güç veya türbinde yok edilen ekserji ve türbindeki ekserji miktarı değişimi kullanılmıştır. Türbinin ikinci yasa veriminin zamana göre değişimi de Şekil 3.34'ten görülebilmektedir. Şekil 3.34 incelendiğinde, türbinin ekserjik veriminin her basınç oranında hemen hemen sabit kaldığı görülmektedir. Ekserjik verimde yalnızca çok düşük bir düşme eğimi olmuştur.



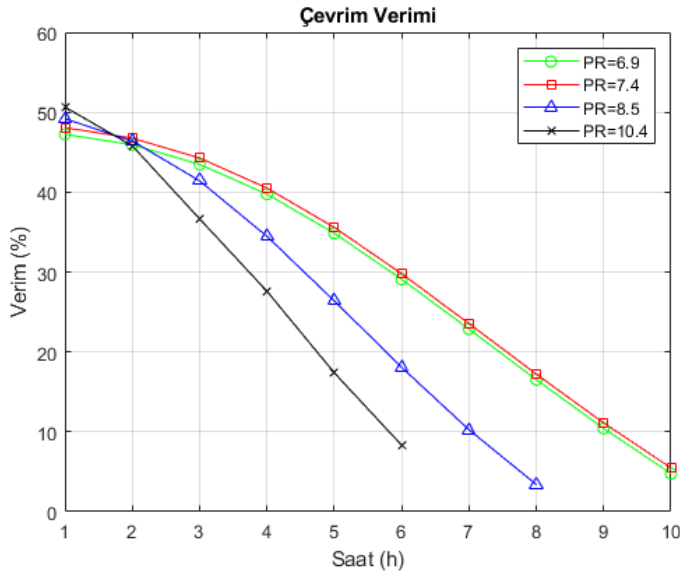
Şekil 3.34. Türbinin ekserjik veriminin zamana göre değişimi

Buraya kadar verilen sonuçlar, Model 3 sisteminin belirli elemanlarına özel olan sonuçlardır. Model 3, eleman bazında incelendiği gibi ayrıca, en genel haliyle de incelenmelidir. Bunun için, yine Model 2'de olduğu gibi belirli parametreler kullanılacaktır. Bu parametreler geri-iş oranı, çevrimin verimi ve şarj-deşarj verimidir. Model 3 için geri-iş oranı hesaplanmış ve yapılan bu hesaba göre geri-iş oranı grafiği elde edilmiştir. Elde edilen bu grafik Şekil 3.35'te görülmektedir.



Şekil 3.35. Geri-iş oranının zamana göre değişimi

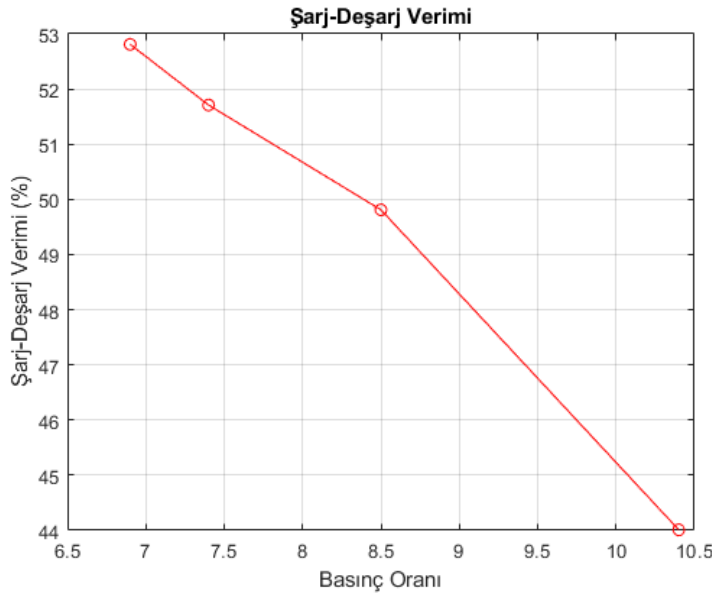
Şekil 3.35 incelendiğinde tüm basınç oranları için geri-iş oranı değeri zamanla artmıştır. Bu beklenen bir durumdur çünkü enerji depolama tankının enerjisi zamanla azalmıştır ve havadaki karbondioksit ve su buharının her yanma reaksiyonu sonrasında molar değerleri zamanla artmıştır. Tüm sistem itibarıyla önemli bir diğer parametre olan deşarj çevrimi veriminin grafiği de Şekil 3.36'da verilmiştir.



Şekil 3.36. Deşarj çevriminin veriminin zamana göre değişimi

Deşarj çevrim veriminin grafiği incelendiğinde, tüm basınç oranları için çevrim verimi deşarj prosesinin ilk saatinde %50 civarlarında olmuştur. Deşarj prosesi devam ettikçe verim

doğal olarak her basınç oranı için düşmüştür. Ortalama çevrim verimi her bir basınç oranı için sırasıyla, %29,49 (PR = 6,9), %30,23 (PR = 7,4), %28,7 (PR = 8,5) ve %31,06'dır (PR = 10,4). Genel sistem performansı açısından bu çalışmada incelenen diğer parametre de şarj-deşarj verimidir. Şarj-deşarj verimi için elde edilen grafik, Şekil 3.37'deki gibidir.



Şekil 3.37. Şarj-deşarj veriminin zamana göre değişimi

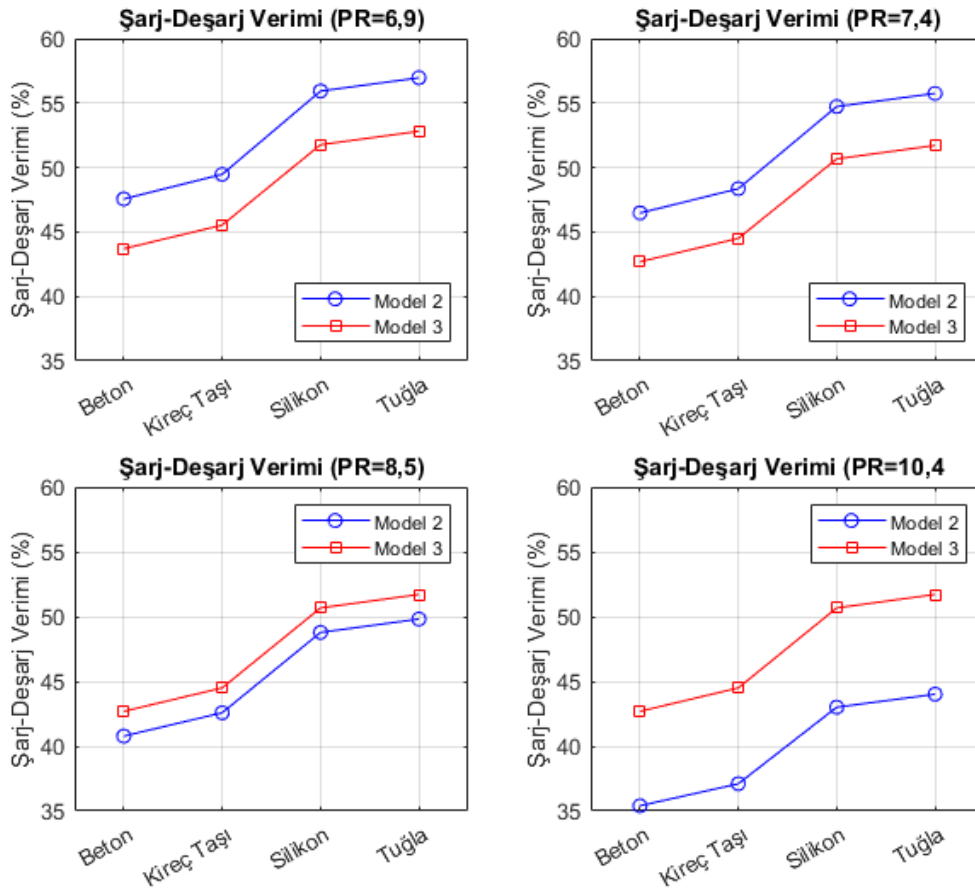
Hibrit sistemde (Model 3), Termal Enerji Depolama sisteminden (Model 2) farklı olarak yanma odası yer almaktadır. Yanma odası, türbin giriş sıcaklığının sabit olmasını sağlamıştır. Ancak buna rağmen, net iş gücü, ekserji değeri ve ekserjik verim gibi parametrelerdedeşarj periyodu devam ettikçe düşüş gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, hesaplamalar yapılırken havanın molar olarak analiz edilmesi ve havanın her yanma sonucunda molar içeriğinin değişmesidir. Her yanma sonucunda havadaki azot ve oksijen içerikleri azalmış, karbondioksit ve su buharı içerikleri ise artmıştır. Karbondioksit ve su buharının molar entalpi değerleri negatif iken, nitrojen ve oksijenin molar entalpi değerleri ise pozitifdir. Yanma sonucu gerçekleşen içerik değişiminden dolayı havanın entalpisinin her çevrim geçtikçe azalmasının sebebi budur. Havanın entalpisi azaldığı için de net güç, ekserji ve ikinci yasa verimi gibi değerler de zamanla azalmışlardır.

Buraya kadar, çalışmada incelenen sistemlerde (Model 1, Model 2 ve Model 3) elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Buraya kadar verilen sonuç grafikleri, farklı basınç oranlarındaki

eğimleri göstermektedir. Bu bölümden sonra, malzemelerin de etkisinin incelenebileceği grafikler gösterilecektir.

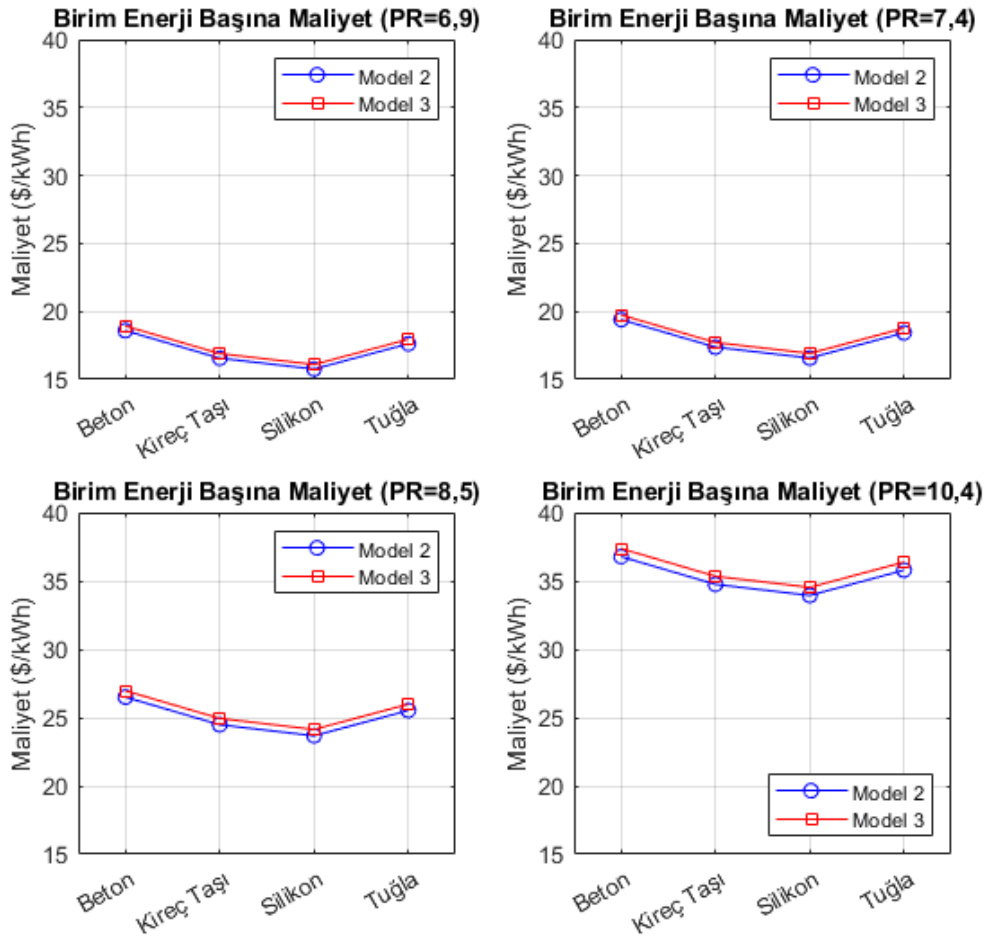
3.5. Model 2 ve Model 3'ün Karşılaştırılması

Çalışmanın bu bölümüne kadar Model 2 ve Model 3 ile ilgili birçok grafik verilmiştir. Model 2 ve Model 3'ün grafikleri yer yer ortak olsa da bu grafiklerin birbirinden ayrıldığı kısımlar da vardır. Özellikle şarj prosesinin neredeyse tamamı, Model 2 ve Model 3 için ortak olarak gerçekleşmiştir. Bu iki model arasındaki majör değişiklikler çoğunlukla deşarj prosesinde olmuştur. Buraya kadar verilen sonuçlar, Model 2 ve Model 3'ün kendi aralarında incelendiği ve değişken olarak yalnızca basınç oranının olduğu sonuçlardır. Bu bölümde ise Model 2 ve Model 3, önemli görülen birtakım parametreler üzerinden karşılaştırılacaktır. Ayrıca bu bölümde, malzemelerin etkilerinin incelendiği grafikler de olacaktır. Yine, yapılan ekonomik analizle ilgili olan sonuçlara da bu bölümde yer verilmiştir. Model 2 ve Model 3'ün verimlerinin karşılaştırılması için Şekil 3.38'de bu iki modelin şarj-deşarj verimlerinin grafiği verilmiştir. Şekil 3.38.'de yer alan bu grafikte, malzemelerin etkisi de gösterilmiştir.



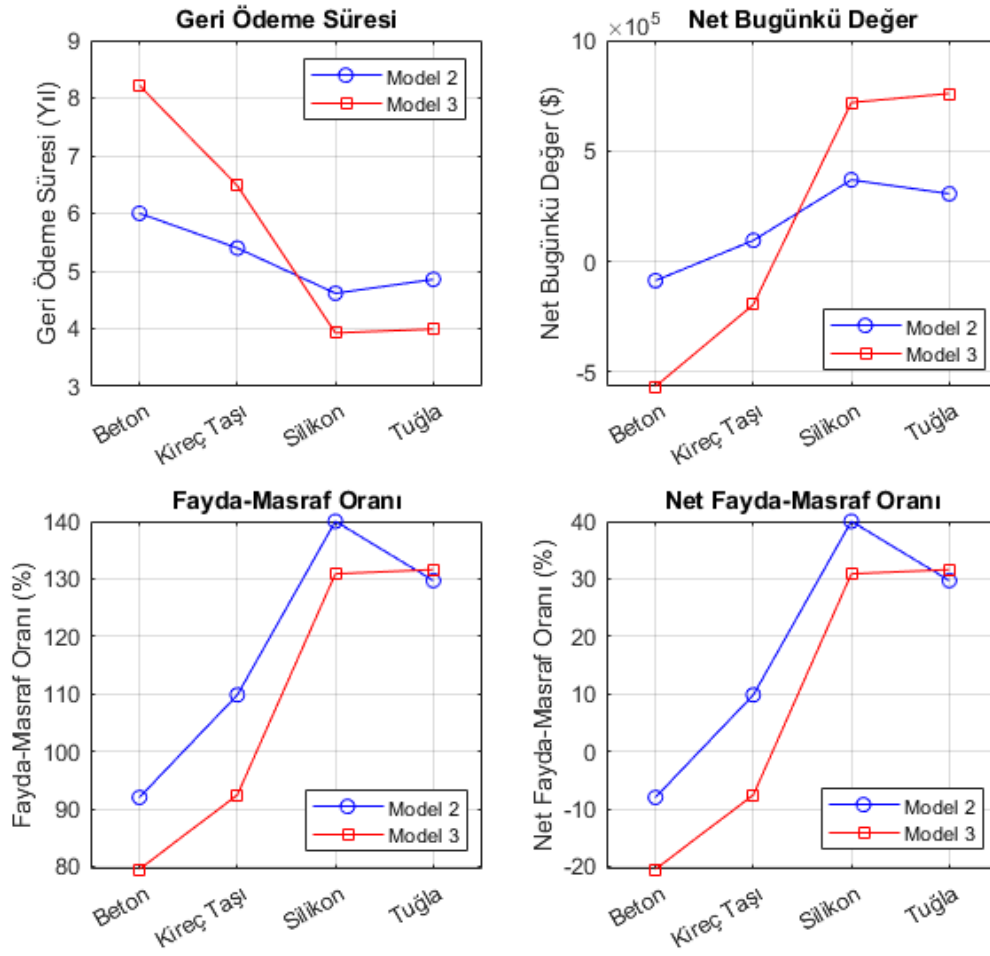
Şekil 3.38. Model 2 ve Model 3 için şarj-deşarj verimlerine enerji depolama malzemelerinin etkisi

Şekil 3.38’de yer alan grafiklerin tamamı incelendiğinde, verimi en çok artıran malzeme tuğla olmuştur. Silikon da tuğlaya yakın bir verim sağlamıştır. Beton ve kireç taşının kullanılması durumunda şarj-deşarj verimleri daha çok düşmüştür. Ayrıca, en yüksek şarj-deşarj veriminin gerçekleştiği durum, basınç oranının 6,9 olduğu durum olmuştur. Aynı şekilde, depolanan birim enerji başına maliyetler de Şekil 3.39’da verilmiştir. Burada birim enerji başına maliyet hesaplanırken yatırım maliyeti depolanan enerjiye oranlanmıştır. Şekil 3.39 aşağıda verilmiştir:



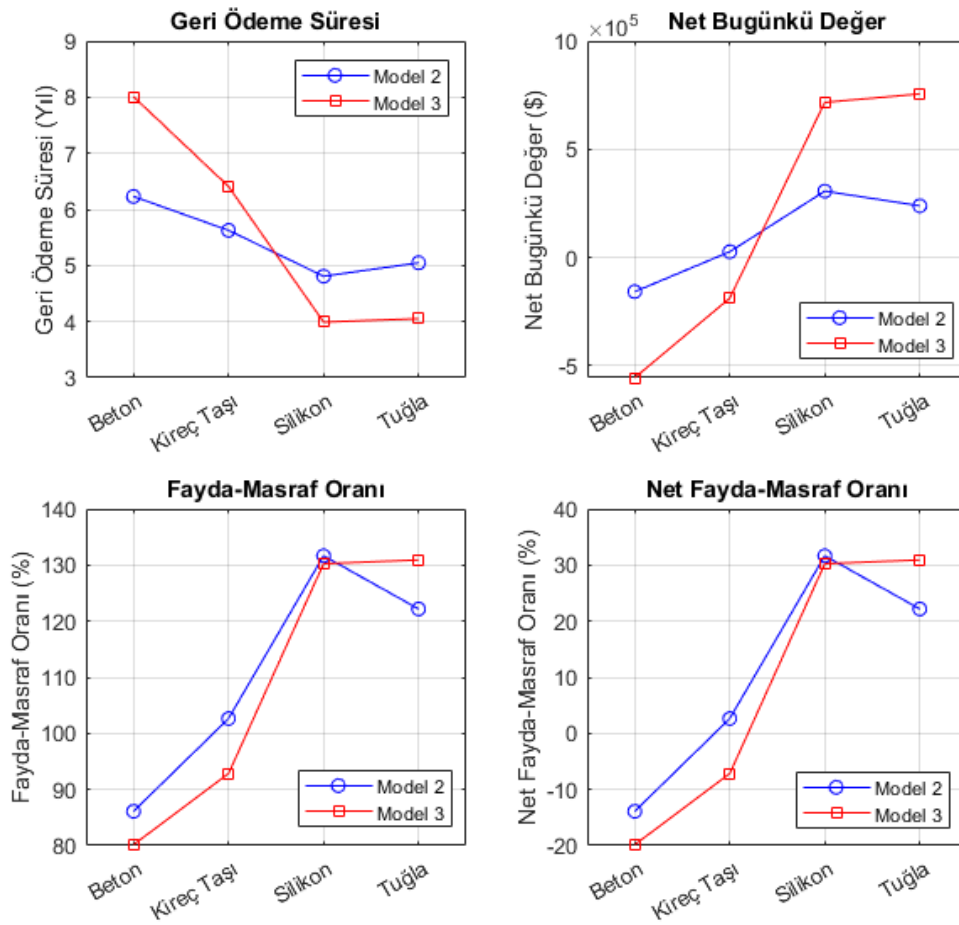
Şekil 3.39. Farklı malzemeler için depolanan birim enerji başına maliyet

Şekil 3.39 incelendiğinde depolama malzemelerine ve basınç oranlarına göre birim enerji başına maliyetlerin değiştiği gözlemlenmektedir. Model 2 ve Model 3 için birim enerji başına maliyetler çok değişmemekle birlikte birim enerji başına maliyet, Model 3'te daha fazladır. Birim enerji başına maliyetler malzeme bazında incelendiğinde, en düşük maliyet silikon malzemesiyle gerçekleşmiştir. En yüksek maliyet de beton malzemesinde ortaya çıkmıştır. Birim enerji başına maliyetin değişimiyle alakalı bir diğer önemli parametre de basınç oranıdır. Grafikler incelendiğinde basınç oranının artmasıyla birim enerji başına maliyetin de arttığı görülmüştür. Ekonomik analiz için bu çalışmada incelenen önemli parametreler, proje değerlendirme metotlarıdır. Bu metotların 6,9 basınç oranı için malzemeye göre değişim grafikleri, Şekil 3.40'ta verilmiştir.



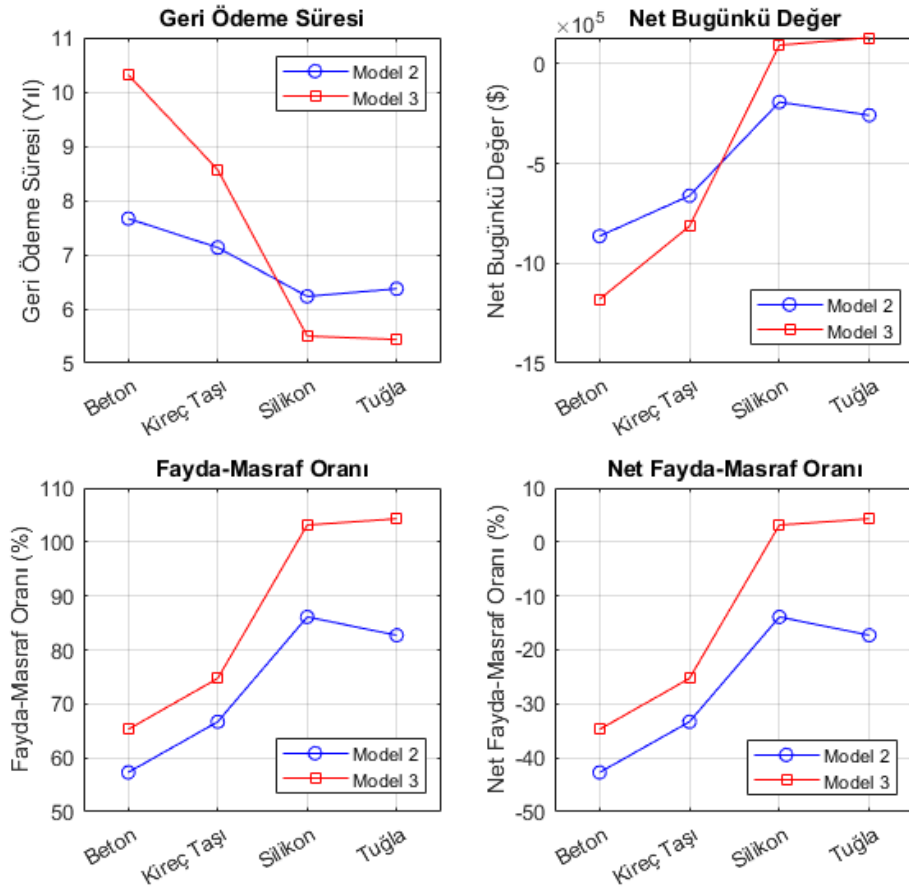
Şekil 3.40. Farklı malzemelerin proje değerlendirme metotlarına etkisi (PR=6,9)

Yukarıdaki grafik incelendiğinde, her iki model için (Model 2 ve Model 3) geri ödeme süresi için en iyi malzeme çiftinin silikon ve tuğla olduğu görülmektedir. Net bugünkü değer incelendiğinde ise, yine silikon ve tuğla malzemeleri göze çarpmaktadır. Model 3 için maksimum net bugünkü değer tuğla malzemesinde görülmüştür ancak, Model 2 için maksimum net bugünkü değer silikon malzemesinde görülmüştür. Fayda-masraf oranı ve net fayda-masraf oranında ise, yine silikon ve tuğla malzemeleri ön plana çıkmaktadır. Model 2 için silikon malzemesi tuğladan da avantajlı olmuştur. Ancak Model 3 için çok az farkla tuğla daha iyi bir seçenek olmuştur. Proje değerlendirme metotlarına malzemelerin etkisi, Şekil 3.41’de 7,4 basınç oranı için verilmiştir.



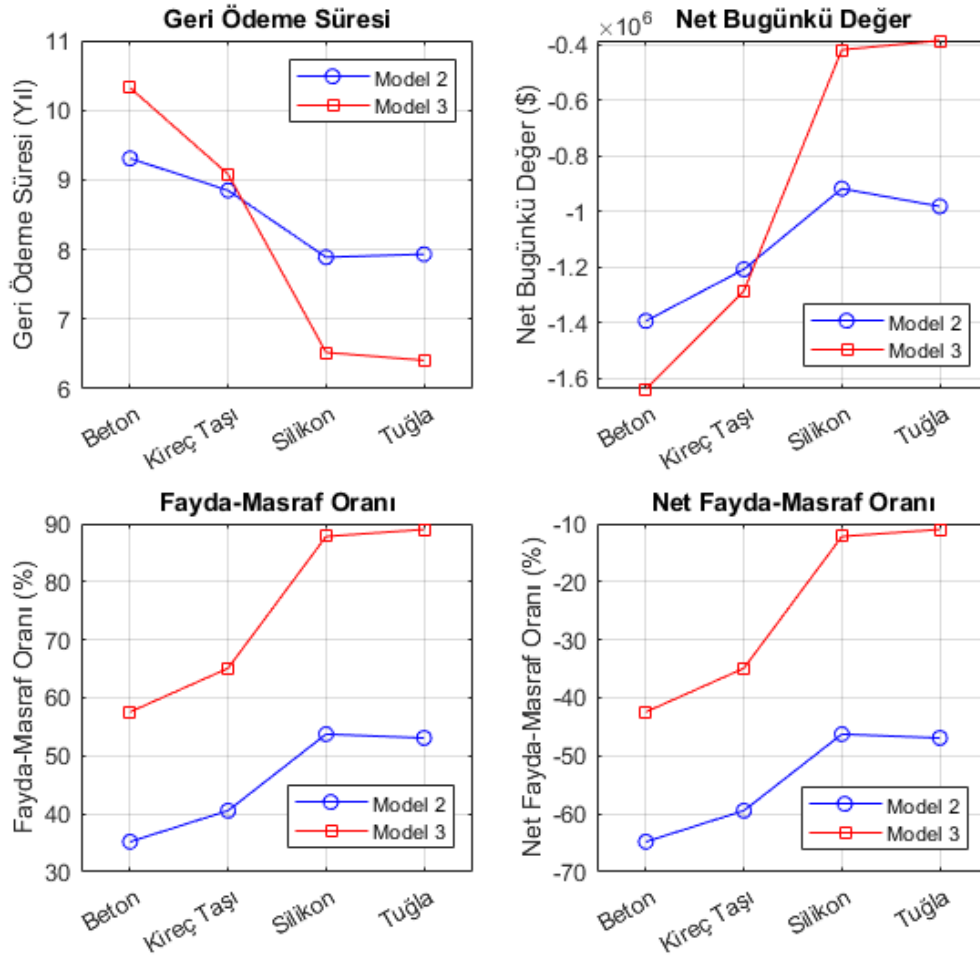
Şekil 3.41. Farklı malzemelerin proje değerlendirme metotlarına etkisi (PR=7,4)

7,4 basınç oranı için proje değerlendirme metotlarının değerleri incelendiğinde, yine silikon ve tuğla en avantajlı malzemeler olarak ön plana çıkmaktadır. Geri ödeme süresi için bu iki malzeme de, her iki model için hemen hemen aynı değeri sağlamışlardır. Net bugünkü değer incelendiğinde ise, Model 2 için silikon, Model 3 için de tuğla ön plana çıkmıştır. Fayda-masraf oranı ve net fayda-masraf oranı incelendiğinde ise, silikon daha ön plana çıkmıştır. Şekil 3.42’de proje değerlendirme metotlarının malzeme kullanımına göre grafikleri 8,5 basınç oranı için verilmiştir.



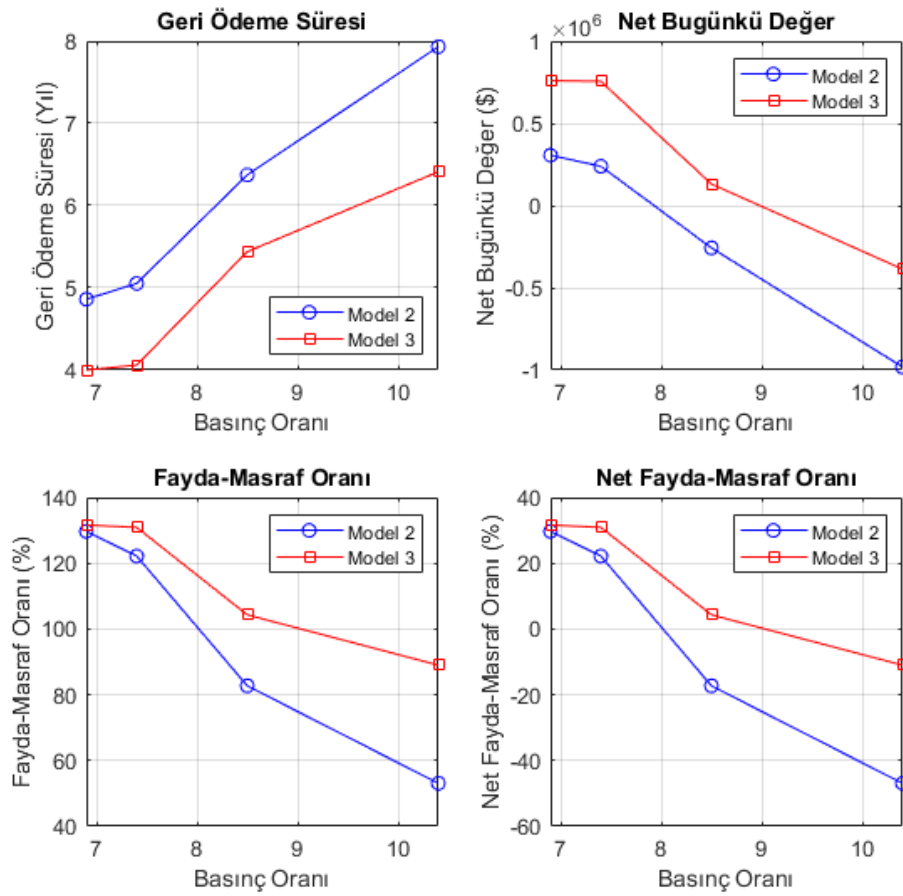
Şekil 3.42. Farklı malzemelerin proje değerlendirme metotlarına etkisi (PR=8,5)

8,5 basınç oranı için proje değerlendirme metotları incelendiğinde, hemen hemen 6,9 ve 7,4 basınç oranı için olan sonuçlarla karşılaşılmaktadır. Geri ödeme süresinde ve net bugünkü değerinde yine silikon ve tuğla ön plana çıkmaktadır. Aynı şekilde, fayda-masraf oranında ve net fayda-masraf oranında da tuğla ve silikon ön plana çıkmıştır ancak, bu proje metotları için silikonun az bir farkla daha avantajlı olduğu görülmektedir. Aynı şekilde 10,4 basınç oranı için oluşturulan proje değerlendirme metotlarının değerlerinin değişim grafiği, Şekil 3.43.'te verilmiştir.



Şekil 3.43. Farklı malzemelerin proje değerlendirme metotlarına etkisi (PR=10,4)

10,4 basınç oranı için, diğer basınç oranlarının aksine Model 2 ve Model 3 için proje değerlendirme metotlarının sonuçları birbirinden daha uzak çıkmıştır. Yine her metotta silikon ve tuğla ön plana çıkmıştır. Ancak, net bugünkü değer ve net fayda-masraf oranı değerleri hiçbir malzeme ve model için pozitif olmamıştır. Dolayısıyla 10,4 basınç oranı için Model 2 ve Model 3 fizibil olmamıştır. Proje değerlendirme metotlarıyla ilgili bu bölümde verilen tüm grafikler incelendiğinde, basınç oranının artışının sistemi ekonomik olarak olumsuz etkilediği görülmüştür. Dolayısıyla, doğrudan basınç oranının proje değerlendirme metotlarına olan etkilerinin de grafiklerini incelemek elzem olacaktır. Dolayısıyla basınç oranının proje değerlendirme metotlarına olan etkisi, Şekil 3.44'te verilmiştir.

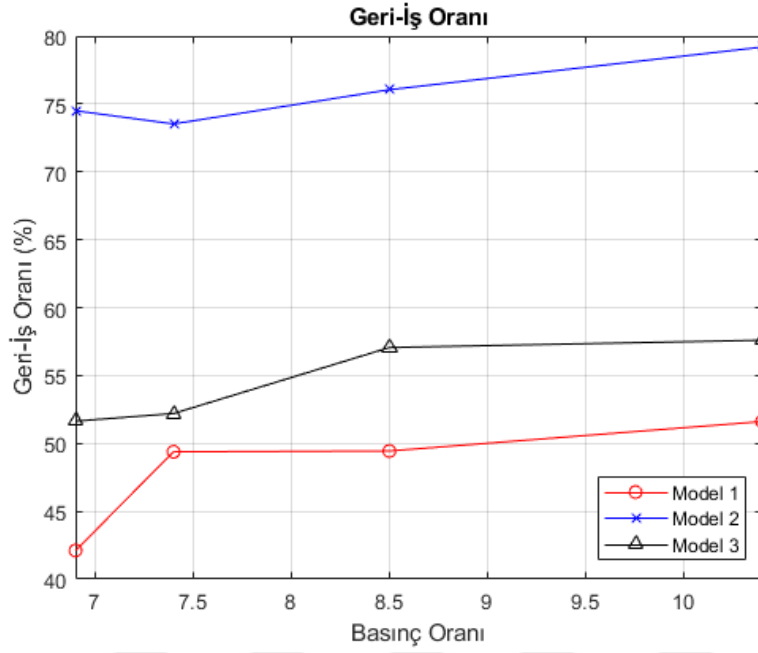


Şekil 3.44. Proje değerlendirme metotlarına basınç oranlarının etkisi

Proje değerlendirme metotlarına basınç oranlarının etkisi, tuğla malzemesi üzerinden Şekil 3.44'te incelenmiştir. Basınç oranının artışıyla geri ödeme süresi uzamış ve net bugünkü değer, fayda-masraf oranı ve net fayda-masraf oranı azalmıştır. Bu da basınç artışının, Model 2 ve Model 3'ü olumsuz etkilediğini göstermektedir.

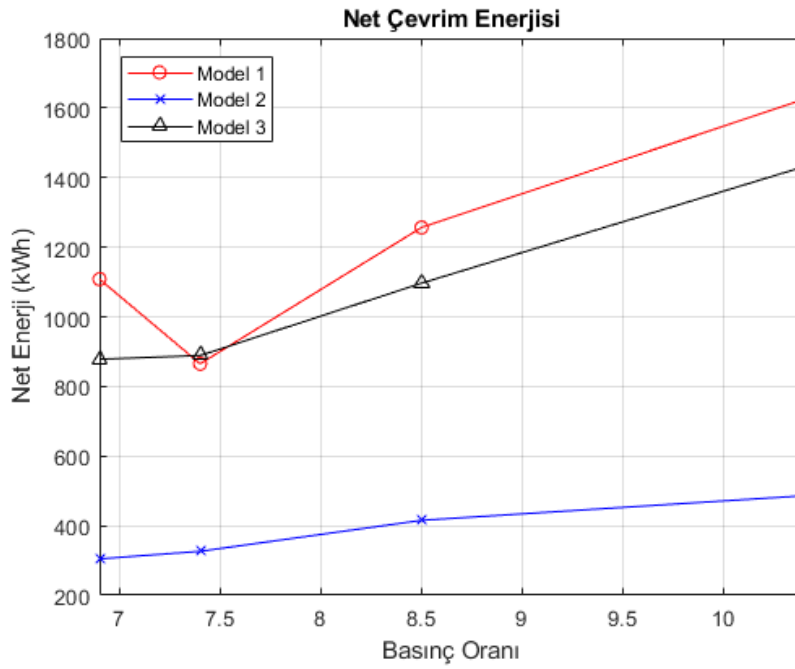
3.6. Model 1, Model 2 ve Model 3'ün Karşılaştırılması

Önceki bölümde Model 2 ve Model 3, belirli parametreler üzerinden karşılaştırılmıştı. Bu bölümde de tüm modeller karşılaştırılmıştır. Tüm modellerin karşılaştırılması, proje değerlendirme metotları, geri-iş oranı, net enerji ve çevrim verimleri üzerinden yapılmıştır. Şekil 3.45'te Model 1, Model 2 ve Model 3, geri-iş oranı üzerinden karşılaştırılmıştır.



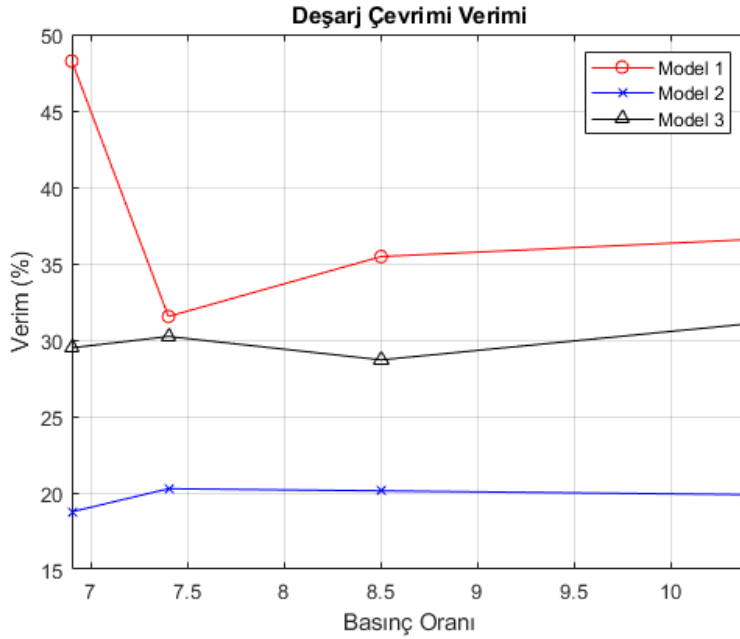
Şekil 3.45. Model 1, Model 2 ve Model 3 için geri-iş oranının basınç oranına göre değişimi

Şekil 3.45 incelendiğinde geri-iş oranı maksimum olarak Model 2’de, minimum olarak da Model 1’de gözlemlenmiştir. Dolayısıyla geri-iş oranı incelendiğinde en avantajlı model, Model 1 olmuştur. Basınç oranının artışı, geri-iş oranını çok fazla etkilememiştir. Şekil 3.46’da da tüm modeller net enerji açısından karşılaştırılmıştır.



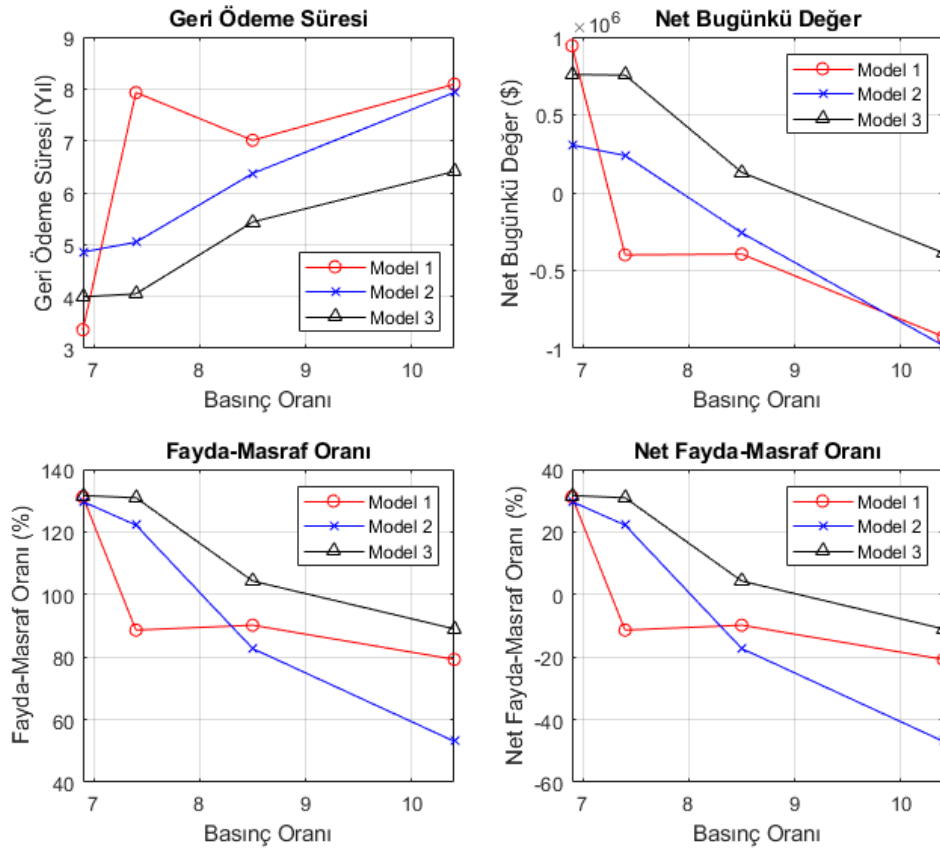
Şekil 3.46. Model 1, Model 2 ve Model 3 için net çevrim enerjisinin basınç oranına göre değişimi

Net çevrim enerjisi grafiğine göre, en avantajlı model yine Model 1 olmuştur. Ancak 7,4 basınç oranı için Model 3, Model 1'e göre daha avantajlı olmuştur. Model 1 ve Model 3'ün net çevrim enerjileri, tüm basınç oranı değerleri için birbirlerine yakın olmuştur. Tüm modellerin karşılaştırılmasının yapıldığı bir diğer önemli parametre de, çevrim verimidir. Çevrim veriminin basınç oranına göre değişiminin grafiği, Şekil 3.47'de verilmiştir.



Şekil 3.47. Model 1, Model 2 ve Model 3 için çevrim veriminin basınç oranına göre değişimi

Şekil 3.47'de yer alan çevrim veriminin basınç oranına göre değişimi grafiği incelendiğinde, yine Model 1 en avantajlı konumdadır. 6,9 basınç oranı dışında Model 1 ve Model 3'ün çevrim verimleri yine birbirine yakın olmuştur. Geri-iş oranı, net enerji ve çevrim verimi değerleri, Model 2 ve Model 3 için ortalama değerlerdir. Model 2 ve Model 3'ün enerjileri zamanla düştüğü için bu sistemlerin geri-iş oranı Model 1'e göre daha yüksek çıkmıştır ve net çevrim enerjisi ve çevrim verimi değerleri de daha düşük çıkmıştır. Model 1, Model 2 ve Model 3'ün karşılaştırılmasının yapıldığı son parametre de, proje değerlendirme metotlarıdır. Proje değerlendirme metotlarının farklı basınç oranlarına göre değişimlerinin grafiği, Şekil 3.48'de verilmiştir.



Şekil 3.48. Model 1, Model 2 ve Model 3 için proje değerlendirme metotlarının basınç oranına göre değişimi

Şekil 3.48’de geri ödeme süresinde en avantajlı durum, 6,9 basınç oranındaki Model 1’de gözlemlenmiştir. Ancak diğer basınç oranları için Model 1’in bir avantajı kalmamıştır. Dolayısıyla geri ödeme süresi için 6,9 basınç oranı dışındaki durumlarda en avantajlı model, Model 3 olmuştur. Ayrıca yine 6,9 basınç oranı dışındaki durumlar için Model 2 de Model 1’e göre daha avantajlıdır. Net bugünkü değerde de geri ödeme süresine göre benzer bir durum vardır. Net bugünkü değer için en iyi durum, 6,9 basınç oranında çalışan Model 1 sistemidir. Diğer basınç oranlarında ise, en avantajlı modeller sırasıyla Model 3, Model 2 ve Model 1 olmuştur. Fayda-masraf oranı ve net fayda-masraf oranı incelendiğinde ise, 6,9 basınç oranı için hemen hemen her model aynı sonucu vermiştir. 7,4 basınç oranı için en avantajlı modeller sırasıyla Model 3, Model 2 ve Model 1’dir. Ancak diğer basınç oranlarındaki sıralama da, Model 3, Model 1 ve Model 2 yönündedir.

4. TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında 3 farklı sistemin özellikleri ve etkileri simülasyon bazlı olarak incelenmiştir. Bu sistemler, Brayton çevrimi (Model 1), Model 2 ve Model 3 olmuştur. İncelenen Brayton çevrimi yalnızca kompresör, yanma odası ve türbinden oluşmaktadır. Brayton çevrimi için oluşturulan simülasyonda hava, atmosferik ortamdan kompresör tarafından çekilmiş ve burada sıkıştırılmıştır. Sıkışmanın ardından özellikleri değişen hava, yanma odasına girmiştir. Yanma odasına ısınan ve yanma odası çıkışında maksimum değerine ulaşan hava buradan türbine girmiştir. Ardından türbinde genişlererek burada enerji üretimini sağlamıştır.

İncelenen bir diğer sistem olan Model 2 için yapılan simülasyonda ise, hava fan tarafından çekilerek elektrik direncine gönderilmiştir. Elektrik direnci gücünü fotovoltaik panelden almaktadır. Fotovoltaik panel ise elektrik direncine enerjiyi, oluşturulan güneş adımına göre vermektedir. Elektrik direncinde ısınmış olan sıcak hava, buradan enerji depolama tankına girmiştir ve tanktaki taşların arasında dolanarak bu taşları ısıtmıştır. Ardından hava, soğumuş ve tankı terk etmiştir. Buraya kadar ki olan kısım, Carnot Batarya'nın şarj prosesini oluşturmaktaydı. Enerji arzının enerji talebini geçtiği 9 saatlik bir şarj prosesinin simülasyonu bu şekilde sona ermektedir. Carnot Batarya'nın deşarj prosesi ise, kompresörün atmosferik havayı çekmesiyle başlar. Hava kompresörde sıkışır ve buradan daha sıcak ve daha basınçlı çıkar. Ardından hava, sıcak enerji depolama tankına girer ve buradan ısınarak çıkar. Sıcak hava, tankı terk ettikten sonra türbine girer ve burada genişler ve belirli miktarda enerjinin üretilmesini sağlar.

İncelenen son sistem olan Model 3 ise, yapı olarak Model 2'ye oldukça benzerdir. Aralarındaki tek fark, Model 3'te yanma odasının bulunmasıdır. Yanma odasının düşünülmesinin sebebi, deşarj periyodu devam ettikçe sıcak enerji depolama tankından çıkan havanın enerjisinin düşmesidir. Enerji depolama tankının çıkışına yerleştirilen bir yanma odası, havanın türbin giriş sıcaklığını sabit tutmaya yardımcı olmuştur. Bu durum, Model 3'ün daha uzun bir deşarj prosesine olanak sağlayabileceğini düşündürse de elde edilen sonuçlar bunu göstermemiştir. Yanma odasına giren hava, burada her yanma reaksiyonuna uğradıktan sonra, içeriğindeki maddelerin molar oranları da değişmiştir. Havanın molar oranlarındaki değişim, nitrojen ve oksijenin azalması, karbondioksit ve su

buharının artması şeklinde gerçekleşmiştir. Karbondioksit ve su buharının molar entalpilerinin negatif olduğu düşünüldüğünde, Model 3'ün deşarj periyodunun önceden düşünüldüğü kadar uzun olmayacağı akla gelmektedir.

Çalışma kapsamında incelenen sistemler, bağımsız olarak incelendikleri gibi aynı zamanda birbirleriyle de karşılaştırılmışlardır. İncelenen sistemler yer yer birbirlerine göre daha avantajlı olmuşlardır. Çevrim verimi ve net enerji konusunda Model 1 diğer modellere göre daha avantajlı olmuştur ancak ekonomik olarak Model 2 ve Model 3, Model 1'den daha avantajlı olmuşlardır. Çevrim verimi ve net enerjinin Model 2 ve Model 3'te daha az olmasının sebebi, bu sistemlerin enerjilerinin giderek azalmasından kaynaklanmaktadır. Ancak Model 1 için böyle bir durum söz konusu değildir. Model 1'de düzenli bir şekilde yakıt kullanıldığından, çevrim verimi ve net enerji değerleri hemen hemen sabit kalmaktadır. Ayrıca Model 1'i dezavantajlı kılan önemli bir faktör de Model 1'in çevreyi kirletmesidir. "Fit for 55" ve "Yeşil Mutabakat" programları incelendiğinde Model 1 gözden çıkarılabilir durumdadır.

Bu çalışma göstermiştir ki, Carnot Batarya sistemleri gaz türbinlerinin yerini doldurabilir. Termal Enerji Depolama sistemlerinin, enerji depolama sistemleri arasında çok yaygın bir şekilde kullanılmadığı düşünüldüğünde, ilerleyen zamanlarda bu kullanımın artması beklenmektedir. Çünkü, en yaygın olarak kullanılan Pompalanmış Hidroelektrik Enerji Depolama sistemleri ve Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama sistemleri yüksek verimlerine, uzun ömürlerine ve düşük maliyetlerine rağmen her bölgeye kurulamamaktadırlar. Bu yüzden bu sistemler, Termal Enerji Depolama sistemine karşı önemli bir handikapa sahiptirler. Dolayısıyla, Termal Enerji Depolama sistemlerinin ilerleyen zamanlarda yaygınlaşacağı kaçınılmazdır ve bu sistemde incelenen Model 3 gibi farklı sistemlerle ve/veya elemanlarla entegre bir şekilde çalıştırılmalılardır. Model 1, Model 2 ve Model 3'ün enerji, ekserji ve ekonomi analizlerinin yapılmasının ardından, bu çalışma konusuyla ilgili başka hedefler de vardır. Literatürde yapılan tarama sonucunda, iş akışkanları üzerine ve bu maddelerin verime olan etkileri üzerine kapsamlı bir çalışmanın yapılmadığını görülmüştür. Ayrıca bir diğer eksik de, Carnot Batarya'nın tepki süreleriyle ilgili kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamıştır. İleri ki çalışmalarda bu konuların üstüne gidilmesi ve şarj veya deşarj proseslerinde farklı konfigürasyonlara sahip sistemler incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Abarr, M., Geels, B., Hertzberg, J. ve Montoya, L. D. (2017a). Pumped thermal energy storage and bottoming system part A: Concept and model. *Energy*, 120, 320–331.
- Abarr, M., Hertzberg, J. ve Montoya, L. D. (2017b). Pumped Thermal Energy Storage and Bottoming System Part B: Sensitivity analysis and baseline performance. *Energy*, 119, 601–611.
- Attonaty, K., Stouffs, P., Pouvreau, J., Oriol, J. ve Deydier, A. (2019). Thermodynamic analysis of a 200 MWh electricity storage system based on high temperature thermal energy storage. *Energy*, 172, 1132-1143.
- Ayachi, F., Tauveron, N., Tarti re, T., Colasson, S. ve Nguyen, D. (2016). Thermo-Electric Energy Storage involving CO₂ transcritical cycles and ground heat storage. *Applied Thermal Engineering*, 108, 1418–1428.
- Bellos, E., Lykas, P. ve Tzivanidis, C. (2022). Pumped thermal energy storage system for trigeneration: the concept of power to XYZ. *Applied Sciences*, 12(3), 970.
- Benato, A. (2017). Performance and cost evaluation of an innovative Pumped Thermal Electricity Storage power system. *Energy*, 138, 419–36.
- Benato, A. ve Stoppato, A. (2017). Energy and Cost Analysis of a New Packed Bed Pumped Thermal Electricity Storage Unit. *Journal of Energy Resources Technology*, 140(2), 020904.
- Benato, A., Stoppato, A. ve Mirandola, A. (2017). State-of-the-art and future development of sensible heat thermal electricity storage systems, *International Journal of Heat and Technology*, 35, 244-251.
- Benato, A. ve Stoppato, A. (2018a). Heat transfer fluid and material selection for an innovative Pumped Thermal Electricity Storage system. *Energy*, 147, 155–168.
- Benato, A. ve Stoppato, A. (2018b). Pumped Thermal Electricity Storage: A technology overview. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, 301–315.
- Dietrich, A., Dammel, F. ve Stephan, P. (2020). Exergoeconomic analysis of a pumped heat electricity storage system based on a Joule/Brayton cycle. *Energy Science & Engineering*, 9, 645-660.
- Dumont, O. ve Lemort, V. (2020a). Mapping of performance of pumped thermal energy storage (Carnot battery) using waste heat recovery. *Energy*, 211, 118963.
- Dumont, O. ve Lemort, V. (2020b). *First Experimental Results of a Thermally Integrated Carnot Battery Using a Reversible Heat Pump / Organic Rankine Cycle*. 2nd International Workshop on Carnot Batteries 2020. Liege, Bel ika.

- Dumont, O., Frate, G. F., Pillai, A., Lecompte, S., De paepe, M. ve Lemort, V. (2020). Carnot battery technology: A state-of-the-art review. *Journal of Energy Storage*, 32, 101756.
- Eppinger, B., Steger, D., Regensburger, C. ve Karl, J. (2021). Carnot battery: Simulation and design of a reversible heat pump-organic Rankine cycle pilot plant. *Applied Energy*, 288, 116650.
- Fan, R. ve Xi, H. (2022). Exergoeconomic optimization and working fluid comparison of low-temperature Carnot battery systems for energy storage. *Journal of Energy Storage*, 51, 104453.
- Farres-Antunez, P., Xue, H. ve White, A. J. (2018). Thermodynamic analysis and optimisation of a combined liquid air and pumped thermal energy storage cycle. *Journal of Energy Storage*, 18, 90–102.
- Frate, G. F., Antonelli, M. ve Desideri, U. (2017). A novel Pumped Thermal Electricity Storage (PTES) system with thermal integration. *Applied Thermal Engineering*, 121, 1051–1058.
- Frate, G. F., Ferrari, L. ve Desideri, U. (2020). Rankine Carnot Batteries with the Integration of Thermal Energy Sources: A Review. *Energies*, 13(18), 4766.
- Frate, G.F., Ferrari, L. ve Desideri, U. (2020). Multi-Criteria Economic Analysis of a Pumped Thermal Electricity Storage (PTES) With Thermal Integration. *Frontiers in Energy Research*, 8(53), 00053.
- Frate, G. F., Ferrari, L. ve Desideri, U. (2020). Multi-criteria investigation of a pumped thermal electricity storage (PTES) system with thermal integration and sensible heat storage. *Energy Conversion and Management*, 208, 112530.
- Furbo, S. (2015). Using water for heat storage in thermal energy storage (TES) systems. *Advances in Thermal Energy Storage Systems*, 31–47.
- Garlik, B. (2022). Energy Centers in a Smart City as a Platform for the Application of Artificial Intelligence and the Internet of Things. *Applied sciences*, 12, 3386.
- Georgiou, S., Shah, N. ve Markides, C. N. (2018). A thermo-economic analysis and comparison of pumped-thermal and liquid-air electricity storage systems. *Applied Energy*, 226, 1119–1133.
- Golpîra, H. ve Bahramara, S. (2020). Internet-of-things-based optimal smart city energy management considering shiftable loads and energy storage. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121620.
- Guo, J., Cai, L., Chen, J. ve Zhou, Y. (2016a). Performance evaluation and parametric choice criteria of a Brayton pumped thermal electricity storage system. *Energy*, 113, 693–701.

- Guo, J., Cai, L., Chen, J. ve Zhou, Y. (2016b). Performance optimization and comparison of pumped thermal and pumped cryogenic electricity storage systems. *Energy*, 106, 260–269.
- Hasnain, S. M. (1998). Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques. *Energy Conversion and Management*, 39(11), 1127–1138.
- Henchoz, S., Buchter, F., Favrat, D., Morandin, M. ve Mercangöz, M. (2012). Thermoeconomic analysis of a solar enhanced energy storage concept based on thermodynamic cycles. *Energy*, 45(1), 358–365.
- Howes, J. (2012). Concept and Development of a Pumped Heat Electricity Storage Device. *Proceedings of the IEEE*, 100(2), 493–503.
- İnternet: Anadolu Ajansı. YEKA GES-4 için başlangıç elektrik enerjisi alım tavan fiyatı yükseltildi.URL: <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/yeka-ges-4-icin-baslangic-elektrik-enerjisi-alim-tavan-fiyati-yukseltildi/2535370>, Son Erişim Tarihi: 02.04.2022.
- İnternet: Annual 2021 Chemical Engineering Plant Cost Index.URL: <https://www.chemengonline.com/2021-cepci-updates-september-prelim-and-august-final/>, Son Erişim Tarihi: 20.04.2022.
- İnternet: Collins, L. Siemens Gamesa: Utilities are lining up for our €40-50/MWh long-duration thermal energy storage.URL: <https://www.rechargenews.com/technology/siemens-gamesa-utilities-are-lining-up-for-our-40-50-mwh-long-duration-thermal-energy-storage/2-1-969626>, Son Erişim Tarihi: 20.05.2022.
- İnternet: ETES: Proven and reliable technology with 80% off-the-shelf components.URL: https://www.strommarkttreffen.org/2019-05-10_Schumacher_ETES-Electric_Thermal_Energy_Storage.pdf, Son Erişim Tarihi: 25.04.2022.
- İnternet: Resmî Gazete. Elektrik Piyasasında Depolama Faaliyetleri Yönetmeliği.URL: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/05/20210509-3.htm>, Son Erişim Tarihi: 25.04.2022.
- İnternet: Siemens Gamesa. ETES Dijital Broşür.URL: <https://www.siemensgamesa.com/-/media/siemensgamesa/downloads/en/products-and-services/hybrid-power-and-storage/etes/siemens-gamesa-storage-etes-storage-brochure-en.pdf>, Son Erişim Tarihi: 13.05.2022.
- İnternet: World Development Indicators: Electricity production, sources, and access.URL: <http://wdi.worldbank.org/table/3.7>, Son Erişim Tarihi: 11.02.2022.
- Jockenhöfer, H., Steinmann, W.D. ve Bauer, D. (2018), Detailed Numerical Investigation of a Pumped Thermal Energy Storage with Low Temperature Heat Integration. *Energy*, 145, 665-676.

- Kalaiselvam, S. ve Parameshwaran, R. (2014). *Thermal energy storage technologies for sustainability systems design*. Assess. Appl. (Birinci Baskı). A.B.D.: Academic Press, 22-35.
- Kim, Y.M., Shin, D.G., Lee, S.Y. ve Favrat, D. (2013). Isothermal transcritical CO₂ cycles with TES (thermal energy storage) for electricity storage. *Energy*, 49, 484-501.
- Kuravi, S., Trahan, J., Goswami, Y., Jotshi, C., Stefanakos, E. ve Goel, N. (2013). Investigation of a High-Temperature Packed-Bed Sensible Heat Thermal Energy Storage System With Large-Sized Elements. *Journal of Solar Energy Engineering*, 135(4), 041008.
- Liu, S., Bai, H., Jiang, P., Xu, Q. ve Taghavi, M. (2022). Economic, energy and exergy assessments of a Carnot battery storage system: Comparison between with and without the use of the regenerators. *Journal of Energy Storage*, 50, 104577.
- McTigue, J. D., White, A. J. ve Markides, C. N. (2015). Parametric studies and optimisation of pumped thermal electricity storage. *Applied Energy*, 137, 800-811.
- McTigue, J. (2019). “Carnot Batteries” for Electricity Storage. Washington, D.C: *National Renewable Energy Laboratory*, 2019.
- Mekhdiev, E. T., Prokhorova, V. V., Makar, S. V., Salikhov, G. G. ve Bondarenko, A. V. (2018). Smart Cities in Future Energy System Architecture. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 8(5), 259-266.
- Mercangöz, M., Hemrle, J., Kaufmann, L., Z’Graggen, A. ve Ohler, C. (2012). Electrothermal energy storage with transcritical CO₂ cycles. *Energy*, 45(1), 407–415.
- Morandin, M., Maréchal, F., Mercangöz, M. ve Buchter, F. (2012). Conceptual design of a thermo-electrical energy storage system based on heat integration of thermodynamic cycles – Part A: Methodology and base case. *Energy*, 45(1), 375–385.
- Morandin, M., Maréchal, F., Mercangöz, M. ve Buchter, F. (2012). Conceptual design of a thermo-electrical energy storage system based on heat integration of thermodynamic cycles – Part B: Alternative system configurations. *Energy*, 45(1), 386–396.
- Ni, F. ve Caram, H. S. (2015). Analysis of pumped heat electricity storage process using exponential matrix solutions. *Applied Thermal Engineering*, 84, 34–44.
- Novotny, V., Basta, V., Smola, P. ve Spale, J. (2022). Review of Carnot Battery Technology Commercial Development. *Energies*, 15(2), 1–33.
- Okazaki, T., Shirai, Y. ve Nakamura, T. (2015). Concept study of wind power utilizing direct thermal energy conversion and thermal energy storage. *Renewable Energy*, 83, 332–338.
- Parameshwaran, R., Kalaiselvam, S., Harikrishnan, S. ve Elayaperumal, A. (2012). Sustainable thermal energy storage technologies for buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2394–2433.

- Peterson, R. B. (2011). A concept for storing utility-scale electrical energy in the form of latent heat. *Energy*, 36(10), 6098–6109.
- Pillai, A., Kaya, A., De Paepe, M. ve Lecompte, S. (2019). *Performance Analysis of an Organic Rankine Cycle for Integration in a Carnot Battery*. 5th International Seminar on ORC Power Systems. Atina, Yunanistan.
- Rindt, K., Hrdlička, F. ve Novotvy, V. (2021). Preliminary prospects of a Carnot-battery based on a supercritical CO₂ Brayton cycle. *Acta Polytechnica*, 61, 644–660.
- Roskosch, D. ve Atakan, B. (2017). Pumped heat electricity storage: potential analysis and orc requirements. *Energy Procedia*, 129, 1026–1033.
- Salem, M., Alavi, M.F., Mahariq, I. ve Accouche, O. (2021). Applications of Thermal Energy Storage in Solar Organic Rankine Cycles: A Comprehensive Review. *Frontiers in Energy Research*, 9, 1-11.
- Schmidt, R.-R., Pol, O., Basciotti, D. ve Page, J. (2012). Smart thermal networks for smart cities - Introduction of concepts and measures. *The European Physical Journal Conferences*, 33, 04002, Konferans.
- Smallbone, A., Jülch, V., Wardle, R. ve Roskilly, A. P. (2017). Levelised Cost of Storage for Pumped Heat Energy Storage in comparison with other energy storage technologies. *Energy Conversion and Management*, 152, 221–228.
- Steinmann, W. D. (2014). The CHEST (Compressed Heat Energy STorage) concept for facility scale thermo mechanical energy storage. *Energy*, 69, 543–552.
- Steinmann, W.D., Jockenhöfer, H. ve Bauer, D. (2019). Thermodynamic Analysis of High-Temperature Carnot Battery Concepts. *Energy Technology*, 8(3), 1900895.
- Steinmann, W.D., Bauer, D., Jockenhöfer, H. ve Johnson, M. (2019). Pumped thermal energy storage (PTES) as smart sector-coupling technology for heat and electricity. *Energy*, 183, 185-190.
- Thess, A. (2013). Thermodynamic Efficiency of Pumped Heat Electricity Storage. *Physical Review Letters*, 111(11), 110602.
- Valero, A., Lozano, M.A., Serra, L., Tsatsaronis, G., Pisa, J., Frangopoulos, C. ve von Spakovsky, M.R. (1994). *Energy*, 19(3), 279-286.
- Vinnemeier, P., Wirsum, M., Malpiece, D. ve Bove, R. (2016). Integration of heat pumps into thermal plants for creation of large-scale electricity storage capacities. *Applied Energy*, 184, 506–522.
- Wang, G.B. ve Zhang, X.R. (2017). Thermodynamic analysis of a novel pumped thermal energy storage system utilizing ambient thermal energy and LNG cold energy. *Energy Conversion and Management*, 148, 1248–1264.

- Wang J., Zhai, Z.J., Jing, Y. ve Zhang, C. (2010). Particle swarm optimization for redundant building cooling heating and power system. *Appl. Energy*, 87(12), 3668-3679.
- Wang L., Lin X., Chai L., Peng L., Yu D., Liu J. ve Chen H. (2019). Unbalanced mass flow rate of packed bed thermal energy storage and its influence on the Joule-Brayton based Pumped Thermal Electricity Storage. *Energy Conversion and Management*, 185, 593-602.
- Wojcik, J. ve Wang, J. (2017). Technical Feasibility Study of Thermal Energy Storage Integration into the Conventional Power Plant Cycle. *Energies*, 10(2), 205.
- White, A., Parks, G. ve Markides, C. N. (2013). Thermodynamic analysis of pumped thermal electricity storage. *Applied Thermal Engineering*, 53(2), 291-298.
- White, A., McTigue, J. ve Markides, C. (2014). Wave propagation and thermodynamic losses in packed-bed thermal reservoirs for energy storage. *Applied Energy*, 130, 648-657.
- Yu, H., Helland, H., Yu, X., Gundersen, T. ve Sin, G. (2021). Optimal design and operation of an Organic Rankine Cycle (ORC) system driven by solar energy with sensible thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, 244, 114494.
- Zamengo, M., Yoshida, K. ve Morikawa, J. (2021). Numerical evaluation of a Carnot battery system comprising a chemical heat storage/pump and a Brayton cycle. *Journal of Energy Storage*, 41, 102955.
- Zhang, H., Baeyens, J., Cáceres, G., Degrevé, J. ve Lv, Y. (2016). Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects. *Progress in Energy and Combustion Science*, 53, 1-40.
- Zhao, Y., Song, J., Liu, M., Zhao, Y., Olympios, A.V., Sapin, P., Yan, J. ve Markides, C.N. (2022). Thermo-economic assessments of pumped-thermal electricity storage systems employing sensible heat storage materials. *Renewable Energy*, 186, 431-456.



GAZİ GELECEKTİR..