
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

SÜRDÜRÜLEBİLİR BÖLGELER İÇİN KÜÇÜK MODÜLER NÜKLEER REAKTÖRLERE YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİNİN ENTEGRASYONU

Gülcan KOCA

DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2025

ETİK BEYAN

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

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

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

Gülcan KOCA
21/07/2025

SÜRDÜRÜLEBİLİR BÖLGELER İÇİN KÜÇÜK MODÜLER NÜKLEER REAKTÖRLERE YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİNİN ENTEGRASYONU

(Doktora Tezi)

Gülcan KOCA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2025

ÖZET

Bu tez çalışmasında, net sıfır karbon hedefi doğrultusunda enerji sektöründe tercih edilen yenilenebilir enerji sistemleri ile, bu hedef sürecinde önemli rol oynaması beklenen ve son yıllarda teknolojik gelişimi hız kazanan Küçük Modüler Reaktörler (SMR) entegre edilerek hibrit bir sistem incelenmiştir. Önerilen hibrit sistemde SMR, güneş ve rüzgar enerjisi ile entegre edilmiştir. Hibrit sistemin simülasyonu yapılmış ve performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Coğrafik koşullara bağlı olarak düşük kapasite kullanımı, kesintili üretim ve düşük verimlilik gibi yenilenebilir enerji sistemlerinin zayıf yönlerinin avantaja çevrilmesi ve yeni nesil SMR sistemlerinden daha verimli üretim elde edilmesi amaçlanmıştır. Dünya genelinde 80'den fazla farklı tasarımı ve çeşitli teknolojilere sahip olan IV Nesil (Gen-IV) nükleer teknolojisi olarak adlandırılan SMR'ler arasından, Çin tarafından işletmeye alınan "Yüksek Sıcaklık Gaz Soğutmalı Reaktör - Çakıl Yataklı Modül (HTR-PM)" teknolojisi, analizlerde referans sistem olarak seçilmiştir. Mevcut sistemde ısı değiştiricileri için gerekli olan ısı yüksek ve alçak basınç türbinlerinden alınan buhar ile sağlanırken, önerilen hibrit sistemde ihtiyaç duyulan buhar ısısı oluk (parabolik) kolektörler aracılığıyla sağlanmıştır. Ayrıca önerilen sistemde rüzgar türbinleri, sistemin iç enerji ihtiyacını karşılayacak şekilde tasarlanmış; rüzgar türbinlerinden elde edilen fazla üretim ise hidrojen üretiminde değerlendirilmiştir. Simülasyon ve performans analizlerinde, System Advisor Model (SAM) ve Mühendislik Eşitlik Çözücü (EES) uygulamalarından yararlanılmıştır. Önerilen sistemde türbinlerden toplam 220,25 MW güç elde edilmiştir. Mevcut SMR sistemine kıyasla; yüksek basınç türbininden 1,15 MW, alçak basınç türbininden 17,9 MW olmak üzere toplamda %8,8 oranında artışla 17,88 MW daha fazla üretim sağlanmıştır. Ayrıca rüzgar enerjisinden 17 MW üretim elde edilmiştir. Mevcut sistemin verimi %30,4 olarak hesaplanırken, önerilen hibrit sistemin verimi %36,4 olarak belirlenmiştir. Enerji ve ekserji kayıplarının en fazla olduğu bileşen yoğuşturucu olarak tespit edilmiştir. Ayrıca rüzgarın en fazla üretim yaptığı dönemde 50 m^3 hidrojen elde edilmiştir.

Bilim Kodu	:	92811
Anahtar Kelimeler	:	SMR, hibrit sistem, yenilenebilir enerji; oluk kolektör, enerji, ekserji
Sayfa Adedi	:	222
Danışman	:	Prof. Dr. Adnan SÖZEN

INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SYSTEMS INTO MODULAR NUCLEAR REACTORS FOR SUSTAINABLE REGIONS

(Ph. D. Thesis)

Gülcan KOCA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2025

ABSTRACT

In this thesis study, a hybrid system was investigated by integrating the renewable energy systems preferred in the energy sector in line with the net-zero carbon target and the Small Modular Reactors (SMR), which are expected to play an important role in this target process and whose technological development has accelerated in recent years. In the proposed hybrid system, SMR is integrated with solar and wind energy. The simulation of the hybrid system was carried out and performance analyses were conducted. It is aimed to turn the weaknesses of renewable energy systems such as low-capacity utilization, intermittent generation and low efficiency into advantages depending on the geographical conditions and to obtain more efficient generation from the new generation SMR systems. Among the SMRs called Generation-IV (Gen-IV) nuclear technology, which has more than 80 different designs and various technologies worldwide, the "High Temperature Gas Cooled Reactor - Pebble Bed Module (HTR-PM)" technology, which is put into operation by China, has been selected as the reference system in the analyses. n the existing system, the heat required for the heat exchangers is provided by steam from high- and low-pressure turbines, whereas in the proposed hybrid system, the required steam heat is supplied through parabolic trough collectors. In addition, wind turbines in the proposed system are designed to meet the internal energy (self-consumption) needs, the excess electricity generated achieved from the wind turbines is used for hydrogen production. System Advisor Model (SAM) and Engineering Equation Solver (EES) software are used in the simulation and performance analyses. In the proposed system, a total of 220.25 MW power was obtained from the turbines. Compared to the existing SMR system; 1.15 MW from the high-pressure turbine and 17.9 MW from the low-pressure turbine, a total of 17.88 MW more generation was achieved with an increase of 8.8%. In addition, 17 MW production was obtained from wind energy. While the efficiency of the existing system was calculated as 30.4%, the efficiency of the proposed hybrid system was determined as 36.4%. The component with the highest energy and exergy losses was determined as the condenser. In addition, 50 m^3 of hydrogen was obtained during the period when the wind produced the most.

Science Code	:	92811
Key Words	:	SMR, hybrid system, renewable energy; parabolic through collector, energy, exergy
Page Number	:	223
Supervisor	:	Prof. Dr. Adnan SÖZEN

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında danışman hocam olarak beni yönlendiren, desteğini esirgemeyen, tecrübesiyle tez çalışmasını şekillendirmeme yardımcı olarak en büyük katkıyı sağlayan Prof. Dr. Adnan SÖZEN'e, çok teşekkür ediyorum. Tez sürecinde, Tez İzleme Komitesinde yer alan Prof. Dr. Kurtuluş BORAN ve Prof. Dr. Şule ERGÜN hocalarıma verdikleri destek, katkı ve emekleri için teşekkür ederim. Tezin derinlik kazanmasına katkı veren ve ayrıca makale sürecinde emeğini ve desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. İbrahim DİNÇER'e ve tecrübesini paylaşan Prof. Dr. Mustafa Zeki YILMAZOĞLU'na teşekkür ederim.

Tez çalışma süresince bilgisayar ve uygulamaları konusunda emeğini ve desteğini esirgemeyen; EÜAŞ Termik Santrallar Dairesi Jeoloji Mühendisi Bilge YALÇIN'a, EÜAŞ Termik Santrallar Dairesi Jeoloji Mühendisi İlknur DİLMAÇ'a, Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi'nden Dr. Öğr. Üyesi Fatih SORGULU'ya teşekkür ederim.

Ve en büyük teşekkür anne ve babama. Tariflenemez, açıklanamaz, anlatılamaz. Ne desem az. Sonsuz teşekkürümü; beni yetiştiren anne ve babama, aile kavramını en iyi şekilde yaşatan kardeşlerime ediyorum. İyi ki varsınız.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ xi

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xii

RESİMLERİN LİSTESİ xiv

HARİTALARIN LİSTESİ xv

SİMGELER VE KISALTMALAR xvi

1. GİRİŞ 1

2. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ SORUNU VE MÜCADELE SÜRECİ 7

2.1. İklimi Anlama ve İzleme Dönemi 7

2.2. Birleşmiş Milletler Faaliyetleri 9

2.3. Avrupa Birliği – Avrupa Yeşil Mutabakatı Süreci 12

2.3.1. Nötr-iklim Avrupa 14

2.3.2. Temiz ve döngüsel ekonomi 15

2.3.3. İnşaat ve bina yenileme 15

2.3.4. Tarladan sofraya 16

2.3.5. Sıfır kirlilik 16

2.3.6. Ekosistem ve biyo çeşitliliğin korunması 17

2.3.7. Ulaşım 17

2.3.8. Finans 17

2.3.9. AR-GE ve inovasyon 19

Sayfa

2.3.10. Dış ilişkiler 20
2.4. Kömür Tüketen Ülke Politikaları 20
2.4.1. Almanya 21
2.4.2. Çin 26
2.4.3. Hindistan 29
2.4.4. Polonya 32
3. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI 37
3.1. Güneş Enerjisi ve Teknolojileri 37
3.1.1. Güneş pilleri (Fotovoltaik-PV) 39
3.1.2. Yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemleri 39
3.2. Rüzgar Enerjisi ve Teknolojileri (Kara ve Deniz üstü) 44
3.3. Jeotermal Enerjisi ve Teknolojileri 49
3.4. Biyokütle Enerjisi ve Teknolojileri 49
3.5. Hidroelektrik Sistemler ve Teknolojileri 51
3.6. Deniz Enerjisi (Dalga, Akıntı, Gel-git) 53
3.7. Hidrojen: Enerji Taşıyıcısı 53
3.7.1. Hidrojen üretiminde kullanılan yöntemler 54
3.7.2. Elektroliz 57
3.7.3. Hidrojen üretim teknolojileri 58
4. NÜKLEER ENERJİ VE TEKNOLOJİLERİ 63
4.1. Nükleer Enerji Tarihi 63
4.2. Nükleer Teknolojide Nesil Kavramı 64
4.3. Nükleer Santral ve Bileşenleri 65
4.4. Büyük Ölçekli Nükleer Santrallar 70

Sayfa

4.4.1. Basınçlı su seaktörü (PWR ve VVER) 70
4.4.2. Kaynar su reaktörü (BWR) 73
4.4.3. Ağır su reaktörü (PHWR, Candu) 74
4.4.4. Gelişmiş gaz soğutmalı reaktör (MAGNOX-AGR) 75
4.4.5. Hafif su grafit yavaşlatıcılı reaktörü (RBMK) 76
4.4.6. Hızlı nötron reaktör 76
4.5. Küçük Modüler Reaktörler ve Teknolojileri 76
4.5.1. Hafif su soğutmalı SMR 78
4.5.2. Yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktör (HTR) 78
4.5.3. Hızlı nötron reaktörü 80
4.5.4. Ergimiş tuz reaktörü (MSR) 80
4.6. Mikro reaktör 81
5. TÜRKİYE'DE VE DÜNYA'DA ENERJİ ÜRETİMİ 83
5.1. Türkiye'de Elektrik Üretim Gelişim Tarihçesi 83
5.2. Enerji Sektöründe Yer Alan Kamu Kurum ve Kuruluşlar 84
5.3. Türkiye'de Nükleer Santral Gelişimi 87
5.4. Türkiye'de Elektrik Üretim Güncel Durum 89
5.5. Dünya'da Mevcut Enerji Durumu 93
6. SİSTEM ÖNERİSİ VE METODOLOJİ 97
6.1. Hibrit Sistem 97
6.2. Önerilen Sistem 97
6.3. Saha Seçimi 101
6.3.1. Güneş enerjisi için yer seçimi 101
6.3.2. Rüzgar enerjisi ve yer seçimi 106

Sayfa

6.3.3. SMR teknolojisi için yer seçimi 108
6.4. SMR İçin Önerilen HTR-PM Özellikleri 110
6.5. Metodoloji 111
6.5.1. SAM uygulaması 113
6.5.2. EES uygulaması 123
7. KULLANILAN TERMODİNAMİK EŞİTLİKLER 127
7.1. Termodinamik Temel Tanımlar 127
7.2. Termodinamik I. Yasası 129
7.3. Termodinamik II. Yasası 136
7.4. Rüzgar Enerjisi Kapasite faktörü 148
7.5. Hidrojen Üretimi 148
8. ANALİZLER VE SONUÇLARI 153
8.1. SMR (HTR-PM) Sistemin Kütle ve Enerji Dengesi 153
8.2. Önerilen NYHES SAM Simülasyonu 158
8.3. Önerilen NYHES Kütle-Enerji Dengesi 160
8.4. Önerilen NYHES Ekserji Analizi 171
8.4.1. Su-buhar hattı ekserji analizi 172
8.4.2. Kolektör ekserji analizi 176
8.4.3. Ana ekipman ekserji kayıpları 180
8.4.4. Önerilen NYHES Termodinamik II. Yasa verimi 181
8.5. Rüzgar Enerjisi Analizi 186
8.6. Hidrojen Üretim Analizi 186
8.7. Karbon Salımı 186
9. SONUÇ VE ÖNERİLER 189

Sayfa

KAYNAKLAR 195

EKLER 211

EK-1. Paris Anlaşması Önemli Maddeleri 212

EK-2. Avrupa Yeşil Mutabakatı için Alınan Kararlar 213

EK-3. PWR Reaktör Teknolojisi Ekipmanı 215

EK-4. Elektroliz Gelişimi 216

EK-5. Therminol-66 ısı aktarma akışkanın sıcaklıklara göre sıvı özellikleri 218

EK-6. Termodinamik kanunların genel özeti 220

ÖZGEÇMİŞ 221

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Dünya kömür rezervi en yüksek yirmi ülke (2022 yılı) 23

Çizelge 3.1. Hidrojen üretim yöntemleri 56

Çizelge 3.2. Su elektroliz yöntemlerinin özellikleri..... 59

Çizelge 3.3. Teknolojiye göre toplam kurulu elektroliz kapasitesi (2019-2030) 62

Çizelge 5.1. Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklara göre dağılımı (2023)... 91

Çizelge 5.2. Türkiye elektrik üretiminin birincil enerji kaynaklarına göre dağlımı..... 92

Çizelge 6.1. Global Solar Sistem'den elde edilen Çanakkale Ayvacık saha özellikleri 106

Çizelge 6.2. HTR-PM reaktör temel özellikleri) 111

Çizelge 7.1. Yenilenebilir olan ve olmayan enerji kaynakları ile 1 kg hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı 151

Çizelge 8.1. HTR-PM sistemi ekipman kütle ve enerji denge eşitliği 153

Çizelge 8.2. Mevcut HTR-PM sistemin elde edilen enerji ve ısı kayıpları..... 155

Çizelge 8.3. HTR-PM için kütle ve enerji değerleri..... 156

Çizelge 8.4. Önerilen NYHES sistemi ekipman kütle ve enerji denge eşitliği 161

Çizelge 8.5. Önerilen sistemin (NYHES) EES sonuçları 163

Çizelge 8.6. Önerilen NYHES için kütle ve enerji denge değerleri 164

Çizelge 8.7. Önerilen NYHES bileşenleri toplam enerji giriş-çıkış ile enerji kayıp değeri 165

Çizelge 8.8. Önerilen NYHES bileşenleri fiziksel ve kimyasal ekserji değerleri 179

Çizelge 8.9. Önerilen NYHES için ekserji sonuçları 184

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Avrupa Yeşil Mutabakat unsurları 14
Şekil 2.2. Almanya toplam enerji tedariği kaynakları 2022 yılı 24
Şekil 2.3. Almanya 2022 yılı elektrik üretimin kaynaklara göre dağılımı 24
Şekil 2.4. Toplam elektrik üretimde kömür kullanma oranı en yüksek ilk 20 ülke 25
Şekil 2.5. 2023 yılı elektrik üretimde kömür kaynağının oranı 25
Şekil 2.6. Çin'in kaynaklara göre toplan enerji tedariği 2021 yılı 28
Şekil 2.7. Çin 2023 yılı kaynaklara göre elektrik üretimi 28
Şekil 2.8. Hindistan kaynaklara toplan enerji tedariği 2021 yılı 31
Şekil 2.9 Hindistan 2023 yılı kaynaklara göre elektrik üretimi 31
Şekil 2.10. Polonya kaynaklara göre toplam enerji tedariği 2022 yılı 33
Şekil 2.11. Polonya 2023 yılı elektrik üretimin kaynaklara göre dağılımı 33
Şekil 3.1. Güneş enerji sistemlerinin sınıflandırılması 38
Şekil 3.2. Güneş kulesi sistemi 43
Şekil 3.3. Rüzgarın, türbin kanatlarına gelişi ve çıkışı 44
Şekil 3.4. Rüzgar türbin çeşitlerinin güç katsayısına göre uç hız oranının değişimi 46
Şekil 3.5. 7 MW kapasiteli bir rüzgar türbini için hız-güç eğrisi 47
Şekil 3.6. Güç, yükseklik ve kanat süpürme genişliklerinin yıllara göre gelişimi 47
Şekil 3.7. Bir su elektroliz sistemindeki temel ekipman 57
Şekil 5.1. Elektrik üretiminde Türkiye kurulu güç gelişimi (1973-2023) 90
Şekil 5.2. Türkiye kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı 90
Şekil 5.3. Türkiye elektrik üretiminin kaynaklara göre dağlımı 92
Şekil 5.4. Dünya elektrik üretiminin kaynaklara göre dağlımı 94
Şekil 5.5. Dünyada işletmede olan reaktörlerin tip sayısı ve toplam elektrik üretim 94

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.6. Dünyada inşaat halindeki reaktörlerin ülkelere göre sayısı 95

Şekil 5.7. Dünyada inşaat halindeki reaktörlerin tiplerine göre sayısı 95

Şekil 6.1. HTR-PM su-buhar çevrimi 100

Şekil 6.2. Önerilen sistem için su buhar çevrimi 100

Şekil 6.3. Rüzgar türbin kanatlarını etkileyen özellikler 107

Şekil 6.4. Rüzgar türbini güç eğrisi (tasarıma bağlı olarak) 107

Şekil 7.1. Termodinamik analizlerinde sistem, sınır ve çevre ilişkisi 127

Şekil 7.2. Ölü hal durumu: Bir sistem ile çevresi dengededir. 128

Şekil 7.3. Türbin ve pompa için izantropik ve gerçek durum 136

Şekil 7.4. Bir elektroliz veya yakıt hücresinin voltaj-akım yapısı 150

Şekil 8.1. Önerilen NYHES için SAM simülasyon sonucu yıllık AC enerji miktarı ... 159

Şekil 8.2. Önerilen NYHES için SAM simülasyon sonucu AC enerjinin aylara göre dağılımı 159

Şekil 8.3. Önerilen NYHES için SAM simülasyon sonucu üretilen enerji (kW) ay-saat 160

Şekil 8.4. Önerilen NYHES bileşenleri enerji değerleri 166

Şekil 8.5. Önerilen NYHES'de SMR enerji üretiminin dağılımı 166

Şekil 8.6. Önerilen NYHES içindeki oluk kolektör alıcı çevresindeki sıcaklıklar 169

Şekil 8.7. Önerilen NYHES bileşenleri ait ekserji giri-çıkış değerleri 185

Şekil 8.8. Önerilen NHYES bileşenlerine ait ekserji kayıp değeri 185

Şekil 8.9. Enerji üretim kaynaklarına göre eşdeğer CO2 emisyon değerleri 187

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Keeling eğrisi 9

Resim 2.2. Dünya kömür tüketimi (1978-2020) 21

Resim 3.1. Güneş pili şematik görünümü 39

Resim 3.2. Güneş oluk kolektörü (Kaliforniya, ABD) 40

Resim 3.3. Güneş oluk kolektör ekipmanı 41

Resim 3.4. Fresnel ayna güneş kolektör ekipmanı 41

Resim 3.5. Çanak tipi güneş kolektörü 42

Resim 3.6. Güneş Kulesi ABD, Nevada, Crescent Dunes Güneş Enerji Santralı..... 43

Resim 3.7. Rüzgar türbini ana parçaları..... 48

Resim 3.8. Hidroelektrik santralı ana bileşenleri 52

Resim 3.9. Hidroelektrik santralında kullanılan Pelton ve Francis türbinlerinin şematik görünümü..... 52

Resim 3.10. Denizaltına kurulan bir türbin..... 53

Resim 3.11. Bir elektroliz ünitesi (temsili gösterim)..... 57

Resim 3.12. Bir elektroliz ünitesinin çalışma prensibi 58

Resim 3.13. Elektroliz yöntemleri ve oluşan reaksiyon farklılıkları 61

Resim 4.1. Bir nükleer santrala ait koruma kabı..... 66

Resim 4.2. Reaktör basınçlı kabı genel görünümü 66

Resim 4.3. Nükleer yakıt demetinin genel ve iç görünümü..... 67

Resim 4.4. Nükleer santral buhar üreteci genel ve iç görünümü 69

Resim 4.5. PWR Reaktör tasarım çevrimleri ve işleyişi..... 71

Resim 4.6. PWR reaktör tasarımın genel görünümü ve bileşenleri 71

Resim 4.7. VVER reaktör tasarımın genel görünümü ve bileşenleri..... 72

Resim 4.8. BWR Reaktör tasarımın genel görünümü ve yapısı 73

Resim **Sayfa**

Resim 4.9. BWR Reaktör tasarımın genel görünümü ve bileşenleri 73

Resim 4.10. Ağır su Reaktör tasarımın genel görünümü ve yapısı 74

Resim 4.11. Gaz soğutmalı bir reaktör tasarımın genel görünümü ve bileşenleri 75

Resim 4.12. Bir SMR tasarımın genel görünümü ve yapısı 78

Resim 4.13. HTR reaktör tasarımında kullanılan TRISO yakıtın görünümü 79

Resim 4.14. HTR-PM tasarımın genel görünümü ve ana ekipmanı 80

Resim 6.1. Yoğuşturucunun iç yapısı genel görünümü 101

Resim 6.2. Enez civarı aday saha özellikleri 103

Resim 6.3. Çanakkale Kumkale civarı aday saha özellikleri 103

Resim 6.4. Bursa Karacabey aday saha özellikleri 104

Resim 6.5. Önerilen NYHES sistemi için belirlenen saha Çanakkale Ayvacık 104

Resim 6.6. Önerilen NYHES sistemi için belirlenen saha Çanakkale Ayvacık (uydu) . 105

Resim 6.7. Önerilen NYHES için belirlenen Çanakkale Ayvacık saha ekran görüntüsü..... 105

Resim 6.8. Çanakkale Ayvacık sahasının güneş azimut açı değeri 106

Resim 6.9. Çanakkale Ayvacık civarında seçilen saha için rüzgar değerleri 108

Resim 6.10. Önerilen NYHES sistemi için SAM programı ekran görüntüsü 113

Resim 6.11. NREL tarafından sunulan güneş radyasyon veri tabının ekran görüntüsü 114

Resim 6.12. SAM uygulaması “yer ve kaynak” veri sayfası ekran görüntüsü 115

Resim 6.13. SAM uygulaması “sistem tasarım” veri sayfası ekran görüntüsü 116

Resim 6.14. SAM uygulaması “güneş alanı” veri sayfası ekran görüntüsü 117

Resim 6.15. Güneş alanında (kolektör alanı) her bir döngü yerleşim planı 117

Resim 6.16. Güneş alanının (kolektör alanı) yerleşimi..... 118

Resim 6.17. Terminol-66 ısı aktarım sıvısı asgari ve azami çalışma sıcaklık değeri 119

Resim 6.18. SAM uygulaması “kolektör” veri sayfası ekran görüntüsü 119

Resim **Sayfa**

Resim 6.19. ABD'de tesis edilmiş oluk kolektör uygulaması 120

Resim 6.20. Oluk kolektör sisteminin genel yapısı 120

Resim 6.21. SAM uygulaması "alıcı tüp" veri sayfası ekran görüntüsü 121

Resim 6.22. Oluk kolektörde kullanılan bir alıcı tüpün yapısı ve modelleri 121

Resim 6.23. SAM uygulaması "güç çevrimi" veri sayfası ekran görüntüsü ve kondenser hava soğutmalı olduğunda elde edilen grafik..... 122

Resim 6.24. SAM uygulaması "termal depolama" veri sayfası ekran görüntüsü..... 123

Resim 6.25. EES uygulaması termodinamik hesaplama fonksiyon seçim ekranı 124

HARİTALARIN LİSTESİ

Harita **Sayfa**

Harita 2.1. Almanya bulunduğu bölge 22

Harita 2.2. Çin bulunduğu bölge 27

Harita 2.3. Hindistan bulunduğu bölge 29

Harita 2.4. Polonya bulunduğu bölge 32

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A	Alan
°C	Santigrat
C	Özgül ısı
db	Desibel
E	Enerji
Ex	Ekserji
GW	GigaWatt
hz	Hertz
m	Kütle / debi
mg	Kütle girişi
mç	Kütle çıkışı
m²	Metrekare
h	Entalpi
kcal/h	Kilokalori/saat
kg/s	Kilogram/saniye
kJ/h	Kilojoule/saat
kPa	KiloPaskal
kWh	Kilowattsaat
MPa	MegaPaskal
MW	MegaWatt
MWe	Megawatt elektrik
MWp	Megawatt güneş
MWt	Megawatt termal
ηth	Termal verimlilik
Q	Isı
W	sitemde yapılan iş
ΔT	Sıcaklık farkı

Kısaltmalar	Açıklamalar
AB	Avrupa Birliği
ABT	Alçak basınç türbini
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AID	Alt ısıl değer
Ar-Ge	Araştırma -Geliştirme
BM	Birleşmiş Milletler
BWR	Basınçlı su reaktörü
CO_2	Karbondioksit
COP	Taraflar konferansı
CSP	Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi
Cu-Cl	Bakır-klor
DNI	Doğrudan normal ışınım
DOE	ABD Enerji Kurumu
Eç	Enerji çıkışı
Eg	Enerji girişi
EES	Mühendislik eşitlik çözücü
EGD	Avrupa
EIB	Avrupa Yatırım Bankası
EİEİ	Elektrik İşleri Etüt İdaresi
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
EPİAŞ	Enerji Piyasaları İşletme A.Ş
EPRI	Elektrik Enerjisi Araştırma Enstitüsü
EÜAŞ	Elektrik Üretim Anonim Şirketi
F	Fahrenhayt
FBR	Hızlı üretken reaktör
GA	Genetik algoritma
GCR	Gaz soğutmalı reaktör
Gen-IV	IV. Nesil
GHG	Sera gazları
GIF	Gen-IV Uluslararası Forum
H_2	Hidrojen
HES	Hibrit enerji sistemi

Kısaltmalar	Açıklamalar
HGA	Ev sahibi ülke anlaşması
HTF	Isı aktarma akışkanı
HTR PM	Yüksek Sıcaklık Gaz Soğutmalı Reaktör-Çakıl Yataklı Modül
IAEA	Uluslararası Atom Enerji Ajansı
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
IGA	Hükümetlerarası Antlaşma
IMF	Uluslararası para fonu
IPCC	Hükümetlerarası iklim değişikliği paneli
KCl-$MgCl_2$	Potasyum klor magnezyum klor
KNO_3	Potasyum nitrat
LCOE	İndirgenmiş elektrik maliyeti
LiF-NaF-KF	Lityum florit -Sodyum florit -Potasyum florit
LWGR	Grafit yavaşlatıcılı su soğutmalı reaktörler
MSR	Ergiyik tuz reaktörü
NaNO3	Sodyum nitrat
NDC	Ulusal Katkı Beyanı
NDK	Nükleer Düzenleme Kurumu
NECP	Ulusal enerji ve iklim planları
NHES	Nükleer hibrit sistem
NÜTED	Nükleer Teknik Destek AŞ
NYHES	Nükleer-yenilenebilir hibrit enerji sistemleri
NREL	Ulusal yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (ABD)
PEM	Proton değişim membranlı
PTC	Oluk kolektör
PWHR/Candu	Basınçlı ağır su reaktörü
PWR	Basınçlı su reaktörü
PV	Foto-voltaik (Photo voltoic)
RMBK	Hafif su grafit yavaşlatıcılı reaktörü
SAM	System Advisor Model
SMR	Küçük modüler reaktör
TAEK	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
TBMM	Türkiye Büyük Millet Meclisi

Kısaltmalar	Açıklamalar
TEAŞ	Türkiye Elektrik Üretim ve İletim A.Ş.
TEDAŞ	Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş.
TEK	Türkiye Elektrik Kurumu
TENMAK	Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu
TETAŞ	Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt Anonim Şirketi
TÜNAŞ	Türkiye Nükleer Enerji A.Ş.
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim AŞ
U-235/238	Uranyum
UNEP	BM Çevre Programı
UNFCCC	BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
VVER	Rus tipi basınçlı su reaktörü
WMO	Dünya Meteoroloji Örgütü
YBT	Yüksek basınç türbini

1. GİRİŞ

Yaşamın varoluşundan itibaren, coğrafi ve iklim koşulları doğrultusunda, insanın beslenmeden barınmaya birçok alanda temel ihtiyaçlarını karşılaması için gerekli olan "enerji", medeniyetlerin şekillenmesinde belirleyici olan en kritik unsurlardan biri olmuştur. İlk çağlarda basit araçlarla karşılanan enerji ihtiyacı, zamanla artan nüfus ve gelişen yaşam koşulları ile birlikte daha karmaşık ve büyük ölçekli sistemlere evrilmiştir. Bu dönüşümün en belirgin adımı, 18. yüzyılda başlayan Sanayi Devrimi ile atılmış; bu dönemde enerji, yalnızca bir ihtiyaç değil, aynı zamanda kalkınmanın temel itici gücü haline gelmiştir. Sanayileşme ve teknolojinin hızlı gelişimi, enerjiyi vazgeçilmez kılmıştır. Artan enerji talebiyle, kaynağına bakılmaksızın sadece enerji üretimi öncelik haline gelmiş; binalardan tarımsal faaliyetlere kadar sınırsız kaynak kullanımı, yaşamı etkileyen yeni bir kavramın ortaya çıkmasına neden olmuştur: "İklim Değişikliği".

İklim değişikliği:

Dünyanın var oluşu ile birlikte gerçekleşmeye başladığı düşünülse de genel olarak sanayi devrimi ile birlikte oluşmaya ve zamanla artış gösterdiği kabul gören iklim değişikliği, dünyayı ve tüm canlıları etkileyen bir sorun olduğu belirlenince, 1990'lı yıllardan itibaren Birleşmiş Milletler (BM) gibi resmi ve önemli bir konuma sahip kurumlar tarafından farklı platform ve etkinliklerde ele alınarak tartışılmaya başlanmıştır. Yürütülen araştırmalar ve incelemeler sonucunda, atmosferi bir örtü ile kaplayarak sera görevi yapan ve bu nedenle dünyanın daha fazla ısınmasına neden olarak iklim değişikliğine sebebiyet veren gazlar belirlenmiştir. Karbondioksit (CO_2), metan, azot oksitler ve su buharı gibi gazlar "sera gazları" olarak adlandırılmış ve oluşturdukları etkiye de "sera etkisi" denilmiştir. Sera gazları içinde en yoğun etkiyi yaptığı kabul edilen karbon, yaygın bir şekilde kullanılan bir terim olmuş ve istenmeyen madde ilan edilmiştir. Karbonun ağırlıklı olarak fosil yakıt içerisinde yer almasından dolayı fosil yakıt kullanılarak enerji üreten sistemler de istenmeyen sistemler olmuştur.

En az veya hiç sera etkisi yapmayan; rüzgar, güneş, jeotermal, hidrolik ve biyogaz gibi enerji kaynakları, "Yenilenebilir Enerji Kaynakları" olarak tanımlanmış ve bu kaynakların kullanımı ile enerji üretilmesinin yaygınlaştırılması için çaba sarf edilmesi ve teşvik edilmesi

benimsenmiştir. Ancak yenilenebilir enerji sistemleri ile üretilen enerji miktarı, talep edilen ihtiyacı tam olarak karşılayacak kapasitede ve verimlilikte olmadığı görülmüştür. Bu nedenle, enerji ihtiyacının karşılanması için çevreye ve atmosfere en az zararlı enerji sistemleri, "Temiz Enerji" olarak literatürde yerini almıştır. Bu kapsamda nükleer ve doğalgaz kaynakları öne çıkmıştır. Gelişmiş ülkelerin enerji üretim sistemlerinde önemli rol oynayan nükleer santrallar, enerji talebine zamanında ve kalitesinde en iyi cevap veren sistemler olarak kabul görmüştür. Nükleer enerji sistemleri, kullanım kapasitesi yönünden çok tercih edilmesine rağmen güvenlik kriterinden dolayı yüksek yapım maliyetine neden olduğundan yaygın olarak uygulanamamaktadır. Yapım aşaması uzun süren ve maliyetli olan büyük nükleer enerji sistemlerine alternatif olarak birçok ekipmanı fabrikada üretilerek hazır halde montaj edilen "Küçük Modüler Reaktörlerin (Small Modular Reactor, SMR)", yapılması son yıllarda artış göstermiştir.

Temiz enerji alanındaki gelişmelerle birlikte birçok ülke, enerji üretiminde sürdürülebilir kaynaklara yönelmekte ve bu doğrultuda planlamalarını güncellemektedir. Enerji üretiminde ve sanayide kullanılan fosil yakıtlı sistemlerin bir gecede değiştirilemeyeceği için, 2050 yılı net-sıfır karbon[1] hedefi kapsamında, 2030 yılına kadar gerekli değişimlerin yapılması gerektiği anlaşılmıştır. Bu durum "enerji geçişi" denilen bir süreci başlatmıştır. Enerji Geçişi süreci, karbon salımı yoğun olan mevcut sistemlerden uzaklaşılmasını, mümkünse kapatılmasını ve yerine temiz enerji sistemlerinin ikame edilmesini belirtir ancak, kısa sürede olamayacak kadar hem teknik hem mali açıdan zor bir süreçtir. Sadece yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile net-sıfır karbon hedefi sağlanır gibi görünse de özellikle enerji talebini zamanında ve kalitesinde karşılanması mümkün görünmemektedir. Bu nedenle, enerjiye olan talep her geçen gün artarak devam ettiğinden, yenilenebilir ve kapasite kullanımı yüksek olan temiz enerji sistemlerinin birlikte veya diğer enerji sistemleri ile birlikte uygulanmasına imkan veren hibrit sistemler bu noktada kendine yer bulmuştur.

Hibrit enerji sistemleri, farklı enerji kaynaklarını bir araya getiren ve kaynakların kullanımında en verimli ve en optimum yolu seçen bir entegre uygulama olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, atık ısı gibi enerji israfı, tekrar faydalı enerjiye dönüştürülürken iklim değişikliği mücadelesinde önemli rol oynanacağı düşünülen enerji

[1] Net-sıfır karbondioksit (CO_2) emisyonları, belirli bir süre boyunca insan kaynaklı CO_2 emisyonlarının küresel olarak insan kaynaklı CO_2 giderilmesi sonucu elde edilen dengeleme durumunu ifade eder. Net-sıfır CO_2 emisyonları aynı zamanda karbon nötrlüğü olarak da adlandırılır [20].

geçiş kaynağı olan hidrojenin (H_2) farklı sanayi alanında kullanılmasına imkan vereceği öngörülmektedir. Hidrojenin kullanımıyla mevcut teknolojinin daha verimli bir şekle evrilmesine ve özellikle enerji depolanmasına katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Literatür taraması:

Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Enerji Kurumu Idaho Ulusal Laboratuvarı tarafından 2013 yılında hazırlanan raporda, ergimiş tuz nükleer reaktörü ile yenilenebilir enerji sistemleri hem elektrik üretmek hem de fazla enerjiyi depolamak amacıyla birlikte incelenmiştir. Reaktörden elde edilen elektrik üretiminde, Rankine, Brayton ve Air-Brayton olmak üzere üç farklı çevrim analiz edilmiştir. Ergimiş tuz olarak; LiF-NaF-KF, KF-ZrF4 ve KCl-MgCl2 tuzları kullanılması durumuna göre analiz yapılmıştır. Hibrit sistemle, yoğun olmayan saatlerde üretilen fazla enerjiyi depolamak, çok değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu mümkün kılmak ve şebeke talep dalgalanmalarını stabilize etmek üzere araştırma yapılmıştır [1]. Norouzi ve arkadaşları çalışmalarında, hidrojen buhar metan modifikasyonunda kullanmak üzere sodyum soğutmalı hızlı reaktör (SMR) teknolojilerinin kullanılmasını önermiştir. Tasarlanan sistemde, yüksek sıcaklık reaktöründen (HTR) elde edilen buhar ile hem elektrik üretilmiş hem de H_2 üretiminde kullanılarak doğal gazdan %25 tasarruf edilmiştir [2].

M. Temiz ve İ. Dinçer çalışmalarında; içme suyu, hidrojen ve elektrik üretmek amacıyla 75 MWp çift yüzeyli PV güneş enerjisi ile 2x10 MWt HTR-10 tipi çakıl yataklı nükleer reaktörü hibrit olarak tasarladığı ve 72 MWe kapasiteli yüksek sıcaklık katı oksit elektroliz (SOE) ünitesi ile birleştirildiği entegre bir sistemi incelemişlerdir. Tasarlanan sistemin ekserji değerleri hesaplanarak enerji verimliği değerlendirilmiştir [3]. M. Al-Zareer, İ. Dinçer ve M. A. Rosen; IV. Nesil gaz soğutmalı hızlı nükleer reaktörü, elektrik ve H_2 üretimi için termo- elektrokimyasal bakır-klor çevrimi, Brayton ve Rankine çevrimi şeklinde kavramsal entegrasyonunu önermiş ve değerlendirmişlerdir. Termo-elektrokimyasal bakır-klor çevrimi vasıtasıyla termokimyasal su ayrışması yoluyla H_2 üretilirken, Rankine (buhar türbini) ve Brayton (gaz türbini) çevrimi aracılığıyla elektrik üretilmektedir. Önerilen sistem simüle edilmiş ve performans analizi yürütülmüştür [4]. T. Kowalczyk ve arkadaşları, çalışmalarında; elektrik ve H_2 üretimi amacıyla, yüksek sıcaklıklı nükleer reaktör ile katı oksitli bir hidroliz sistemi entegrasyonu analiz etmişlerdir. Nükleer reaktörlerin işletme esnekliğini ve karlılığını artırmanın yanı sıra H_2 piyasasındaki gelişmeler nedeniyle yapılan

incelemede, ayrık sistemlerden ziyade birleşik sistemlerin daha esnek ve çevre açısından daha uygun olduğu kanaatine varılmıştır [5]. A Pirmohamadi ve arkadaşları; güvenlik ve daha yüksek termal verimlilik gibi önemli unsurlardan dolayı Azot- Brayton çevrimli sodyum soğutmalı hızlı reaktörler (SFR'ler) ile dip çevrimleri kullanan Kalina ve ısı pompası çevrimlerini birlikte öneren çalışmalarında; önerilen sistemin güvenilirliğini incelemek için enerji, ekserji ve eksergenomik analizler yapmışlardır. Kalina çevrimindeki temel amonyak konsantrasyonu, türbin genleşme oranı ve düşük basınçlı kompresör basınç oranı gibi farklı optimum çalışma koşullarında genel çevrimin temel özelliklerindeki değişikliklerin etkisinin araştırılması yürütülmüştür [6].

Ho ve arkadaşları., küçük modüler nükleer reaktör ile büyük ölçekli H_2 depolama sistemini entegre ederek oluşturdukları yeni bir kontrol şeklini analiz etmişlerdir. Oluşturulan sistemde, SMR'da üretilen elektriğin bir kısmı şebekeye bir kısmı ise H_2 üretimi için elektroliz tesisine verilmektedir. Hidrojen, tuz mağarasında depolanıp sonrasında gaz santralında yine elektriğe dönüştürülmektedir. NHES, fiyat düşükken enerji depolayabilir ve fiyat yüksek olduğunda fazladan elektrik satabilir ve yan hizmetler piyasasına katılım sağlayabilir olduğu belirtilmiştir [7]. Abdussamia ve arkadaşları çalışmalarında; orta/büyük ölçekli şebekeden bağımsız enerji sistemlerinin esnek çalışmasının sürekli ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına bağlı oldukları görüşünü baz alarak nükleer-yenilenebilir entegre sistemin, potansiyel bir enerji ağı olabileceğini incelemişlerdir. Bu doğrultuda, Nükleer-Yenilenebilir-Mikro-Hibrit Enerji Sisteminin (N-R MHES) optimal planlaması için, a) Doğrudan Birleştirme, b) Tek Kaynak ve Çoklu Ürüne Dayalı Birleştirme, c) Çoklu Kaynaklar ve Çoklu Ürünlere Dayalı Birleştirme olmak üzere üç yöntem üzerinden analiz yürütmüşlerdir. Optimizasyon probleminin amacı, en düşük net bugünkü maliyeti elde etmektir. Bu araştırma şebekeden bağımsız uygulamalar için esnek N-R MHES olasılığına odaklanmıştır [8].

Sun ve ark., kurşun-bizmut ötektik reaktörünü içeren nükleer enerji ile rüzgar enerjisini entegre eden hibrit bir sistemle rüzgar enerjisi kullanımını artırarak temiz enerji üretimini sağlamak ve böylece Çin'in enerji arzını karşılamayı amaçlamışlardır. Çalışmada reaktörün teknik uygulanabilirliği gösterilmiş ve hibrit enerji sistemine (HES) dair ön analiz gerçekleştirilmiştir [9]. Zhao ve ark., güneş ve nükleer enerjiyi birleştiren kavramsal bir HES tasarımı önermiştir. Hibrit istemde, ticarileşmiş ergimiş tuz yoğunlaştırılmış güneş kule santralı ile küçük modüler reaktör (SMR) birlikte parametrik çalışması tamamlanmıştır.

Enerji talebi olduğunda, karbon salımı olmadan verimli şekilde enerjinin karşılandığı belirlenmiştir [10]. Borissova, SMR ve kule tipi CSP güneş enerjisi santralinden oluşan bir HES'i analiz etmiştir. SMR'den alınan buhar, güneş enerjisi sistemi ile ısıtılarak yüksek basınç türbinine gönderilmiş, ardından yeniden kızdırılarak düşük basınç türbinine yönlendirilmiştir [11]. Son ve ark., CSP güneş enerjisi, enerji depolama ve mikro modüler reaktör (MMR) teknolojili nükleer enerjiden oluşan bir HES'in indirgenmiş elektrik üretim maliyetini (LCOE) incelemiştir. Önerilen HES'in, yalnız başına CSP sistemine kıyasla maliyet açısından rekabetçi olduğu ve nükleer-CSP hibrit sisteminin izole mikro şebekelerde kullanılabilecek yüksek potansiyelli bir enerji kaynağı olarak değerlendirilebileceği belirtilmiştir [12].

Gabbar ve Siddique, hızlı şarj uygulamaları için nükleer ve yenilenebilir enerji kaynaklarının oluşturduğu hibrit bir sistemi değerlendirmiştir. Bu hibrit sistem, çeşitli enerji sistemleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada sera gazı emisyonları, enerji maliyetleri, net bugünkü maliyet ve yatırım getirisi gibi parametreler dikkate alınarak sistemin uygulanabilirliği değerlendirilmiştir [13]. Bamshad ve Safarzadeh, nükleer ve yenilenebilir enerji kaynakları ile entegre edilen bir HES için belirsizlik ve duyarlılık analizleri gerçekleştirmiştir. Karbonsuz enerji üretimine potansiyel bir aday olan sistemde; üretim kapasitesinin artırılması planlaması, en düşük maliyet, minimum zararlı emisyon, maksimum verimlilik ve en düşük yük kaybı olasılığı incelenmiştir[14]. Redfoot ve ark., nükleer enerji santrali ile birlikte rüzgar, güneş enerjisi ve batarya depolama sistemlerinin yanı sıra fosil yakıtlı santralin de yer aldığı bir sitemi analiz etmiştir. Çalışmada, endüstriyel bileşenlerin ön tasarım değerlendirilmesine yönelik bir yöntem geliştirilmesi hedeflenmiş ve bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi ile risk değerlendirme yapılmıştır[15].

Norouzi ve arkadaşları, 3000 kW kapasiteli bir SMR santralının oluk güneş kolektörü ve PCM (faz değişim malzemesi) enerji depolama sistemi ile birlikte içme suyu, enerji, ısı ve kimyasal üretimi ile dörtlü bir üretim tesisini optimize etmiş ve maliyet tahmini çalışmıştır. Genetik Algoritma (GA) ile Mühendislik Eşitlik Çözücü (Engineering Equation Solver, EES) programı kullanılarak sekiz karar değişkenine dayalı olarak üç farklı senaryo için gerçekleştirilen PCM depolamalı güneş santralı için hibrit sistemin ekserji analizi yürütülmüştür [16]. Aktekin ve ark. , nükleer enerji, fotovoltaik (PV), rüzgar enerjisi, batarya ve H_2 yer aldığı bir HES'i değerlendirmiştir. Türkiye'nin Mersin ili için saatlik ve pik konut talebine güvenilir elektrik arzı sağlanması amaçlanmıştır. Elektrik üretimi ve H_2 üretimi için

kullanılabilecek fazla enerjinin belirlenmesi amacıyla ArcGIS ve Çok Kriterli Karar Verme (MCDM) yöntemleri kullanılmıştır [17] .

Literatüre bakıldığında, Türkiye Marmara Bölgesinde, nükleer SMR teknolojisi, oluk (parabolik) kolektör ve rüzgar türbinin entegre ederek hem enerji hem de hidrojen üretimi gerçekleştirilen hibrit sistem analizi yapılmamıştır. Bu nedenle bu tez çalışmasında, yenilenebilir enerji kaynaklarının kapasite ve verim açıklarını telafi etmek ve enerji depolamasının temellerini oluşturmak üzere hibrit bir sistemin tasarlanması ve enerji analizlerinin yapılmasının faydalı olacağı düşünülmüştür. Tasarlanan hibrit sistemde, güneş teknolojilerinden oluk kolektör ile SMR teknolojilerinden deneme çalışmasına başlamış olan Yüksek Sıcaklık Gaz Soğutmalı Reaktör-Çakıl Yataklı Modül (High Temperature Gas Cooled Reactor - Pebble- Bed Module, HTR-PM) entegre edilecektir. Rüzgar enerjisinden elde edilen enerji, tasarlanan sistemin iç enerjisini karşılamak üzere şebekeye verilmesi ve fazla üretim sağlanması durumunda da H_2 üretiminde kullanılması tasarlanmıştır. Önerilen sistem simüle edilerek enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilecektir.

Çok fazla sanayi şehrini barındırması ve buna bağlı yoğun nüfusa sahip olmasından dolayı enerjiye en çok ihtiyaç duyan Marmara Bölgesi incelemeye esas alan tezin amacı;

- Yenilenebilir ve SMR teknolojilerini alternatif yeni yaklaşımlar olarak birleşik ve entegre sistem olarak çalıştırmak,
- Temiz enerji sistemleri aracılığıyla SMR teknolojisinden daha fazla verim elde etmek,
- Kesintili üretim yapan ve düşük kapasite faktörüne sahip rüzgar enerjisi ve oluk kolektör tip güneş enerjisinden daha fazla yararlanarak elektrik üretimini azami düzeye çıkartmak,
- Hidrojen üretimi ile enerji depolaması sağlamak,
- Temiz enerji sistemleri ile temiz, kesintisiz ve sürdürülebilir karbonsuz elektrik üretmek,
- İklim değişikliği mücadelesi kapsamında CO_2 azaltımına katkı sağlamaktır.

2. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ SORUNU VE MÜCADELE SÜRECİ

Tez çalışmasına yönelik esas alınan iklim değişikliği sorunu ve mücadelesini daha iyi kavramak üzere, sorunun nasıl tanımlandığı, başlangıcı, gelişmesi ve sorunla mücadele etmek üzere yapılan çalışmalar aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

Birleşmiş Milletler (BM), iklim değişikliğini, sıcaklıklarda ve hava modellerindeki uzun dönemli değişimler olarak tanımlamaktadır [18]. Bu değişimlerin güneş içindeki oluşum veya volkanik patlamalardan kaynaklı doğal olabileceği ancak 1800'lerden beri öncelikle kömür, petrol ve gaz gibi fosil yakıtların kullanıldığı insan faaliyetlerinin iklim değişikliğine sebebiyet verdiği bilinmektedir [18]. Fosil yakıtların dünyanın çevresini bir battaniye gibi sararak güneşin ısısını hapsettiği ve sıcaklıkları yükselttiği ifade edilmektedir. Sera gazları oluşumunda, enerji, sanayi, ulaşım, binalar, tarım ve arazi kullanımı gibi belli sektörler kaynak olarak gösterilmektedir [18].

BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin (UNFCCC) 1. Maddesi, 2. Bendinde iklim değişikliği; doğal iklim çeşitliliğine ek olarak, doğrudan veya dolaylı olarak küresel atmosferin bileşimini değiştiren insan faaliyetlerine atfedilen durum olarak tanımlanmaktadır [19]. İklim değişikliğini bilimsel olarak değerlendirmek üzere BM çatısı altında kurulan Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), iklim değişikliğini; iklim sisteminin ortalama durumunda ve/veya değişkenliğinde on yıllar veya daha uzun sürelerde meydana gelen, doğal ya da insan kaynaklı değişiklikler olarak tanımlamaktadır [20]. İklim değişikliği, doğal süreçlerden veya güneş döngüsü, volkanik patlamalar ve atmosferin bileşimindeki veya arazi kullanımındaki kalıcı insan kaynaklı değişiklikler gibi dış etkilerden kaynaklanabilmektedir [20]. En genel ifadeyle, iklim değişikliği, atmosferdeki değişikliklerin yanı sıra dünyadaki jeolojik, kimyasal, biyolojik ve coğrafi faktörlerin etkileşimlerin bir sonucu olarak ikliminin zaman içinde değişmesi şeklinde açıklanabilir.

2.1. İklimi Anlama ve İzleme Dönemi

Yaşamın birçok alanında olduğu gibi iklim alanında da önce iklimin kendisi ve oluşumu önce anlayıp tanımlanmaya ve ardından izlenmeye başlanmıştır. Horace Benedict de Saussure, 1760 yılında heliotermometre ile sera etkisi oluşumunu deneyimleyen bilim insanı

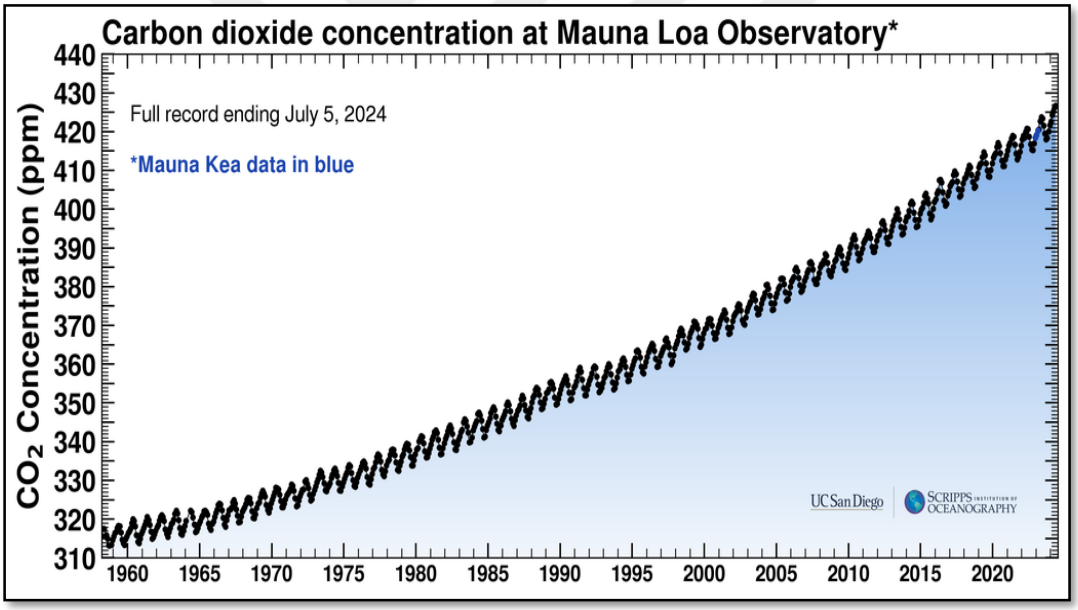
olarak tarihte yerini aldı [21]. Fransız bilim insanı Joseph Fourier, 1826'da yaptığı çalışmalarla, Dünya'ya ulaşan güneş enerjisinin bir kısmının atmosferde tutulduğunu ve bu sayede Dünya'nın sıcak kaldığını ortaya koymuştur. Atmosferin, tıpkı bir cam sera gibi davrandığını belirtmiştir [22]. Fourier'in, atmosfer olmasaydı, dünya çok daha soğuk olacaktı teorisi, 1850'lerde Eunice Newton Foote tarafından araştırıldı. Foote, cam silindirler kullanarak yaptığı deneylerle, güneşin ısıtma etkisinin nemli havada kuru havaya göre daha fazla olduğunu ve en yüksek ısınma derecesinin CO_2 içeren bir silindirde meydana geldiğini tespit etti [22]. İrlandalı bilim adamı John Tyndall, 1891 yılında bu çalışmayı biraz daha genişleterek, güneş ışığının soğurulmasında tam olarak ne tür gazların rol oynayabileceğini test etti ve sonuçta; kömür gazlarının (CO_2, metan ve uçucu hidrokarbonlar içeren) enerjiyi emmede daha etkili olduğunu gösterdi [22].

İsveçli kimyager Svante Arrhenius, 1895'te geçmişteki buzul çağını açıklamak üzere, atmosferdeki azalan CO_2 seviyelerinin dünyayı nasıl soğutabileceğini ve volkanik aktivitedeki bir azalmanın küresel CO_2 seviyelerini düşürüp düşürmeyeceğini araştırdı. Hesaplamaları, CO_2 seviyelerinin yarıya indirilmesi durumunda, küresel sıcaklıkların yaklaşık 5 °C (9 Fahrenheit) düşebileceğini gösterdi. CO_2 seviyeleri iki katına çıkması durumunda, küresel sıcaklık, aynı miktarda 5 °C (9 F) artacağını analiz ederek teorinin tam tersinin doğruluğunu inceledi [22]. Arrhenius'in karbon gazına dikkat çekerek buzul çağının bitişi veya başlangıcı olabileceğini tespit etmesi [21], İngiliz mühendis Guy Stewart Callendar, karbon emisyonlarının halizhazırda ısınma etkisine sahip olduğunu iddia etmiş [22] ve 938 yılında yaptığı hesaplamalarla, atmosferdeki CO_2 miktarının ikiye katlanmasının Dünya'yı 2 °C (3,6 F) ısıtabileceğini öne sürdü [21], [22]. Gezegenin sera etkisiyle ısınmaya başladığını 1960'lara kadar iddia etmeye devam eden Callendar'ın iddiaları çoğunlukla şüpheyle karşılanmasına rağmen, küresel ısınma olasılığına dikkat çekmeyi başardı. Bu dikkat, iklim ve CO_2 seviyelerini daha yakından izlemek için devlet tarafından finanse edilen ilk projelerin bazılarının gerçekleşmesinde rol oynadı [22].

İklim değişikliğine yönelik bilimsel çalışmalar, Hawaii'de Dünya'nın en büyük aktif yanardağı olan Mauna Loa'da, Kaliforniya Üniversitesi, San Diego Scripps Oşinografi Enstitüsü tarafından kurulan Mauna Loa Gözlemevi'nde, Enstitü'nden Charles David Keeling, atmosferik CO_2 yoğunluğunu ölçmesi ile başladı [22-24] C. Keeling, iklim değişikliğinin temelinin CO_2 olduğunu ileri süren bilim adamıdır. Mauna Loa yanardağı, haftalarca artan iç faaliyetin ardından 28 Kasım 1958 yılında patlamasının ardından

merkezden alınan veriler dikkat çekti ve titiz analitik prosedürler kullanarak, doğal ve insan kaynaklı karbon eğilimleri hakkında yeni bilgiler ortaya çıkarıldı [24]. Keeling'in kesinlik, doğruluk ve süreklilik çerçevesinde uzun yıllar yaptığı araştırma, fosil yakıtların yanması ile sera etkisinden kaynaklanan küresel iklim değişikliği arasındaki en önemli bilimsel bağlantılardan birini ortaya çıkardı [24].

Modern iklim biliminin temel göstergesi olan atmosferik CO_2 yoğunluğunun güvenilir kaydını sağlayan Keeling Eğrisi, günümüzde hâlen devam eden ölçüm programıyla anlık ve güncel veriler sunmaktadır [25]. Anlık alınan verilerin sürekli izlenebildiği ikonik grafik Keeling Eğrisi, Resim 2.1'de görülmektedir. Keeling Eğrisi, insanın çevre üzerindeki etkisinin ve fosil yakıtların küresel iklim değişikliğindeki rolünün güçlü bir simgesi ve 60 yılı aşkın bir süredir CO_2 ölçümünün otoritesi görülmektedir [23], [24].



Resim 2.1. Keeling eğrisi [25]

2.2. Birleşmiş Milletler Faaliyetleri

İklim değişikliği 1945 yılında kurulan BM bünyesindeki hava, iklim ve su konuları ile ilgilenen Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) kapsamındaydı. Kaynakların korunması ve kullanımı hakkında 1949'da düzenlenen BM Bilimsel Konferansı, kaynakların ekonomik ve sosyal kalkınma için nasıl yönetileceği konusunu ele alan ilk BM faaliyeti olarak bilinmektedir [26].

BM Ekonomik ve Sosyal Konseyi, çevre sorunlarını ilk defa 29 Mayıs 1968 tarihinde gündemine özel olarak aldı ve BM Genel Kurul tarafından onaylanarak ilk BM İnsan Çevresi Konferansını düzenlemeye karar verdi [26]. İsveç Stockholm'de, 5-16 Haziran 1972 tarihlerinde düzenlenen Birinci Dünya Zirvesi'nde, insan çevresinin korunması için uluslararası ilkeler ve eylem planı kabul edilmiş ve iklim değişikliği ilk kez hükümetlerin dikkatine sunulmuştur [26]. Zirvede, atmosferik bileşenlerin izlenmesi için istasyon kurulması önerilmiş, çevresel sorunlar uluslararası gündeme taşınmıştır. Takip eden yıllarda BM Çevre Programı (UNEP), ozon tabakasına zarar veren maddelerle mücadeleyi güçlendirmiş ve 1985 Viyana Sözleşmesi ile 1979 Sınır Ötesi Hava Kirliliği Sözleşmesi protokolleri kabul edilmiştir. Bu gelişmeler, küresel çevre ve iklim sorunlarına yönelik uluslararası iş birliğinin temelini oluşturmuştur [26].

1987'de BM Genel Kurulu, çevreye duyarlı kalkınmayı hedefleyen "Çevresel Bakış 2000 ve Sonrası" belgesini kabul ederek çevre politikalarına ivme kazandırmış, ilk kez "sürdürülebilir kalkınma" kavramını öne çıkarmıştır [26]. 1988'de ise küresel ısınma ve ozon tabakasındaki incelme uluslararası gündemde öncelikli konular haline gelmiş, BM Genel Kurulu iklim değişikliğini özel ve acil bir mesele olarak tanımlamıştır [26].Aynı yıl sera ısınması ve küresel iklim değişikliğinin incelenmesi için oluşturulan IPCC'nin görevi, iklim değişikliğinin bilimsel, sosyal ve ekonomik yönlerini değerlendirmek ve olası müdahale stratejileri ile gelecekteki uluslararası sözleşmelere temel oluşturacak öneriler sunmaktır [27]. IPCC, kurulduğundan beri, 1990 yılında ilk rapor, 1995 'te ikinci, 2001'de üçüncü, 2007'de dördüncü 2018'de beşinci ve 2021'de altıncı olmak üzere iklim değişikliği hakkında dünya çapında kapsamlı Değerlendirme Raporu ve diğer raporlar (Metodoloji Raporu, Özel Rapor ve Teknik Belge) sundu [27], [28]. Bu gelişmelerin sonucunda, 1989 yılı, ilk önemli küresel çabaların gösterildiği yıl oldu ve Ozon Tabakasının Korunmasına İlişkin Helsinki Deklarasyonu kabul edildi [26].

İklim değişikliği konusunda küresel farkındalık, 29 Ekim - 7 Kasım 1990'da düzenlenen İkinci Dünya İklim Konferansı'nda daha da güçlenmiş; iklim değişikliği, küresel ölçekte ortak yanıt gerektiren özgün bir sorun olarak tanımlanmıştır [26]. 1992'de Rio de Janeiro'da gerçekleştirilen BM Çevre ve Kalkınma Konferansı (Dünya Zirvesi), çevresel iş birliği ve sürdürülebilir kalkınma bağlamında Rio Deklarasyonu ve Gündem-21'i benimseyerek uluslararası çevre politikalarına yön vermiştir. Gündem 21'in 9. Bölümü, atmosferin korunması kapsamında enerji, sanayi, ulaşım, ozon tabakası ve sınır ötesi kirlilik ilişkilerine

odaklanmıştır. Aynı yıl kabul edilen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC), 158 ülke tarafından imzalanmış ve sera gazı emisyonlarını tehlikeli seviyelere ulaşmadan sınırlandırmayı hedeflemiştir [26]. 1994'te yürürlüğe giren Sözleşme Çerçevesi (UNFCCC) ile her yıl Taraflar Konferansı (COP) düzenlenmekte olup ilki 1995'te Almanya'da gerçekleştirilmiştir. COP-3'te ise Kyoto Protokolü kabul edilmiştir.

Kyoto Protokolü

İklim değişikliğiyle mücadelede dönüm noktası olarak kabul edilen Kyoto Protokolü, Japonya'nın Kyoto şehrinde 11 Aralık 1997'de imzalanmış ve 16 Şubat 2005'te yürürlüğe girmiştir [26], [29]. UNFCC Sözleşmesi'ni uygulamasını sağlayan [29] Protokol, sanayileşmiş ülkeler ve geçiş ekonomilerinin sera gazı emisyonlarını belirli hedefler doğrultusunda azaltmasını ve düzenli raporlamasını öngörmektedir. "Ortak fakat farklılaştırılmış sorumluluklar" ilkesi temelinde, gelişmiş ülkelere daha fazla yükümlülük getirmektedir [29]. Ek B'de 37 ülke ve AB için bağlayıcı azaltım hedefleri tanımlanmış, bu hedeflere ulaşmak için esneklik mekanizmaları ve uyumsuzluk halinde yaptırımlar öngörülmüştür[29]. Bu yönüyle Protokol, diğer çevre sözleşmelerinden ayrılmaktadır.

Protokol Ek-I ülkelerine sayısallaştırılmış emisyon azaltım hedefi belirten ilk uluslararası anlaşmadır [30]. Sanayileşmiş ülkelerin toplam CO_2 ve diğer sera gazı emisyonlarını 1990 seviyelerine göre en az %5 oranında azaltmayı hedefleyen Protokol'ün ilk taahhüt dönemi 2008-2012 olarak belirlendi. İkinci taahhüt dönemi ise 1 Ocak 2013- 2020 tarihleri arasında uygulanmıştır. Bu dönemde, ilk taahhüt döneminden farklı olarak 2020 yılında 1990 yılına göre en az %18 azaltması kararlaştırılmıştır [31]. Doha Değişikliği olarak bilinen II. Taahhüt Dönemi, usulen kabul edilmiş ve bu süreçte Kyoto Protokolü işlevini tamamlayarak yerini Paris Antlaşmasına bırakmıştır [31].

Türkiye, 5386 Sayılı "Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesine Yönelik Kyoto Protokolüne Katılmamızın Uygun Bulunduğuna Dair Kanun'un" Türkiye Büyük Millet Meclisi (TBMM) tarafından 5 Şubat 2009'da kabul edilmesi ve 13 Mayıs 2009 tarih ve 2009/14979 Sayılı Bakanlar Kurulu Kararı'nın BM'ye sunulmasıyla 26 Ağustos 2009 tarihinde Kyoto Protokolü'ne Taraf olmuştur [30].

UNFCCC'ye 197, Kyoto Protokolü'ne ise 192 taraf bulunmaktadır.

Paris Anlaşması

Paris'te 2015 yılında düzenlenen BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi 21. Taraflar Konferansı'nda (COP 21) ele alınan 2020 sonrası iklim değişikliği rejiminin çerçevesini oluşturan bir anlaşmadır [32]. Anlaşma, 5 Ekim 2016 tarihi baz alınarak, küresel sera gazı emisyonlarının %55'ini oluşturan en az 55 tarafın anlaşmayı onaylaması koşulunun karşılanması sonucunda, 4 Kasım 2016 itibariyle yürürlüğe girmiştir. Kabulünün üzerinden bir yıl geçmeden yürürlüğe giren ilk küresel anlaşma [32], ulusal katkılar, azaltım, uyum, finansman, teknoloji transferi ve şeffaflık gibi alanlarda kapsamlı bir uygulama çerçevesi sunmaktadır [32]. 2021'de Glasgow'da düzenlenen COP26'da Paris Anlaşması'nın uygulama usullerini belirleyen Çalışma Programı (Kural Kitabı) oluşturulmuş ve anlaşmanın işlevselliği güçlendirilmiştir [32].

Türkiye, Paris Anlaşması'nı 22 Nisan 2016'da imzalamış, 7 Ekim 2021'de onaylayarak iç hukuk sürecini tamamlamış ve 11 Ekim 2021'de onay belgesini BM Sekretaryasına sunmuştur. Türkiye, gelişmekte olan ülke statüsünde anlaşmaya taraf olmuş ve 2053 yılı için net-sıfır emisyon hedefini ilan etmiştir. Başlangıçta 2015'te %21 oranında artıştan azaltım içeren "Niyet Edilen Ulusal Katkı" beyanı sunulmuş; bu hedef, 2022'de COP27'de %41 oranına yükseltilmiştir [33].

2.3. Avrupa Birliği – Avrupa Yeşil Mutabakatı Süreci

Avrupa Birliği (AB), BM tarafından yürütülen çalışmalara destek vererek hem Kyoto Protokolü hem de Paris Anlaşmasına taraf olmuş ve daha sıkı önlemler alınması gerektiğini farklı platformlarda dile getirmiştir. Avrupa Konseyi'nin 21 Haziran 2019 tarihinde gerçekleşen Euro Zirvesi'nde 2019-2024 stratejik gündemini onayladı [34] ve nötr-iklim[2] (climate-neutral), yeşil, adil ve sosyal bir Avrupa inşa etme konularına odaklandı. Avrupa Konseyinde yer alan liderlerin iklim, dezenformasyon, uzun vadeli AB bütçesi gibi konulara ağırlık verdikleri toplantı sonucunda yayınlanan belgede, iklim değişikliği konusunda alınan iki karar aşağıda belirtilmiştir [35]:

[2] İnsan faaliyetlerinin iklim sistemi üzerinde net bir etkiye yol açmadığı durumu ifade eden kavramdır. Böyle bir duruma ulaşmak için atılan emisyonların dengelenmesi gerekmektedir [20].

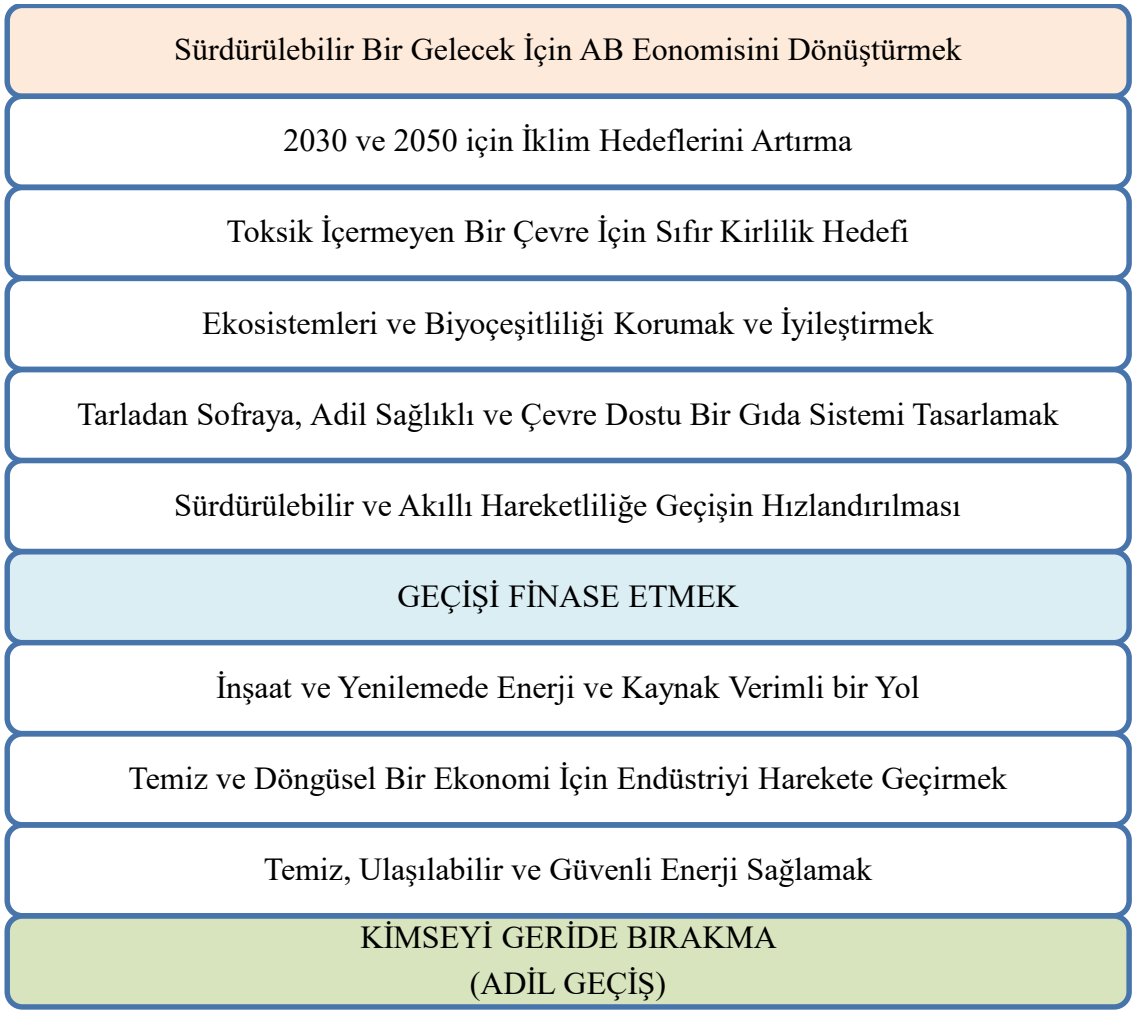
- Paris Anlaşması'nın hedefine ulaşmak için, BM Genel Sekreteri'nin 2019 Eylül ayındaki İklim Eylem Zirvesi'nde belirtilen; sıcaklık artışının sanayileşme öncesi seviyesine göre 1,5°C'nin üzerinde sınırlama çabalarını sürdürmek de dahil olmak üzere küresel iklim eyleminin hızlandırılmasının önemini belirterek Üye Devletlerin ve Komisyonun aktif katılımı vurgulandı.
- Avrupa'nın rekabet edebilirliğini koruyacak, adil ve sosyal olarak dengeli olacak, Üye Devletlerin ulusal koşullarını dikkate alacak ve 2030 azaltımına ulaşmak için halihazırda kabul edilmiş olan önlemleri geliştirirken kendi enerji çeşidine karar verme haklarına saygı gösterecek olan Paris Anlaşması'na uygun olarak, nötr-iklim AB'ye geçiş için uygulamaya konulacak koşullar, teşvikler ve kolaylaştırıcı çerçeve üzerindeki çalışmaları geliştirmek üzere AB'nin uzun vadeli stratejisinin 2020'nin başlarında kabul edilerek UNFCCC'ye sunulması amacıyla bu yıl (2019) bitmeden ilgili dokümanı tamamlamaya davet etti. Ayrıca, Avrupa Yatırım Bankası'nı (EIB) iklim eylemini destekleyen faaliyetleri hızlandırmaya davet etti.

Avrupa Yeşil Mutabakatı

Avrupa Birliği (AB), atmosferin ısınması, iklimin her geçen yıl değişmesi, gezegendeki sekiz milyon türden bir milyonun yok olma tehlikesiyle karşı karşıya kalması, ormanlar ve okyanusların kirlenmesi ve yok edilmesi gibi kritik başlıklarda mücadele etmek amacıyla çevre ve iklim politikaları konusunda atılacak adımları ve taahhütleri içeren *Avrupa Yeşil Mutabakatı* (EGD) (The European Green Deal), 11 Aralık 2019 tarihinde yayınladı [36]. Avrupa'nın ilk nötr-iklim kıta olmasını amaçlayan EGD, tarımdan enerjiye, ulaşımdan inşaata kadar tüm sektörlere yönelik bir dizi politikayı içermektedir [36], [37], EGD, net sera gazı emisyonlarının 2050'de sıfırlandığı kaynakları verimli kullanan ve rekabetçi bir ekonomi ile AB'yi adil ve müreffeh bir topluma dönüştürmeyi amaçlayan yeni bir büyüme stratejisi olarak görülen bir belgedir [38]. BM sürdürülebilir kalkınma hedefleri uygulanmasını esas alan [36] EGD'nin ana hedefler üç başlıkta toplanabilir [38]:

- 2050 yılına kadar net sera gazı emisyonu olmaması
- kaynak kullanımından ayrıştırılmış ekonomik büyüme
- hiç kimseyi ve hiçbir yeri geride bırakmamak

Avrupa Yeşil Mutabakatının temel unsurları, Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Avrupa Yeşil Mutabakat unsurları [36]

EGD'yi uygulamak için ekonomi, sanayi, üretim ve tüketim, büyük ölçekli altyapı, ulaşım, gıda ve tarım, inşaat, vergilendirme ve sosyal faydalar genelinde temiz enerji arzına yönelik politikaların yeniden gözden geçirilmesi gerektiği vurgulanarak, EGD'nin temel esasları aşağıda özetlenmiştir [36]:

2.3.1. Nötr-iklim Avrupa

AB, 2050 yılına kadar nötr-iklim hedefine ulaşmak için 2030 yılına kadar net sera gazı emisyonlarını 1990 seviyelerine kıyasla en az %55 azaltmak üzere iklim, enerji, ulaşım ve vergilendirme politikalarını bu doğrultuda uygun hale getirme kararı aldı. EGD'nin temel hedefi olan 2050 nötr-iklim hedefinin yakalanması ile AB, ilk net-sıfır karbonlu kıta olmayı da elde edecektir [36].

AB, etkili ve adil bir geçiş için koşulları net bir şekilde belirleyecek, yatırımcılar için öngörülebilirlik oluşturacak ve geçişin geri döndürülemez olmasını sağlayarak 2050'ye kadar nötr-iklime ulaşacaktır [36]. Bu süreçte, gerekli yasal mevzuat çalışmaları başlatılarak özellikle, İklim Yasası, Emisyon Ticareti, Enerji Vergilendirme, Arazi Kullanımı gibi önemli alanlardaki yasalar ile tüm AB politikalarının nötr-iklim hedefine katkıda bulunmasını ve tüm sektörlerin üzerine düşeni yapması sağlanacaktır [36]. Ayrıca, seçilen sektörler için bir karbon sınırı ayarlama mekanizması önerilerek ekonomi genelinde etkili karbon fiyatlandırması sağlanacaktır [36].

2.3.2. Temiz ve döngüsel ekonomi

Nötr-iklim ve döngüsel ekonomiye erişmek için sanayiinin hızlanması gerektiği ancak bir sanayi sektörünü ve ilgili tedarik zincirini dönüştürmenin yaklaşık 25 yıl sürdüğü dikkate alındığından 2050 yılı için şimdiden harekete geçilmelidir. AB sanayisinin değişime başladığı, ancak %20'lerde olduğu bilinmektedir [36].

2050 hedefine erişmek için, dijital dönüşümünden faydalanarak AB sanayi stratejisi, oluşturulacak ve oluşturulan yeni döngüsel ekonomi eylem planı, özellikle tekstil, inşaat, elektronik ve plastik gibi kaynak yoğun sektörlere odaklanarak AB ekonomisinin, modernleşmesine ve doğacak fırsatları değerlendirmesine yardımcı olacaktır. İşletmeler; yeniden kullanılabilir, dayanıklı ve onarılabilir ürünler sunmasına teşvik edilecektir [36]. Çevreye zararlı ürünlerin AB pazarına girmesini önlemek için minimum koşullar belirlenecek ve sürdürülebilir ürünler politikası oluşturulacaktır. Önemli sektörlerde çığır açan teknolojiler özellikle temiz H_2, yakıt hücreleri ve diğer alternatif yakıtlar, enerji depolama, karbon yakalama ve depolamanın geliştirilmesi teşvik edilecektir ve inovasyon fonu ile desteklenecektir [36].

2.3.3. İnşaat ve bina yenileme

Binalar, tüketilen enerjinin %40'ını oluşturduğundan AB, enerji verimliliği ve talebin karşılanmasına yönelik kamu ve özel binalarda bir "yenileme dalgası" başlatılmasını önermektedir [36].

Bina yenileme ile enerji faturaların düşmesi, enerji kıtlığında azaltma oluşturması, inşaat sektörünü canlandırması ve küçük işletmelerin desteklenmesi beklenmektedir. Üye Devletler içinde yer alan binaların yıllık yenileme oranı %0,4 ile %1,2 arasında olduğundan AB'nin enerji verimliliği ve iklim hedeflerine ulaşması için bu oranın en az ikiye katlanması gerektiği belirtilmektedir [36].

2.3.4. Tarladan sofraya

Gıda üretimi hava, su ve toprak kirliliğine neden olmakta, biyo-çeşitlilik kaybına ve iklim değişikliğine katkıda bulunmakta, aşırı miktarda doğal kaynak tüketilmekte ve gıdanın önemli bir kısmı da israf edildiği vurgulanmaktadır [36]. Oluşturulacak "Tarladan Sofraya" stratejisi ve gıda zincirinin tüm aşamalarını kapsayan sürdürülebilir bir gıda politikası ile iklim değişikliğiyle mücadele, çevreyi koruma ve biyo- çeşitliliği koruma çabalarının artırılması amaçlanmaktadır. Ayrıca taşıma, depolama, paketleme ve gıda atıkları konusunda harekete daha bilinçli hareket edilerek çevresel etkilerinin azaltılması amaçlamaktadır [36].

AB'nin 2021-2027 yılları için ortak tarım politika önerileri, ortak tarım politikasının genel bütçesinin en az %40'ının ve Deniz Balıkçılığı Fonu'nun en az %30'unun iklim eylemine katkıda bulunacağını şart koşmaktadır [36].

2.3.5. Sıfır kirlilik

Vatandaşlarını ve ekosistemlerini korumak için AB'nin hava, su, toprak ve tüketici ürünlerinden kaynaklanan kirliliği daha iyi izlemesi, raporlaması, önlemesi ve iyileştirmesi gerekmektedir. Birbiriyle ilişkili olan sorunları gidermek için hava, su ve toprak için sıfır kirlilik eylem planını oluşturulacaktır. Zehirsiz bir ortam için, oluşan kirliliği temizlemek ve düzeltmenin yanı sıra kirliliğin oluşması için daha fazla önlem alınması gerekmektedir [36].

Yer altı ve yer üstü sularının doğal yapısına dönüştürülmesine yönelik çaba gösterilirken mikro plastikler ve kimyasallar gibi zararlı kirleticilerden kaynaklanan kirliliği giderilmesi sağlanacaktır. Daha temiz hava elde etmek üzere hava kalitesinin izlenmesi ve modellenmesi sağlanacak ve Dünya Sağlık Örgütü tavsiyeleriyle uyumlu olacak şekilde hava kalitesi standartları gözden geçirilecektir. Büyük sanayi tesislerinden kaynaklanan kirliliğe yönelik toksik olmayan bir ortam sağlamak üzere Kimyasal Strateji oluşturulacaktır [36].

2.3.6. Ekosistem ve biyoçeşitliliğin korunması

Ekosistemler; gıda, tatlı su, temiz hava ve barınak gibi temel hizmetleri sağlarken, doğal afetleri, zararlıları ve hastalıkları azaltmalarından ve iklimi düzenlemeye yardımcı olmalarından dolayı biyoçeşitlilik kaybının durdurulması için gerekli önlemler alınacak ve Biyoçeşitlilik Stratejisi uygulanacaktır [36]. Su ve deniz kaynaklarının kullanımını da bu kapsamda gözden geçirilecek ve iyileştirilmesi sağlanacaktır. Sürdürülebilir "mavi ekonomi", AB'nin arazilere olan yoğun talebin azaltılması ve iklim değişikliği mücadelesinde merkezi bir rol oynayacaktır. Biyoçeşitlilik stratejisi, ayrıca, yeşil Avrupa şehirlerine yönelik önerileri ve kentsel alanlardaki biyoçeşitliliği artırmayı içerecektir. Tarladan Sofraya Stratejisi ile uyumlu olacaktır [36].

2.3.7. Ulaşım

AB'nin sera gazı emisyonlarının dörtte biri ulaşım alanından gelmekte ve artmaya devam etmektedir. Nötr-iklim hedefine ulaşmak için, 2050 yılına kadar karayolu, demiryolu, havacılık ve deniz ulaşım emisyonlarında %90 bir azalma sağlanacaktır [36].

Ulaşım konusu, özellikle şehirleri daha fazla kirletmeme, şehir trafiği tıkanıklığına çözüm ve daha iyi toplu taşıma sağlanması açısından ele alınacaktır 2025'ten itibaren sıfır emisyonlu mobiliteye doğru, otomobiller, içten yanmalı motorlu araçlar ve kamyonetler için CO_2 emisyon performans standartları mevzuatı gözden geçirilecek ve daha sıkı emisyon standartları önerilecektir. Elektrik araçlar için şarj istasyon sayısı arttırılacaktır. Ayrıca gemi sektörü için, AB limanlarına erişim yeniden düzenlenecek ve limana yanaşmış gemileri kıyı elektriği kullanmaya zorunlu kılmak da dahil olmak üzere, deniz taşımacılığı ile ilgili olarak önlemler alınacaktır. Benzer şekilde, havaalanlarının yakınında hava kalitesi, uçaklar ve havaalanı işletmelerinden kaynaklanan kirletici emisyonlarla mücadele edilerek iyileştirilecektir [36].

2.3.8. Finans

AB, 2030 iklim ve enerji hedeflerine ulaşmak için yıllık 260 milyar Euro'luk ek yatırım gerektiğini hesaplamıştır. Süreç içinde finans ihtiyacının devam edeceği veya artacağı

belirtilerek bu ek finansman ihtiyaçlarını karşılamak üzere Sürdürülebilir Avrupa Yatırım Planı oluşturularak sürdürülebilir yatırımların desteklenmesi gerektiği belirtilmiştir [36]. Sürdürülebilir Avrupa Yatırım Planı, "kimseyi geride bırakmama (Leave no one behind)" stratejisi ile uygulanacak ve böylece geçişin adil ve kapsayıcı bir şekilde yürütülmesiyle başarıya ulaşılması sağlanacaktır. Kimseyi geride bırakmamak için, Adil Geçiş Fonunun yer aldığı bir Adil Geçiş Mekanizması oluşturulacaktır. Adil Geçiş Mekanizması, ülkelerin sosyal ve coğrafi koşullara bağlı olarak etkilenmeleri göz önünde bulundurularak fosil yakıtlara veya karbon yoğun süreçlere bağımlı olanlar için geçişten en çok etkilenen bölge ve sektörlere odaklanılacaktır [36].

InvestEU Fonu olarak adlandırılan fonun en az %30 oranında iklim değişikli mücadelesine katkı sağlaması beklenmektedir. InvestEU, üye devletlerin AB bütçe garantisini kullanmasına ve yeşil faaliyetleri teşvik edecek ulusal banka ve kurumlarıyla iş birliği yapmasına imkan vermektedir [36]. Yatırımcılara ve şirketlere, AB yeşil tahvil standardı geliştirilerek sürdürülebilir yatırımları belirlemeleri ve güvenilir olmaları açısından daha fazla fırsat oluşturulacaktır [36].

Sürdürülebilir faaliyetleri sınıflandırmak için taksonomi uygulanacaktır.

Sınıflandırma (Taksonomi)

AB, 2050 hedeflerine erişebilmek için önemli yatırımlar yapması gerektiği aşikardır. Bu nedenle EGD finans kapsamında sürdürebilir finans stratejisi belirlemek üzere oluşturduğu eylem planı, taksonomi, referans noktaları, yeşil tahvil ve raporlama ana başlıklarını içermektedir. Bu noktada taksonomi önemli bir başlık olarak öne çıkmıştır.

Taksonomi; AB taksonomisi şeklinde vurgulanan bir terim olarak; Yeşil Mutabakat çerçevesinde hangi faaliyetlerin çevresel sürdürülebilir ekonomik eylem olup olmayacağını gösteren bir sınıflandırma belgesi olarak açıklanabilir. Sınıflandırma çerçevesinde, politikacılar stratejilerini belirlerken, şirketler ve yatırıcımlar ise hangi sürdürülebilir faaliyetlere yatırım yapacaklarına karar vermeleri açısından büyük bir kolaylık sağlayacaktır. Bu doğrultuda EGD uygulanması ve hedeflere varılması sürecinde yatırıcımlar yeşil yıkama (greenwashing) olarak adlandırılan durumdan korunmuş olacaktır [39].

AB tarafından 2016 Aralık ayında, Teknik Uzman Grup (Technical Expert Group, TEG) kurulmuş ve bu gruptan bir sınıflandırma sistemi oluşturması istenmiştir. Hazırlanan rapor, 2018 yılı başında yayımlanmış ve ardından AB taksonomisinin oluşmasına vesile olan sürdürülebilir büyüme finansmanı için bir eylem planı yayımlanmıştır [40].

Taksonomide, bir ekonomik faaliyetin çevresel açıdan sürdürülebilir sayılması için karşılaması gereken dört genel koşul aşağıdadır [41]:

1. Altı çevresel hedeflerden en az bir çevresel hedefe önemli katkı sağlamak,
2. Diğer beş çevresel hedefin hiçbirine önemli zarar vermemek,
3. Asgari güvenlik önlemlerine uymak,
4. Belirtilen teknik tarama kriterlerine uymak.

Taksonomi düzenlenmesinin 2020 Haziran ayında yayınlanmasıyla önemli enerji üretim kaynaklarından nükleer ve doğalgaz taksonomide yer almamasından dolayı tartışmalar başladı. Komisyon tarafından 2021 Temmuz ayında nükleer enerjinin "önemli bir zarar vermeme (do no siginificant harm)" açısından bir rapor hazırlatılarak Komisyona sunuldu. Yapılan görüşme değerlendirmeler ve uzun tartışmalar sonucunda nükleer ve doğalgaz AB Taksonomisine dahil edildi [40].

2.3.9. AR-GE ve inovasyon

Yeni teknolojiler, sürdürülebilir çözümler ve ezber bozan inovasyon, EGD'nın hedeflerine ulaşmak için kritik öneme sahiptir. "Ufuk Avrupa" olarak adlandırılan program, diğer AB programlarıyla birlikte bir sinerji oluşturarak kamu ve özel yatırımlardan yararlanmada çok önemli bir rol oynayacaktır. Ufuk Avrupa programı, ihtiyaç duyulan araştırma ve inovasyon çabalarını desteklemesi beklenmekte ve bütçesinin en az %35'i, EGD'in uygulanmasına yönelik yeni iklim çözümlerini finanse edilmesinde kullanılacaktır. İklim değişikliğine uyum, okyanuslar, şehirler ve toprak gibi alanlarda, dört "Yeşil Mutabakat Misyonu", büyük ölçekli değişikliklerin sağlanmasına yardımcı olacak ve çeşitli paydaşları bir araya getirecektir [36].

Piller, temiz H_2, düşük karbonlu çelik üretimi, döngüsel biyo-temelli sektörler ve çevre inşaatı konularında araştırma ve inovasyon çalışmaları desteklenecektir.

Dijital altyapı (süper bilgisayarlar, bulut, ultra hızlı ağlar) ve yapay zeka çözümleriyle birleştirilen erişilebilir ve birlikte çalışabilir veriler, kanıta dayalı kararları kolaylaştırır ve çevresel zorlukları anlama ve bunlarla mücadele etme kapasitesini genişletir. Bu nedenle ekolojik geçişi desteklemek için dijital dönüşümden faydalanmak üzere ilgili çalışmalar desteklenecektir. [36].

2.3.10. Dış ilişkiler

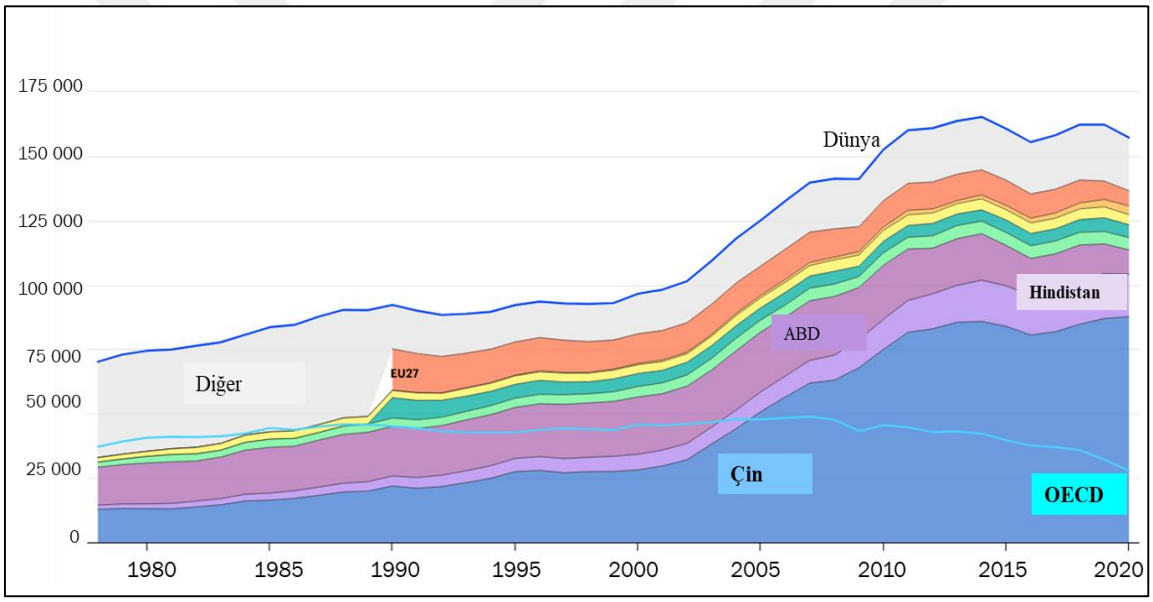
AB, iklim değişikliği sorunun tek bir ülkeye ait olmadığını bunun bir küresel sorun olduğunu vurgulayarak her ne kadar kendi bünyesi içinde gerekli önlemleri alıyor olsa da öncelikle komşularının ve sonra dünya genelindeki tüm paydaşların iklim değişikliği mücadelesine dahil olması gerektiğini belirtmektedir. Avrupa'nın tek başına aldığı önlemler ve kurallar ile EGD hedeflerinin yakalanmasının mümkün olamayacağını bu nedenle küresel bir tepki verilerek gösterilen çabanın ve alınan önlemlerin birlikte uygulanması gerektiğini savunmaktadır. Bu noktada diğer ülkeleri hem teşvik etmek hem de ikna etmek üzere BM, G7, G20, Dünya Ticaret Örgütü ve diğer ilgili uluslararası forumlar veya platformlar dahil hem ikili hem de çok taraflı tüm diplomatik kanalları kullanmaktadır. AB, küresel sera gazı emisyonlarının %80'inden sorumlu olan G20 ülkeleriyle yakın ilişkiler kurmaya devam edilmesini belirtmektedir. Güvenilir bir örnek oluşturarak diplomasi, ticaret politikası, kalkınma desteği ve diğer dış politikaları takip ederek, AB etkili bir savunucu konumundadır. [36].

EGD uygulanması amacıyla Avrupa iklim değişikliği konusunda çaba sarfederken, diğer ülkelerinde belli sorumluluk alması gerektiği bu nedenle ortaya çıkabilecek haksız rekabet durumlarını önlemek için sınırda karbon vergisi sistemini önermektedir [36].

2.4. Kömür Tüketen Ülke Politikaları

İklim değişikliği ile mücadelede en büyük hedef net-sıfır karbon olarak adlandırılan atmosfere giren sera gazlarının atmosferden uzaklaşarak belli bir dengenin sağlandığı durumdur. Net-sıfıra ulaşıldığı zaman küresel ısınmanın artık durmuş olduğu kabul edilecektir [42]. Net-sıfır karbon hedefi için önemli adımlardan biri olan Paris Anlaşmasının imzalanması ve sonrasında yayınlanan Avrupa Yeşil Mutabakatı ile AB, 27 üye ülkeden fosil yakıtları bırakmalarını ve bunun için bir tarih vermelerini istedi. Uluslararası Enerji

Ajansı (IEA) tarafından 31 Mart 2021'de düzenlenen Net-Sıfır Zirvesi [43] ile birlikte net-sıfır hedefleri çerçevesinde giderek artan sayıda ülkeler taahhütlerini bildirmeye başladılar. Bu süreçte bütün dikkatler, enerji üretim sisteminde yoğunlukla kömür kullanan Almanya ve Polonya'ya çevrildi. Ekonomik ve coğrafi konum açılarından farklı olan bu üye ülkeler nasıl bir strateji izleyeceği o dönem için merakla takip edildi. Ülkemizde de kömür ağırlıklı enerji üretimi gerçekleştiğinden bu iki ülkenin yanı sıra Resim 2.2'te gösterilen IEA verilerine göre [44] dünya sıralamasında ilk iki sırada yer alan Çin ve Hindistan'ın yüksek kömür kullanımı nedeniyle izleyeceği yol haritası 2050 net sıfır karbon hedefi süresinde önemli bir strateji olarak değerlendirildiğinden bu iki ülke bilgileri aşağıda yer almaktadır. Bu nedenle dört ülkenin enerji üretim durumu ile politikası aşağıda özetlenmiştir.



Resim 2.2. Dünya kömür tüketimi 1978-2020 [44]

2.4.1. Almanya

Uluslararası Para Fonu (IMF) tarafından 2024 Nisan ayında yapılan açıklamaya göre [45] dünyanın en büyük üçüncü ekonomisine sahip olan Almanya, AB'nin bir üyesi olarak Harita 2.1'de görüleceği üzere Avrupa kıtasında kuzeybatı yönünde yer alır [46].

Zengin kömür yataklarına sahip olmasından dolayı, özellikle demir-çelik endüstrisinde gelişmiş önemli bir sanayi ülkesidir. Bu nedenle sanayinin gelişmeye başladığı yıllardan itibaren enerjiye olan ihtiyaçtan dolayı kömürü yoğun bir şekilde kullanan ülkeler arasında

yer almaktadır. ABD Enerji Bilgi İdaresi 2022 verilerine göre [47] Dünya kömür rezervi bakımından Almanya, Çizelge 2.1'de gösterildiği gibi ilk on ülke arasında yer almaktadır.



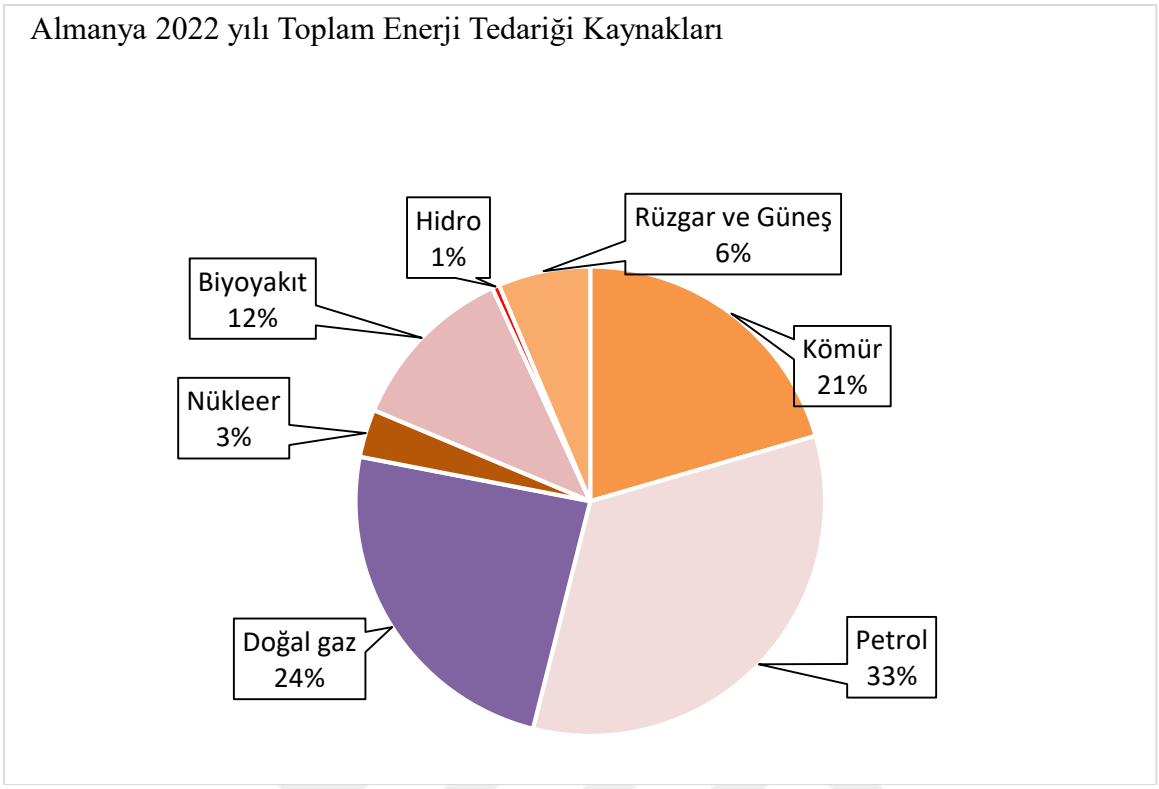
Harita 2.1. Almanya bulunduğu bölge [46]

Uzun yıllar kömür tüketiminde ilk sıralarda yer alan Almanya, iklim değişikliği mücadelesini desteklemek üzere hem Paris Anlaşması hem de EGD hedefleri kapsamında, 2038 yılına kadar kömürden tamamen çıkacağını beyan etmiştir. Bu nedenle de yatırımlarını yenilenebilir enerji kaynaklarına aktarmaya başlamıştır İzlediği politikalar nedeniyle kömür tüketiminde azalma görülmüş olsa da, 2022 yılı başlarında ortaya çıkan Rusya-Ukrayna arasındaki savaş ile birlikte Rusya'nın doğalgaz ithalatını kısıtlaması nedeniyle Almanya, enerji arzını karşılamak üzere tekrar kömür kullanmak zorunda kalmıştır [48].

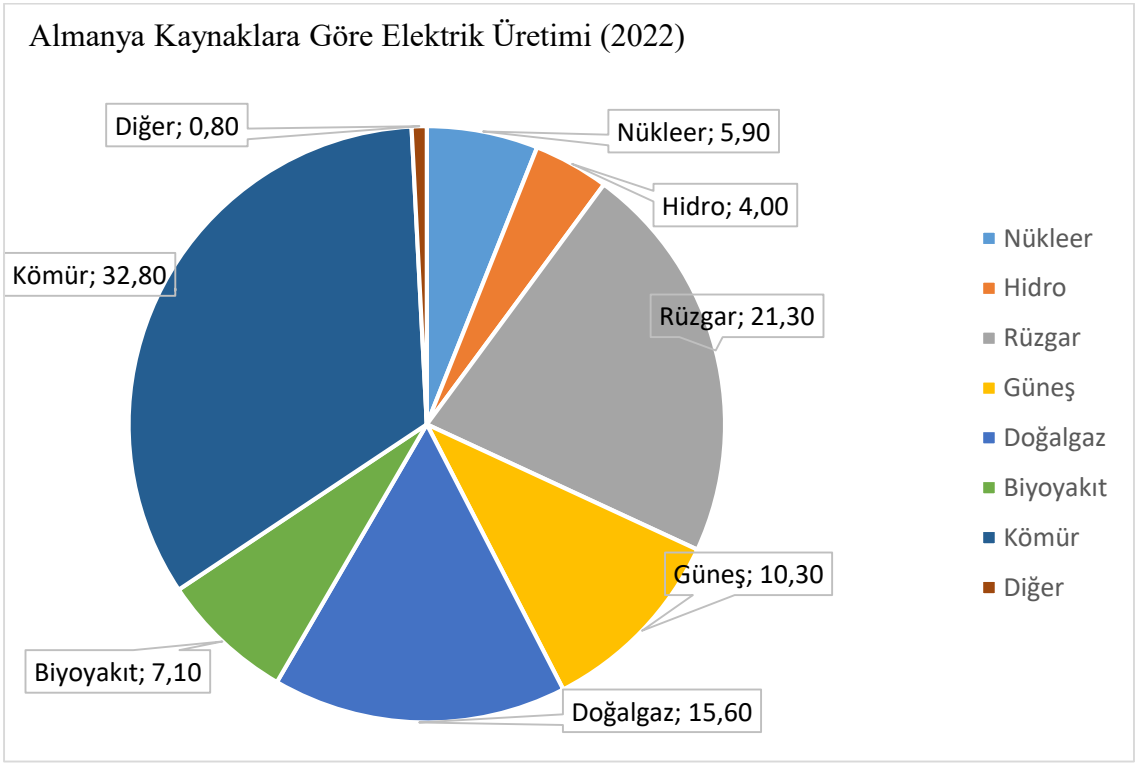
Almanya, toplam enerji tedariğini, IEA 2022 yılı verilerine göre %33 oranında petrolden, %24 oranında doğalgazdan sağlamış olduğu [49] Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Almaya, elektrik üretiminde ise, yine IEA 2022 yılı verileri çerçevesinde yaklaşık %33 oranında kömür ve %21,3 oranında rüzgardan ve %15,6 oranında nükleer kaynaktan yararlanmıştır [49]. Almanya elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 Dünya kömür rezervi en yüksek yirmi ülke (2022 yılı) [47]

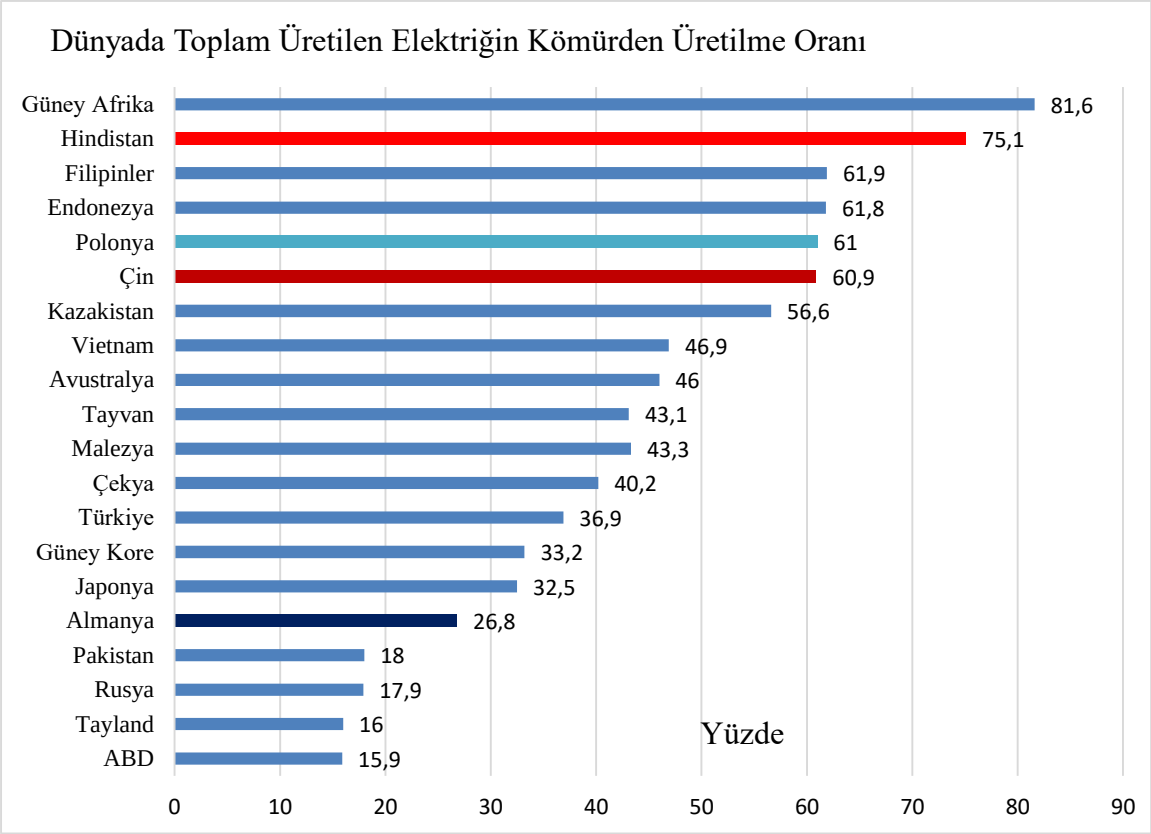
SIRA	ÜLKE	KÖMÜR REZERVİ (MİLYON KISA TON)
1	ABD	274 410
2	Rusya	178 757
3	Avustralya	165 597
4	Çin	157 847
5	Hindistan	122 414
6	Almanya	39 573
7	Endonezya	38 436
8	Ukrayna	37 892
9	Polonya	31 450
10	Kırgızistan	31 415
11	Kazakistan	28 225
12	Türkiye	12 704
13	Kuzey Kore	11 684
14	Güney Afrika	10 905
15	Yeni Zelanda	8 350
16	Sırbistan	8 283
17	Brezilya	7 271
18	Kanada	7 255
19	Esvatini	5 119
20	Kolombiya	5 020



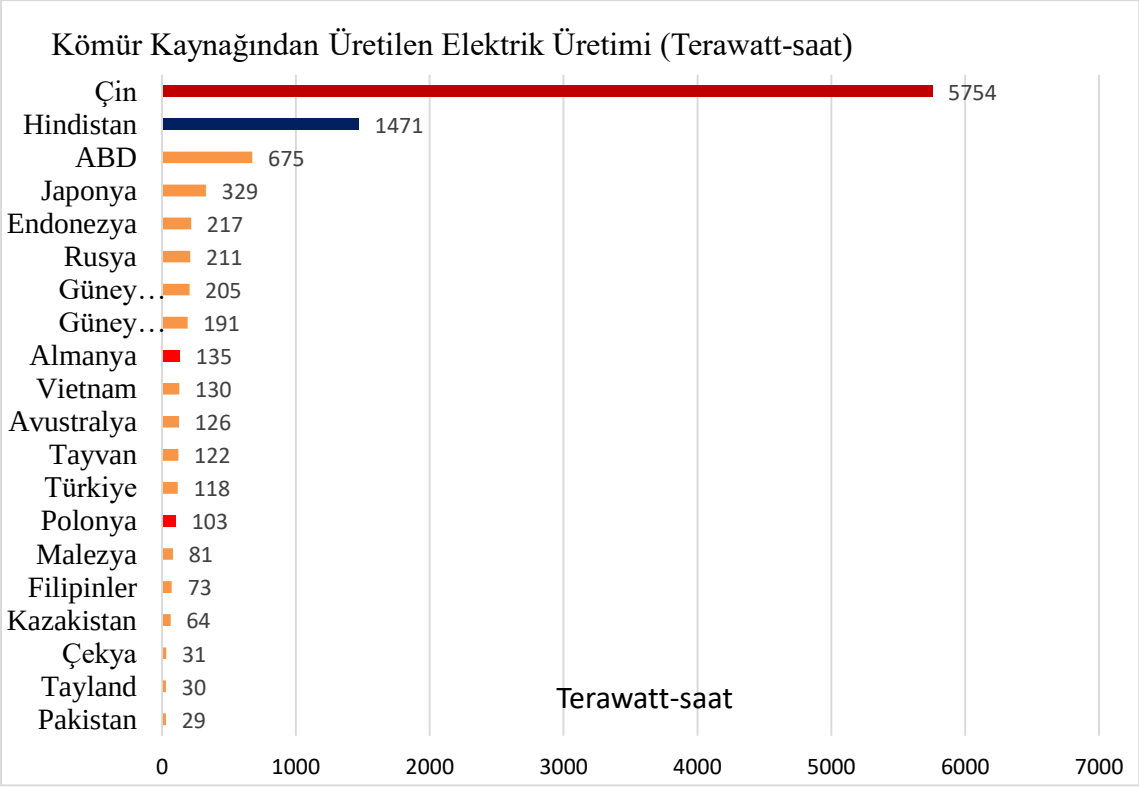
Şekil 2.2. Almanya toplam enerji tedariği kaynakları 2022 yılı [49]



Şekil 2.3. Almanya 2022 yılı elektrik üretimin kaynaklara göre dağılımı [49]



Şekil 2.4. Toplam elektrik üretimde kömür kullanma oranı en yüksek ilk 20 ülke [50]



Şekil 2.5. 2023 yılı elektrik üretimde kömür kaynağının oranı [50]

Almanya enerji üretiminde kömür kaynağını terk ederek yerine yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneleceğini ifade etti. Bu kapsamda, 12 Aralık 2019 tarihinde Ulusal İklim Değişikliği Kanunu'nu resmi gazetesinde yayınlayarak 2050 yılı için izleyeceği yolu ve hedefleri açıkladı [51]. Kanun 18 Ağustos 2021 tarihinde güncellendi. Bu kanun çerçevesinde; enerji, sanayi, ulaşım, binalar, tarım ve atık sektörlerinde uzun dönemli bir strateji benimsenmiş ve 2030 yılına kadar 1990 seviyelerine göre en az %65 oranında, 2040 yılına kadar en az %88 oranında sera gazı emisyonların kademeli olarak azaltılması belirlenmiştir. 2045 yılına kadar nötr iklim hedeflerine varılmasını ve 2050 yılından itibaren eksi yönde değerlerin izlenmesi hedeflenmiştir. Arazi ve orman kullanımı için yine aynı yıllar olmak üzere 2030, 2040 ve 2045 yıllarında sırasıyla en az 25, 35, 40 milyon ton CO_2 eşdeğeri olmak üzere yıllık emisyon değerlerinin azaltılmasına katkı sağlaması hedeflenmiştir. Almanya, bu hedefler için güneş ve rüzgar başta olmak üzere tüm yenilebilir enerji kaynaklarını kullanacağını diğer taraftan enerji tedariği için kömür ve nükleer kaynak kullanmayacağını farklı platformlarda dile getirmektedir.

Almanya nükleer enerji kaynağını kullanan ülkelerden biri olarak bugüne kadar 36 reaktör işletti[52] 1998 yılında nükleerden vazgeçme kararı alındı ancak 2009 yılında tekrar bu karar ertelendi [53], 2011 yılında tekrar nükleerden çıkılması kararı tekrar alınarak 8 reaktör hemen kapatıldı [53]. Geriye kalan diğer reaktörlerin 2022 yılına kadar belli bir plan dahilinde kapatılmasına karar verildi. Ancak Rusya'dan alınana gazın kesintiye uğramasından devam eden nükleer santralların 2023 yılına kadar çalıştırılmasına karar verildi [53]. 2023 yılında elektrik üretimin %1,4'ünü nükleerden karşılayan Almanya 2024 yılı itibariyle santrallarını tamamen kapatmıştır [52].

2.4.2. Çin

IMF tarafından 2024 Nisan ayında yapılan açıklamaya göre [45] Amerika'dan sonra dünyanın en büyük ikinci ekonomisine sahip olan Çin, Harita 2.2'te görüldüğü üzere [54] Asya kıtasında geniş toprakları olan bir ülkedir. Yüzölçümünün büyük olmasının yanı sıra nüfus bakımından Hindistan'dan sonra ikinci sırada [55] yer alarak en kalabalık ülkelerin başında olan Çin, ekonomi ve nüfus büyüklüğüne bağlı olarak enerji üretim ve tüketiminde de önemli bir konuma sahiptir.

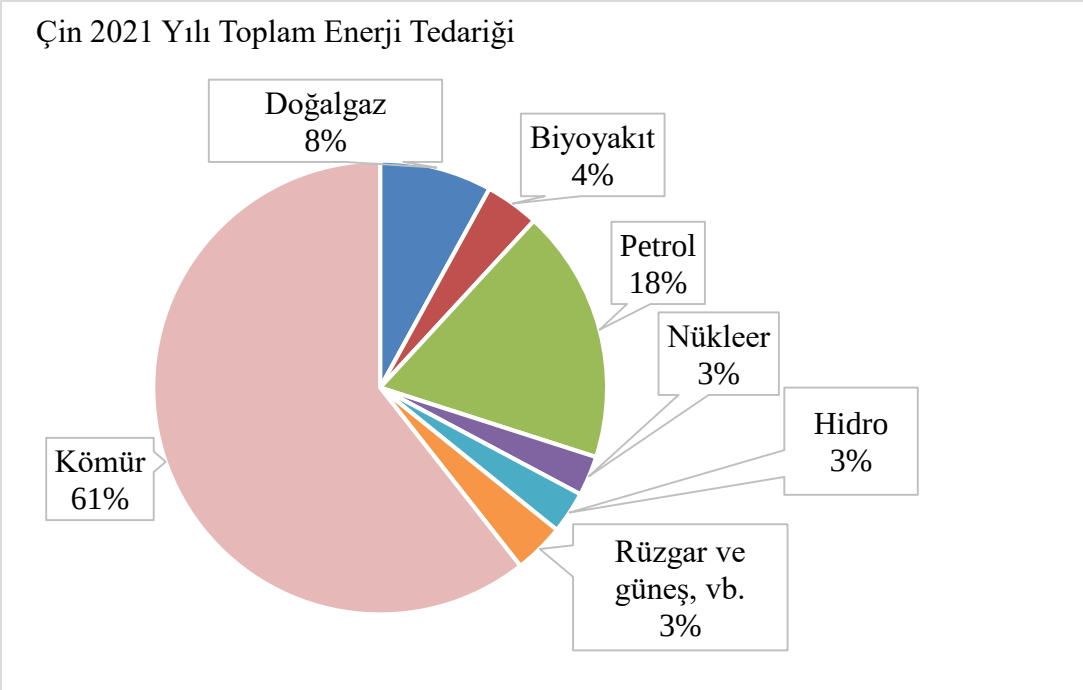
ABD Enerji Bilgi İdaresi 2022 verilerine göre [47], Dünya kömür rezervi bakımından Çin,

Çizelge 2.1.'de gösterildiği gibi dördüncü sırada yer almaktadır. Kömür yönünden zengin maden yataklarına sahip diğer ülkelere benzer şekilde Çin'de de sanayinin gelişmesi ve ilerlemesi ile birlikte enerjiye ihtiyaç duyulan her sektörde kömür yoğun olarak kullanılmıştır. Dünya genelinde 2023 yılı itibariyle toplam elektrik üretiminde kömür kaynağı kullanma oranı en yüksek ülkeler listelendiğinde [50], Güney Afrika ve Hindistan ilk iki sırada yer alırken Polonya ve Çin sırasıyla beşinci ve altıncı sırada yer almakta olduğu Şekil 2.4'te görülmektedir. Ancak sadece kömür kaynağından elektrik üretim miktarına bakıldığında, Şekil 2.5.'te görüleceği üzere, 2023 yılı itibariyle, Çin, 5754 terawatt-saat ile elektrik üretiminde kömür kaynağını kullanan ülkeler arasında açık ara dünya birinciliğini elinde tutmaktadır[50]. Bununla birlikte Çin, çok geniş bir coğrafyada yerleşik olmasından dolayı enerji üretim ve tüketim açısından birçok enerji kaynağında ilk sıralarda yer almaktadır.

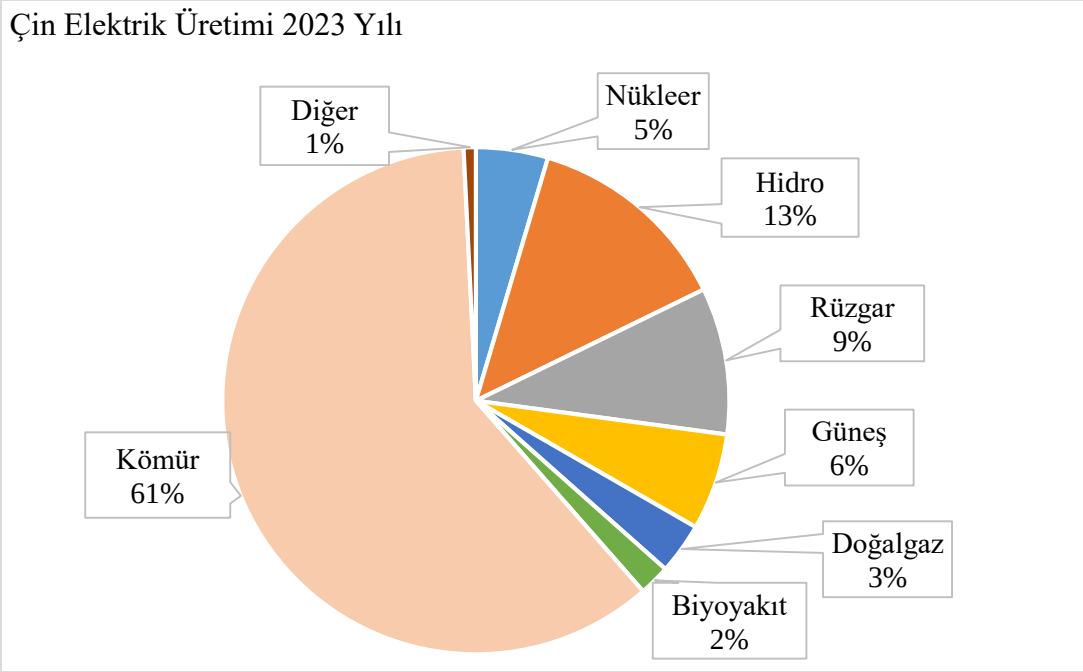


Harita 2.2. Çin bulunduğu bölge [54]

IEA 2021 yılı verilerine göre [56] Çin, Şekil 2.6.'de gösterildiği üzere, toplam enerji tedariğinin yaklaşık %61'ni kömürden, %18'ini petrolden, %3'ünü hidro, %3'ünü nükleerden ve %3'ünü rüzgar ve güneşten karşılamaktadır. Çin elektrik üretiminde ise Şekil 2.7'de gösterildiği üzere, 2023 yılı itibariyle, üretilen elektriğin %61'i kömür, %13'ü hidro, %5'i nükleer, %9 rüzgar, %6 güneş ve %3'ü doğalgaz kaynağından sağlamıştır. Bu değerler, IEA 2021 yılı verileri [56] ile karşılaştırıldığında rüzgar, güneş ve nükleer kaynak kullanımında artış olurken kömür oranında azalma sağlandığı görülmüştür.



Şekil 2.6. Çin kaynaklara toplan enerji tedariği 2021 yılı [56]



Şekil 2.7. Çin 2023 yılı kaynaklara göre elektrik üretimi [57]

IEA tarafından 2023 yılında yayınlanan World Energy Outlook raporuna göre [58] kömür üretim ve tüketiminde ilk sırada yer alan Çin, iklim değişikliği mücadelesi kapsamında kömürden kaynaklı emisyon değerleri nedeniyle gözlerin çevrildiği ülkelerin başında

gelmektedir. Çin'in elektrik üretimi çerçevesinde tükettiği kömür miktarı ve buna bağlı emisyon değerleri tartışmalara neden olmuştur. Net-sıfır hedefi kapsamında 2040 yılına kadar kömürden çıkacağı söylenmiş olsa da, 2021 yılında iklim konusunda yapılan liderler zirvesinde Çin Başkanı tarafından 2026 yılından itibaren kömür oranında azalıma gideceklerini ve 2060 yılı itibariyle kömürden çıkabileceklerini beyan etmiştir [59]. Geniş coğrafyası ile rüzgar, güneş ve su kaynakları yönünden zengin olan Çin 2022 yılında, 2021-2025 yıllarını kapsayan 14.cü beş yıllık yenilenebilir enerji kalkınma ve modern enerji sistem planını açıkladı [60], [61]. Plan ile yenilenebilir enerji üretiminde %50'lik bir artış ile 2020'de 2,2 trilyon kWh'den 2025'te 3,3 trilyon kWh olacak şekilde 2025 yılı itibariyle elektrik tüketiminin %33'ünün yenilenebilir enerjiden karşılanması hedeflenmiştir. Bununla birlikte enerji ihtiyacını karşılamak üzere yeni kömürlü santral yapılmasını onay verilmiştir. Bu nedenle Çin'in kömürden çıkmasının kolay olmayacağı farklı platformlarda tartışılmaya başlanmıştır [62], [63]. Bir diğer taraftan nükleer teknoloji sahibi ülkelerden biri olarak Çin, 56 adet nükleer reaktör ile 54,152 MWe kapasite elektrik üretimi yaparken aynı zamanda 29,635 MWe kapasiteli 28 adet nükleer reaktörü inşa etmektedir [64].

2.4.3. Hindistan

IMF tarafından 2024 Nisan ayında yapılan açıklamaya göre [45], dünyanın en büyük beşinci ekonomisine sahip olan Hindistan, Harita 2.3'te görüldüğü üzere [65] Asya kıtasında yer alan ülkelerinden biridir. Aynı zamanda dünyanın en büyük kalabalık ülkesi olarak nüfus bakımından dünyada birinci sırada yer almaktadır [55].



Harita 2.3. Hindistan bulunduğu bölge [65]

Hindistan, 1990 yıllarına kadar kendi kendine yetebilen ülkeler arasında yer alırken 1991 yılından itibaren liberal ekonomi politikasına kademeli geçiş yapma kararı almış ve 1998 yılına kadar yaptığı ekonomik reformlar ile hızlı bir gelişim göstermiştir [66]. Bu hızlı gelişime bağlı olarak enerji kullanımı da artmıştır. Ülkenin hızlı gelişimi ile birlikte artan enerji talebi için öncelikli kendi kaynaklarından kömürü kullanmıştır. ABD Enerji Bilgi İdaresi 2022 verilerine göre [47], Dünya kömür rezervi bakımından Hindistan, Çizelge 2.1.'de gösterildiği gibi beşinci sırada yer almaktadır.

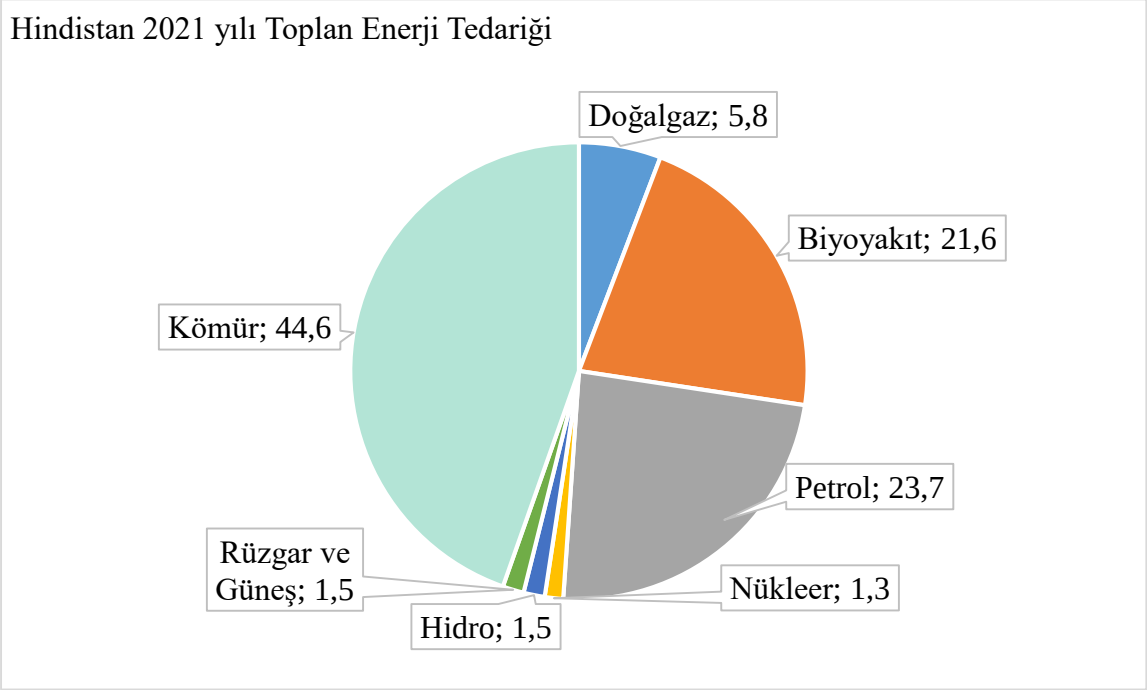
Dünya genelinde 2023 yılı itibariyle toplam elektrik üretiminde kömür kaynağı kullanma oranı en yüksek ülkeler listelendiğinde [50], Hindistan, Güney Afrika'dan sonra %75'lik oran ile ikinci sırada yer aldığı Şekil 2.4'te görülmektedir. Kömür kaynağından elektrik üretim miktarına 2023 yılı itibariyle bakıldığında, Şekil 2.5.'te görüleceği üzere 1471 terawatt-saat Çin'den sonra ikinci sıradadır [50].

Hindistan, IEA 2021 yılı verileri doğrultusunda [67], Şekil 2.8.'de gösterildiği üzere, toplam enerji tedariğinin %44,6'sı kömür, %23,7'si petrol, %21,6'sı biyoyakıt, %5,8'i doğalgaz, %1,5'i hidro ve %1,3'ü nükleer kaynaktan karşılamıştır. Elektrik üretiminde ise, Ember verileri doğrultusunda [68], Şekil 2.9'da gösterildiği üzere, 2023 yılı itibariyle, üretilen elektriğin %75'i kömür, %7,5'i hidro, %2,5'i nükleer, %4'ü rüzgar, %5,6'sı güneş ve %2,6'sı doğalgaz kaynaklarından sağlanmıştır. Elektrik üretiminde, Ember verileri ile IEA 2021 yılı verileri ile karşılaştırıldığında kömür ve güneş kaynak kullanımında artış yaşanırken hidro, doğalgaz ve nükleer kaynaklarda azalma olduğu gözlemlenmiştir.

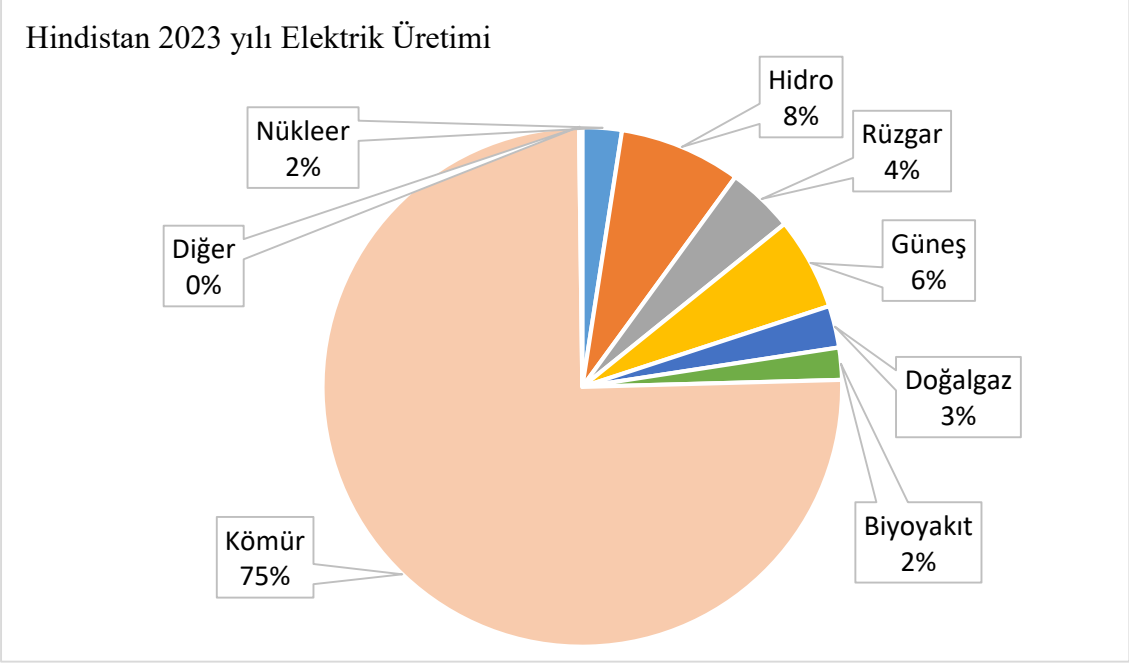
Hindistan Merkez Elektrik Kurumu (The Central Electricity Authority, CEA), 2023 yılı başlarında 2017-2022 yıllarının gözden geçirilmesiyle beş yılın (2022-2027) detaylı planı ve gelecek beş yılın (2027-2032) öngörülerini içeren Ulusal Elektrik Planını (NEP) onayladı ve resmi gazetede yayınladı [69]. Hızlı gelişen ülkedeki enerji talebi 2026-27 yılı için 277,2 GW ve 2031-32 yılı için 366,4 GW olacağı belirtilmiştir.

Muhtemel kurulu güç 2031-32 yılı için 900422 MW olacağı tahmin edilmektedir. Bu gücün 304.147 MW'lık kısmı (kömür-259.643 MW, gaz-24.824 MW, nükleer-19.680 MW) ve 596.275 MW'lık kısmı ise yenilenebilir enerjiden (büyük hidroelektrikten-62.178 MW, güneş-364.566 MW, rüzgar-121.895 MW, küçük hidro-5450 MW, biyokütle-15.500 MW,

pompajlı santral-26.686 MW) karşılanması hedeflenmiştir. Ülkenin 2029-30 yılına kadar fosil dışı kaynaklı kurulu gücü 500 GW civarında olması planlanmıştır [69].



Şekil 2.8. Hindistan kaynaklara toplan enerji tedariği 2021 yılı [67]



Şekil 2.9. Hindistan 2023 yılı kaynaklara göre elektrik üretimi [68]

Hindistan, nükleer santraldan 1969 yılından beri enerji üretimi yapmakta ve 2023 yılında, %3,1 oranla 48235 GW'lık enerji üretimini 20 adet nükleer reaktör vasıtasıyla gerçekleştirmiştir. Toplam 5398 MW kapasite olacak şekilde 7 adet reaktör inşaatı devam ederken 4 adet reaktör ise bekletilmektedir [70].

2.4.4. Polonya

IMF tarafından 2024 Nisan ayında yapılan açıklamaya göre [45], dünyanın en büyük yirmi birinci ekonomisine sahip olan Polonya, AB üye ülkelerinden biri olarak Harita 2.4'te görüldüğü üzere [71] Avrupa'nın kuzeydoğusunda yer alır.

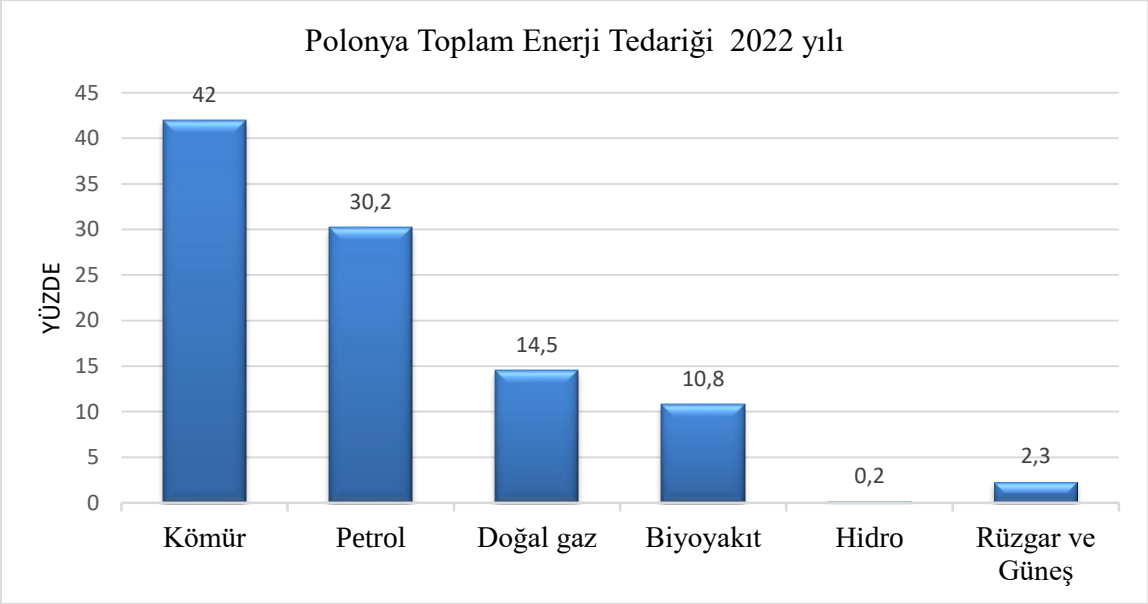


Harita 2.4. Polonya bulunduğu bölge [71]

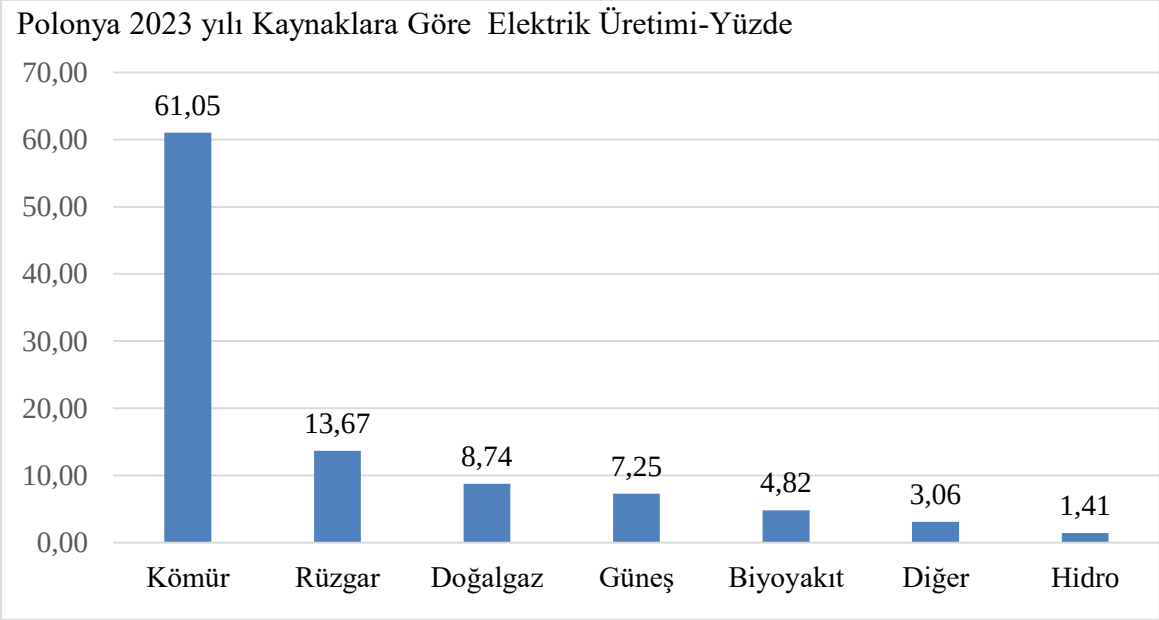
Önemli taşkömürü ve linyit maden yataklarına sahip olan Polonya, ABD Enerji Bilgi İdaresi 2022 verilerine göre [47], Dünya kömür rezervi bakımından Çizelge 2.1.'de gösterildiği üzere dokuzuncu sırada yer almaktadır. Sanayi devrime ile birlikte artan enerji talebini karşılamak üzere kullanılan kömür, ülkede stratejik bir öneme sahiptir [72].

Dünya genelinde 2023 yılı toplam elektrik üretiminde kömür kaynağı kullanma oranı en yüksek ülkeler listelendiğinde[50], Polonya, %61'lik oranla beşinci sırada yer aldığı Şekil 2.4'te görülmektedir. Ancak sadece kömür kaynağından elektrik üretim miktarı incelendiğinde, 103 terawatt-saat üretim miktarı ile on dördüncü sırada yer aldığı Şekil 2.5.'te görülmektedir [50].

Polonya elektrik üretiminde, başta kömür olmak üzere petrol, doğalgaz, biyoyakıt, hidro, rüzgar ve güneş kaynaklarından yararlanmaktadır. IEA 2022 verilerine göre [73], Polonya toplam enerji tedariğinde Şekil 2.10'da görüldüğü üzere öncelikle %42 oranında kömür ve %30 oranında petrol kullanmıştır. Polonya'nın kaynaklara göre elektrik üretimi ise Şekil 2.11'de gösterilmektedir. Şekilde anlaşılacağı üzere 2023 yılı itibariyle Polonya elektrik üretimini, %61 oranında kömür kaynağından sağlamıştır [74].



Şekil 2.10. Polonya kaynaklara göre toplam enerji tedariği 2022 yılı [73]



Şekil 2.11. Polonya 2023 yılı elektrik üretimin kaynaklara göre dağılımı [74]

Kömür kapasitesinin yüksek olması nedeniyle özellikle elektrik üretimini uzun süredir kömürden karşılayan Polonya, iklim değişikliği mücadelesi kapsamında AB içinde kömürü bırakıp bırakmayacağı zaman zaman gündem oluştur. AB içinde en çok kömür kullanan ülkelerden biri olan Almanya, yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimini artırarak kömürü bırakacağı tarihi de belirtirken Polonya, kömürü bırakacağı tarihi tam olarak belirleyememiştir. AB Komisyonu, Eurelectric aracılığıyla tüm üye ülkelerden kömürden çıkış tarihini istemiştir. Eurelectric tarafından hazırlanan Ulusal Enerji ve İklim Planları (NECPs) belgesinde [75], başlangıçta Polonya hemen yer almamıştır. Kömürün yerine ikame edilecek diğer enerji kaynakları kapasitesinin daha düşük olması, Polonya'yı bu dönemde izleyeceği politika açısından zor durumda bırakmıştır.

Polonya İklim ve Çevre Bakanlığı tarafından 2021 yılında kısaca EPP-2040 olarak adlandırılan 2040'a kadar Polonya Enerji Politikası adlı belge yayınlanmıştır [76]. Belgede;

- 2030 yılında, elektrik üretiminde kömür oranın %56'yı aşmayacağı,
- Bütün sektörlerde nihai enerji tüketiminde, yenilenebilir oranı en az %23 olacağı,
- kurulu deniz üstü rüzgar kapasitesinin 2030'ta yaklaşık 5,9 GW ve 2040'ta 11 GW ulaşılacağı,
- nükleer santral kapasitesi 2033'te 1-1,6 GW olacak şekilde devreye alınmasına başlanacağı,
- sera gazı emisyonlarının 1990 seviyesine göre yaklaşık %30 azalma olacağı,
- bütün evlerin bölgesel ısıtma ile ısınacağı beyan edilmiştir.

.

Bu belge sonrasında ilerleyen süreçte, yerli taşkömürü ve linyite bağımlı olan enerji sistemi enerji dönüşümünde ilerleme kaydedildi ve AB içinde en hızlı büyüyen güneş PV pazarlarından biri oldu ve ayrıca ısı pompalarında da gelişti[73].

Polonya, Küresel Kömürden Temiz Enerjiye Geçiş Bildirisini 1 Ekim – 13 Kasım 2021 tarihlerinde Birleşik Krallık İskoçya'da düzenlenen COP26'da imzaladı, ancak dünyanın ilk 25 büyük ekonomisi içinde yer almasına rağmen gelişmekte olan ülke statüsünde olduğunu belirterek bu yönde uygulamaya tabi olmak istedi [77]. Süreç içinde Polonya, 2023 Ekim ayında seçime gitmiş ve kömür enerjisinin kademeli olarak bırakılması dahil çevresel faaliyetlerin artacağını ifade eden parti seçimleri kazanmıştır [78]. Bu konuda plan

yapacaklarını ve tarih vereceklerini basına açıklamışlardır [78].

Nükleer enerji kaynağının enerji üretiminde yer alması çalışmaları uzun süredir devam eden Polonya, Zarnowiec'te 1984 yılında iki nükleer santralı yapmak üzere inşaatına başlamış ancak inşaatın %40'ı tamamlanınca 1990 yılında proje iptal edilmiştir [79]. İklim değişikliği mücadelesindeki kömürden çıkış politikasından dolayı 2009 yılında nükleer enerjiyi, enerji sistemine tekrar dahil etme kararı aldı. Bu konudaki çalışmalar devam etmektedir [79].

3. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

Doğal enerji kaynaklarının kullanımı sonucunda tükenmeyen ve yenilenen enerji kaynakları olarak bilinen yenilenebilir enerji kaynakları için Birleşmiş Milletler tarafından yapılan tanım aşağıdaki gibidir [80]:

"Yenilenebilir enerji tüketildiği zaman daha yüksek oranda yenilenen (güneş ışığı, rüzgar gibi) doğal süreçlerden elde edilen enerjidir. Güneş, rüzgar, jeotermal, biyokütle yanı sıra dalga, akıntı ve gelgit gibi su gücünü içeren kısaca hidro (hidroelektrik) olarak adlandırılan kaynaklar, en genel yenilenebilir enerji kaynaklarıdır."

Yenilenebilir enerji kaynakları ve teknolojilerine aşağıda kısaca tanıtılmıştır: Ayrıca son yıllarda üzerinde önemle durulan ve gelecekte enerji sistemlerinde doğrudan ya da dolaylı bir şekilde yer alması beklenen hidrojen bu bölümde kısaca tanıtılmıştır.

3.1. Güneş Enerjisi ve Teknolojileri

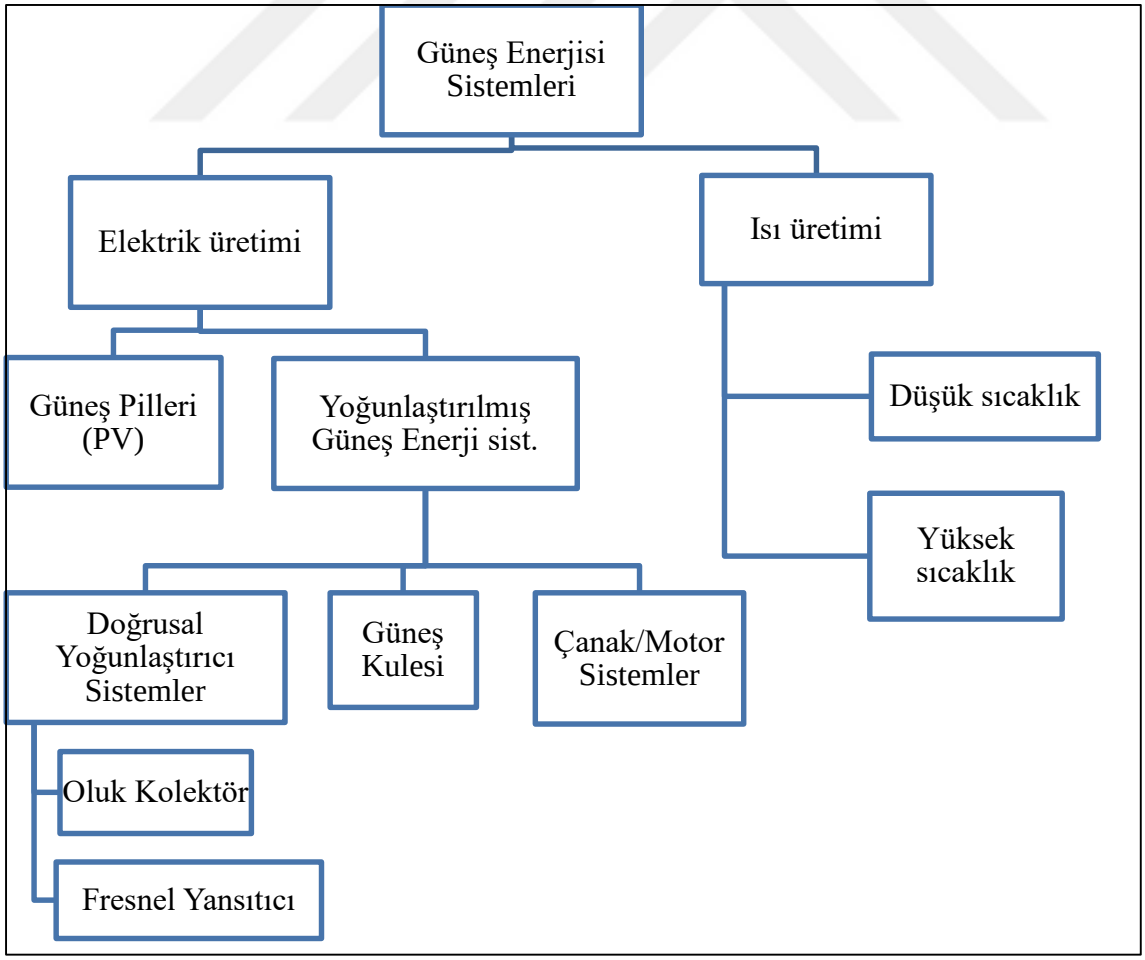
Evrendeki en büyük enerji kaynağı olan güneş, bitmeyen enerjisi ile yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelir. Güneş, insan başta olmak üzere tüm canlılar için vazgeçilmez bir kaynaktır.

Bir gaz küresi olan güneş, yaklaşık % 91 H_2 ve % 8,9 helyum içermektedir [81]. Aynı zamanda çok az miktarda oksijen, karbon, demir, sodyum ve azot vb. gazlar da bulunmaktadır. Güneşteki H_2 atomları, sürekli "füzyon[3]" [82] olarak adlandırılan reaksiyonu geçirdiğinden reaksiyonla birlikte sürekli enerji açığa çıkar. Bu enerji Dünya ve diğer gezegen ve yıldızlara yayılır. Yayılan güneş ışınları doğrusal hareketli olup 300000km/s hız ile atmosfere kadar zayıflamadan gelir ve güneş sabiti adını alır. Atmosfere kadar çok fazla değişime uğramadan gelen güneş sabiti dünyaya girdikten sonra Dünya eliptik yapısı nedeniyle yıl içinde değişkenlik gösterebilir. Dünyaya gelen güneş ışını, bir kısmını cisim emer, bir kısmı yansır ve bir kısmı da cisimden geçer.

[3] Füzyon: İki hafif atom çekirdeğinin birleşerek tek bir ağır atom oluşturacak şekilde büyük miktarda enerjinin açığa çıktığı süreçtir [82].

Canlıların var oluşundan itibaren yararlandığı güneş, zaman içinde ısınma, aydınlanma ve gıda kurutumu gibi alanlarda değerlendirilirken teknolojinin gelişimi ile birlikte enerji üretimine yönelik kullanılmaya da başlanmıştır. Güneş enerjisinden yararlanma 1970 yıllardan itibaren hız kazanmıştır. Gelinen noktada güneş enerjisi, elektrik veya ısı üretimine bakılmaksızın; pasif kullanım, su ısıtılması, proses suyu eldesi, güneş pilleri fotovoltaik-PV, yoğunlaştırılmış güneş şeklinde genel bir sınıflandırma yapılmıştır [83].

Birçok kaynakta yer alan pasif kullanım terimi, güneş enerjisinden herhangi bir alet veya cihaz kullanılmadan yararlanmayı ifade eder. Isı ve ışık amacıyla güneş ışınının doğrudan kullanılmasını belirtir [83]. Evlerin güney yönüne bakacak şekilde yapılması örnek verilebilir. Su ısıtılması ise, ev ve işyerlerinde ihtiyaç duyulan sıcak su temininde güneşten yararlanmayı tarifler. Ülkemizde de uzun yıllardır yapılan bir uygulamadır. Bu sınıflandırma, elektrik üreten sistemler ve ısı üreten sistemler olmak üzere Şekil 3.1'te görüldüğü gibi genel olarak sınıflandırılmıştır.

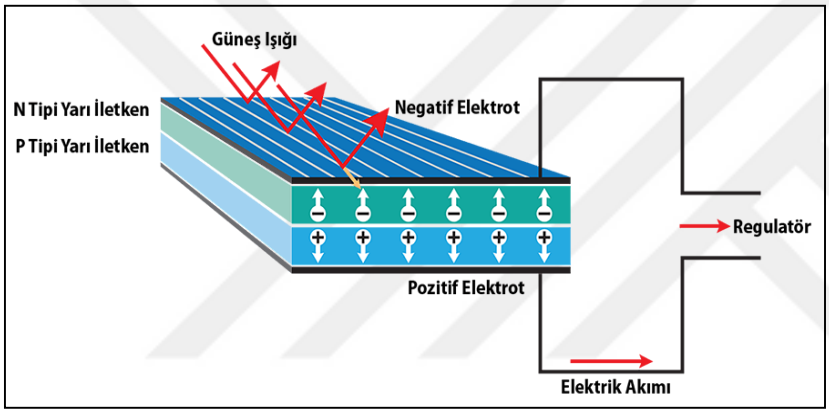


Şekil 3.1. Güneş enerji sistemlerinin sınıflandırılması

Güneş enerjisinden elektrik üretimi, güneş pilleri fotovoltaik-PV ve yoğunlaştırılmış güneş enerjisi olmak üzere iki ana başlık altında incelenecektir.

3.1.1. Güneş pilleri (Fotovoltaik-PV)

Yaygın olarak fotovoltaik denilen güneş pilleri, güneş ışınını doğrudan elektriğe dönüştürür [83]. Güneş ışını, kullanılan ikili yarı iletken katmanların birinden elektron koparır ve bu kopan elektron diğer katman tarafından çekilir ve böylece elektron hareket ederken elektrik akımı oluşur. Oluşan akım çeşitli iletkenler vasıtasıyla kullanılacağı bölgeye taşınır. Bu yapı Resim 3.1'de gösterilmektedir [84].



Resim 3.1. Güneş pili şematik görünümü [84]

3.1.2. Yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemleri

Güneş pilleri vasıtasıyla çok fazla elektrik elde edilememektedir veya çok fazla alanı kullanmak gerektiğinden ekonomik olmamaktadır. Bu nedenle güneş ışınları, aynaların yansıtma özelliğinden yararlanılarak belli bir noktaya veya alana yönlendirilir. Böylece odaklanan noktada, daha fazla enerjinin oluşması sağlanır. Aynalar vasıtasıyla, güneş ışınlarının belli bir noktada toplanması yöntemi, yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemleri (Concentrating solar-thermal power -CSP) olarak adlandırılmaktadır.

CSP sistemleri, elektrik üretmenin yanı sıra tuzsuzlaştırma, rafineri, gıda kurutma ve kimyasal üretim gibi alanlarda kullanılabilmektedir. Bu nedenle performansının artırılması, maliyetinin düşürülmesi, yaşam ömrünün uzatılması ve malzeme ve ekipman güvenirliğinin geliştirilmesi konularında yapılan çalışmalar ABD tarafından desteklenmektedir [85]. Son

yıllarda CSP ile üretilen elektriğin maliyeti daha verimli sistemlerin geliştirilmesi, daha yaygın termal enerji depolamanın kullanımı sayesinde %50 oranında azaltılmıştır [85].

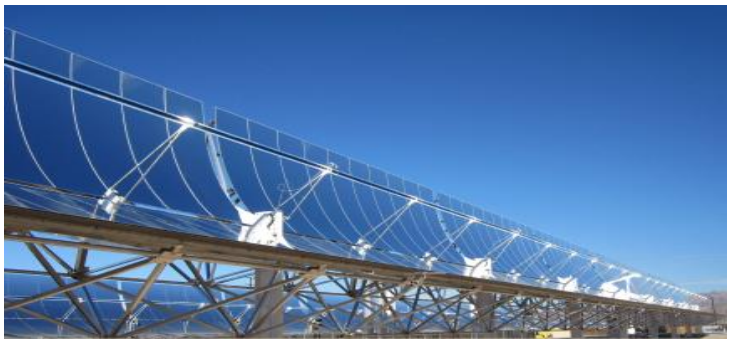
Yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemleri, kullanılan aynaların şekillerine üç başlıkta toplanabilir [83].

Doğrusal yoğunlaştırıcı sistemler

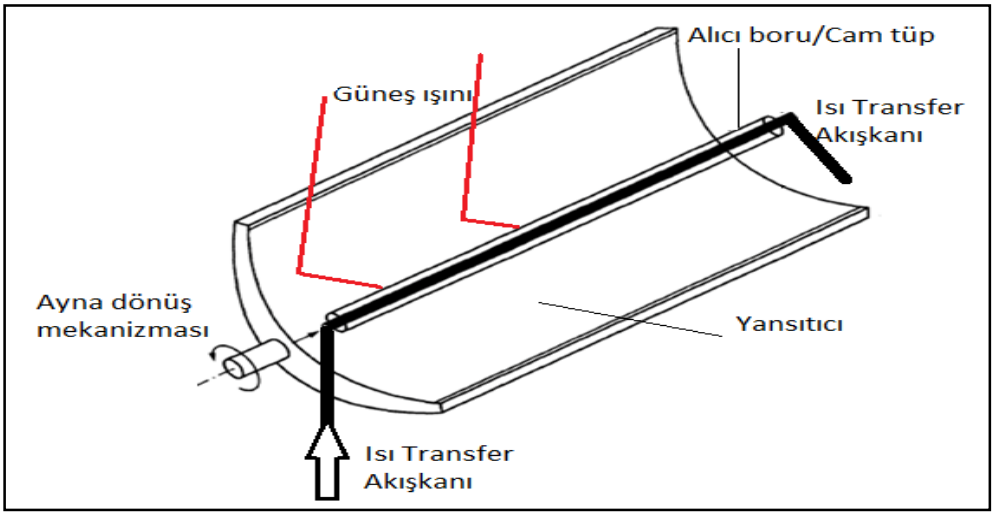
Uzun dikdörtgen veya kavisli (U şeklinde) şekilde olan aynalar, güneş ışınlarının istenilen noktaya doğru yönlendirir. Aynalardan yansıyan güneş ışınları, aynalar ile aynı düzlemde uzanan "alıcı tüp (ısı emici boru)" olarak adlandırılan ve içinde ısı aktarıma akışkanı (HTF) geçen borulara gelir. Borulara gelen ışınlar sayesinde HTF ısınır. Isınmış olan HTF, ısı değiştiricisi vasıtasıyla kullanılacak olan diğer akışkanları ısıtır. Doğrusal yoğunlaştırıcılar, şekillerine göre ikiye ayrılmıştır:

1. *Oluk kolektör*

Aynalar oluk (parabolik) şeklinde olması nedeniyle bu isimle adlandırılmıştır. Genellikle İngilizce ismi Parabolic Trough Collector terimin kısaltması olan PTC kullanılır. Oluk kolektör; ısı transfer sıvısının yer aldığı alıcı tüp veya cam tüp, gelen güneş ışınını tüpe aktaran yansıtıcı ve yansıtıcının güneş yönünü takip etmesini sağlayan dönüş mekanizmasını içerir. Güneşten gelen tüm ışınları alacak şekilde, aynaların uzunluğu boyunca aynanın odak noktasında alıcı tüp yer alır. Elektrik üretimi amacıyla ABD, Kaliforniya bölgesinde yapılan oluk kolektörlü güneş santralı Resim 3.2'de görülmektedir [71]. Bir güneş oluk kolektör bileşenleri Resim 3.3'te gösterilmektedir.



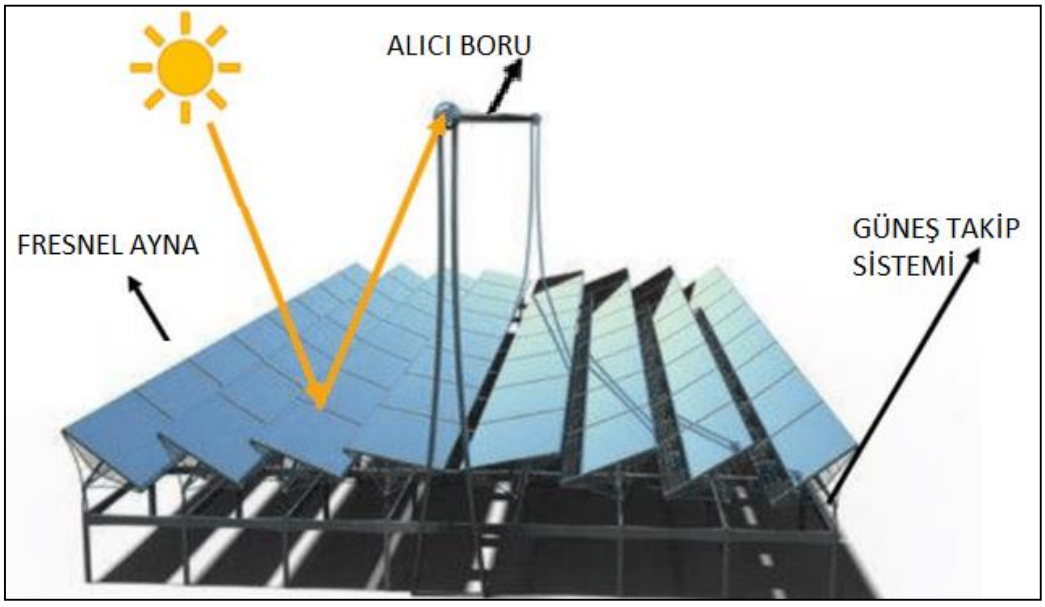
Resim 3.2 Güneş oluk kolektörü (Kaliforniya, ABD) [86]



Resim 3.3. Güneş oluk kolektör bileşenleri

2. *Fresnel yansıtıcı*

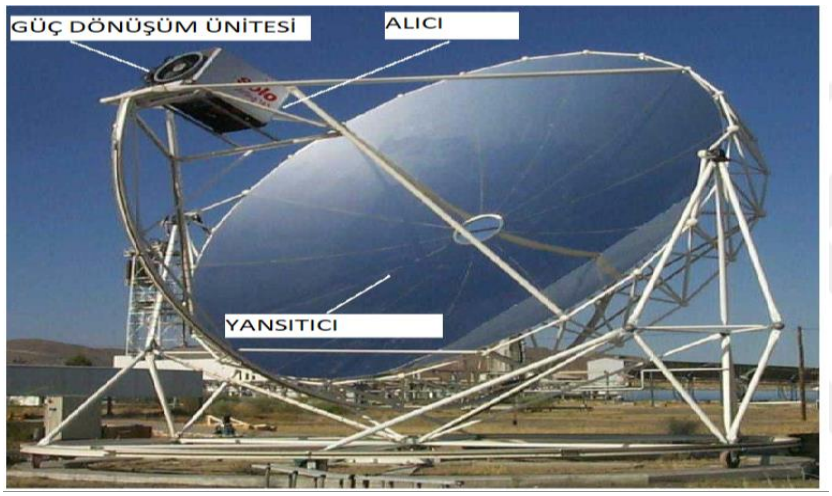
Adını ünlü fizikçi Augustin Jean Fresnel'den alan fresnel yansıtıcılar, düz yapıya sahiptir. Yansıtıcıların güneşi takip etmede daha fazla hareket kabiliyetine sahip olmasını sağlamak için bir alıcı tüp, aynaların üzerine gelecek şekilde yerleştirilir. Yine oluk kolektörde olduğu gibi boru içinde HTF vasıtasıyla istenilen yere ısı aktarımı gerçekleştirilir. Fresnel yansıtıcıda yer alan ana ekipman Resim 3.4'te gösterilmektedir [87].



Resim 3.4. Fresnel ayna güneş kolektör ekipmanı [87]

Çanak/Motor sistemler

Ayna şekillerine göre sınıflandırmada yer alan çanak sistemler, uydu antenlerine benzer şekilde çanak yansıtıcıların kullanıldığı sistemdir [83]. Bir örneği Resim 3.5'te gösterilen çanak tipi kolektörde [88], sistem bir çanak şeklindedir ve aslında çok sayıda küçük aynalardan oluşmaktadır. Diğer doğrusal yoğunlaştırıcı sistemlerde olduğu gibi bu yapıda da güneş ışınları yansıtıcılara gelir ve termal alıcı tüpte toplanır. Emici borular, toplanan ısıyı genaratöre aktarır.



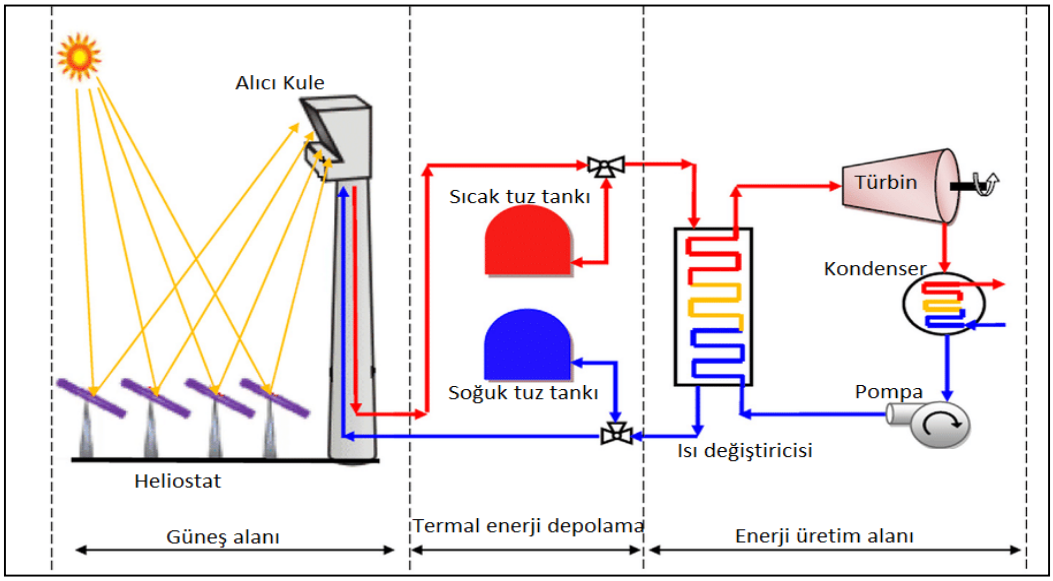
Resim 3.5. Çanak tipi güneş kolektörü [88]

Termal alıcı tüp ve generatör genel olarak güç dönüşüm ünitesi olarak adlandırılır. Çanak ile generatör arasında arayüz olan termal emici boru [89], yoğunlaştırılmış güneş ışınlarını emer, enerjiyi ısıya dönüştürür ve ısıyı generatöre aktarır. Bir termal alıcı tüp, genellikle akışkan olarak hidrojen veya helyum kullanan tüp demetidir [89]. Emici boru tarafından ısıtılan akışkan, pistonları hareket ettirmeyi ve mekanik güç oluşturmayı sağlar. Mekanik güç, elektrik üretmek üzere bir generatörü veya alternatörü çalıştırmak için kullanılır. Günümüzde çanak/motor sistemlerinde ısı motoru olarak stirling motoru, yaygın şekilde kullanılmaktadır [83].

Güneş kulesi

Güneş ışığını, kulenin tepesindeki bir alıcıya odaklamak ve yoğunlaştırmak için heliostat olarak bilinen düz, güneşi takip eden aynalardan oluşan bir sistemdir [83]. Alıcı içinde yer

alan HTF sayesinde buhar üretilir ve buhar, bir türbin-generatör sistemi ile elektrik üretir [83]. Güneş kulelerinde, HTF olarak su/buhar kullanılmasının yanı sıra gelişmiş tasarımlarda, daha iyi ısı aktarma ve enerji depolama yönleriyle ergimiş nitrat tuz tercih edilebilmektedir. Enerji depolama veya termal depolama uygulaması, bulutlu havalarda veya geceleri üretim yapılabilmesine imkan sağlamaktadır [83]. ABD, Nevada, Crescent Dunes Güneş Enerji Santralı, örnek bir sistem olarak Resim 3.6'da ve güneş kulesinin genel şematik görünümü Şekil 3.2'de gösterilmektedir



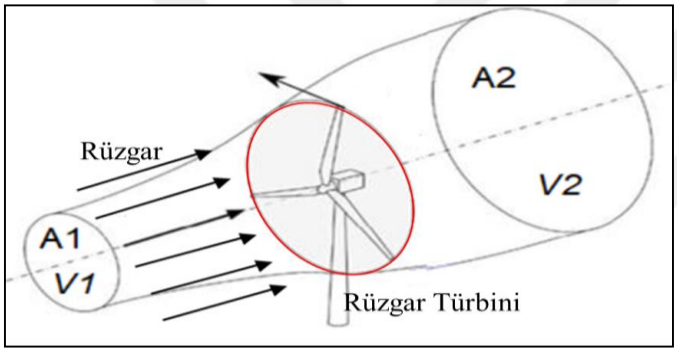
Şekil 3.2. Güneş kulesi sistemi [90]



Resim 3.6. Güneş Kulesi ABD, Nevada, Crescent Dunes Güneş Enerji Santralı [91]

3.2. Rüzgar Enerjisi ve Teknolojileri (Kara ve Deniz üstü)

Rüzgar, güneş ışınlar ile yeryüzünün düzensiz ısıtılması ve dünyanın dönmesi sonucunda havanın yüksek basınçlı noktadan alçak basınçlı noktaya doğru hareketi olarak bilinir. Rüzgarın oluşmasıyla havada kinetik enerji de oluşmuş olur. Havanın bu kinetik enerjisinden genellikle yel değirmeni olarak bilinen teknolojiden binlerce yıldır yararlanılmış ancak elektrik üretimi, rüzgar türbinleri teknolojisinin gelişimi ile yakın tarihte başlamıştır. Havanın hareketi ve rüzgar türbinine doğru A1 alanı – V1 hızı ile gelişi ve A2 alanı – V2 hızı ile çıkışı Şekil 3.3'te görülmektedir. Burada kanatlara gelen rüzgar, kanatların hareketlenmesine ve türbin rotorunun dönmesine böylece enerjiye dönüşmesine neden olur.



Şekil 3.3. Rüzgarın, türbin kanatlarına gelişi ve çıkışı

Rüzgar enerjisini tasarı sürecinde, analizlerde ve değerlendirilme aşamasında kullanılan kavramlar aşağıda açıklanmıştır.

Kapasite faktörü

Rüzgar enerjisinden yararlanmak için seçilen sahada veya bulunulan bölgede, yeteri kadar rüzgarın olması gerekir. Rüzgar, coğrafi koşullara bağlı bir olgudur, bu nedenle üretim yapılmadan önce kapasitenin belirlenmesi gerekir. Bir santralın esas alınan belirli bir sürede ürettiği toplam enerjinin, santralın kuruluş kapasitesine diğer bir deyişle tam kapasite üretebileceği enerjiye bölümü ile elde oran olarak tanımlanan bu kavram genellikle yenilenebilir enerji kaynaklarında yaygın bir şekilde kullanılır. Bir rüzgar santralının kuruluş kapasitesi 10 MW iken, esen rüzgara bağlı olarak 8 MW elde ediliyorsa kapasite oranı %80 olarak adlandırılır.

Güç katsayısı

Rüzgar türbin verimliliğinin göstergesi olan bu kavram, rüzgar enerji sektöründe sıklıkla kullanılmaktadır. Türbin tarafından sağlanan gerçek üretim, belirli bir hıza sahip rüzgardan elde edilen türbinin teorik üretimine bölünmesi ile elde edilen oran olarak tanımlanmaktadır.

$$C_P = \frac{P_{türbin}}{P_{teorik}} =$$

$P_{Türbin}$,: Gerçekte türbin tarafından üretilen ve ölçülebilen üretim çıktı değeridir.

P_{teorik}: Tasarım değeri ve o anki rüzgar değerine göre azami üretim gücünü gösterir.

$$P_{teorik} = 0{,}5\ \rho\ A\ V^3 \quad \text{(Watt)} \qquad A = \frac{\Pi D^2}{4} \quad (m^2)$$

ρ (kg/m^3): havanın yoğunluğu

V (m/s) hava hızı

A (m^2): türbin kanatlarının taradığı alan

D: türbinin çapı

Uç-hız oranı

Rüzgar türbin kanatlarının uçlarının hızı ile rüzgar hızı arasındaki oranı ifade eden bu kavram, rüzgar türbin tasarımında önemli bir faktör olarak aşağıda belirtilen eşitlik ile hesaplanır.

$$\lambda = \frac{\text{Kanatların açısal hızı}}{\text{Rüzgarın hızı}} = \frac{\omega\ R}{V}$$

λ: Uç hız oranı

ω: Türbinin açısal hızı (rad/s)

R: Türbin kanat yarıçapı (m)

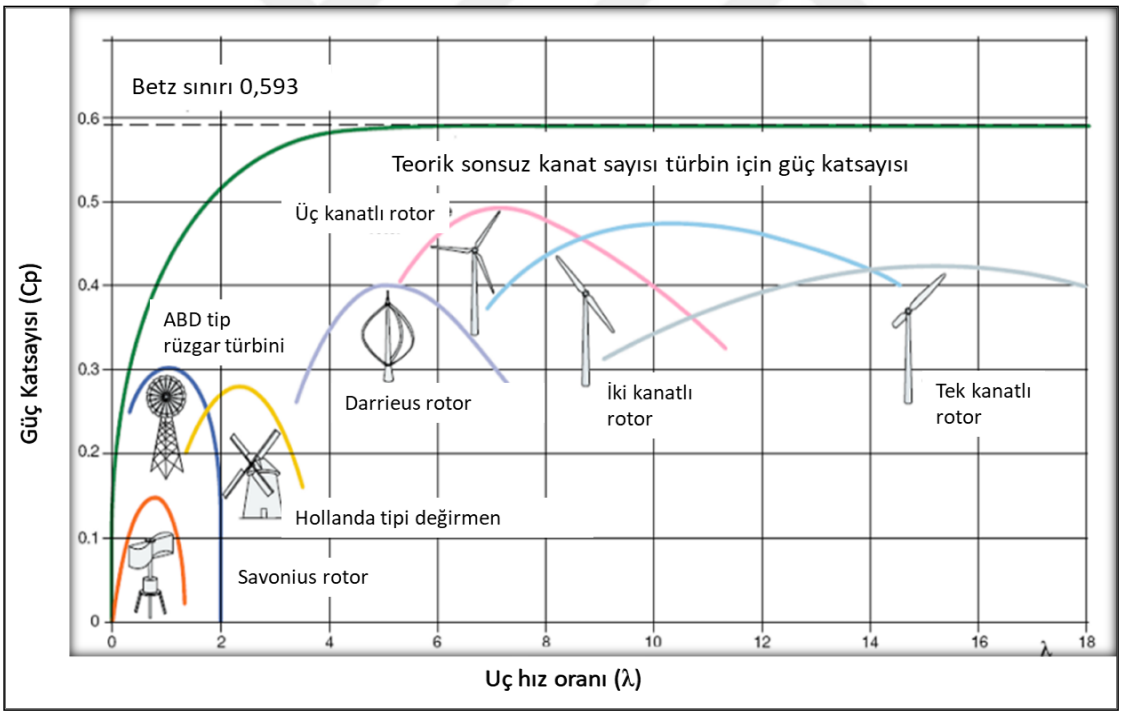
V: Rüzgarın hızı (m/s)

Türbinlerin kıyaslanmasında Şekil 3.4'te yer alan güç katsayısı-uç hız oranı grafiği

kullanıldığından türbin kanat uç hız oranları önemli bir yer teşkil eder.

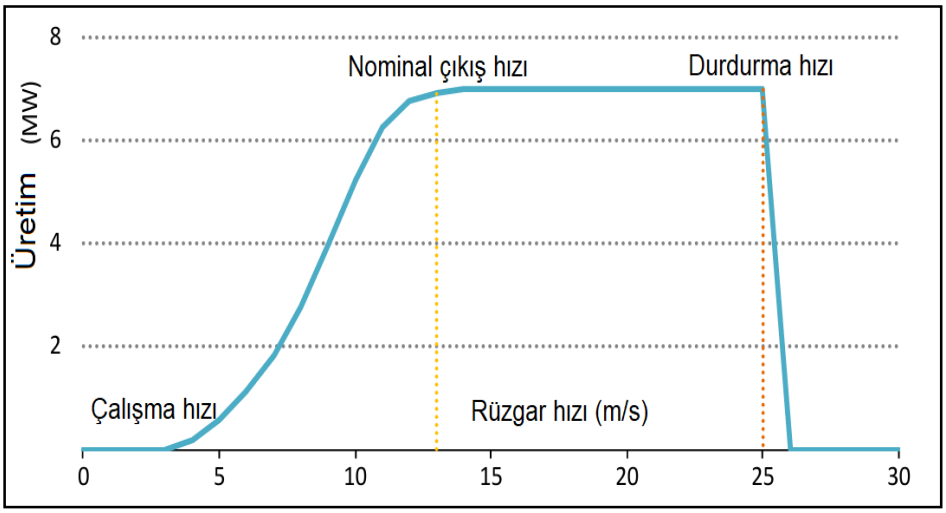
Betz sınırı

Alman fizikçi Albert Betz tarafından 1919 yılında öne sürülen ve kendi ismi ile "Betz Sınırı" olarak adlandırılan görüş; "rüzgar türbin verimlerinin ulaşabileceği maksimum bir sınır değeri vardır" şeklindedir. En ideal bir rüzgar türbini, rüzgarın tamamını enerjiye dönüştürmesi rüzgar akışının doğası gereği mümkün değildir [92]. Bir rüzgar türbini, rüzgarın kinetik enerjisini, en fazla 16/27 (0,593) oranında kullanarak üretim yapabilir diğer bir deyişle rüzgarın en fazla %59,3'nü enerjiye dönüştürülebilir. Bu nedenle tüm rüzgar türbinlerinin güç katsayıları maksimum 0,593 olacak şekilde Betz sınırı olarak belirlenmiş değer ile sınırlıdır [92]. Gerçekte rüzgar türbin verimleri %35-45 aralığında olduğundan, Betz sınırına ulaşamamışlardır. Türbinlerin güç katsayıları Şekil 7.6'da gösterilmektedir.



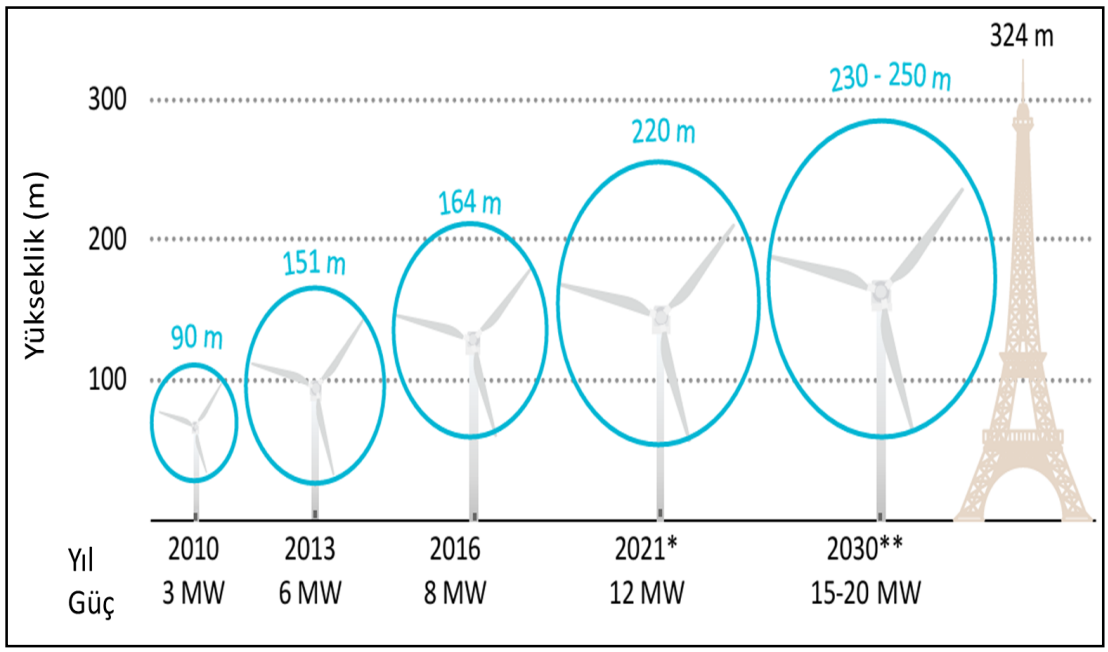
Şekil 3.4. Rüzgar türbin çeşitlerinin güç katsayısına göre uç hız oranının değişimi [93]

Rüzgar türbinlerinin çalışması, Şekil 3.5'te gösterilen hız-güç eğrisi olarak tanımlanan grafik ile açıklanmaktadır. Kanat teknolojisine göre rüzgar hızı 3-5 m/s aralığında üretim gerçekleşir ve hız 25 m/s'ye ulaştığında üretim, güvenlik nedeniyle durur.



Şekil 3.5. 7 MW kapasiteli bir rüzgar türbini için hız-güç eğrisi [94]

Rüzgar türbinleri ilk olarak karada konuşlandırıldı. Ancak ilerleyen süreçte deniz üzerinde oluşan muazzam rüzgar gücü tespit edilince deniz üstünde de yapılmaya başlandı. Dünyanın birçok yerinde yapılan ölçümlerle rüzgar atlası oluşturuldu. Büyük rüzgar kapasiteleri tespit edildikçe, daha uzun türbinler ve daha büyük rotorlar üretilmeye başlandı. Rüzgar türbin gücü, yüksekliği ve kanat süpürme genişliği alanlarındaki teknolojik gelişmeler sonucunda rüzgar türbin kapasite değerleri de artmıştır. Bu gelişim yıllara göre ilerleme durumu Şekil 3.6'da gösterilmiştir [94].



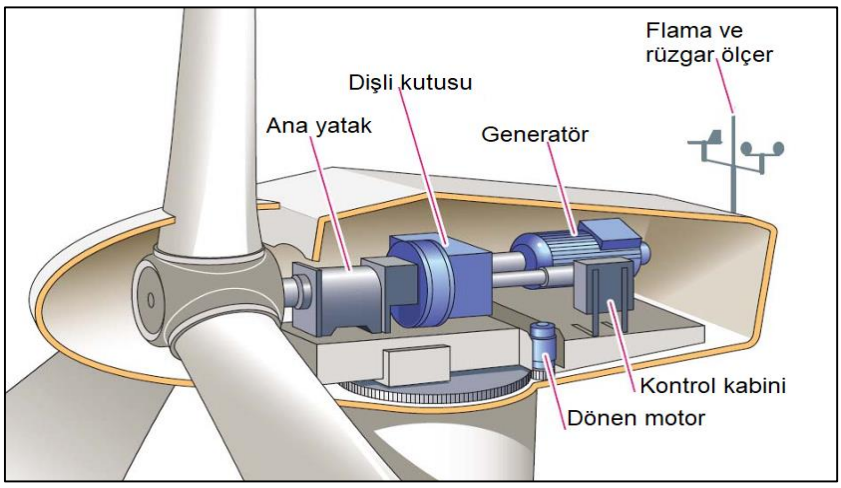
Şekil 3.6. Güç, yükseklik ve kanat süpürme genişliklerinin yıllara göre gelişimi [94]

Rüzgar türbinleri genel olarak yatay ve düşey eksenli rüzgar türbini olarak iki başlıkta incelenir [95].

1) Yatay eksenli rüzgar türbinleri
a. Klasik rüzgar türbinleri
b. Yavaş rüzgar türbinleri
c. Hızlı rüzgar türbinleri
2) Düşey eksenli rüzgar türbinleri

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin dönme eksenleri rüzgar yönüne paralel ve kanatlar rüzgar yönüne diktir. Elektrik üretimi amacıyla kullanılan ticari türbinler genellikle yatay eksenlidir. Bu türbinler genellikle rüzgarı önden alacak şekilde (upwind) tasarlanmıştır. Yel değirmeni olarak bilinen klasik rüzgar türbinlerinin devir sayıları düşük, türbin boyutu büyüktür. Yüksek hız gerektirmeyen yavaş türbinlerde ise kanat sayısı fazla ve devir sayısı düşüktür. Genellikle elektrik üretimi amacıyla tasarlanan hızlı rüzgar türbinlerinin daha fazla güç elde edilir. Bu türbinlerin devir sayısı yüksek fakat kanat sayısı azdır.

Düşey eksenli rüzgar türbinlerinin dönme eksenleri düşey ve rüzgara diktir. Türbin kanatların içbükey ve dışbükey yüzeyleri arasındaki çekme kuvveti farkı nedeniyle dönme hareketi oluşur. Diğer eğik eksenli rüzgar türbinlerinin dönme eksenleri, düşeyle rüzgar yönünde bir açı yapar. Ayrıca, kanatlar ve dönme ekseni arasında da belirli bir açı bulunmaktadır. Bir rüzgar türbinin genel parçaları Resim 3.7'de görülmektedir [96].



Resim 3.7. Rüzgar türbini ana parçaları [96]

3.3. Jeotermal Enerjisi ve Teknolojileri

Jeotermal enerji, İngilizce kökenli yeryüzü (geo) ve ısı (thermal) kelimelerinden oluşturulan bir terim olarak yeryüzünün altında yer alan ulaşılabilen sıcak suyun ısı enerjisini ifade etmektedir [97]. Jeotermal kaynak denildiğinde, yerkabuğu altında birkaç metreden birkaç kilometreye kadar değişen farklı derinliklerde ve birikmiş ısı ile basıncın oluşturduğu farklı sıcaklıklardaki su anlaşılır. Bu suyun enerjisinden yararlanmak üzere yeraltı kuyuları açılır ve çeşitli uygulamalarda kullanmak üzere yüzeye çıkartılır. Çevresindeki yeraltı ve yerüstü sularına göre daha fazla çözülmüş mineral, çeşitli tuz ve gaz içerebilen sıcak su, **y**enilenebilir, temiz, ekonomik ve çevre dostu bir kaynak olarak kabul edilmiştir [98]. Jeotermal kaynaklar; elektrik üretimi, ısı üretimi ve sağlık amaçlı olmak üzere termal turizm alanlarında kullanılmaktadır.

Jeolojik ve coğrafik konumu itibarı ile aktif tektonik kuşak üzerinde yer alan ülkemiz, diğer ülkeler ile kıyaslandığında daha zengin jeotermal kapasitesine sahiptir [98]. Jeotermal potansiyel açısından ülkemiz, Avrupa'da ilk sırada yer alırken kurulu güç bakımından Dünya'da dördüncü sırada yer almaktadır. Farklı sıcaklıklarda olmak üzere yaklaşık 1.000 adet doğal çıkışlı jeotermal kaynak, ülkemizin çeşitli bölgelerinde yer almaktadır [98]. Türkiye'nin jeotermal potansiyelinin %78'i Ege Bölgesinde, %9'u İç Anadolu'da, %7'si Marmara Bölgesi'nde, %5'i Doğu Anadolu'da ve %1'i diğer bölgelerde yer almaktadır. Bu bölgelerdeki kaynakların %90'ı düşük ve orta sıcaklıkta olduğundan genellikle ısıtma, termal turizm ve çeşitli endüstriyel uygulamalara yönelik olarak doğrudan kullanırken, %10'u yüksek ısı kapasitesi nedeniyle elektrik üretiminde değerlendirilmektedir.

Ülkemizde, elektrik üretiminde jeotermal enerji, ilk defa 1975 yılında, Denizli Sarayköy ilçesinde 0,5 MWe gücüne sahip Kızıldere Santralında kullanılmıştır. Jeotermal enerjiyi elektrik üretiminde kullanan ilk beş ülke ABD, Endonezya, Filipinler, Türkiye ve Yeni Zelanda olarak sıralanmaktadır [98].

3.4. Biyokütle Enerjisi ve Teknolojileri

Bitki ve hayvanlardan elde edilen yenilenebilir organik maddelerden üretilen ve yüzyıllardır kullanılan bu enerji türü, kısaca biyokütle olarak adlandırılmaktadır.

"Belediye atıkları, bitkisel yağ atıkları, gıda ve yem değeri olmayan tarımsal atıklar, endüstriyel odun dışındaki orman ürünleri ile atık lastiklerin işlenmesi sonucu ortaya çıkan yan ürünlerden elde edilen kaynaklar ve sanayi atık çamurları ile arıtma çamurları" biyokütle olarak tanımlanmaktadır [99]**.**

Bitki ve hayvanlardan elde edilen yenilenebilir organik maddeler olan biyokütle, ısı için doğrudan yakılabilir veya çeşitli işlemlerle sıvı ve gaz yakıtlara dönüştürülebilir. Biyokütle birçok ülkede, özellikle de gelişmekte olan ülkelerde yemek pişirme ve ısınma için önemli bir yakıt olarak hala kullanılmaktadır.

Biyokütle enerji üretiminde kullanıldığında, yanma sırasında açığa çıkan karbon atmosfere yayılır. Biyokütle üretimi artıkça, eşdeğer miktarda karbon emilir ve böylece neredeyse sıfır emisyonlu bir yakıt haline gelir. Yenilenebilir enerjinin %55'ini ve küresel enerji arzının %6'sından fazlasını oluşturan biyokütle dünya çapında en büyük yenilenebilir enerji kaynağıdır [100].

Biyokütle kaynakları ile farklı çevrim yöntemleri kullanılarak elde edilen yakıt türleri aşağıda belirtilmiştir [99]:

Biyokütlenin enerjiye çevrim yöntemleri

- Termokimyasal
    - Doğrudan yakma (Isı-buhar)
    - Gazlaştırma & Piroliz & Katalitik Sıvılaştırma
- Biyokimyasal
    - Fermantasyon
    - Biyometanizasyon
- Fizikokimyasal
    - Transesterifikasyon
- Fiziksel
    - Parça boyutu küçültme & yoğunlaştırma & sıkıştırma

Enerji üretiminde kullanılan biyokütle kaynakları aşağıda en temel alanlar olarak sıralanmıştır [99];

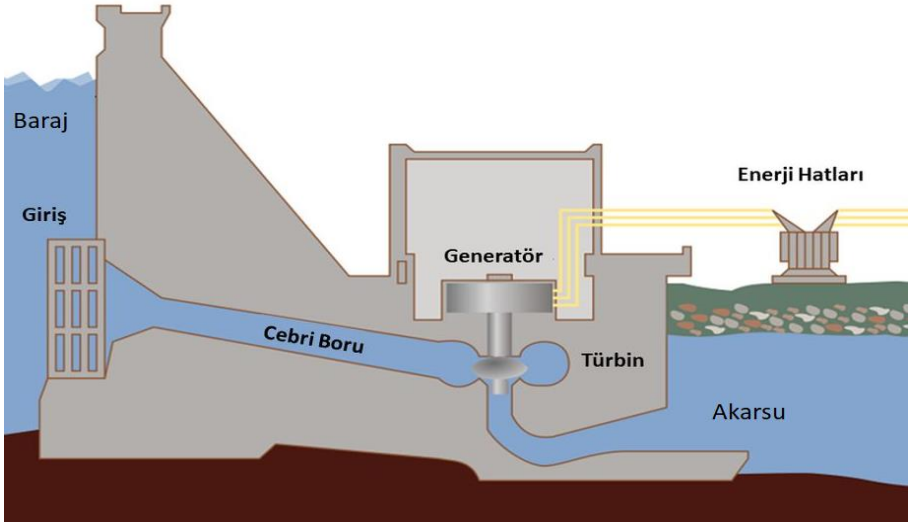
1. Tarımsal kaynaklar: Yağlı tohumlu bitkiler (kanola, ayçiçeği, soya vb.), şeker ve nişasta bitkileri (patates, buğday, mısır, şeker pancarı vb.), elyaf bitkileri (keten, kenevir, sorgum, miskantus, vb.), bitkisel artıklar (dal, sap, saman, kök, kabuk, vb.)
2. Orman ve orman ürünlerinden elde edilen kaynakları: Orman ve ormancılık endüstrisi atık ve artıkları, enerji ormanları, enerji bitkileri.
3. Hayvansal kaynaklar: Büyükbaş, küçükbaş ve kümes hayvanlarının dışkıları, mezbaha atıkları ve hayvansal ürünlerin işlenmesi sırasında ortaya çıkan atıklar.
4. Kentsel ve endüstriyel atıklardan elde edilen kaynaklar: Biyolojik kökenli endüstri atıkları, belediye atıkları, arıtma çamurları.

3.5. Hidroelektrik Sistemler ve Teknolojileri

Hidroelektrik enerji sistemleri, coğrafya koşullarına bağlı olarak akarsu yataklarında yükseklik farkı bulunan yerlerdeki potansiyel enerjiden yararlanılarak suyun doğal akışı ile güç elde edilen yenilenebilir enerji sistemleridir. Yükseklik farkından dolayı var olan potansiyel enerji ile birlikte suyun akış hızı ile oluşan kinetik enerji, suyun aktığı alandaki türbinde mekanik enerji oluşturur. Türbinde elde edilen mekanik enerji generatör vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Büyük kapasiteye elverişli olmaları, yüksek verimli, işletme gideri düşük, yakıt gideri olamayan ve çevreye uyumlu olmaları nedeniyle yoğunlukla tercih edilmektedir.

Hidroelektrik santral yapımında uygulama genellikle yükseltinin olduğu yerlerde akarsuyun önüne baraj oluşturularak suyun biriktirilmesi ile yüksekten düşüğe suyun akışı sağlanır. Baraj yapımının mümkün olmadığı durumlarda derivasyon olarak adlandırılan akarsuyun belli bir kısmını kanal veya cebri boru ile alarak yine yüksekten düşüğe suyun akışı sağlanır. Hidroelektrik santralında; baraj gölü, dipsavak, dolusavak, kanal veya cebri boru, vana, türbin, generatör ve şalt sahası önemli bölümler olarak yer alır.

Bir hidroelektrik santralının genel yapısı ve ana ekipmanının yer aldığı şematik görünümü Resim 3.8’de gösterilmektedir.



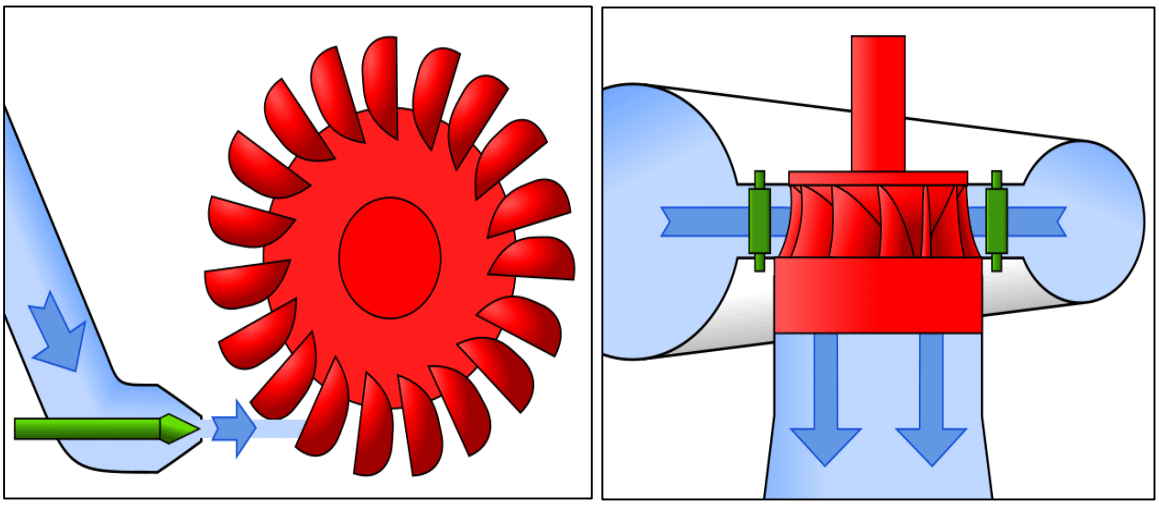
Resim 3.8. Hidroelektrikk santralı ana parçaları [101]

Hidroelektrik santralındaki önemli parçalardan biri olan türbin farklı tiplerde imal edilebildiğinden santrallarda genellikle türbin tipine göre adlandırılabilmektedir. Bu nedenle özellikle suyun etki etmesine göre iki ana tipte türbin bulunmaktadır [102]:

Etki (aksiyon) ve reaksiyon türbinleri.

- Aksiyon (etki) tipi türbinler (Pelton, Turgo, Banki)
- Reaksiyon tipi türbinler (Francis, Kaplan, Uskur, Boru)

Ülkemizde hidroelektrik santrallarda en yaygın kullanılan pelton ve francis türbinlerin şematik görünümü Resim 3.9'da gösterilmektedir.



Resim 3.9. Hidroelektrik santralında kullanılan Pelton (solda) ve Francis (sağda) türbinlerinin şematik görünümü

3.6. Deniz Enerjisi (Dalga, Akıntı, Gel-git)

Deniz enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan ve kesintisiz enerji edilme potansiyeli geliştirilmeye çalışılan bir kaynak olarak yenilenebilir enerji sistemleri içinde önemli bir konuma sahiptir. Bu enerji kaynağında; coğrafi ve iklim koşulları çerçevesinde, özellikle deniz üzerindeki rüzgara bağlı olarak oluşan dalga, akıntı veya gel-git gibi doğal durumlardaki potansiyel veya kinetik enerjiden faydalanılması amaçlanmaktadır. Yeni geliştirilmekte olan bu enerji türü özellikle denizdeki akıntı ve rüzgarın yoğun olduğu bölgelerde yaygınlaştırılmaya çalışılmaktadır. İskoçya civarında uygulaması yapılan denizaltı akıntı türbini Resim 3.10'da gösterilmektedir [103].



Resim 3.10. Denizaltına kurulan bir türbin [103]

3.7. Hidrojen: Enerji Taşıyıcısı

Hidrojen, 1700'lü yıllarda yanabildiği keşfedilmiş olup üst ısıl değeri 140,9 MJ/kg ve alt ısıl değeri 120,7 MJ/kg ile yakıtlar arasında birim kütle başına en yüksek enerjiye sahiptir. Kokusuz, renksiz, zehirsiz ve tatsız bir gaz olan H_2, doğada bileşikler halinde olduğundan serbest olarak bulunmaz. Diğer enerji kaynakları vasıtasıyla üretilen H_2, birincil enerji kaynağı değildir ve bir enerji taşıyıcısı olarak tanımlanmaktadır. Fosil yakıtlar, su ve biyokütle gibi diğer kaynaklardan üretilen enerjiyi depolar ve taşır [104]. Temiz yanan yakıtlardan H_2, oksijen ile birleştirilmesiyle ısı ve elektrik üretilir ve yan ürün olarak yalnızca su buharı ortaya çıkar [104]. Bu yapısından dolayı iklim değişikliği kapsamında, temiz enerji kullanımı yönünden son yıllarda hidrojen üretimi ve kullanımına yoğun bir

eğilim yaşanmaktadır. Hidrojen, yaklaşık -253 ^{o}C'de tam olarak sıvı hale gelir. Gaz halindeki H_2, sıvı haline göre 700 kat daha fazla yer kaplar. Rafineri ve kimya sektöründe ağırlıkla kullanılan H_2, son yıllarda özellikle enerji sektöründe daha sonra kullanılmak üzere depolanmakta ve ihtiyaç halinde ısı ve elektrik elde edecek uygulamalar tasarlanmaktadır.

Hidrojen, üretildiği kaynaklara göre farklı isim almaktadır [105]:

Gri hidrojen: kömür gazlaştırma veya buhar metan reformasyonu gibi işlemlerde fosil yakıt kullanılarak üretilen H_2. Fosil kaynaklardan H_2 üretildiğinde, CO_2 emisyonu artış gösterdiğinden net-sıfır karbon kapsamında istenmemektedir.

Mavi hidrojen: Gri H_2 üretim süreci ile benzerdir, ancak karbon yakalama ve depolamaya sahip olması ile bu ismi alır. Daha düşük sera gazı emisyonları ürettiği için net-sıfır karbon yolunda desteklenmektedir, Karbon yakalama oranının yüzde yüz olması gerekmektedir.

Yeşil hidrojen: Yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilen H_2 bu ismi alır. Sürdürülebilir bir enerji geçişi için en uygun h H_2 olarak kabul görmüş ve net-sıfır karbon yolunda desteklenmektedir. Hidrojen üretim teknolojileri arasında, en çok yenilenebilir elektrikle beslenen su elektrolizine odaklanılmıştır. [105].

3.7.1. Hidrojen üretiminde kullanılan yöntemler

Hidrojen üretiminde kullanılan yöntemler aşağıda sıralanmıştır [106]:

- Elektroliz yöntemi
- Kimyasal yöntemler: Su, metal, metal hidratlar, gaz bazlı hidratlar, metal hidroksit kaynaklarının redoks reaksiyonları sonucunda H_2 üretilmesidir. Ticari anlamda çok gelişmemiş olan redoks reaksiyonları, indirgeme ve oksidasyon içeren bir tür reaksiyondur.
- Termoliz yöntemi: Bir bileşiğin kimyasal ayrışması olarak adlandırılmaktadır. Suyun ayrıştırılması elektroliz olarak tanımlanırken su termolizi, suyun sıcaklığı 2500 K üzerindeyken gerçekleştirilmektedir ve zor bir işlem sürecine sahiptir. Su, 2500K

sıcaklıktayken %1 ayrışım gerçekleşirken, 3000 K sıcaklıkta %64 oranında ayrışım gerçekleşmektedir [106].

- Termokimyasal yöntemler: Isı enerjisi verilerek kimyasal reaksiyonla suyun H_2 ve oksijene dönüştürülmesine termokimyasal su ayrıma denmektedir. Kısmi oksidasyon, piroliz, termokimyasal su ayırma, buhar metan reformu, gazlaştırma ve ototermal yöntemler bu başlık altında yer almaktadır. Hidrokarbonların 3-8 MPa basınç ve 1300-1500 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen gazlaştırma işlemine kısmi oksidasyon denmektedir. Ham organik madde, 0,1-0,5 MPa basınç ve 500-900 °C sıcaklıklılarda, hava, su ve oksijen olmayan ortamda ısıtılarak gazlaştırma işlemi piroliz yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Buhar metan reformu, sentez gazı üretilmesi sonucunda bir gaz su dönüşüm reaksiyonu ile devam etmesidir. Kömür veya katı atık gibi bir yakıt, H_2 veya sentez gazına (H_2 + CO) dönüştürülmesi gazlaştırma denir. Buhar metan reformu, sentez gazı üretimi ve ardından bir gaz su dönüşüm reaksiyonu ile devam eder [106].
- Fotoliz yöntemler: Yeryüzüne ulaşan güneş ışınları, foton maddeler ile karşılaşır ve fotonik radyasyon vasıtasıyla suyun ayrıştırılması gerçekleştirilir.
- Biyokütleden ısıl işlemle üretim: Biyokütle içindeki su, %80'den az olduğu zaman ısıl işlem yöntemi uygulanır. Biyogaz olarak adlandırılan metan ve biyoyakıt olarak adlandırılan metanol, etanol, biyodizel ve biyodimetileterin reformu sonucu gerçekleştirilen üretim yöntemidir.
- Isıl işlemsiz biyolojik üretim: Mikroorganizmaların oksijensiz ortamda gerçekleştirdiği doğal bir reaksiyondur. Biyohidrojen üretimi direkt biyofotoliz, indirekt biyofotoliz, ışıksız fermentasyon ve ışıklı fermentasyon olmak üzere dört temel mekanizma ile gerçekleştirilebilir.
- Doğalgazın reformu ile üretimi: Günümüzde H_2 üretiminin %95'i fosil yakıtlardan reformasyon teknolojisi ile gerçekleştirilmektedir. %97'den daha fazla metan içeren doğalgaz, genellikle buharlı reformasyon işlemine tabi tutulur ve H_2 üretilir.

Açıklanan bu yöntemler arasında yapılan karşılaştırma Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

İklim değişikliği kapsamında hidrojen, enerji aktarımı ve depolanması yönünden önemli bir rol üstlenmesi öngörüldüğünden üretiminde de yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılmasına ve bu teknolojilerin geliştirilmesi üzerine yoğun çalışmalar

yürütülmektedir. Bu nedenle, özellikle su ayrışımı yöntemi veya kısaca elektroliz olarak adlandırılan yöntem, detaylı açıklanmıştır.

Çizelge 3.1. Hidrojen üretim yöntemleri

YÖNTEM	Enerji (kWh/Nm^3)		Teknolojik İlerleme	Verim (%)	Maliyet*
	Teori	Pratik			
Doğalgazın Buharlı Reformasyonu	0,78	2-2,5	Olgun	70-80	1
Kısmi Oksidasyon	0,94	4,9	Olgun	70	1,8
Nafta Reformasyonu			Olgun		
Kömür Gazlaştırma	1,01	8,6	Olgun	60	1,4-2,6
Kömürün Kısmi Oksidasyonu			Olgun	55	
Kloralkali Elektrolizi			Olgun		
Suyun Elektrolozi (Elektrik)	3,54	4,9	Olgun	62-82	3-10
Biyokütle Gazlaştırma			Olgun	45-50	2,0-2,4
Metan/Doğal Gaz Piroliz			Ar-Ge	72-54	0,9
H_2S metan Reformasyonu	1,5	-	Ar-Ge	50	<1
Kuru Gaz Reformasyonu			Ar-Ge	47-58	˜1
Atık Petrolün Buharlı Reformasyonu			Ar-Ge	75	<1
Buhar-Demir İşlemi			Ar-Ge	46	1,9
Suyun Elektrolizi			Ar-Ge	10	>3
Suyun Yüksek Sıcaklıkta Elektrolizi			Ar-Ge	48	2,2
Termokimyasal Su Ayrışımı			Ar-Ge	35-45	6
Fermentasyon			Ar-Ge	20-60**	
Foto fermantasyon			Ar-Ge	24-46**	
Karanlık + Foto Fermentasyon	1,2-3		Ar-Ge	30-48**	
Su Fotolizi			Ön Ar-Ge	<10	
Suyun Fotoelektrokimyasal Ayrışımı			Ön Ar-Ge	0,5-12	
Suyun Fotokatalitik Ayrışımı			Ön Ar-Ge		
*Doğalgazın buharlı reformasyon oranı **Teorik H_2 üretim veriminin yüzdesidir					

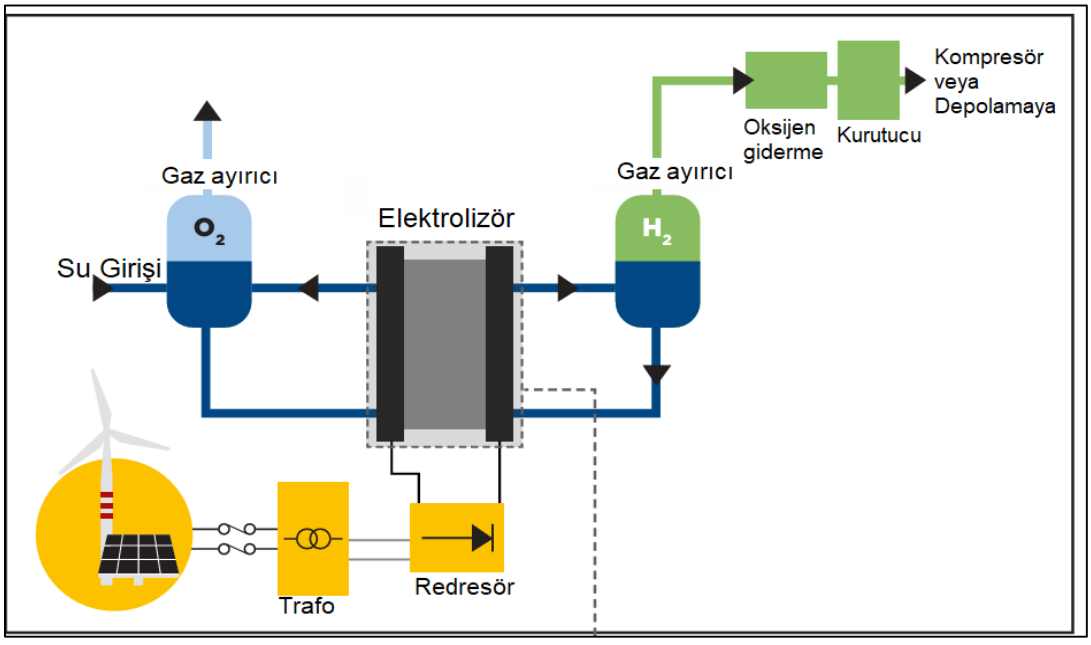
3.7.2. Elektroliz

Doğru akım kullanılarak suyun kendini oluşturan hidrojen ve oksijene ayrıştırılması olarak tanımlanan elektroliz işlemi, modüler ve kompakt bir yapıya sahip kapalı kutu görünümündeki elektroliz hücresi olarak adlandırılan cihaz içinde gerçekleşir.



Resim 3.11. Bir elektroliz ünitesi (temsili gösterim) [93]

Bir elektroliz sisteminde yer alan ana ekipman Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Hidrojen üretimi için elektrik enerjisi gereklidir. Şebekeden alınan elektrik veya rüzgar/güneş enerjisinden alternatif akım (AC) olarak üretilen elektrik, trafo vasıtasıyla redresöre aktarılır ve burada doğru akıma (DC) dönüştürülür. Doğru akım, elektroliz içindeki suya iletilir.



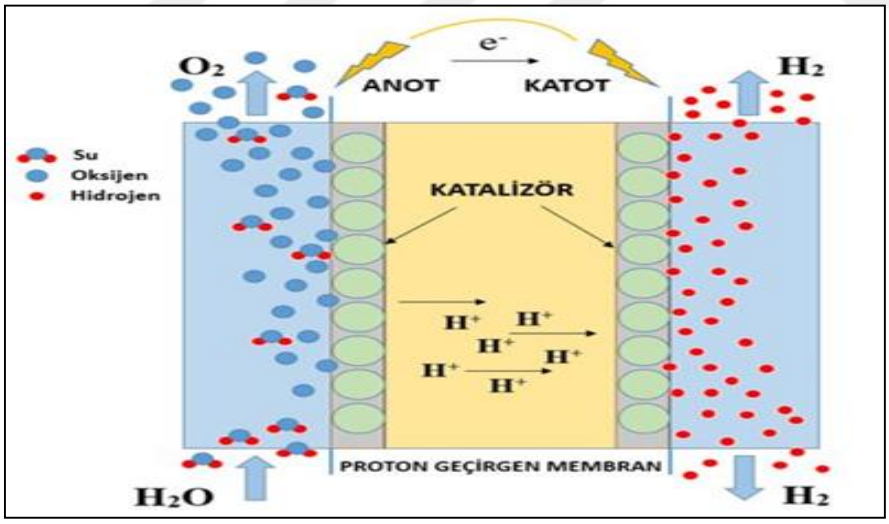
Şekil 3.7. Bir su elektroliz sistemindeki temel ekipman [92]

Elektroliz hücresinde, iki düzlem elektrot ve elektrolit olarak adlandırılan sıvı bulunur. Elektrolit olarak kullanılan suya DC uygulandığında, suyun iletkenlik özelliği ile akım, su molekülleri içinde pozitif elektrottan negatif elektrota doğru hareket eder. Hidrojen ve oksijen bağlarının koptuğu bu akım hareketinde, pozitif elektrik yüküne sahip olan H_2, negatif elektrot olan katotta toplanır ve gerçekleşen bu duruma yükseltgenme reaksiyonu denir. Benzer şekilde negatif yükse sahip olan oksijen ise pozitif elektrot olan anotta toplanır ve gerçekleşen bu duruma indirgenme reaksiyonu olarak tanımlanır. Bu süreç, Resim 3.12'de temsili olarak gösterilmektedir. En saf H_2 üretilmesi ve depolanması için oksijenden tamamen ayrıştırılması gerektiğinden H_2 toplandığı tarafa oksijen giderici ve sonrasında bir kurutucu ekipman yerleştirilir. Kurutucu, hidrojen içindeki suyun alınmasını sağlar.

Anot reaksiyonu $H_2O \rightarrow 1/2\ O_2 + 2e^- + 2H^+$

Katot reaksiyonu $4H^+ + 4e^- \longrightarrow 2H_2$

Toplam reaksiyon $H_2O \rightarrow H_2 + 1/2O_2$



Resim 3.12. Bir elektroliz ünitesinin çalışma prensibi [107]

3.7.3. Hidrojen üretim teknolojileri

Hidrojen üretiminde su elektroliz uygulamasının prensibi basit olsa da fiziksel-kimyasal ve elektrokimyasal yönlerinden farklar olması nedeniyle ticari veya geliştirme aşamasında

dört çeşit teknolojisi bulunmaktadır [108]. Bunlardan Alkali ve PEM elektroliz yöntemi ticari olarak kullanılmaktadır.

- Alkali elektroliz hücreleri
- Proton değişim membranlı (PEM)
- Katı oksit elektroliz hücreleri (SOEC)
- Anyon değişim membranlı (AEM)

Bu dört çeşit elektroliz yöntemindeki farklılıklar Çizelge 3.2'de gösterilmektedir [108].

Çizelge 3.2. Su elektroliz yöntemlerinin özellikleri [108]

	ALKALİ	PEM	AEM	KATI OKSİT
İşletme sıcaklığı	70-90 °C	50-80 °C	40-60 °C	700-850 °
İşletme basıncı	1-30 bar	<70 bar	<35 bar	1 bar
Elektrolit	Potasyum hidroksit (KOH) 5-7 molL-	PFSA membranlar	KOH or NaHCO3 içeren DVB polimer destek 1molL	Yttria-stabilize edilmiş Zirkonyum (YSZ)
Ayırıcı	PPS ağ yapısı ile desteklenmiş Zirkonyum ZrO2	Katı elektrolit	Katı elektrolit	Katı elektrolit
Elektrot / Katalizör (Oksijen tarafı)	Nikel kaplamalı delikli paslanmaz çelik	İridyum oksit	Yüksek yüzey alanı Nikel veya NiFeCo alaşımları	Perovskit-tip (örn.: LSCF, LSM)
Elektrot / Katalizör (H_2 tarafı)	Nikel kaplamalı delikli paslanmaz çelik	Karbon siyahı üzerinde platinyum nanopartiküller	Yüksek yüzey alanı Nikel	Ni/YSZ

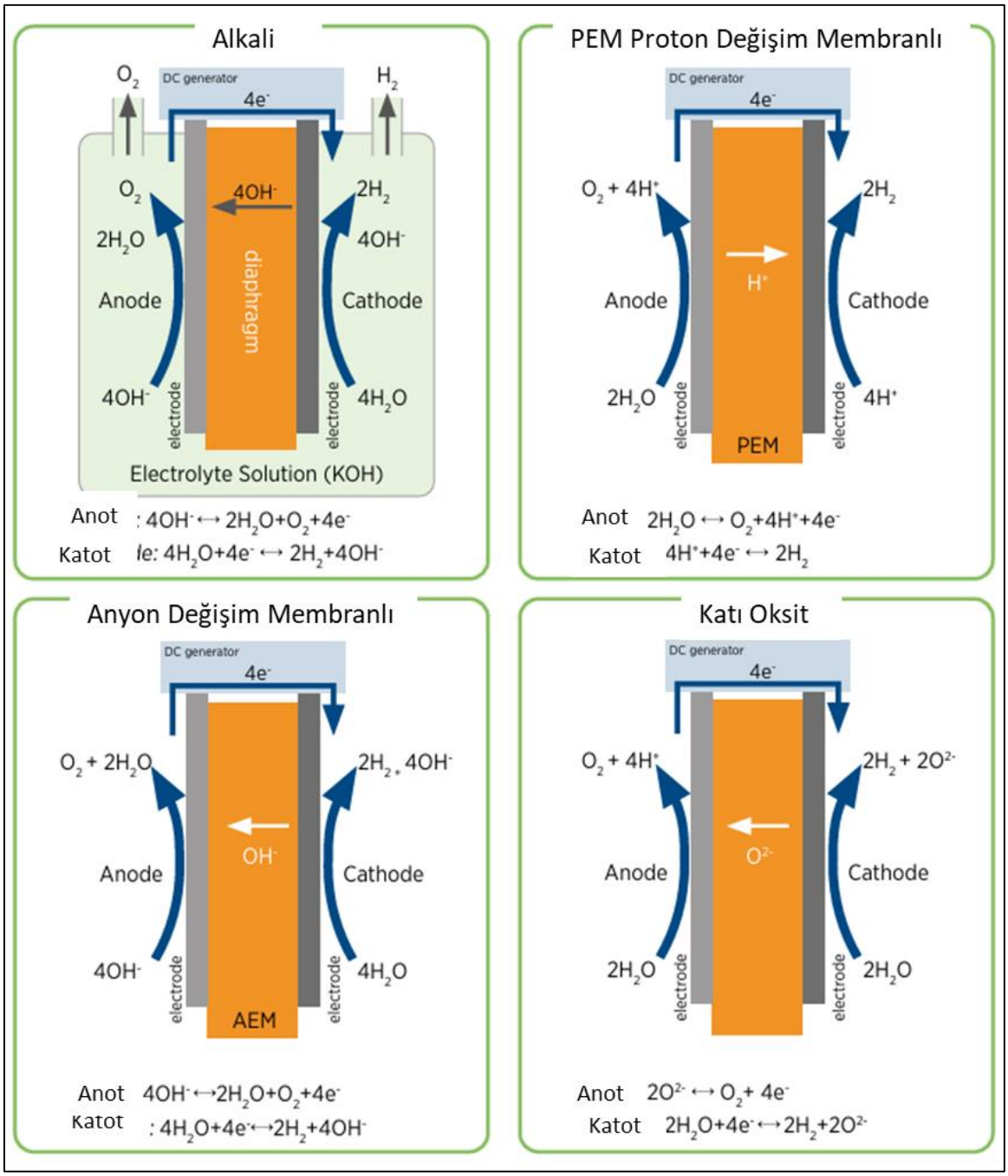
Çizelge 3.2. (devam) Su elektroliz yöntemlerinin özellikleri [108]

	ALKALİ	PEM	AEM	KATI OKSİT
Gözenekli taşıma katmanı Anot	Nikel ızgara (herzaman değil)	Platinyum kaplamalı sinterlenmiş gözenekli titanyum	Nikel köpük	İri taneli Nikel ızgara veya köpük
Gözenekli taşıma katmanı Katot bipolar	Nikel ızgara		Nikel köpük veya karbon kumaş	Yok
İki kutuplu plaka Anot	Nikel kaplı paslanmaz çelik	Platinyum kaplamalı titanyum	Nikel kaplı paslanmaz çelik	Yok
İki kutuplu plaka Katot t	Nikel kaplı paslanmaz çelik	Altın kaplamalı titanyum	Nikel kaplı paslanmaz çelik	Kobalt kaplamalı paslanmaz çelik
Çerçeve yapısı ve sızdırmazlık sistemi	PSU, PTFE, EPDM	PTFE, PSU, ETFE	PTFE, Silikon	Seramik cam

Not: Renkli bölmeler farklı şirketler arasındaki önemli değişik gösteren durum veya ekipmanı belirtir.

PFSA: Perfloroalkilsülfonik Asit (Perfluoroalkylsulfonic Acid)
TFE: Politetrafloroetilen (Polytetrafluoroethylene)
ETFE: Etilen Tetrafloroetilen (Ethylene Tetrafluoroethylene)
PSF: Polibisfenol-A Sülfon (Poly(bisphenol-A sulfone))
PSU: Polisolfon (Polysulfone)
YSZ: Yttrium Stabilize Edilmiş Zirkonya (Yttria-Stabilized Zirconia)
PPS: Polifenilen Sülfid (Polyphenylene Sulfide)
LSCF: $La_{0.58}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-\delta}$)
LSM: $La_{1-x}Srx)_{1-\gamma}MnO_3$)
Crofer 22APU: Co içeren koruyucu kaplamalı

Ticari olarak kullanılmakta olan PEM elektroliz yöntemi ile diğer üç çeşit elektroliz yöntemleri arasındaki reaksiyon oluşum farklılıkları, Resim 3.13'de gösterilmektedir [108].



Resim 3.13. Elektroliz yöntemleri ve oluşan reaksiyon farklılıkları [108]

PEM elektroliz yöntemi

PEM elektroliz işleyişinde de, anot ve katot ayrışma sürecinde, hidrojen protonları (H^+), membran vasıtasıyla katoda geçer [109]. Kullanılan perflorosülfonik asit (PFSA) membrandan dolayı 70 bara kadar yüksek basınçta çalışır ve elektroliz verimliliği %80'lere

ulaşır [108]. Verimin yüksek olması ile daha saf H_2 elde edilmektedir. Çizelge 3.2'de görüleceği gibi düşük sıcaklık (50-80^{o}C) çalışma koşullarına sahiptir.

PEM elektrolizleri, modüler ve kompakt olarak kapalı bir yapıya sahiptir. Ani değişen yüklerde çalışabilme özelliği olduğundan yenilenebilir elektriğe hızlı tepki verme açısından avantajlıdır [110], [111]. Bu nedenle rüzgar enerji sistemlerde tercih edilen bir teknolojidir. Bununla birlikte kullanılan membran, asidik yapıya sahip olduğundan, altın ve titanyum kaplı elektrotlar ile katalizör olarak platin, iridyum ve rutenyum gibi metallerin kullanılır ve bu durumda maliyet daha yüksek olmaktadır [108].

PEM elektroliz teknolojisi yeni geliştirilmesine rağmen, IEA verileri doğrultusunda, kullanımı son yıllarda hızlı bir atış göstermiş ve 2023 yılı itibariyle 921 MW kapasiteye ulaşarak en yakın rakibi alkali elektroliz modelin 1152 MW'lık kapasite değerine yaklaştığı Çizelge 3.3'de görülmektedir[112]. Yine aynı çizelgede, alkali elektrolizin piyasadaki oranı yaklaşık %40 iken PEM elektroliz yaklaşık %32 oranına ulaşmıştır [112].

Çizelge 3.3. 2050'ye kadar net-sıfır emisyon senaryoları" 2019-2030 döneminde teknolojiye göre toplam kurulu elektroliz kapasitesi [112]

Yıl	Alkali MW	PEM MW	Diğer MW	Toplam MW
2019	164	80	13	257
2020	197	108	14	319
2021	354	147	58	559
2022	404	217	66	687
2023	1 152	921	811	2 884
2030				560 000

.

4. NÜKLEER ENERJİ VE TEKNOLOJİLERİ

4.1. Nükleer Enerji Tarihi

Alman kimyager Martin H. Klaproth'un 1789 yılında keşfettiği maddeye, o dönem yeni keşfedilen Uranus gezegeninden esinlenerek "uranyum" adını vermesi ile nükleer enerjinin tarihi başlangıcını yapmıştır [113]. Uranyumun bir oksit bileşiği olan bu keşfedilen maddeden uranyumun saf madde olarak elde edilmesi ise, Fransız kimyacı E.M. Peligot tarafından 1841 yılında gerçekleştirildi. Bu keşiften 55 yıl ve ilk madde keşfinde 107 yıl sonra 1896 yılında Henri Becquerel tarafından uranyumun alfa ve beta adını verdiği ışınları yaydığını keşfetmiştir. Aynı konuda çalışan Marie ve Pierre Curie çifti de aynı dönemde bu ışınları keşfetmiş ve adına "radyoaktivite" demişlerdir. Bu keşif ile birlikte uranyum hem sağlıkta hem teknik alanda değerlendirilmek üzere birçok bilim insanı tarafından araştırılmış ve kullanılmıştır [113]. Gelinen noktada, Danimarkalı fizikçi Niels Bohr'öne sürdüğü; "fisyonun[4] uranyumun bir izotopu olan ve doğada bulunan uranyumun %99'unu oluşturan U- 238 izotopu ile değil, doğada bulunan uranyumun %0,7'sini oluşturan U- 235 izotopundan kaynaklandığı" görüşü 1939 yılında Szilard ve Fermi tarafından ispatlanmasıyla uranyum enerji alanında kullanılmaya başlanmıştır [113].

İkinci Dünya Savaşı sırasında, 1945 yılında Japonya'nın Hiroşima ve Nagasaki bölgelerine atılan atom bombası ile "nükleer enerji (atom enerjisi)" tüm dünyada duyulmuş oldu. Bu olay çok büyük bir etki yaratmış ve bu nedenle böyle bir enerjinin barışçıl amaçlarla kullanılması yönünde karar alınmıştır. Nükleer enerjinin barışçıl amaçlarla kullanımı kararı ile birlikte Birleşmiş Milletler çatısı altında, 1957 yılında, Uluslararası Atom Enerji Ajansı (IAEA) kurulmuş ve birçok mevzuat düzenlemesi ve anlaşmalar ile nükleer enerji kullanımı bir düzen içinde yürütülmektedir.

Nükleer enerji ifadesi, "güvenlik (safety)" ile terimi ile birlikte anılır ve olmazsa olmaz şeklinde tariflenebilir. Nükleer enerjinin olumsuz sonuçları ile karşılaşmamak her faaliyet içinde güvenlik öncelikli yer almış ve tasarımdan işletmeye her durumda güvenlik gerekliliklerine göre hareket edilmiştir. Yine güvenlik kurallarına bağlı olarak, yaşanan her

[4] Fisyon: Bir atom çekirdeğinin iki veya daha fazla küçük çekirdeğe bölünerek aynı zamanda enerji açığa çıkardığı bir reaksiyondur [181].

olumsuz duruma karşı önlem alınmış ve olası bir sonraki olumsuz durumların yaşanmasının önüne geçilmiştir. Bu nedenledir ki "öğrenilmiş dersler" veya "çıkarılan dersler" terimi önemli bir yer edinmiştir ve tüm ilgili kişi veya kuruluşlar çıkarılan dersleri dikkate alırlar.

İlk nükleer reaktör, Fermi ve ekibi tarafından Chicago Üniversitesinde, 1942 yılında ilk nükleer fisyon zincir reaksiyonunu gerçekleştirdiği "Chicago Pile-1" (CP-1) reaktörü olsa da enerji üretim amacıyla yapılan ilk sivil amaçlı nükleer reaktör, Rusya Federasyonu'nun (eski SSBC) Moskova-Obninsk'te 1954 yılında işletmeye aldığı 5 MWe (30 MWt) gücündeki reaktör, nükleer reaktörlerin atası olarak bilinir [113]. Bu ilk nükleer enerji santralı ile şehir hatları bağlantısı, 1957 yılında Obninsk şehrinde gerçekleştirilmiştir. Bu tarihten itibaren, nükleer alanda çalışmakta olan ülkeler, nükleer santral teknolojisini kullanmaya ve geliştirmeye başlamıştır.

Elektrik üretim amacıyla yapılan ilk nükleer reaktörler 5 MWe gibi küçük kapasite ile başlanmış, bir diğeri 60 MWe kapasiteli yapılmış ve ABD Westinghouse firması tarafından 1960 yılında, 250 MWe kapasite, Yankee Rowe adlı ilk tam ticari nükleer reaktör inşaatına başlanmıştır. Yankee Rowe santralı 1992 yılında işletmeye alınmıştır [114]. Bu süreçte, 1960 sonlarında 1 000MWe kapasiteli büyük santral siparişleri alınmaya başlanmıştır.

Rusya'da aynı dönemlerde önce 100 MW, sonra 210 MW ve 440 MW kapasiteli santrallar tasarlanarak inşaatına başlanmıştır. Rusya, 1973 yılında 1000 MW kapasiteli santral inşaatına başlayarak büyük kapasiteli santral tasarlamaya başlamıştır [114].

Fransa, Kanada gibi ülkeler de, 1960'lı yıllarda reaktör kapasitelerini artırarak büyük ölçekli santral yapımına başlamıştır [114].

4.2. Nükleer Teknolojide Nesil Kavramı

Nükleer enerjinin keşfi ile birlikte, fisyon zincir reaksiyonunu gerçekleştirmek üzere özellikle araştırma ve deneme amaçlı yapılan ilk reaktörler I Nesil reaktörler olarak adlandırılmaktadır. Nükleer enerjinin barışçıl amaçlarla kullanılmasına yönelik, ticari elektrik üretmek üzere yapılan ve işletilen reaktörlerin kendini teknik ve ekonomik yönden ispatlaması ile birlikte 1970'li yıllardan itibaren nükleer santral kullanımı yaygınlaşmaya başlamış ve sayısı hızla artmıştır. Bu sistemler II: Nesil olarak sınıflandırılmış ve halen

kullanımda yer almaktadır. Gelişen teknolojinin yanı sıra, özellikle 1979 Three Miles Island ve 1986 Çernobil kazalarından sonra güvenlik kriteri baz alınarak pasif güvenlik sistemleri tasarımda yer alırken santral ömürleri de uzamıştır. Ayrıca ekonomik olması açısından doğalgaz ile rekabet edebilsin diye tasarımlarda iyileştirmeler yapılarak III. Nesil reaktörler 1990'lı yıllardan itibaren ortaya çıkmıştır. III. Nesil reaktörler, II. Nesil reaktörlerde kanıtlanmış ve kullanılmakta olan teknolojiler çerçevesinde iyileştirmeler veya yenilikler yapılarak geliştirildiğinden evrimsel tasarımlar olarak tanımlanmaktadır [113].

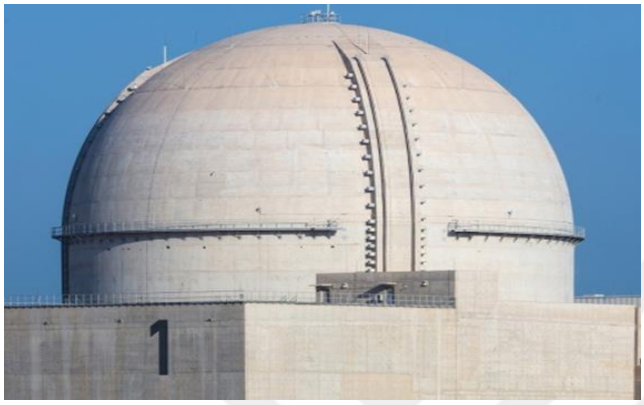
Daha güvenlikli olması için sürekli geliştirilmeye çalışılan nükleer reaktörler, iklim değişikliği kapsamında önemli rol alabileceği düşünülerek, teknoloji sahibi önde gelen ülkeler (AB Euratom yanı sıra Arjantin, Brezilya, Çin, Fransa, Güney Kore, Güney Afrika, İsviçre, İngiltere, Japonya, Kanada ve Rusya), ABD önderliğinde 2000 yılında biraraya gelmişlerdir. "IV. Nesil için Uluslararası Forum (Generation IV International Forum-GIF)" adıyla yapılan toplantıda, gelecek nesil reaktörlerin birlikte geliştirilmesi amaçlanmıştır [113]. Toplantıda, IV. Nesil reaktörler ile; artan enerji ihtiyacının karşılanması, nükleer atık miktarının azaltılması ve daha az zararlı hale getirilmesi, nükleer kaynakların daha iyi değerlendirilmesi, nükleer silahların yayılmasının önlenmesi ve genel olarak daha güvenlikli ve daha ekonomik reaktör geliştirilmesi konuları ele alınmıştır. Önemli tasarım değişikliğine sahip ve yenilikçi olan IV. Nesil nükleer reaktörler üzerinde değerlendirmeler yapılmış ve altı adet nükleer konsept, geleceğin geliştirilecek IV. Nesil teknolojileri olarak seçilmiştir [113].

4.3. Nükleer Santral ve Bileşenleri

Nükleer santrallar, kömürlü veya doğalgazlı termik santrallar gibi, kullanılan yakıttan elde edilen ısı ile çevrim suyu ısıtılarak buhar elde edilir ve bu buhar, türbin-generatör sistemlerinde mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü yapılardır. Tasarım teknolojisine göre değişmekle beraber genel olarak bir nükleer santral, reaktör ve yardımcı ekipmanın yer aldığı nükleer ada; türbin-generator grubunun yer aldığı türbin adası ve diğer yardımcı sistemlerin yer aldığı santralın geri kalan kısmını oluşturan "tesis dengesi (balance of plant)" bölümlerinden oluşur.

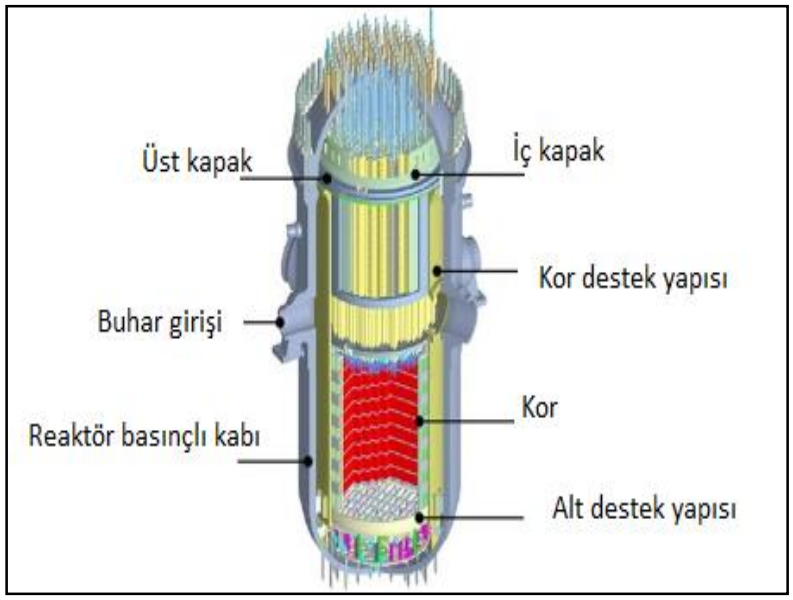
Nükleer reaktör teknolojisinde kullanılan önemli ekipman ve terimler aşağıda belirtilmiştir:

Koruma Kabı (Containment): Reaktör basınçlı kabının ve buhar üreteci gibi ana ekipmanın yer aldığı bölümdür [115]. Herhangi bir olumsuz durumla karşılaşıldığında, insan ve canlılara zarar gelmemesi amacıyla radyasyonun dışarıya yayılmaması için tasarlanmış kalın beton duvarın oluşturduğu yapıdır. Bir nükleer santrala ait koruma kabı Resim 4.1'de görülmektedir.



Resim 4.1. Bir nükleer santrala ait koruma kabı [116]

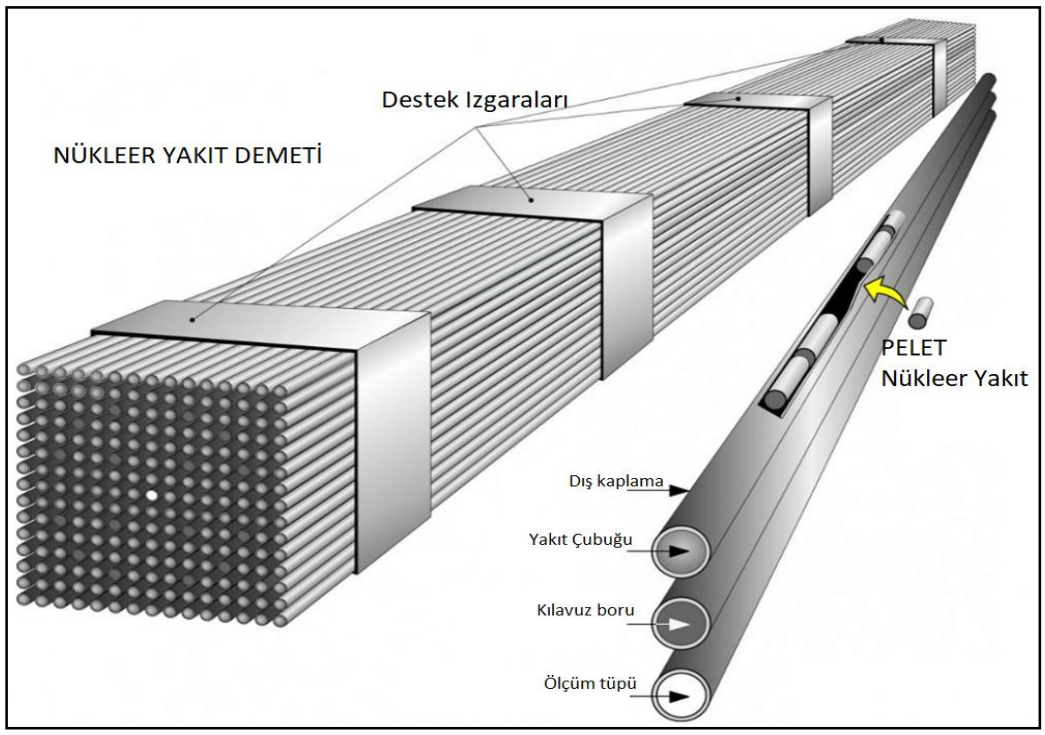
Reaktör basınçlı kabı: Yakıt çubukları, soğutucu ve yavaşlatıcının yer aldığı, fisyon işleminin gerçekleştiği yüksek sıcaklığa ve yüksek basınca dayanıklı, yüksek güvenirlikte, nükleer enerjinin kalbi diye tanımlanan en kritik en önemli ekipmanı olan silindirik çelik kaplardır [115]. Bir reaktör basınçlı kabı ve ana bölümleri Resim 4.2'de görülmektedir.



Resim 4.2. Reaktör basınçlı kabı genel görünümü [117]

Yakıt

Nükleer santrallarda yakıt olarak uranyum kullanılmaktadır. Doğada bulunan uranyumun yaklaşık %99'u fisyon tepkimesinde kullanılmaz. Doğada bulunan uranyumun yaklaşık %0,7'sini oluşturan U-235 izotopu fisyon gerçekleştirir. Ancak uranyumun yakıt haline gelebilmesi için uzun bir işlemden geçmesi gerekmektedir. Çıkarılan uranyum cevheri farklı oksitlere ayrılır. Reaktör tasarımlarına göre uranyum farklı oranlarda zenginleştirme işlemine tabi tutulur. Doğal uranyumun içinde çok az olan U-235 izotopunun yüzde miktarının artırılması zenginleştirme olarak tanımlanmaktadır. Araştırma reaktörlerinde zenginleştirme oranı %20 civarında iken, reaktör boyutunun küçük olması gereken bir nükleer denizaltısında bu oran %90 düzeyindedir. Nükleer santral reaktör büyüklüğünde bir kısıtlama bulunmadığı için yakıt zenginleştirme oranı genellikle %2-5 arasında olmaktadır [113]. İşlemler sonucunda "pelet" olarak adlandırılan yaklaşık 1 cm çapında ve 2 cm uzunluğunda silindirik malzeme elde edilir [115]. Peletler yaklaşık 4 m uzunluğunda sızdırmaz paslanmaz çelik veya Zircaloy3 tüplere yüklenir. Yine tasarıma bağlı olarak bu uzun tüpler farklı sayıda demet haline getirilir ve reaktör kor içine tasarım şekline göre yerleştirilir. Bir reaktör tasarımında kullanılan nükleer yakıt demetinin genel ve iç görünümü Resim 4.3.'te gösterilmektedir.



Resim 4.3. Nükleer yakıt demetinin genel ve iç görünümü [118]

Yavaşlatıcı (Moderatör)

Termal reaktörlerde bulunan yavaşlatıcı (moderatör), fisyon sonucu oluşan nötronların tekrar reaksiyona girerek termal enerji oluşturmasını yavaşlatmak için kullanılır [115]. Yavaşlatıcı için düşük kütle sayılı malzemeler kullanılır. Yavaşlatıcı olarak genellikle su (atomlarının üçte ikisi H_2), ağır su[5] ve grafit (karbonun yaygın şekli) kullanılır [115]. Berilyum ve beyaz bir seramik malzeme olan berilyum oksit (BeO) de yavaşlatıcı olarak kullanılır ancak bu malzemeler çok maliyetlidir.

Soğutucu

Adından da anlaşılacağı gibi reaktör korundaki ve diğer parçalar üzerinde oluşan ısıyı uzaklaştırmak için kullanılır [115]. Su, ağır su ve çeşitli gazlar, termal reaktörler için en yaygın olarak kullanılan soğutuculardır. Soğutucu olarak su ve ağır su kullanılıyorsa, bu soğutucular aynı zamanda yavaşlatıcı görevi de görür.

Kontrol çubukları

Fisyon sonucu açığa çıkan nötronları kendi bünyesine aldığı (absorbe eden) için reaktörü kontrol etmekte kullanılan hareketli malzemelerdir [115]. Nötronları yuttuğu için kontrol çubuklarının herhangi bir hareketi, sistemin çarpan faktörünü doğrudan etkiler. Çubukların geri çekilmesi "k"[6] değerini arttırırken, reaktör içine itilmesi "k" değerini azaltır. Kontrol çubukları, reaktör içindeyken reaktör kapanmış olur, çubukların geri çekilmesi reaktörün çalışması anlamına gelir [115].

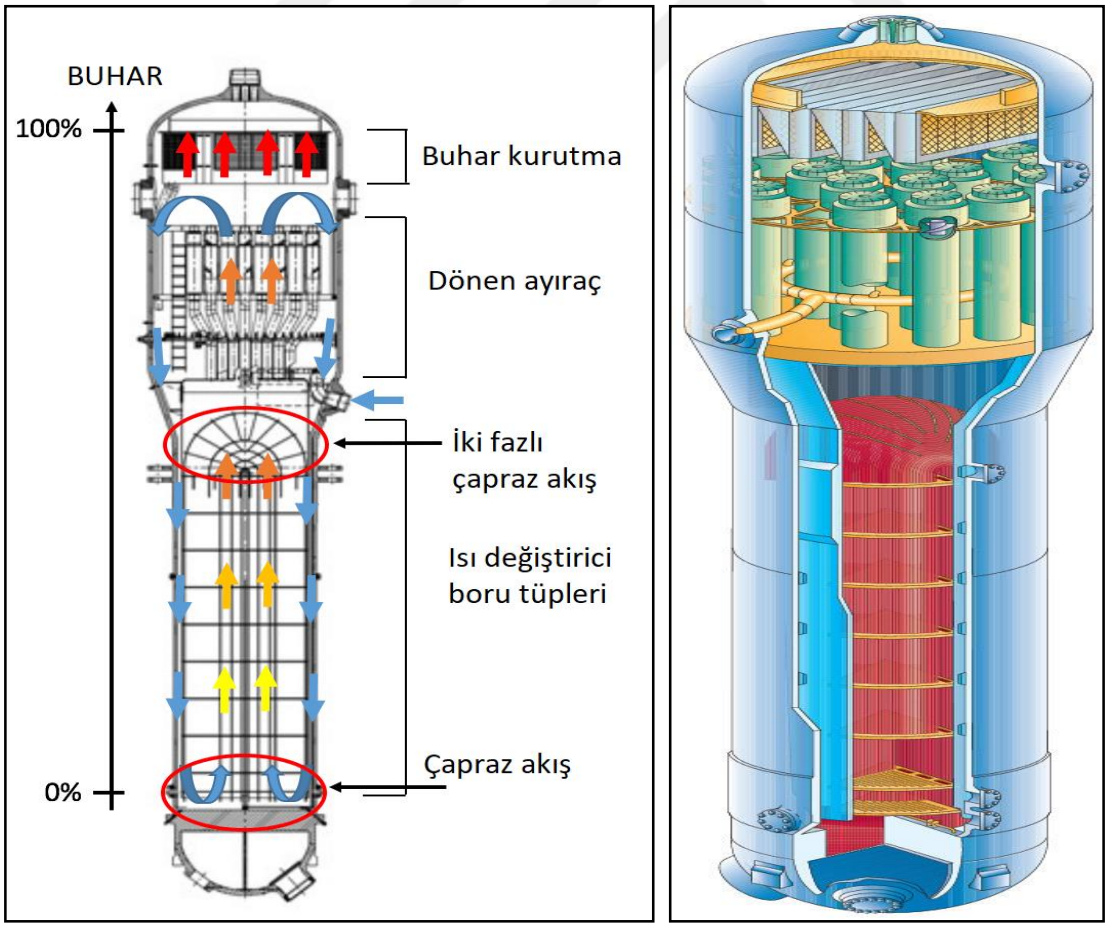
[5] Ağır su: Normal su molekülünde bulunan iki hidrojen atomunun (H-1) yerine, içinde iki döteryum atomu (H-2), bulunan sudur. Genellikle, ağır su H_2O yerine D_2O ile gösterilir ve döteryum olarak da ifade edilir. Fazladan iki nötrona sahip olan ağır su, normal sudan yaklaşık %10 daha ağırdır.

[6] k değeri: Fisyon reaksiyonu sonucunda ısı açığa çıkarken aynı zamanda fazladan nötron da açığa çıkar. Fazladan açığa çıkan nötron bir diğer atom çekirdeği ile reaksiyona girer ve bu olay zincirleme devam eder. Zincirleme reaksiyonda termal nötron sayısındaki artış olarak tanımlanmaktadır ve k ile gösterilmektedir. k değeri, 1'den büyükse, zincirleme reaksiyon süperkritiktir ve nötron sayısı üstel olarak artar. Eğer k değeri, 1'den küçükse, zincirleme reaksiyon kritik altıdır (subcrtitical) ve nötron sayısı üstel olarak azalır. K değeri 1'e eşit olduğu zaman, zincirleme reaksiyon sabit bir hızda ilerler, enerji sabit bir seviyede salınır ve sistemin kritik olduğu söylenir [115].

Bor, yüksek nötron tutuma özelliğine sahip olduğundan kontrol çubuklarında bor çeliği kullanılır. Ayrıca güçlü termal nötron yutan metalik elementlerden hafniyum veya kadmiyum yanı sıra gümüş ve bu metallerin çeşitli alaşımları kontrol çubuk malzemesi olarak kullanılır. Çubuklar genellikle silindir şeklindedir [115].

Buhar üreteci

Kısaca PWR diye adlandırılan basınçlı su reaktöründe yer alan bir ekipmandır. Reaktördeki ısıyı alan soğutucu (su), reaktör içinde kaynamasına izin verilmez ve bu nedenle türbininde kullanılacak olan buhar, başka bir ekipmanda üretilir. Bir tür ısı değiştiricisi olan ve buhar üreteci olarak adlandırılan ekipmanda, reaktörden gelen yüksek basınçlı soğutma suyu, alttan yukarıya ve oradan da tekrar aşağıya doğru U borular vasıtasıyla hareket eder. U borular içindeki diğer çevrim suyu burada buhar haline gelerek türbine gönderilir [115]. Buhar üretecinin genel ve iç görünümü Resim 4.4'te gösterilmektedir.



Resim 4.4. Nükleer santral buhar üreteci genel ve iç görünümü sol [119], sağ [120]

Büyük ölçekli nükleer santral ve küçük modüler reaktör kavramı

Nükleer santrallar, kullanılan yakıttan çevrim türüne ve kullanılan ekipmanın yerleşimine göre çok çeşitli tasarlanabilmekte ve bu nedenle reaktör teknolojilerindeki farklılıklara göre değişik isimler almaktadır. Nükleer santrallar için tasarlanan reaktörlerin, en yaygın kullanımı ile büyük ve küçük ölçekli reaktörler olmak üzere iki şekilde ifade edilmektedir. Büyük ve küçük ölçek için yapılan tanımlama:

IAEA, reaktör kapasitesi 300 MWe altında olan reaktörleri küçük ölçekli; kapasitesi 300-700 MWe arasında olan reaktörleri orta ölçekli ve kapasitesi 700 MWe üzerinde olan reaktörleri büyük ölçekli reaktörler olarak tanımlar [121].

IAEA, kapasitesi 10 MWe altında olanları ise mikro (minik) reaktör olarak tanımlamaktadır [121]. 300 MW altında olan reaktörler, "küçük modüler reaktör (SMR) olarak adlandırılmaktadır. En yaygın ve en gelişmiş veya kendini ispatlamış olan büyük ve küçük kapasiteli reaktör teknolojileri aşağıda özetlenmiştir.

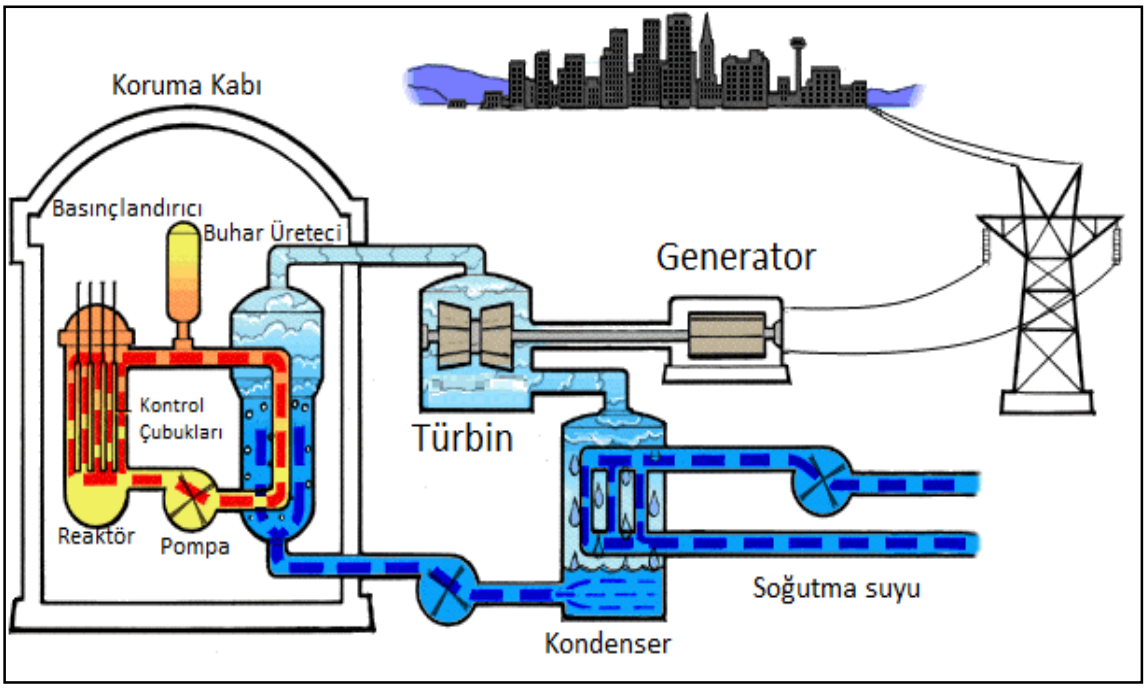
4.4. Büyük Ölçekli Nükleer Santrallar

Enerji üretiminde tercih edilen büyük ölçekli reaktör tasarımlarından basınçlı su reaktörü (PWR/VVER), kaynar su reaktörü (BWR), basınçlı ağır su reaktörü (PWHR/CANDU), gaz soğutmalı reaktörler, kendini ispatlamış veya yaygın kullanılan rektör teknolojileridir. Elektrik üretiminde yaklaşık %73'ünü PWR teknolojisi oluşturmaktadır. Halen işletilmekte olan 416 reaktörün 306 adedi "Basınçlı Su Reaktörü (PWR)", 43 adedi "Basınçlı Ağır Su Reaktörü (PHWR)" ve 46 adedi "Kaynar Sulu Reaktör (BWR)" teknolojisindedir [122]. Ayrıca, 10 adet Grafit Yavaşlatıcılı Su Soğutmalı reaktörler (LWGR), 8 adet Gaz Soğutmalı Reaktörler (GCR) ve 2 adet Hızlı Üretken Reaktörler (FBR) dünya genelinde enerji üretiminde yer almakta ve halen işletilmektedir.

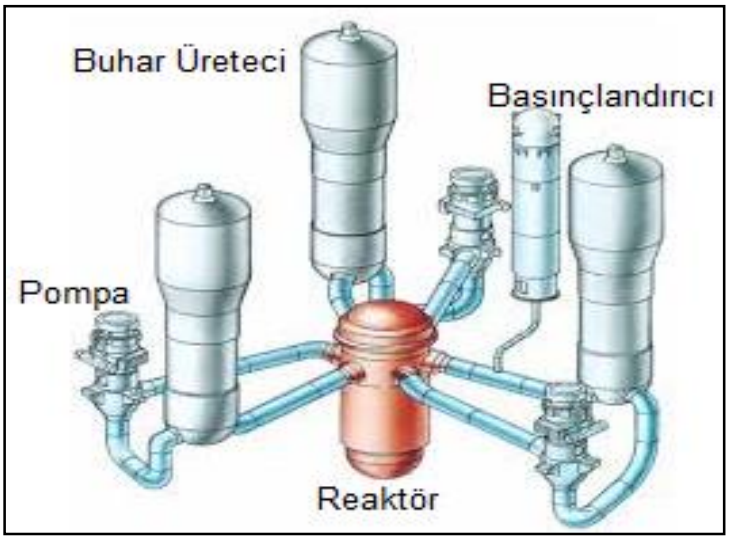
4.4.1. Basınçlı su reaktörü (PWR ve VVER)

Büyük ölçekli nükleer santralların reaktör tasarımlarından en çok kullanılan teknolojinin başında yer alır ve İngilizce "Pressurized Water Reactor" kelimelerin baş harflerinin oluşturduğu "PWR" olarak adlandırılır. Türbinde kullanılacak buharın elde edilmesini

amaçlayan sistemde reaktör basınçlı kabı, buhar üreteci, basınçlandırıcı ve sistem pompası önemli ekipman arasındadır. PWR sisteminin öne çıkan özelliği, buhar elde etmek için iki çevrim kullanılmaktadır. Birinci çevrim, reaktör basınçlı kabı ile buhar üreteci arasında; ikinci çevrim, buhar üreteci ile türbin arasında gerçekleşir [115]. PWR sisteminde yer alan çevrimler ve ana ekipmanın genel görünümü Resim 4.5 ve 4.6'da gösterilmektedir.



Resim 4.5. PWR Reaktör tasarım çevrimleri ve işleyişi [123]

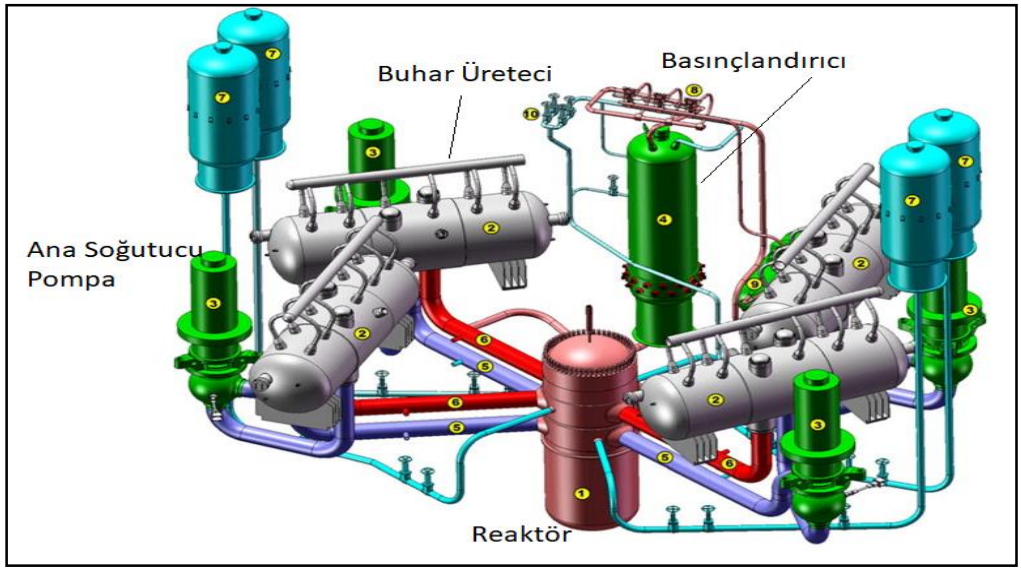


Resim 4.6. PWR reaktör tasarımın genel görünümü ve ana ekipmanı [124]

Reaktör basınçlı kabında yer alan uranyum yakıt çubuklarından fisyon yoluyla elde edilen ısı, soğutucu olarak kullanılan yüksek basınç altındaki kaynmasına izin verilmeyen suya aktarılır ve buhar üretecine gönderilir. Buhar üretecinde, U-tüpler vasıtasıyla türbine gidecek diğer çevrim suyu burada buhar haline gelir ve türbine gönderilerek generatörde elektrik üretilir. Su, yaklaşık 290°C sıcaklıkta, reaktör korunun dışından aşağı doğru inecek şekilde girer ve korun içinden yukarı doğru ısınarak yaklaşık 325°C sıcaklıkta kaptan çıkar. Yaklaşık 15 MPa civarında yüksek bir basınçta tutulan su kaynamaz [115]. PWR sistemlerinde, üretim dengesini korumak için reaktör kabının üstünde yerleşik olan kontrol çubukları kullanılır. Basınçlandırıcı ile sistem basıncı dengelenir. Kapasite azaltmak istediğinde sistem içine bor veya grafit gönderilmektedir [115].

VVER

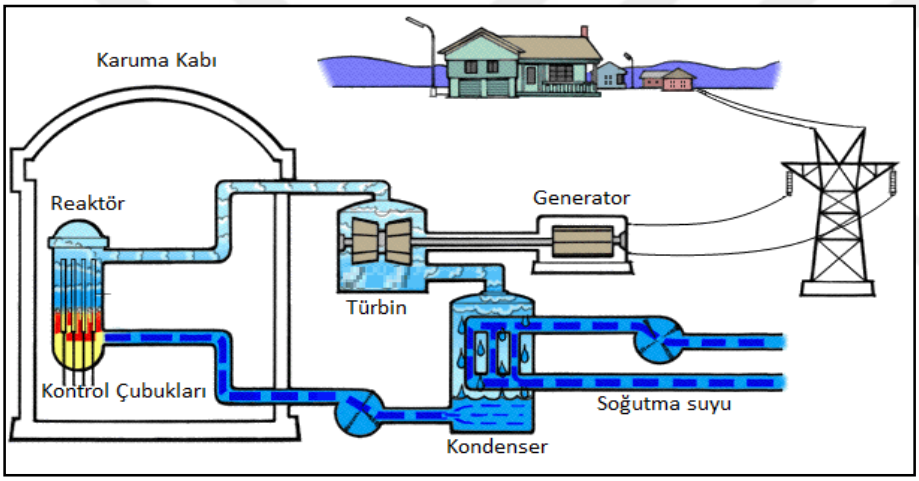
Rus tipi basınçlı su reaktör tasarımı olan ve kısaca VVER olarak adlandırılan tasarım PWR ile benzer çalışma prensibine sahiptir. Bu tasarımda da, buhar üretmek için iki çevrim kullanılır. Reaktörde kaynamasına izin verilmeyen basınç altındaki soğutucu su, buhar üreticine gönderilir. Buhar üretecindeki diğer çevrim suyu, reaktörden gelen su ile buhar haline gelir. VVER reaktör tasarımın genel yapısı ve çevrim şekli Resim 4.7'de görüldüğü gibi buhar üreteçleri dikey değil yatay konumdadır. Reaktör içindeki yer alan yakıt demetleri hekzagonal örgü biçimindedir. Çernobil nükleer santral kazası sonrası önemli ölçüde geliştirilmiş olan VVER tasarımında çift katmanlı koruma binası yapılmaktadır



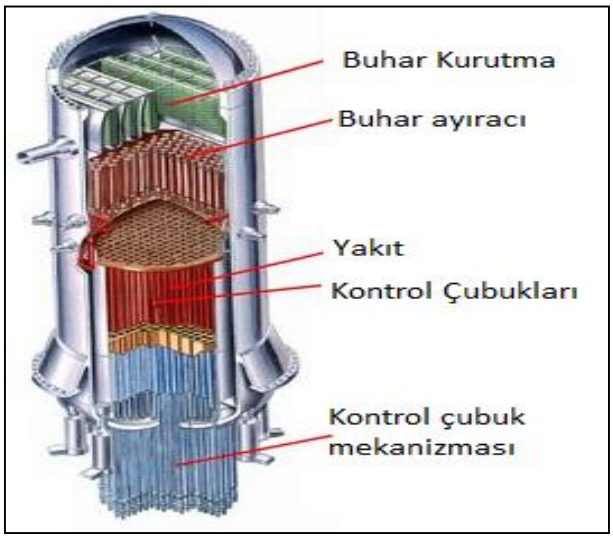
Resim 4.7. PWR reaktör tasarımın genel görünümü ve ana ekipmanı [125]

4.4.2. Kaynar su reaktörü (BWR)

Büyük ölçekli nükleer reaktör tasarımların bir diğeri olan kaynar su reaktörü, İngilizce "Boiling Water Reactor" kelimelerinin baş harflerinin oluşumu ile kısaca BWR olarak ifade edilmektedir. BWR tasarımında amaç, PWR sisteminde olduğu gibi buhar elde etmektir. Reaktör içinde, belli bir oranda zenginleştirilmiş uranyum yakıtı kullanılır. Fisyon reaksiyonu sonucu açığa çıkan ısı ile birlikte soğutucu olarak kullanılan su, reaktör kabı içinde buhar haline gelir. Buhar doğrudan türbine gönderilir ve generatörde elektrik üretimi gerçekleştirilir. BWR sisteminde yer alan çevrimler ve ana ekipmanın genel görünümü Resim 4.8 ve Resim 4.9'da gösterilmektedir.



Resim 4.8. BWR Reaktör tasarımın genel görünümü ve ana ekipmanı [126]

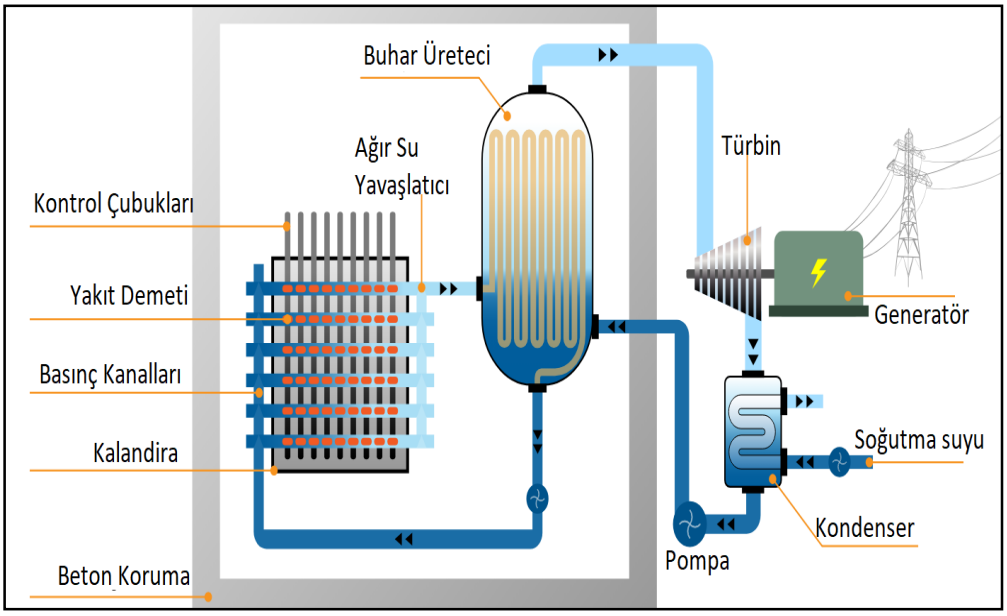


Resim 4.9. BWR Reaktör tasarımın genel görünümü ve ana ekipmanı [127]

Reaktör içindeki basınç yaklaşık 7 MPa ve sıcaklık 290 °C civarındadır. Düşük basınçlı sistem olduğundan reaktör kabının, PWR'daki gibi kalın olmasına gerek yoktur ancak güç yoğunluğu (watt/cm3), düşük olduğu için BWR reaktör boyutları aynı kapasiteli PWR'a göre daha büyük olmaktadır [115]. PWR tasarımından bir diğer farkı, kontrol çubukları reaktörün alt kısmında yer almasıdır. Reaktör kabı içinde üretilen buhar, kabın üst kısmında toplanmasından dolayı kontrol çubuklarının daha etkin çalışabilmesi için alt kısma yerleştirilir [115].

4.4.3. Ağır su reaktörü (PHWR, Candu)

Basınçlı ağır su reaktörü, adından da anlaşılacağı üzere, soğutucu olarak reaktörde ağır su (D_2O) kullanılan bir reaktör tasarımıdır. İngilizce "Pressurized Heavy Water Reactor" kelimelerinin baş harflerinin oluşturduğu PHWR ile ifade edilir. Ayrıca bu tip reaktörler "Canada Deuterium Uranium" kelimelerinden oluşan CANDU kısaltması ile yaygın olarak bilinmektedir. PWR tasarımında olduğu gibi iki çevrim vardır. Birinci çevrimdeki sıcak su, buhar üretecini gönderildikten sonra buradaki ikinci çevrim suyu ile buhar elde edilir. Bu tasarımda, yakıtın yer aldığı Kalandira denilen büyük bir tank yapı vardır. Yakıtlar, Kalandira içine yatay olarak yerleştirilir ve genellikle 290°C sıcaklık ve atmosferik basıncın yaklaşık 100 katı civarında bir basınç altında soğutulur [121]. PHWR sisteminde yer alan çevrimler ve ana ekipmanın genel görünümü Resim 4.10'da gösterilmektedir.



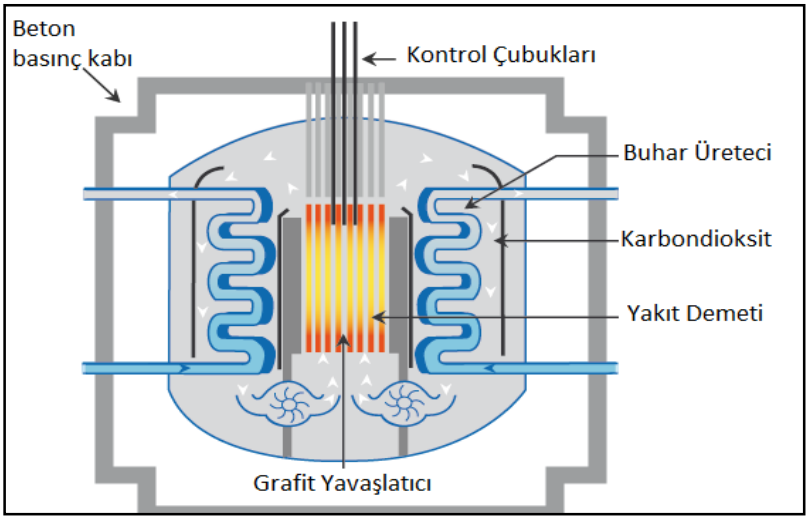
Resim 4.10. Ağır su Reaktör tasarımın genel görünümü ve ana ekipmanı [128]

Yakıt olarak doğal uranyum oksit (%0,7 U-235) kullanılan bu tasarımda uranyum zenginleştirilmesine gerek yoktur. Doğal uranyum kullanıldığından daha verimli bir yavaşlatıcıya ihtiyaç duyulduğundan ağır su (D_2O) kullanılmaktadır.

Diğer tasarımlar ile karşılaştırıldığında PHWR sistemlerinde kullanılan doğal uranyumdan daha fazla enerji elde edilir ancak aynı zamanda daha fazla kullanılmış yakıt açığa çıkar. Sistem çalışırken yakıt yüklemesi yapılabilmektedir [121]. Kanada, 1950'lerden beri ve Hindistan 1980'lerden beri PHWR (Candu) reaktör tasarımlarını kullanmakta ve geliştirmektedir [121].

4.4.4. Gelişmiş gaz soğutmalı reaktör (MAGNOX-AGR)

Gaz soğutmalı reaktörler daha çok İngiliz tasarımı olarak bilinmektedir. Fisyon ısısını almak üzere soğutucu olarak CO_2 ve yavaşlatıcı olarak grafit kullanılan II. Nesil tasarım arasında yer almaktadır. Yakıt olarak zenginleştirilmiş uranyum oksit kullanılan tasarımda, CO_2 gazı reaktör koru içinde dolaşarak 650 °C sıcaklığa ulaşır. Bu sıcak gaz, buhar üretecinden geçerek ısısını, ikinci çevrim akışkanına aktarır. Buhar üretecinde, gazdan aldığı ısı ile çevrim suyu buhar haline gelir ve buradan türbine gönderilir [121]. Reaktörün yük azaltma veya artırma veya tamamen kapatılması durumunda kontrol çubukları kullanılır. Ayrıca, soğutucu içine azot eklenmesiyle ikinci bir durdurma sistemi de bulunmaktadır. Gaz soğutmalı bir reaktörde yer alan ana ekipmanın genel görünümü Resim 4.11'de gösterilmektedir.



Resim 4.11. Gaz soğutmalı bir reaktör tasarımın genel görünümü ve ana ekipmanı [121]

4.4.5. Hafif su grafit yavaşlatıcılı reaktörü (RBMK)

Eski Sovyetler Birliği dönemimde plütonyum üretim reaktörlerinden geliştirilen bu reaktör, kaynar su reaktör (BWR) tasarım ile benzer yapıdadır. Ancak, yakıt, BWR'larda olduğu gibi basınçlı bir kap içinde değil Candu modelinde olduğu gibi ayrı bir kanallaştırılmış basınçlı tüpler içine yerleştirilmiştir. Her bir yakıt demetinin ayrı bir kanalı vardır, bu nedenle çalışam sırasında yakıt değişimi yapılabilir [115]. Yavaşlatıcı olarak hafif su yerine grafit kullanılmaktadır. Grafit yavaşlatıcının geçtiği 7 m uzunluğunda dikey basınç tüpleri bulunmaktadır.

BWR tasarımında olduğu gibi, reaktör korunda 290°C sıcaklık ve yaklaşık 6,9 MPa basınçta su soğutucu görevini üstlenir. Düşük oranda zenginleştirilmiş uranyum oksitten oluşan yakıt demetleri 3,5 m uzunluğundadır. Eski Sovyetler Birliği dışında inşa edilmemiştir [121].

4.4.6. Hızlı nötron reaktör

Tasarım yapısına bağlı olarak bazı reaktörlerde yavaşlatıcı (moderatör) bulunmaz ve yakıtın içinde veya çevresinde bulunan U-238 izotopundan daha fazlasını yaparken plütonyumdan güç üreten hızlı nötronları kullanırlar. Normal reaktörlere kıyasla orijinal uranyumdan 60 kat daha fazla enerji alır ancak yapım maliyeti pahalıdır [121].

Tükettiklerinden daha fazla parçalanabilir malzeme (plütonyum) üretecek şekilde tasarlanmışlarsa hızlı üretken reaktörler (FBR) olarak adlandırılırlar.

4.5. Küçük Modüler Reaktörler ve Teknolojileri

İklim değişikliği mücadelesi kapsamında; küçük/orta ölçekli veya modüler reaktörlerin, birçok kullanıcıya ulaşması, farklı uygulama alanlarında kullanılabilmesi, esnek üretimin sağlanabilmesi, yeni iş fırsatlarının oluşturabilmesi için nükleer alanda neler yapılabileceği tartışılıyordu. Bu kapsamda ABD Enerji Kurumu'nun (DOE) Nükleer Enerji, Bilim ve Teknoloji Ofisi öncülüğünde, 2000 Ocak ayında, IV. Nesil reaktörlerin geliştirilmesine yönelik uluslararası iş birliği amacıyla bir toplantı gerçekleştirildi Bu işbirliği yapılanmasına Gen-IV International Forum kısaltması olarak GIF adı verildi [129].

Konusunda uzmanların bir araya geldiği GIF, yakıtı daha verimli kullanacak, atık üretimini azaltacak, ekonomik, sıkı güvenlik ve silahsızlanma standartlarını karşılayacak yeni nesil enerji sistemlerini geliştirilmesini amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda, farklı ülkelerden 100 uzman, 130 adet reaktör tasarımını değerlendirmesi sonucunda, araştırılması ve geliştirilmesi için altı adet reaktör tasarımını belirledi [129]:

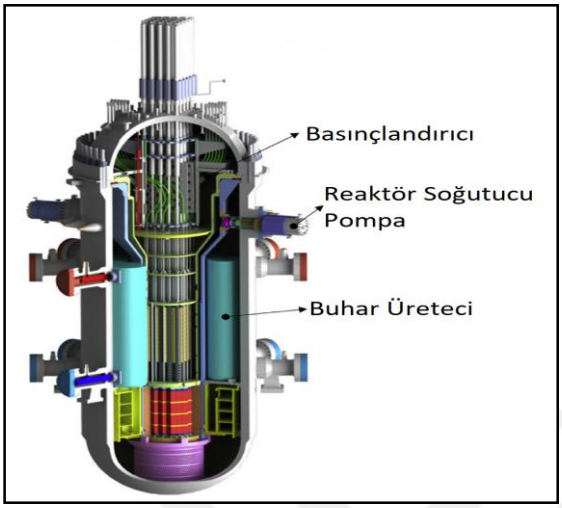
1. Gaz soğutmalı Hızlı Reaktör (GFR)
2. Kurşun soğutmalı Hızlı Reaktör (LFR)
3. Erimiş Tuz Reaktörü (MSR)
4. Süperkritik Su soğutmalı Reaktör (SCWR)
5. Sodyum soğutmalı Hızlı Reaktör (SFR)
6. Çok Yüksek Sıcaklık Reaktörü (VHTR)

GIF toplantısı ile birlikte teknolojik gelişmeler ve ihtiyaçlar doğrultusunda, "Küçük Modüler Reaktör (SMR)" tasarımları yapılmaya başlanmıştır. SMR açılımındaki ifadeler[130];
Küçük; fiziksel olarak geleneksel bir nükleer reaktörünün boyutunun çok küçük bir kısmını,
Modüler; sistemlerin ve bileşenlerin fabrikada monte edilmesini ve bir ünite olarak kurulum için bir yere nakledilmesi,
Reaktörler; nükleer fisyon reaksiyonu ile ısı üretmesi ve bu ısının enerji üretiminde kullanılmasını belirtmektedir.

SMR konusunda hazırlanan raporlarda, bu teknolojiye gösterilen ilginin nedenleri açıklanmıştır [121]:

- SMRlar, küçük boyutları ve modülerlikleri nedeniyle, bir fabrikada inşa edilebilir ve modül modül monte edilebilir, dolayısıyla inşaat kalitesi ve verimlilik seviyesi artar.
- Küçük boyutları ve pasif güvenlik özellikleri, daha küçük şebekeye sahip olan ve nükleer enerji tecrübesi az olan ülkelere uygundur.
- Boyut, inşaat verimliliği ve daha az yedek ekipman gerektirdiği için pasif güvenlik sistemleriyle, büyük santrallara kıyasla daha kolay finansman sağlanır.
- Belirli bir SMR tasarımı için "seri üretim ekonomisini" elde etmek, maliyetleri daha da azaltacaktır.

SMR tasarımlarından bir örnek Resim 4.12'de genel görünümü ve ana ekipmanı gösterilmektedir [131].



Resim 4.12. Bir SMR tasarımın genel görünümü ve ana ekipmanı [131]

IAEA verilerine göre dünyada 80'den fazla SMR tasarımı [130] olduğu için aşağıda teknolojik olarak farklı tasarlanan ve geliştirilmekte olan önemli SMR türleri kısaca açıklanmıştır:

4.5.1. Hafif Su soğutmalı SMR

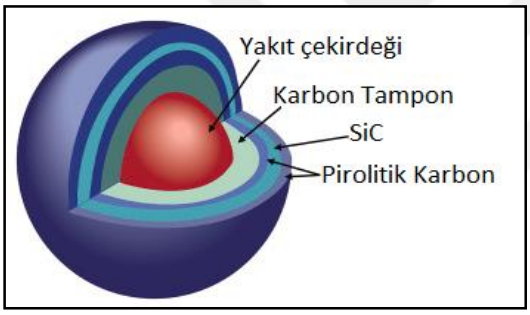
Hafif su soğutmalı reaktör, işletilme tecrübesi çok olan ve kendini ispatlamış yaygın olarak kullanılan PWR reaktör tasarım yapısına benzer şekilde, basınçlandırıcı, buhar üreteci, reaktör, pompa gibi ana ekipmanın tek bir gövde içinde birleştirildiği reaktördür. Hafif su ifadesi, nötron yavaşlatıcı olarak ağır suyun kullanıldığı diğer tasarım reaktöründen ayırt etmek için kullanılmaktadır [113]. Yakıt olarak %5 oranına kadar zenginleştirilmiş uranyum kullanılan bu tasarımda, soğutucu ve yavaşlatıcı olarak su kullanılmaktadır. Reaktörü kontrol etmek için kontrol çubukları kullanılır [113].

4.5.2. Yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktör (HTR)

Yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktör İngilizce "High Temperature Gas-cooled Reactors" kelimelerinin baş harflerinin oluşturduğu HTR kısaltması ile anılmaktadır. Reaktördeki yakıtın fisyon sonucu açığa çıkan ısısından yararlanmak ve buhar üretmek için iki çevrim

kullanan bir tasarımdır. Birinci çevrimde soğutucu olarak gaz kullanıldığı için gaz soğutmalı reaktörler olarak adlandırılmaktadır. Birinci çevrimde soğutucu olarak helyum, karbondioksit veya nitrojen gazlarından kullanılır [121]. Hızlı nötron tasarımları haricinde yavaşlatıcı olarak grafit kullanılmaktadır.

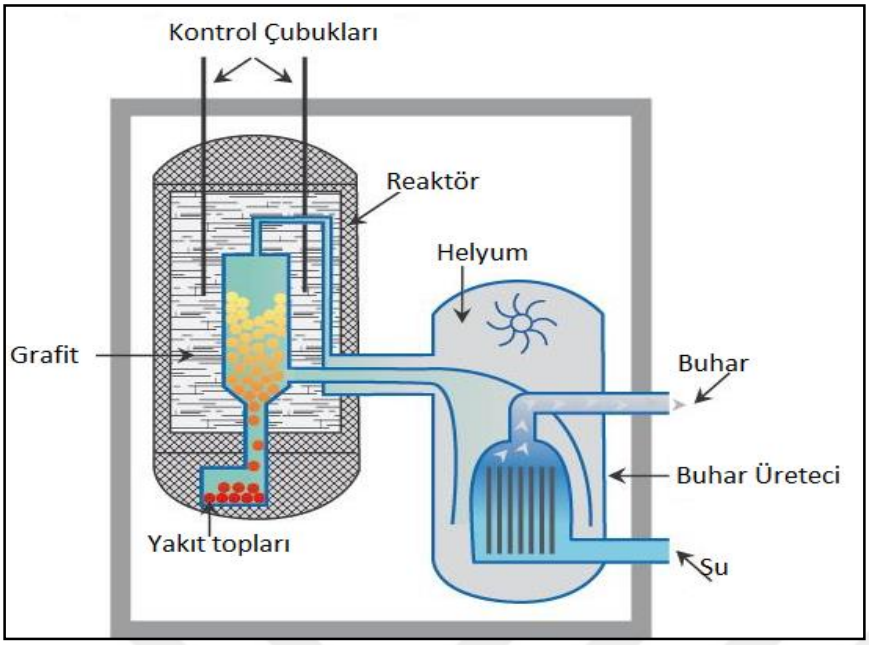
Reaktörde, İngilizce "tristructural-isotropic (üçlü yapısal izotropik)" kelimesinin kısaltması olan TRISO olarak adlandırılan yakıt kullanılmaktadır [121]. Her biri %20'ye kadar U-235 ile zenginleştirilmiş uranyum oksikarbür (veya uranyum dioksit) çekirdeğe (yaklaşık 0,5 mm) sahip olan çekirdekten oluşan yakıt, çapı 1 mm'den küçük TRISO parçacıkları biçimindedir. Triso yakıtlar, 1800°C'lere kadar herhangi bozunma olmadığından nükleerde önemli bir konu olan güvenlik açısından rahatlıkla kullanılabilmektedir. TRISO yakıtının bir kesiti Resim 4.13'de görülmektedir.



Resim 4.13. HTR reaktör tasarımında kullanılan TRISO yakıtın görünümü [132]

HTR teknolojisinde, Çin, lider ülkelerden biridir. HTR-PM adıyla geliştirdiği ilk örnek santralın temelini, Aralık 2012'de attı ve inşaatını 2021'de tamamladı. Santrala yakıtın yüklenmesiyle Eylül 2021'de kritikliğe ulaştı ve böylece ilk modüler yüksek sıcaklık gaz soğutmalı reaktörü çalışmaya başladı [133]. Tanıtım tesisi 2021'de şebekeye bağlandı ve ticari faaliyete başladı. IV. Nesil SMR'lerin ilk gösterimi olması nedeniyle santral yakından takip edilmektedir.

Helyum soğutucu, basınçlı kabın alt alanında reaktöre 250°C sıcaklıkta girer ve reaktör korunu soğutarak 750 °C ortalama çıkış sıcaklığı ve 7 MPa basınç ile buhar üretecine gider. HTR-PM tasarımın genel görünümü ve ekipmanı Resim 4.14'de görülmektedir.



Resim 4.14. HTR-PM tasarımın genel görünümü ve ana ekipmanı [121]

4.5.3. Hızlı nötron reaktörü

Hızlı nötron reaktörü, İngilizce "fast neutron reactor" kelimelerin baş harflerinin oluşturduğu FSR ile anılmaktadır Nükleer yakıtın fisyon reaksiyonu sonucu ortaya çıkan nötronların zincir reaksiyon oluşturması için yavaşlatılan tasarımların aksine, nötronlar yavaşlatılmadan, hızlı nötronlar tarafından fisyon zincir reaksiyonu devam eder. Yakıt olarak, %15-20 oranında zenginleştirilmiş uranyum nitratı (UN) veya (U-Pu)N, (U-transuranik)N veya (U-Pu)Zr içeren yakıt kullanılır. Yavaşlatıcı kullanılmaz. Atmosferik basınçta veya yakınında çalışan soğutucular, genellikle sodyum, kurşun veya kurşun-bismut gibi yüksek iletkenlik ve kaynama noktasına sahip sıvı metallerdir [121]. Bu tasarımda da reaktör içinde oluşan ısı, bir ısı değiştiricisi vasıtasıyla türbin çevriminde kullanılan suya aktarılır ve buhar elde edilir.

4.5.4. Ergiyik tuz teaktörü (MSR)

Ergiyik tuz reaktörü, İngilizce "molten salt reactor" kelimelerin baş harflerinin oluşturduğu MSR ile anılmaktadır. Tasarımında amaç yine buhar elde etmektir ancak en önemli özelliği kullanılan yakıtın hem şeklinin hem türünün farklı olmasıdır. Reaktör içindeki yakıt, peletlerin oluşturduğu uranyum çubukları şeklinde değil, tasarıma bağlı olarak yakıt,

çözünmüş olan zenginleştirilmiş U-235 veya U-233 floritleri ile lityum ve berilyum florit (FLiBe) tuzunun karışımından oluşmaktadır [121]. Ülkemizde, toryum reaktörü olarak da tanınmaktadır. Yakıt, çözünmüş olarak kullanılmıyorsa, çakıl yataklı denilen yakıt topları tercih edilmektedir. FLiBe ve lityum florit tuzları, basınçsız ortamda, 1400 °C'ye kadar sıvı olarak kalırlar. Reaktör koru, yaklaşık 700 °C'de ve düşük basınçta tuz akışına izin verecek şekilde düzenlenmiş sönmemiş grafit yavaşlatıcıyı içermektedir. Tuz-yakıt karışımı, ikincil bir ısı değiştiricisinden geçirilir ve türbin çevriminde kullanılan suyu buhar haline getirir [121].

4.6. Mikro Reaktör

Reaktör kapasitesi 10 MWe altında olan tasarımlar mikro olarak adlandırılmaktadır. Bununla birlikte bazı tasarımcılar kapasitesi 20 MWe kadar olan reaktörleri de mikro kapsamına almaktadırlar. Tasarıma bağlı olarak, diğer reaktörlerde olduğu gibi farklı teknolojide olabilmekte bu nedenle farklı soğutucu da kullanılmaktadır. Teknoloji olarak ergiyik metal soğutmalı veya yüksek sıcaklık gaz reaktörleri tercih edilebilmektedir. Yakıt olarak %4 - 19,75 arası zenginleştirilmiş uranyum kullanılmaktadır. Kurulum amacına bağlı olarak yakıt değişim süresi 36 aydan 20 yıla kadar değişim gösterebilmektedir [113]. Bir kamyonun üzerinde taşınabilecek şekilde tasarlandığından, bir çok farklı alanada kullanma imkanı olmaktadır. Özellikle uzak, ulaşımın zor olduğu bölgeler için tercih edilmeketdir.

5. TÜRKİYE'DE VE DÜNYA'DA ENERJİ ÜRETİMİ

5.1. Türkiye'de Elektrik Üretim Gelişim Tarihçesi

Türkiye'de ilk elektrik üretimi, 15 Eylül 1902 tarihinde, Tarsus'a elektrik sağlanmasıyla başlamıştır. Tarsus Belediyesi'nde çalışan Avusturyalı Dörfler, Berdan Nehri Bentbaşı mevkiinde 2 kW'lık bir dinamoyu, sudeğirmeni milinin transmisyon kayışına bağlayarak elektrik üretimi gerçekleştirmiştir. Çalışmaların devam ettirilmesi soncunda, ilk termik santral olarak kabul edilen kömürle çalışan Silahtarağa Termik Santralı, 14 Şubat 1914'te devreye alınarak İstanbul'u aydınlatmaya başlamıştır. İşletmeye alındığı tarihten ekonomik ömrünü tamamladığı 1983 yılına kadar hizmet elektrik üretiminde kullanılmıştır.

Teknolojinin gelişimine ve ihtiyaçlara bağlı olarak, zamanla sadece kömürle çalışan santral değil hidrolik, nükleer doğalgaz kaynaklarının kullanımına yönelik adımlar atılmış ve ülkenin en ücra noktalarına kadar elektrik görülmüştür.

Elektrik üretiminin yanı sıra aynı zamanda iletim ve dağıtım faaliyetleri aynı hızla devam ettiği için kurumsal olarak da gelişmeler yaşanmıştır. Bütün işlerin tek bir çatı altında toplanmasına sağlayan Türkiye Elektrik Kurumu (TEK), 1970 yılında 1312 sayılı Kanun ile kurulmuştur. İlerleyen süreçte, Belediyeler ve Birliklerin ellerindeki elektrik tesislerinin 1982 yılında TEK'e devredilmesiyle tüm elektrik ile ilgili faaliyetler TEK tarafından yürütülmüştür. Bu yıllarda, elektriklenmiş köy sayısı %61'e ulaşırken, Türkiye'nin kurulu gücü 6638,6 MW, üretimi ise 26552000 MWh olarak gerçekleşmiştir.

Gelişen teknoloji, talebin artması, izlenen politikaların değişmesi, vb. yaşanan gelişmeler doğrultusunda daha etkin yönetim amacıyla TEK, 12 Ağustos 1993 ve 4789 sayılı Bakanlar Kurulu Kararı ile iki farklı kuruma ayrılmıştır:

1. Türkiye Elektrik Üretim ve İletim A.Ş. (TEAŞ),
2. Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. (TEDAŞ)

İzlenen politikalar çerçevesinde ve özellikle enerji sektörünün Avrupa Birliği (AB) müktesebatına uyumlu hale getirilmesine yönelik, yeniden yapılandırma çalışmaları

sonucunda, 2 Mart 2001 tarihinde resmi gazetede yayınlanan 2026 nolu Bakanlar Kurulu'nun kararı ile TEAŞ aşağıdaki isimlerde olacak şekilde üç farklı İktisadi Devlet Teşekkülü olarak yeniden yapılandırılmıştır.

1. Elektrik Üretim Anonim Şirketi (EÜAŞ)
2. Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt Anonim Şirketi (TETAŞ)
3. Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ)

Aynı dönemde, özelleştirme faaliyetlerinin de etkisiyle enerji piyasası yeniden düzenlenmiş ve Elektrik Piyasası Düzenleme Kurumu 3 Mart 2001 tarih ve 24335 sayılı Resmi Gazetede yayınlanarak kurulmuş, 2 Mayıs 2001 tarih ve 24390 sayılı Resmi Gazetede 4646 sayılı Kanun ile adı Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) adını almıştır.

5.2. Enerji Sektöründe Yer Alan Kamu Kurum ve Kuruluşlar

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK); Enerji piyasasının 2001 yılında yeniden düzenlenmesi sonucunda kurulan EPDK; süreç içinde yayınlanan,

- 2001 yılı 4646 sayılı Doğalgaz Piyasası Kanunu;
- 2003 yılı 5015 sayılı Petrol Piyasası Kanunu;
- 2005 yılı, 5307 sayılı Sıvılaştırılmış Petrol Gazları Piyasası Kanunu;
- 2013 yılı, 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu

ile; "elektrik, doğal gaz, petrol ve likit petrol gazının (LPG); yeterli, kaliteli, sürekli, düşük maliyetli ve çevreyle uyumlu bir şekilde tüketicilere ulaştırılması için mali açıdan güçlü, istikrarlı ve şeffaf bir enerji piyasası oluşturmayı ve bu piyasada bağımsız bir düzenleme ve denetimin sağlanmasını amaçlamıştır" [134].

Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ): Elektrik ve enerji piyasasının yeniden düzenlenmesi kapsamında 2001 yılında yapılan değişimler ile ilga Türkiye Elektrik Üretim-İletim A.Ş. (TEAŞ) Genel Müdürlüğü, 02.03.2001 tarih ve 24334 sayılı Resmi Gazetede yayımlananı Bakanlar Kurulu Kararı ile üç farklı şirkete ayrılmıştır Bu üç şirketten biri olarak kurulan EÜAŞ, 29 Haziran 2001 tarihli 24447 sayılı Resmi Gazetede ana statüsü yayınlanarak; "kamu yararını gözeterek, kârlılık ve verimlilik ilkeleri çerçevesinde; güvenli, sürekli,

kaliteli, verimli, düşük maliyetli, çevreyi gözetir elektrik enerjisi üretimi ve satışı faaliyetinde bulunmak amacıyla" [135] çalışmalarına başlamıştır.

EÜAŞ'ı ana statüsü 2022 yılında güncellenmiştir. EÜAŞ; Afşin, Çan ve Çayırhan Bölgelerinde olmak üzere üç termik santralın yanı ısıra İstanbul ve Bursa Bölgelerindeki doğalgaz termik santrallarını ve Ülkemizin büyük hidroelektrik santrallarını işleterek elektrik üretmektedir.

Elektrik alım satım gibi ticari faaliyetlerden sorumlu olan TETAŞ, 2018 yılında, EÜAŞ çatısı altında birleştirilerek kapatılmıştır.

Türkiye Elektrik İletim Dağıtım A.Ş. (TEİAŞ): Elektrik ve enerji piyasasının yeniden düzenlenmesi kapsamında 2001 yılında yapılan değişimler ile ilga Türkiye Elektrik Üretim-İletim A.Ş. (TEAŞ) Genel Müdürlüğü, 02.03.2001 tarih ve 24334 sayılı Resmi Gazetede yayımlananı Bakanlar Kurulu Kararı ile üç farklı şirkete ayrılmıştır. Bu üç şirketten biri olarak kurulan TEİAŞ, üretilen elektriğin dağıtım noktalarına kadar iletilmesinden sorumlu olan bir kamu kuruluşudur. EPDK tarafından 13.03.2003 tarihinde verilen İletim Lisansı çerçevesinde; ülke çapında iletim faaliyetleri ile ilgili proje, tesis, kontrollük, işletme-bakım ve yük dağıtım konularındaki çalışmaları sürdürmektedir.

Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. (TEDAŞ): TEK'in 1993 yılında iki farklı kuruma ayrılması sonucunda, TEDAŞ bir kamu kuruluşu olarak kurulmuştur. TEİAŞ tarafından iletilen elektrik, TEDAŞ tarafından dağıtımı yapılarak som tüketicilere ulaştırılması sağlanmıştır. Ancak yaşanan gelişmeler ve ihtiyaçlar doğrultusunda, kamu tarafından sağlanan elektrik dağıtım hizmetleri, 2 Nisan 2004 tarih ve 22 sayılı Özelleştirme Yüksek Kurulu Kararı ile 21 dağıtım bölgesi olacak şekilde özelleştirilmiştir. Halen dağıtım hizmetleri TEDAŞ koordinasyonunda 21 farklı özel şirket tarafından yürütülmektedir.

Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPİAŞ): Özelleştirme faaliyetleri sonucu hem kamu hem de özel şirketler tarafından yürütülen elektrik üretim, iletim ve dağıtım faaliyetlerinin ticari yönden etkin, güvenilir, şeffaf ve sürdürülebilir bir şekilde işletilmesi ve çalıştırılması amacıyla 18 Mart 2015 yılında EPİAŞ kurulmuştur. EPİAŞ, enerji borsası olarak, piyasa alış-satış işlemlerinin şeffaf, düzenlemelere uygun bir şekilde yürütülmesi ve referans fiyat oluşturulması görevlerini yürütmek amacıyla piyasa katılımcılarına, enerji alış-satış

talepleri için ortam sağlamaktadır [136].

Nükleer Düzenleme Kurumu (NDK): Nükleer enerjiden yararlanmak üzere gerekli faaliyetleri yürütmek amacıyla 1956 yılında kurulan Atom Enerjisi Komisyonu, gelişen güvenlik ilkeleri doğrultusunda kapanmış ve yeni bir düzenleme ile Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) kurulmuştur. Ülkemizde nükleer santral kurulması kararı sonucu, TAEK tarafından yürütülen kontrol faaliyetleri ile düzenleyici faaliyetlerinin birbirinden ayrılarak bağımsız yürütülmesi için TAEK, 2 Temmuz 2018 yılında iki farklı yapıya dönüşmüştür. Bunlardan biri olan NDK, nükleer alandaki düzenleyici faaliyetlerin yanı sıra radyasyon güvenliği ile ilgili faaliyetleri de yürütmektedir [137].

Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK): Yukarıda açıklandığı üzere, TAEK'in yeniden yapılandırılması sonucu oluşan iki farklı kurumdan bir diğeri de Tenmak'tır. ETKB'ye bağlı olarak; enerji, maden, iyonlaştırıcı radyasyon, parçacık hızlandırıcıları ve nükleer teknoloji alanlarında; bilimsel araştırmalar yapmak-yaptırmak, teşvik edip destek vermek, koordinasyonu sağlamak üzere ilgili tüm faaliyetleri yürütmektedir.

Nükleer Teknik Destek AŞ (NÜTED): NDK, kendisine verilen görevlerini yerine getirirken ihtiyaç duyacağı her türlü teknik destek, analiz, danışmanlık, denetim, eğitim ve sertifikalandırma gibi hizmetleri yapmak üzere NÜTED şirketini kurmuş ve 23 Mayıs 2019 tarihinde Ticaret Sicil Gazetesinde tescil edilmiştir. NÜTED'in görev tanımı, 08 Mart 2022 tarih ve 7381 sayılı Nükleer Düzenleme Kanunu ile yenilenmiş ve NDK'nın ihtiyaçlarına yönelik olarak birçok alanda teknik destek hizmetini halen yürütmektedir [138].

Türkiye Nükleer Enerji A.Ş. (TÜNAŞ): EÜAŞ'ın bağlı ortaklığı şeklinde, 2015 yılında, Jersey adalarında, EUAS International ICC adında şirket 8022 sayılı Bakanlar Kurulu Kararı ile kurulmuştur. Şirketin amacı; "ETKB tarafından belirlenen faaliyetler, uluslararası anlaşmalar çerçevesinde belirlenen faaliyetlerin yanı sıra yurt dışında elektrik enerjisi üretimi ve ticareti ile yakıt ve atık yönetimine yönelik santralın kurulması, işletilmesi, bakımı, onarımı ve rehabilitasyonu, elektrik ticareti, yakıt ve atık yönetimi gibi faaliyetleri yerine getirmektir. İlerleyen süreçte ve gelişmeler doğrultusunda, 2022 yılında, EUAS Int. ICC özvarlığını devralmış ve Türkiye'de TÜNAŞ şirketi kurulmuştur [139].

5.3. Türkiye'de Nükleer Santral Gelişimi

Bir atomun parçalanması ile ortaya çıkan muazzam enerjinin keşfedilmesinin ardından, nükleer enerji, ilk zamanlarda askeri alanında kullanılmaya başlanmış ve sonunda II. Dünya Savaşı sırasında Japonya'nın Nagazaki ve Hiroşima bölgelerine atılan atom bombası ile tüm dünya böyle bir enerjiden haberdar olmuştur [140]. "Atom" teriminin duyulmasından sonraki süreçte, Amerika'nın başkanı Dwight D. Eisenhower, 1953 yılı Birleşmiş Milletler Genel Kurulu'nda "Barış için Atom (Atom for Peace)" çağrısını yaparak bu enerjinin farklı şekilde değerlendirilmesine yol açmıştır. Bu çağrıya karşılık veren Türkiye, 5 Mayıs 1955 tarihinde ABD ile "Sulh için Atom" ikili anlaşmasını imzalayarak bu konuda ilk adımını atmış oldu. Aynı yıl, 8-20 Ağustos 1955 tarihinde, İsviçre-Cenevre'de "I. Uluslararası Atom Enerjisinin Barışçıl Amaçlarla Kullanımı Konferansı" düzenlendi. Türkiye bu gelişmeleri yakından takip ederek, teknik ve bilimsel altyapı için gerekli olan hem insan gücünü yetiştirmeye hem de mevzuat çalışmalarına başladı. Farklı bölgelerde araştırma merkezleri kuruldu ve 1961 yılında İstanbul Çekmece'de bir araştırma reaktörü devreye alındı.

Santral yapımı için hem mevzuat düzenlemesi hem de saha belirlenmesine yönelik faaliyetler 1960'lardan itibaren yoğun şekilde sürdürüldü. Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİEİ) tarafından yürütülen fizibilite çalışmaları sonucunda; yakıtı doğal uranyum olan 300-400 MWe gücünde basınçlı ağır su reaktör tipinde bir nükleer santralın 1970 yılında inşaatına başlanacak ve 1977'de devreye alınacak şekilde planlaması yapıldı. Ancak 1970 yılında TEK'in kurulması ile çeşitli kurum ve kuruluşlar altında yürütülen ilgili faaliyetlerin TEK'e devredilmesi kararının yanı sıra 70'li yıllarda yaşanan ekonomik ve politik nedenlerle ilk santral yapımı askıya alınmıştır. Saha belirleme çalışmaları sonucunda uygun bulunan 10 saha içinde ilk sırada yer alan Mersin Akkuyu sahası için 1976 yılında yer lisansı verildi. İkinci santral yapımı için 600 MWe kapasiteli türbin ve nükleer ada kısımları ayrı olmak üzere paket usulü ihale ile 1977 yılında açılan ihaleye PWR, BWR ve PHWR gibi tüm reaktör teknoloji firmaları davet edildi. PWR teklif veren Westinghouse, kredi bulamadığı için 1978'de çekilirken, BWR teklifi veren Stal Laval ile uzun müzakerelere rağmen 1980 yılında yaşanan politik gelişmeler nedeniyle yapım işi askıya alındı.

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'nun (TAEK), 1982 Temmuz ayında kurulmasıyla üçüncü defa nükleer santral yapım işi için bir girişim daha yapıldı. TAEK tarafından ihale duyurusu yapılmadan, 1982 yılında, Atomic Energy of Canada Limited (AECL), Siemens-Kraft Werk

Union (KWU) ve General Electric (GE) firmalarından doğrudan teklif alınarak 1983 Kasım ayında teknik, ekonomik ve idari olarak başlanan müzakereler, 1984 ve 85 yıllarında devam etmiştir. Rusya'da (eski SSBC), 1986 Nisan ayında yaşanan Çernobil kazası, önemli bir aşamaya gelen görüşmelerin askıya alınmasına vesile olmuş ve santral yapım işi iptal edilerek mevcut dairde kapatılmıştır. Verilen uzun aradan sonra, ETKB, 2010 yılında bir santralın devreye alınabilmesi için 1993 yılında Akkuyu nükleer santral yapımı tekrar yatırıma dahil edildi ve TEAŞ'ta 1994 yılında bir daire kuruldu. O güne kadar yapılmış çalışmaların güncellenmesinin ardından hazırlanan yeni şartname ile TEAŞ, en az 600 MWe kapasiteli bir veya iki ünite olmak üzere toplam 1 400-2 800 MWe kapasiteli, %100 kredili anahtar teslimi yöntemi ile 1996 Aralık ayında dördüncü defa ihaleye çıktı. Üç farklı konsorsiyumun verdiği tekliflerin üç yıl gibi uzun sürede değerlendirilmesi sonucu, nihai sonuca varılmıştır. Ancak, dönemin Başbakan'ı tarafından 25 Temmuz 2000 tarihinde Bakanlar Kurulu Kararı açıklanarak ekonomik nedenlerden dolayı ihale iptal edildiği duyurulmuş ve ayrıca TEAŞ bünyesindeki daire de kapatılmıştır.

Uzun süredir üzerinde çalışılan nükleer santralın gerçekleştirilememesi nedeniyle ETKB, 2007 yılında, santral yapımını tekrar gündemine aldı ve 5710 sayılı Kanun ile özel şirketlere, devlet kuruluşları ile birlikte santral kurma ve işletme imkanı vererek TETAŞ'ın üretilen elektriği satın alma ve satma yetkisi verdi. TETAŞ, 2008 Mart ayında; Akkuyu sahası için 4000 MWe kapasiteli bir nükleer santral yapımı için ihaleye çıkmış ve Rus şirketinden gelen tek teklifi, bedelinin yüksek olması nedeniyle beşinci kez yapılan ihaleyi iptal etmiştir.

Barışçıl amaçlarla kullanıldığı ilk yıllardan beri nükleer enerjiden yararlanmak isteyen ancak bu isteğini gerçekleştiremeyen Türkiye, bir nükleer santral yapmak üzere Rusya ile doğrudan görüşmelere başlamıştır. Yapılan heyetler arası görüşmeler sonucunda, 12 Mayıs 2010 tarihinde, Mersin Akkuyu sahasında, dört ünite VVER-1200 tipi reaktör yapımı için Hükümetlerarası Antlaşma (Intergovernmental Agreement-IGA) imzalanmıştır. *"Türkiye Cumhuriyeti Hükümeti ile Rusya Federasyonu Hükümeti Arasında Türkiye Cumhuriyeti'nde Akkuyu Sahası'nda Bir Nükleer Güç Santralının Tesisine ve İşletimine Dair İşbirliğine İlişkin Anlaşma"* olarak 6 Ekim 2010 tarihli ve 27721 sayılı resmi gazetede yayımlanmasının ardından hem Rusya Meclisi'nde hem de Türkiye Büyük Millet Meclisi'nde onaya tabi olmuştur.

Akkuyu sahasında yapılacak olan nükleer santralın anlaşmasını müteakip, daha önce santral sahalarından biri olarak belirlenen Sinop İnceburun mevkiinde ikinci bir nükleer santral yapımı için Japonya ile doğrudan görüşmelere başlanarak iki ülke arasında aşağıda tam adı belirtilen Hükümetlerarası Antlaşma ve Evsahibi Ülke Antlaşması (HGA) birbirinin ayrılmaz parçası olarak 1 Nisan 2015 tarihli ve 6642 sayılı Kanun'la uygun bulunmuştur. Bu antlaşmalar da, Türkiye ve Japonya Meclisi'nde onaya tabi olmuştur.

1. Türkiye Cumhuriyeti'nde Nükleer Güç Santrallarının ve Nükleer Güç Sanayisinin Geliştirilmesi Alanında İşbirliğine İlişkin Anlaşma
2. Türkiye Cumhuriyeti'nde Nükleer Güç Santrallarının Nükleer Güç Sanayisinin Geliştirilmesine Dair İşbirliği Zaptı**"**

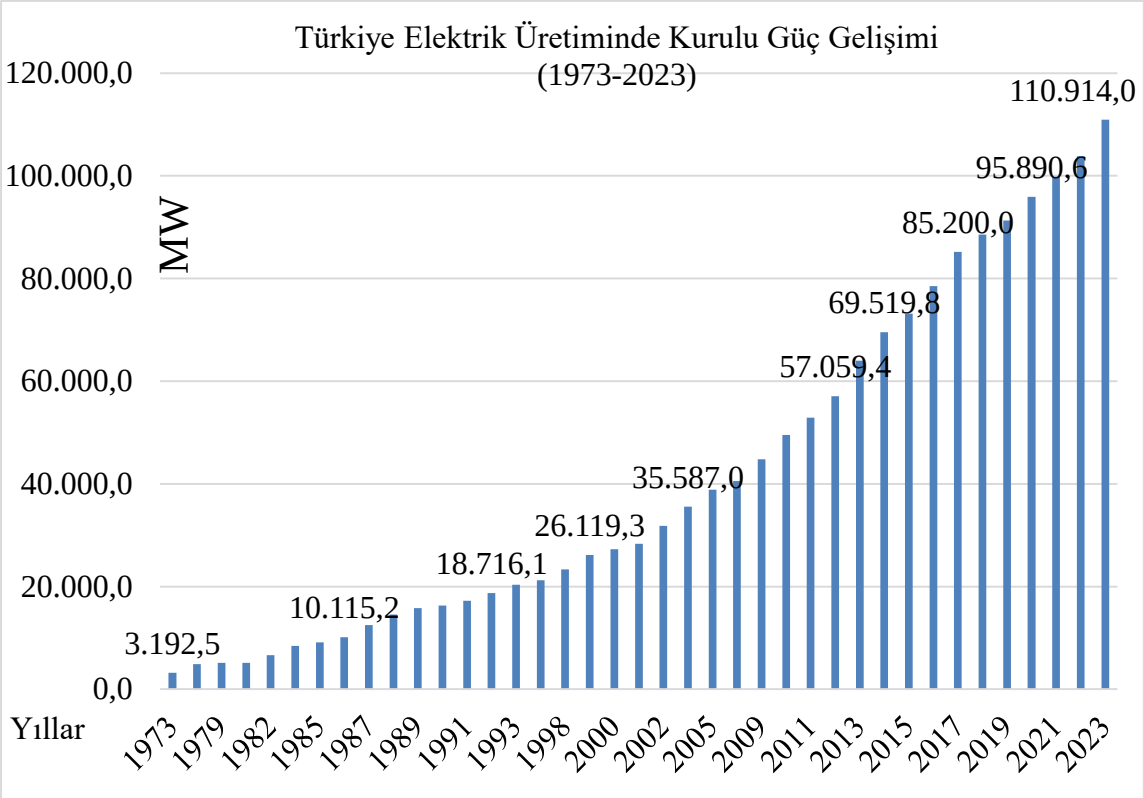
Sinop Nükleer Santralı Projesi, EÜAŞ ve Japon Konsorsiyumunun[7] sırasıyla %49 ve %51 oranındaki ortaklığı ile fizibilite çalışması tamamlanmış ancak, ekonomik yönden yapılabilir bulunmadığı için proje yapımı askıya alınmıştır.

5.4. Türkiye'de Elektrik Üretim Güncel Durum

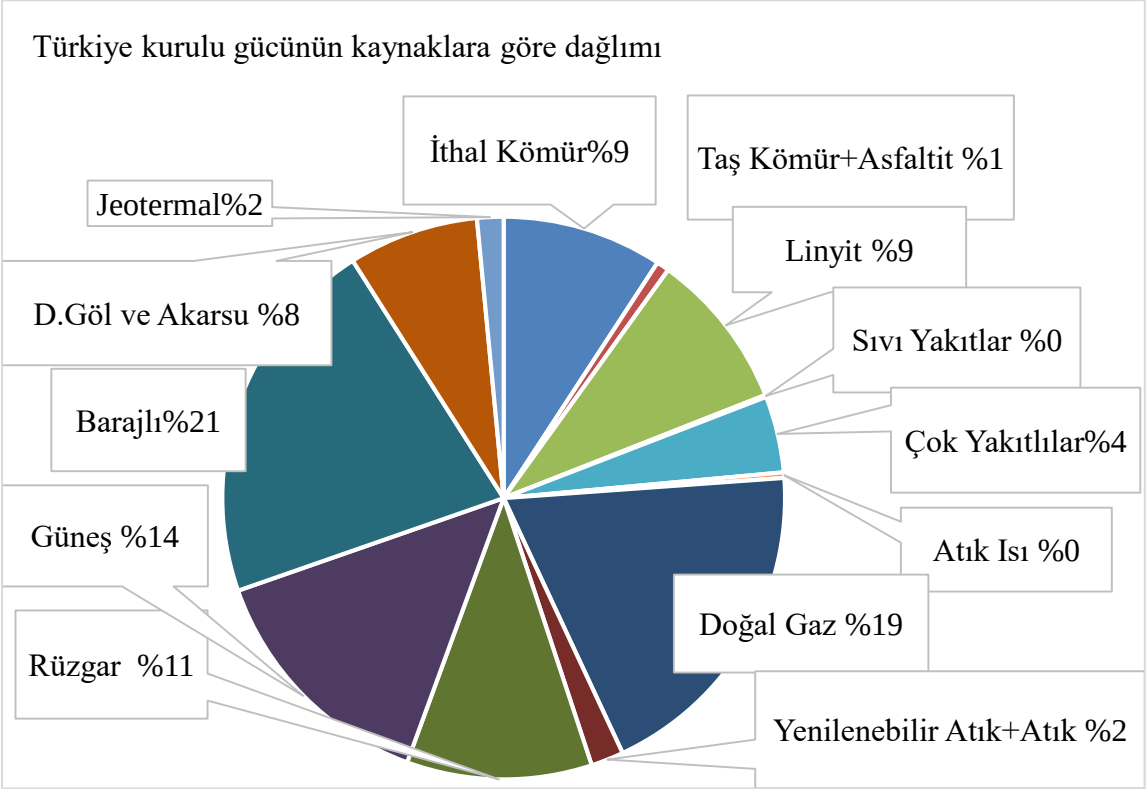
Türkiye'nin nüfus ve sanayi gelişim ve büyümesine bağlı olarak enerji talebi de süreç içinde artış veya azalış eğilimi göstermiştir. TEİAŞ tarafından hazırlanan sektör raporunda, son 50 yılı kapsayacak şekilde 1973-2023 yılları arası elektrik üretiminde Türkiye kurulu güç gelişimi Şekil 5.1'deki yer almıştır [141].

Türkiye kurulu gücü, Şekil 5.1'de görüldüğü gibi 1973 yılında 3 192 MW iken 2023 yılı itibariyle 110 914 MW'a ulaşmıştır. [141]. Bu şekilden hangi dönemde kaç MW kapasiteli bir santral yapımının gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Yapılan yatırımlar ve inşaat süresine bağlı olarak santralların işletmeye alındığı özellikle 2003, 2007, 2010 ve 2013 yıllarında önemli artış yaşandığı görülmektedir. Ülkemizin elektrik üretmi 2013 yılında 57 GW iken, 2021'de 95 GW civarında olduğu görülmektedir.

[7] Japon Konsorsiyumu, Japon MitsuBishi, Japon Itochu ve Belçika Engie (eski GDF-Suez) firmalarından oluşmaktadır.



Şekil 5.1. Elektrik üretiminde Türkiye kurulu güç gelişimi (1973-2023) [141].



Şekil 5.2. Türkiye kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı [142]

Türkiye elektrik üretimini, birincil enerji kaynakları olan kömür, doğalgaz, petrol türevleri gibi fosil yakıtların yanı sıra, hidroelektrik, rüzgar, güneş, jeotermal ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından da sağlamaktadır. TEİAS verileri doğrultusunda, kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı Şekil 5.2'de gösterilmektedir. Türkiye kurulu gücü, yaklaşık %19'u kömür, yaklaşık %19 doğalgaz, yaklaşık %29'u hidroelektrik ve yaklaşık %11 rüzgar ve %14'ü güneş şeklindedir [142].

Türkiye 2023 yılı kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı Çizelge 5.1'de kapasite ve yüzde olarak detaylıca gösterilmiştir. Enerji yatırımlarında, yenilenebilir enerji kaynaklarının teşvik edilmesiyle, Ülkemiz kurulu gücünün yaklaşık %55'i yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşmaktadır.

Çizelge 5.1. Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklara göre dağılımı (2023) [142]

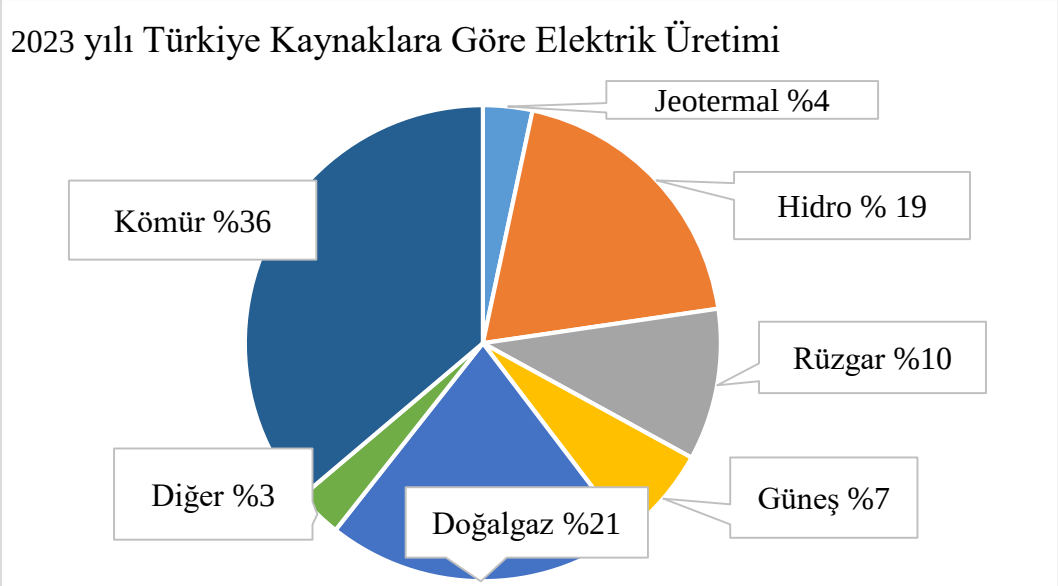
KAYNAK	MW	%
İthal Kömür	10220,3	9,21
Taş Kömür + Asfaltit	812,5	0,73
Linyit	10066,3	9,08
Sıvı Yakıtlar	135,4	0,12
Çok Yakıtlılar	4874,3	4,39
Atık Isı	359,1	0,32
Doğal Gaz	21285,6	19,19
Yenilenebilir Atık + Atık	2087,4	1,88
Rüzgar	11806,1	10,64
Güneş	15613,4	14,08
Barajlı	23650,2	21,32
D.Göl ve Akarsu	8312,2	7,49
Jeotermal	1691,3	1,52
TOPLAM	110914	100

Türkiye elektrik üretiminin birincil enerji kaynaklarına göre dağlımı 2023 yılı itibariyle, Şekil 5.3'te gösterilmektedir. Gerçekleşen üretim değerlerinin hem miktarı hem de yüzdesi Çizelge 5.2'de gösterilmektedir. Burada görüleceği üzere, 2023 yılında 331148,9 GWh elektrik üretimi gerçekleşmiştir. Yaklaşık %22 oran ile bu üretim ithal kömür kaynağından sağlanmıştır. İthal kömür ve doğal gaz birlikte dikkate alındığında yaklaşık %43 oranında

dışa bağımlı olduğumuz görülmektedir. Bununla birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarına verilen teşvikler ile artan yatırımlar sonucunda rüzgar enerjisinden %10 ve güneş enerjisinden yaklaşık %6,5 oranında fayda sağlanarak üretim gerçekleştirildiği anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.2. Türkiye elektrik üretiminin birincil enerji kaynaklarına göre dağlımı[143]

KAYNAK	ÜRETİM (GWh)	YÜZDE (%)
İthal Kömür	72719,40	21,96
Doğal Gaz	69452,23	20,97
Barajlı	44302,17	13,38
Linyit	41735,31	12,6
Rüzgar	34109,05	10,3
Güneş	22090,56	6,67
D.Göl ve Akarsu	19700,28	5,95
Jeotermal	11102,08	3,35
Yenilenebilir +Atık + Atık Isı	10124,73	3,06
Taşkömürü + Asfaltit	5341,69	1,61
Sıvı Yakıtlar	471,42	0,14
TOPLAM	331148,90	100,00

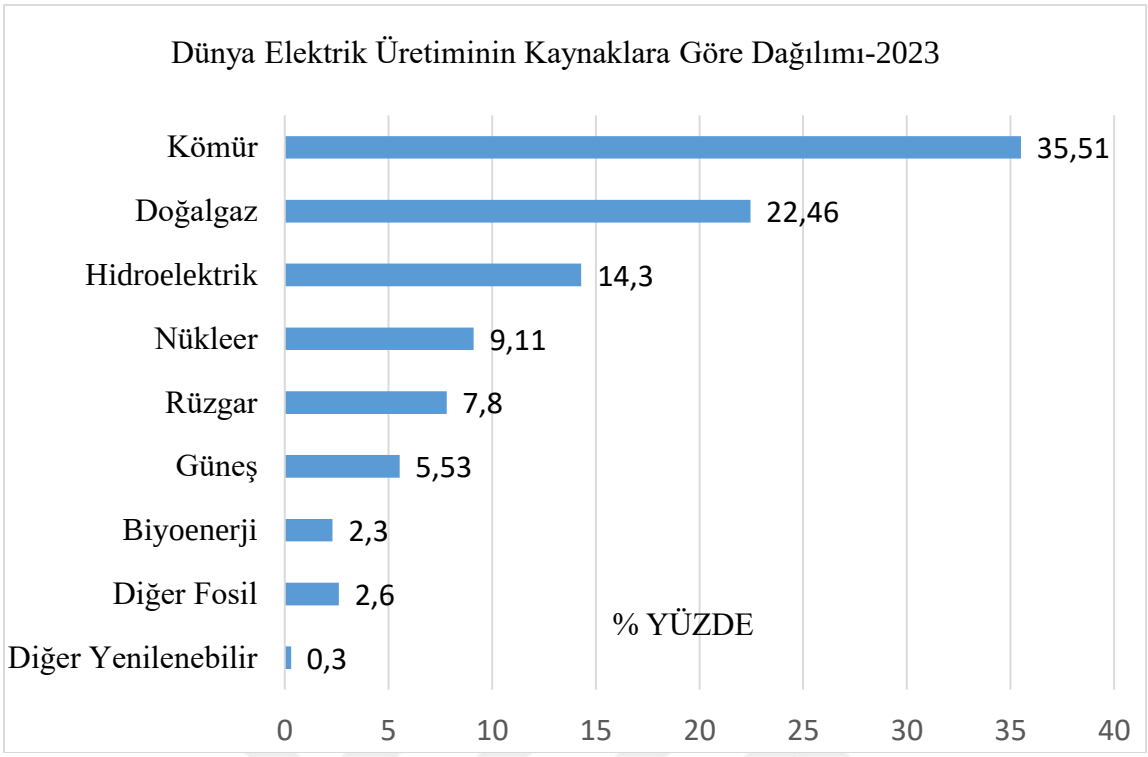


Şekil 5.3. Türkiye elektrik üretiminin kaynaklara göre dağlımı [143]

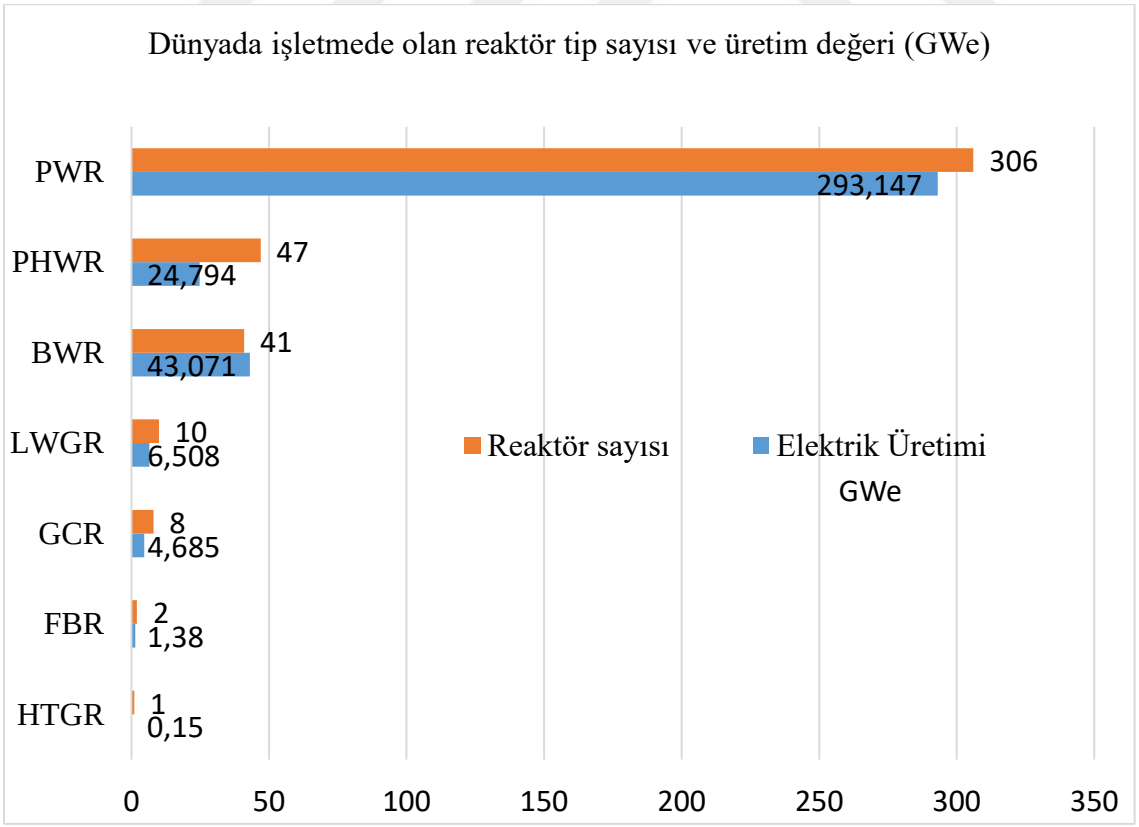
5.5. Dünya'da Mevcut Enerji Durumu

Ülkemizde olduğu gibi, Dünyada da elektrik üretimi, birincil enerji kaynakları olan kömür, doğalgaz, petrol türevleri gibi fosil yakıtların yanı sıra, hidroelektrik, rüzgar, güneş, jeotermal ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmaktadır. Dünya elektrik üretiminin birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı, Statista sayfasından alınan veriler doğrultusunda; yaklaşık %35,5 kömür, yaklaşık %22 doğalgaz, yaklaşık %14 hidroelektrik, yaklaşık %9 nükleer, yaklaşık %8 rüzgar ve yaklaşık %5,5 güneş şeklindedir [144]. Dünya elektrik üretiminin kaynaklara göre dağlımı Şekil 5.4'te gösterilmektedir. İklim değişikliği kapsamında alınan kararlarla, kömür gibi fosil yakıtların kullanımı azaltılmaya çalışılırken rüzgar, güneş gibi yenilenebilir kaynakların kullanımında artış yaşanmaktadır.

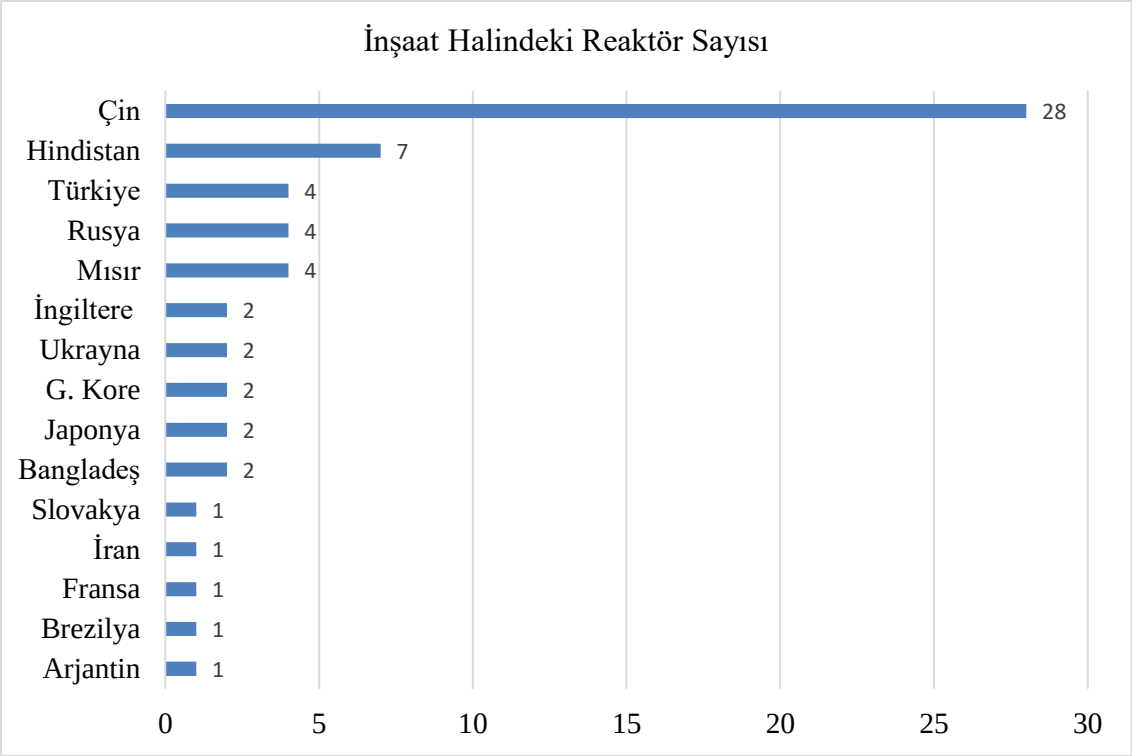
Nükleer santral açısından ise Dünyada, halen işletmede olan reaktörler arasında, 306 adet gibi bir rakamla PWR tip reaktörden yaklaşık 293 GWe elektrik üretimi ile açık ara birinci sırada yer alırken ağır su kullanılan PHWR, 47 adet ile ikinci sırada ve 41 adet BWR ise üçüncü sırada yer almaktadır [122]. Bununla birlikte, işletmede olmayan veya geçici kapatılmış 19 adet BWR tip reaktör bulunmaktadır. Halen işletmede olan en çok reaktör tipi ve toplam üretim değeri Şekil 5.5'te gösterilmektedir. İklim değişikliği mücadelesi kapsamında baz yük çalışan nükleer santral yapımı, özellikle Çin'de hızlı ve yoğun şekilde devam etmekte olduğu Şekil 5.6'te görülmektedir. Şekilde görüleceği üzere Çin'de yapımı devam eden 28 adet reaktör bulunurken, Hindistan 7 adet reaktör yapımı ile ikinci sırada yer almaktadır [122]. Yapılmakta olan santralların 54 adedi PWR tip reaktör iken, FBR'den 4 adet, BWR'dan 2 adet ve PHWR'den 2 adet olmak üzere toplam 62 adet reaktör yapım halindedir ve Şekil 5.7'da gösterilmektedir [122].



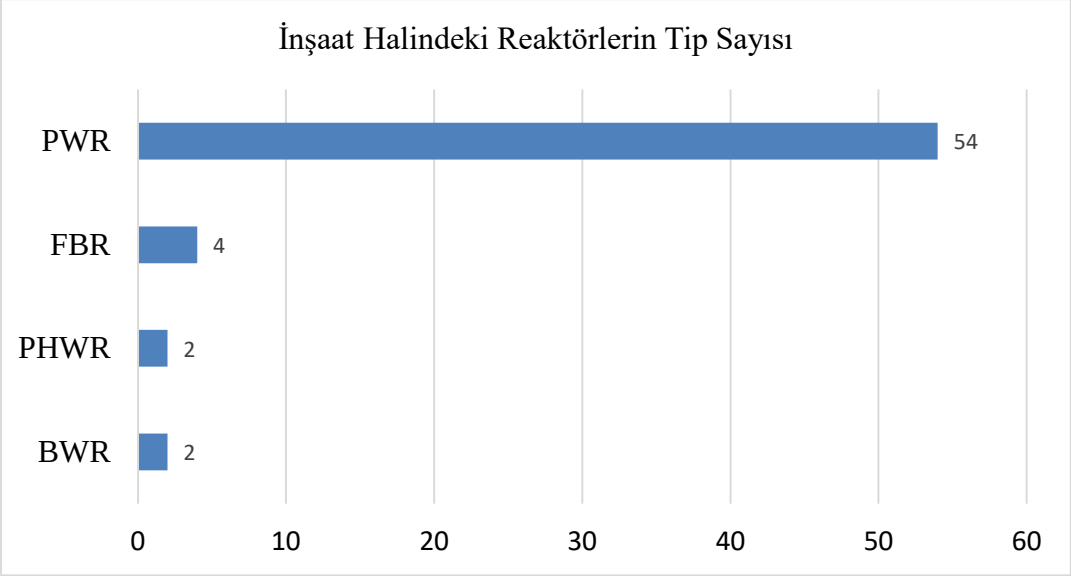
Şekil 5.4. Dünya elektrik üretiminin kaynaklara göre dağlımı [144]



Şekil 5.5. Dünyada işletmede olan reaktörlerin tip sayısı ve toplam elektrik üretimi [122]



Şekil 5.6. Dünyada inşaat halindeki reaktörlerin ülkelere göre sayısı [122]



Şekil 5.7. Dünyada inşaat halindeki reaktörlerin tiplerine göre sayısı [122]

6. SİSTEM ÖNERİSİ VE METODOLOJİ

6.1. Hibrit Sistem

İklim değişikliği mücadelesi kapsamında, birçok ülke fosil yakıtları terk ederek yerine yenilenebilir ve temiz enerji sistemlerini kullanmayı amaçlamaktadır. Ancak, hemen hemen hepsi kesintili üretim yapan yenilenebilir enerji sistemlerinin kapasite faktörleri düşük olduğu için son yıllarda, yenilenebilir sistemler ile özellikle termik santrallar birlikte değerlendirilerek ortak bir üretimin sağlanmasına çalışılmaktadır. Hibrit sistem olarak anılmaya başlanan yapıda, bir veya birden çok üretim tesisi, bir diğer üretim tesisi ile birlikte; birleşik veya birbirini tamamlayan şekilde veya ortak alanda üretim yapmaktadır.

Hibrit sistemin tanımı incelendiğinde; ABD DOE hibrit enerji sistemini (HES) "*bağımsız çalışan alternatifler ile kıyaslandığında, maliyet tasarrufu ve gelişmiş kabiliyetler, değer, verimlilik veya çevresel performans elde etmek için kapsayıcı bir çerçevesi aracılığıyla veya fiziksel olarak entegre edilen birden fazla enerji üretimi, depolama ve/veya dönüştürme teknolojisi*" olarak tanımlamaktadır [145]. Hibrit sistemde, daha verimli bir üretim gerçekleştirilerek mümkün olduğunca daha az karbon salımlı kesintisiz elektrik üretimi amaçlanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, kesintili üretim yaptıklarından genellikle ya fosil yakıtlı sistemlerle birlikte kullanılarak elektrik üretimi sağlamakta ya da enerji depolaması ve H_2 üretimi gibi diğer alternatif faaliyetler için kullanılmaktadır. Depolama veya hidrojen üretimi, enerjinin başka bir alanda farklı zamanda kullanılmasına imkan vermektedir. Son yıllarda hem uygulaması hem de hala geliştirilmeye çalışılması yönüyle bu tez çalışması, hibrit sistem üzerine odaklanmıştır.

6.2. Önerilen Sistem

Tez çalışması için yapılana inceleme ve araştırma sonucunda, karbon ve sera gazlarının artmasına neden olan fosil yakıtların artık terkedilerek yenilenebilir ve temiz enerji sistemleri vasıtasıyla enerji üretilmesinin, insan başta olmak üzere tüm canlılar ve çevre sağlığı hatta geleceğimizi güvence altına almak açısından büyük önem arz ettiği değerlendirilmiştir. Bu nedenle temiz, kesintisiz, ekonomik, verimli ve sürdürülebilir enerji üretimi için oluşturulacak hibrit bir sistemin analiz edilmesi ve analiz sonucuna göre

stratejiler ve iyileştirmelerin önerilmesine karar verilmiştir.

Tez çalışması için nükleer enerji kaynağından yeni geliştirilmekte olan SMR teknolojisi ile yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş ve rüzgarın birlikte kullanımı ile oluşturulan bir hibrit sistem (Nükleer-Yenilenebilir Hibrit Enerji Sistemleri, kısaca N-Y-HES) önerilmiştir.

Temiz enerji sistemleri olarak kabul edilen nükleer enerji sistemleri, büyük ölçekten küçük ölçeğe, ağır su kullanımından hafif su veya gaz kullanımına kadar çeşitli teknolojilere sahip kendini kanıtlanmış bir sistemdir. Nükleer enerji teknolojileri, güvenlik gereksinimleri nedeniyle tasarımcılar tarafından daha ekonomik veya daha güvenli sistemi elde etmek adına sürekli geliştirilmektedir. Hibrit sistemde, nükleer teknolojilerinden yeni geliştirilen ve iklim değişikliğinde önemli rol oynaması beklenen ve IV Nesil (Gen-IV) olarak adlandırılan SMR teknolojisi yer almaktadır. SMR teknolojileri de Bölüm 4.5'de açıklandığı üzere çeşitli teknolojilere sahip olduğundan, Çin tarafından tanıtım işletmesi devam eden HTR-PM reaktör teknolojisi, bu tez için önerilen sistemin (N-Y-HES) temelini oluşturmaktadır.

Kömürlü santrallarda olduğu gibi, geleneksel termik santral uygulamalarının amacı buhar elde etmektir. Buhar üretim sürecinde kullanılan su, kazana veya reaktöre ulaşmadan önce ön ısıtmaya tabi tutulur. Bu ısıtma, ilk çalıştırma esnasında sıvı yakıt kullanan yardımcı tesisler aracılığıyla sağlanırken; sistem normal işletme moduna geçtiğinde, su, yüksek veya alçak basınç türbininden alınan kızgın buhar ile ısı değiştiricisinde ön ısıtmaya tabi tutulur. Önerilen sistemde (N-Y-HES), türbinden alınan buhar ile ön ısıtması yapılan su, güneş enerji kaynağından yararlanılarak ısıtılırken sistemin iç enerji ihtiyacı rüzgar türbinleri ile sağlanır ve ayrıca rüzgardan elde edilen fazla üretim hidrojen üretimi için elektroliz sisteminde kullanılır.

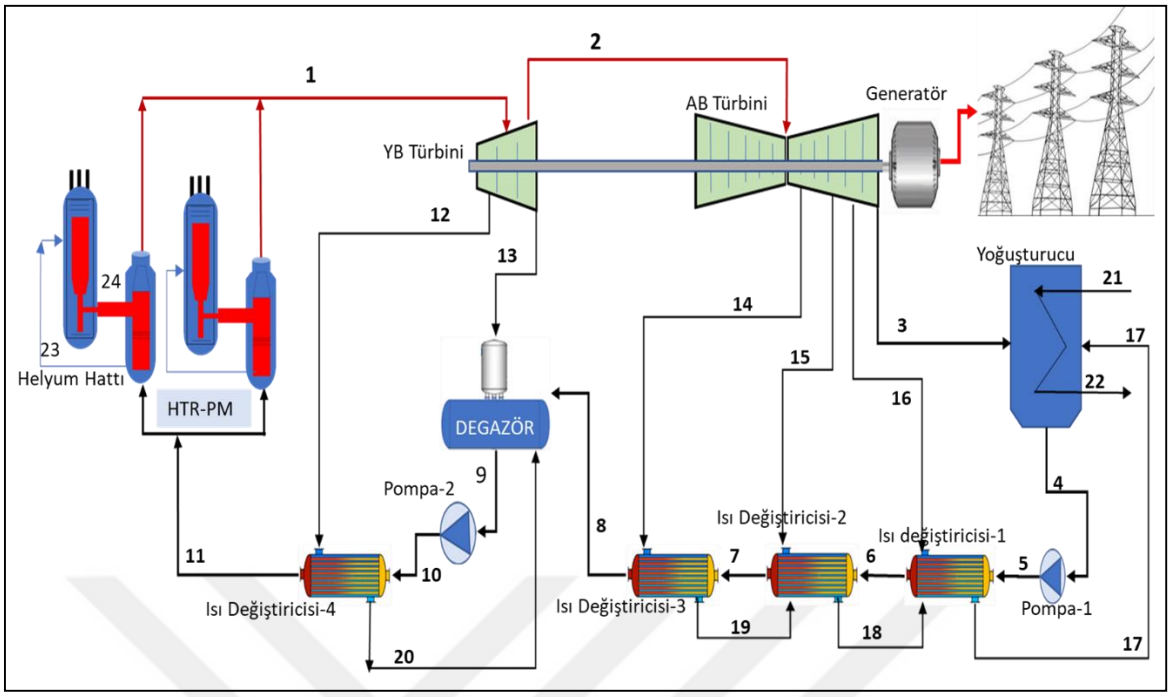
Güneş enerjisi sistemleri hem elektrik hem de ısı ürettiği için birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Bölüm 3.1'de açıklandığı üzere, fotovoltaik teknolojisinden farklı çeşitlere sahip yoğunlaştırılmış güneş teknolojilerine kadar birçok uygulaması olan güneş enerjisi teknolojilerinden yoğunlaştırılmış güneş enerji başlığı altında yer alan oluk tip kolektör kullanılmıştır.

Yenilenebilir enerji denilince ilk akla gelen rüzgar enerjisi, önerilen sistemde (N-Y-HES) iç ihtiyacı karşılamak üzere kullanılmıştır. Düşük kapasite faktörüne sahip olması nedeniyle

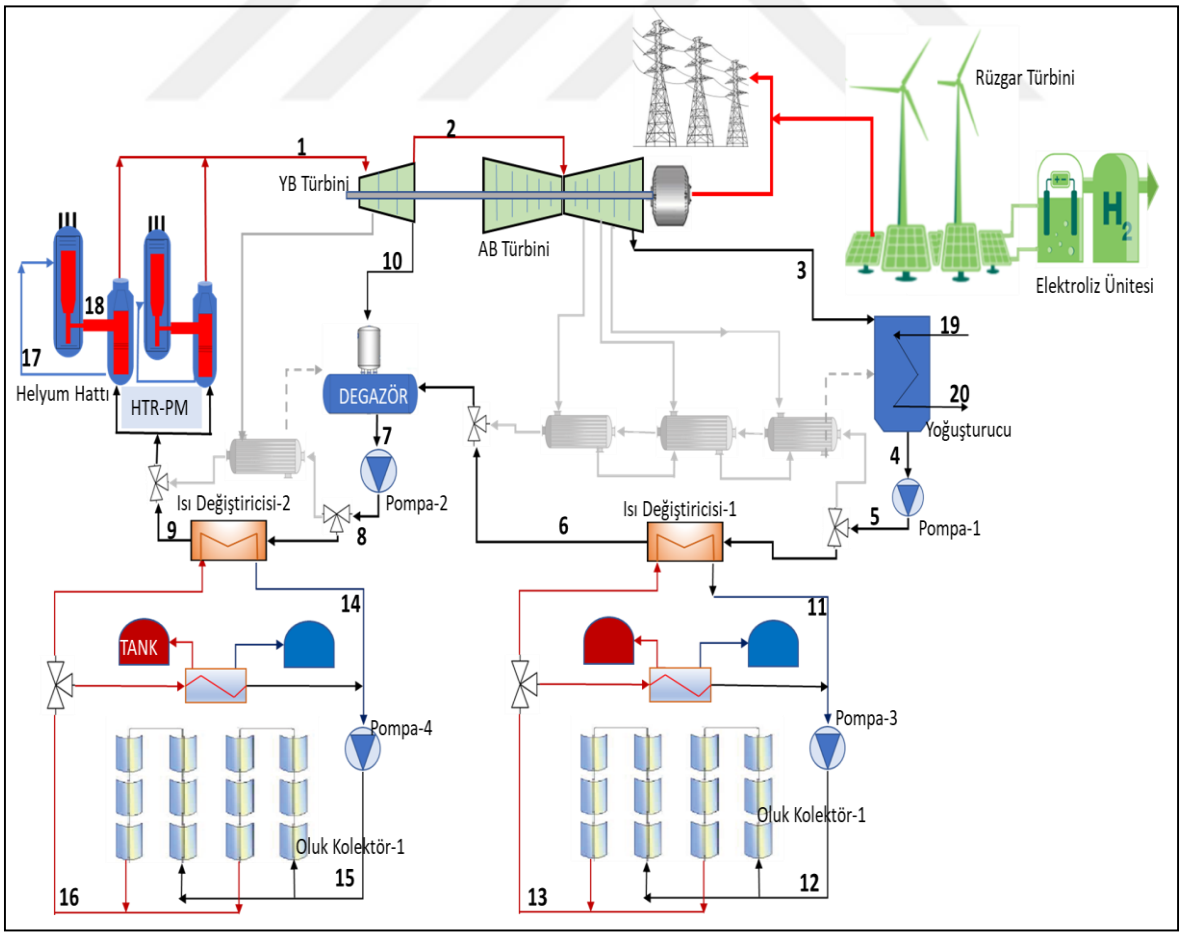
daha fazla kurulu gücü ihtiyaç duyulan rüzgar enerjisinden sağlanan fazla üretim, hidrojen üretimi için elektroliz sisteminde değerlendirilmiştir.

Mevcut durum için esas alınan HTR-PM su-buhar çevrimi, IAEA tarafından hazırlanan raporda yer aldığı gibi [146], Şekil 6.1'de gösterilmektedir. Mevcut durum hesap ve analizler için Şekil 6.1 numaralandırılmıştır. Önerilen sistem (N-Y-HES), Şekil 6.2'de gösterilmektedir. Bu sistemin hesap analizleri için Şekil 6.2, numaralandırılmıştır.

Geleneksel termik santral yapısı ile benzer olan HTR-PM sisteminde, su, yoğuşturucu sonrasında yer alan pompa ile ısı değiştiricilerine gönderilerek türbinden alınan kızgın buhar ile aşamalı olarak ısıtılır. Üç ısı değiştiricisinde belli bir sıcaklığa ulaşan su, su-buhar ayrımının yapıldığı degazöre gelir. Degazörde de su-buhar ayrımı için türbinden buhar alınır veya ilave su sağlanır. Degazör sonrası sistemin en önemli ve en büyük pompası vasıtasıyla yüksek basınçlı ısı değiştiricisine gönderilen su reaktör ile birleşik yapıda yer alan buhar üretecine gider ve burada buhar halini alır. Buhar üretecinde üretilen buhar, sıcaklığını reaktör korunu soğutan helyum gazından sağlar. Buhar üretecinde üretilen buhar, önce yüksek basınç (YB) türbinine oradan da alçak basınç (AB) türbinine giderek mevcut enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür. Türbinde elde edilen mekanik enerji generatör içinde elektrik enerjine dönüşür. Türbin içinde kullanılan buhar, artık çürük buhar olarak adlandırılır ve sistemde yeniden kullanılabilmesi için sıcaklığının düşürülmesi ve yeniden basıncının artırılması gerekir. Türbinden çıkan buhar, hemen yoğuşturucuya girer ve burada soğutma suyu ile yoğuşturularak sıcaklığı düşürülür ve suya dönüşür. Yoğuşturucu, içinde soğuk su geçen çok küçük boru demetlerinden oluşan bir yapıya sahiptir. Buhar, boru demetlerinin arasından geçer ve aynı anda boru demetlerinin içinden geçen soğutma suyu, buharın sıcaklığını alır ve ısınır. Isınmış olan bu soğutma suyunun tekrar sistemde kullanılabilmesi için soğutulması gerekir. Isınmış olan soğutma suyu deniz/akarsu/göle bırakılır ve yeni soğuk su denizin farklı noktasından alınır. Deniz veya akarsu bulunmuyorsa soğutma suyunun soğutulması için soğutma kule sistemi kullanılır. Nükleer santrallar genellikle deniz veya akarsu kenarına kurulur.

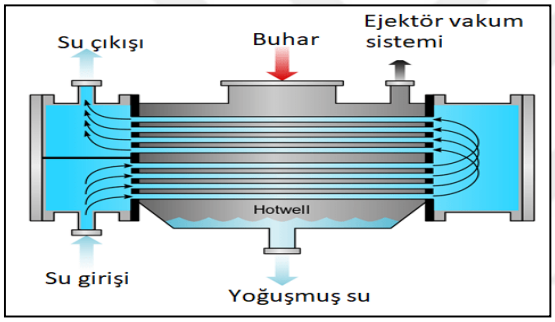


Şekil 6.1. HTR-PM su-buhar çevrimi [146]



Şekil 6.2. Önerilen sistem için su buhar çevrimi

Nükleer santrallarda güvenlik (safety) öncelikli olduğu için önerilen sistemde (NYHES), HTR-PM'in su-buhar çevrim yapısı, giriş-çıkış sıcaklıkları, pompa değerleri değiştirilmedi. HTR-PM yapısında yer alan dört adet ısı değiştiricisi yerine oluk kolektörleri ile bağlantılı iki adet ısı değiştiricisi uygulandı. Önerilen NYHES'de, Şekil 6.2'de görüldüğü gibi iki grup oluk kolektör kullanıldı. Birinci grup oluk kolektör, mevcut istemde degazör öncesinde yer alan üç adet ısı değiştiricisinin yerine uygulanan ısı değiştiricisine gerekli ısıyı sağlar. İkinci grup oluk kolektör ise mevcut sistemde degazör ve ana pompa sonrasında yer alan ısı değiştiricisinin yerine kullanılan ısı değiştiricisi için gerekli olan ısıyı sağlar. Sistem çevrim suyu ön ısıtması oluk kolektör ile yapılırken, sistemin iç enerji ihtiyacı rüzgar türbinleri ile karşılanmaktadır. Rüzgar kapasite faktörüne bağlı olarak rüzgardan elde edilen fazla enerji H_2 üretiminde kullanılmaktadır.



Resim 6.1. Yoğuşturucu iç yapısı genel görünümü [147]

Elektrik üretimi ve enerji geçiş kaynağı olarak kabul edilen hidrojen üretimi için önerilen NYHES hem simüle edilerek hem de termodinamik birinci ve ikinci kanunları çerçevesinde analizi yapılarak uygunluğu ve kullanılabilirliği ortaya çıkarılmıştır. Mevcut sistem ile önerilen sistemin analiz sonuçları mukayese edilmesiyle aradaki farklar değerlendirilmiştir. Yeni geliştirilmekte olan SMR teknolojilerinin avantajları kullanarak yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili üretimini veya düşük kapasite faktörünü artı bir değere dönüştürülmesinin oluşturduğu durum görülmüştür.

6.3. Saha Seçimi

6.3.1. Güneş enerjisi için yer seçimi

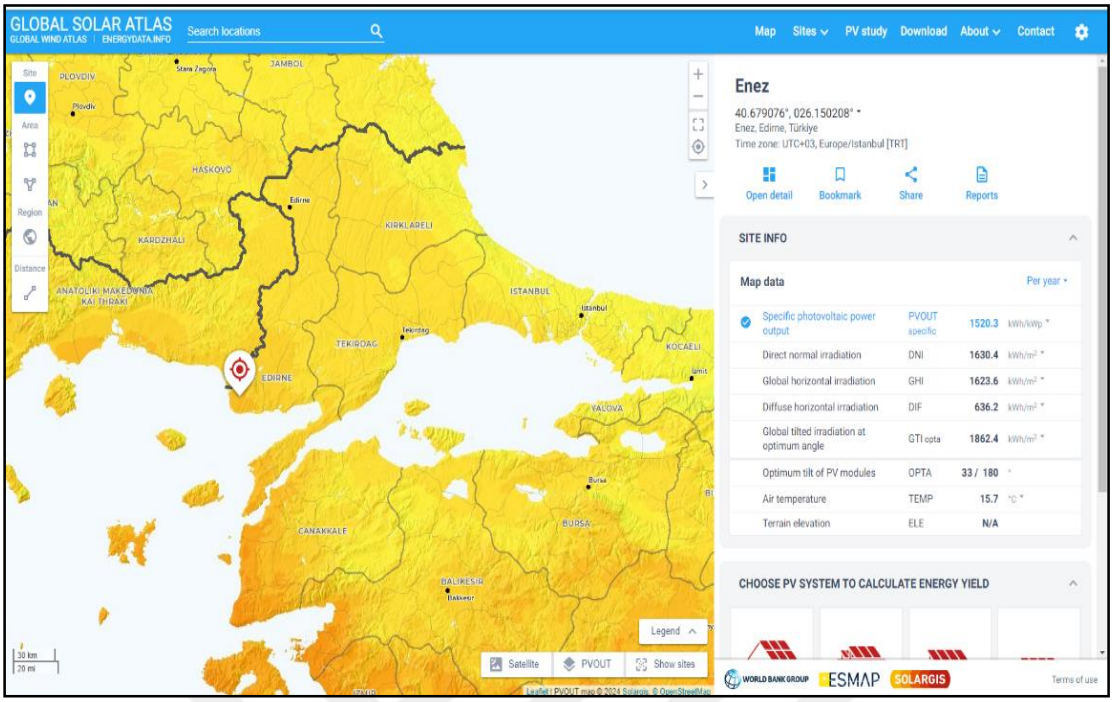
Önerilen NYHES için Marmara Bölgesi belirlenmiştir. Nüfus yoğunluğu fazla olan ve çok

sayıda sanayi tesislerinin yer aldığı İstanbul, Kocaeli, Bursa, Tekirdağ gibi büyük şehirlerin bulunduğu Marmara Bölgesi, yüksek elektrik talebi nedeniyle Türkiye'deki en büyük enerji tüketimine sahiptir. Marmara Bölgesi, aşağıda belirtilen kriterler nedeniyle hibrit sistemin daha uygun olabileceği düşünülmüştür. Bu özellikler aşağıda sıralanmıştır:

- Enerji ihtiyacının yüksek olduğu büyük sanayi kuruluşlarının yer aldığı İstanbul, Kocaeli, Bursa, Tekirdağ gibi şehirler bu bölgede yer almakta ve enerjiye zamanında ve kesintisiz olarak erişmeleri önem arz etmektedir.
- Rüzgar kapasitesinin yüksek olduğu alanlar bu bölgede yer almaktadır.
- Santralların soğutma suyunun sağlanabileceği deniz kıyısı mevcuttur.
- Hali hazırda üretim yapan santralların iletim hatları kullanılır.
- Sistemde elde edilen enerji geçişi kaynağı olan H_2 üretiminin kullanılabileceği endüstriyel tesisler yakın mesafede yer almaktadır. Üretilen H_2, kullanım alanlarına ulaştırılması için gerekli olan liman ve ana yollar mevcuttur.

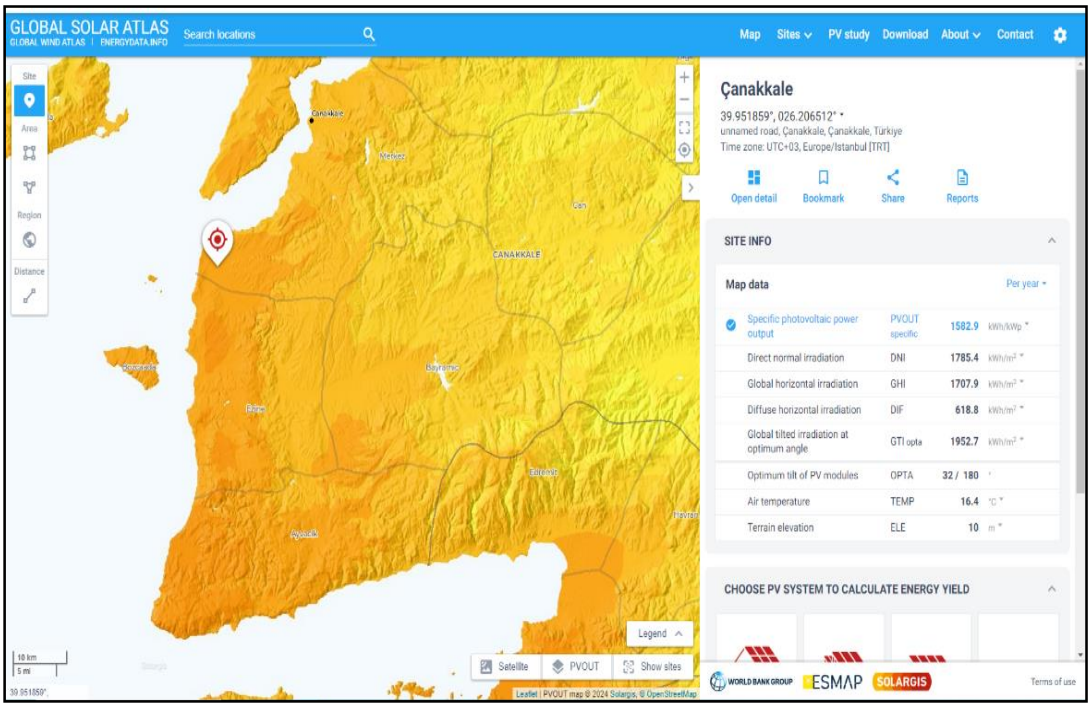
Analizlerde kullanılan program uygulamalarında, sahanın tam koordinatlarının bilinmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemlerinin tercih edilmesinde; güneşin bir cisme yön değiştirmeden ve dik olarak geldiği doğrudan ışınım (direct normal irradiation, kısaca DNI) değeri baz alınmaktadır. Açık bir gökyüzünde, bulutsuz bir havada güneşten yeryüzüne gelen ışınımların yaklaşık %80'i doğrudan ışınımdır. DNI değeri, 1800 Wh/m^2/yıl'dan (yaklaşık 5,5 kWh/m^2 /gün) büyükse, yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemleri ekonomik ve uygulanabilir olabilmektedir [148]. Bu nedenle, öncelikli olarak oluk tip kolektörün kullanımı için gerekli eşik dikkate alınarak Marmara Bölgesi'nde farklı noktaların DNI değerleri, güneş hesaplamalarında yaygın olarak kullanılan Global Solar Atlas verileri üzerinden incelenmiştir: Edirne, Çanakkale ve Bursa civarında, soğutma suyu ihtiyacı baz alınarak deniz kıyısında yer alabilecek sahalara bakıldığında DNI değerlerinin 1800 Wh/m^2/yıl altında olduğu tespit edilmiştir.

Edirne Enez civarı bir sahanın DNI değeri 1 630 Wh/m^2/yıl iken, Çanakkale Kumkale civarı bir sahanın DNI değeri 1 785 Wh/m^2/yıl ve Bursa Karacabey civarı bir sahanın DNI değeri 1499 Wh/m^2/yıl'dır. Bu noktalardan alınan ekran görüntüleri sırasıyla Resim 6.2, Resim 6.3 ve Resim 6.4'te görülmektedir [149].

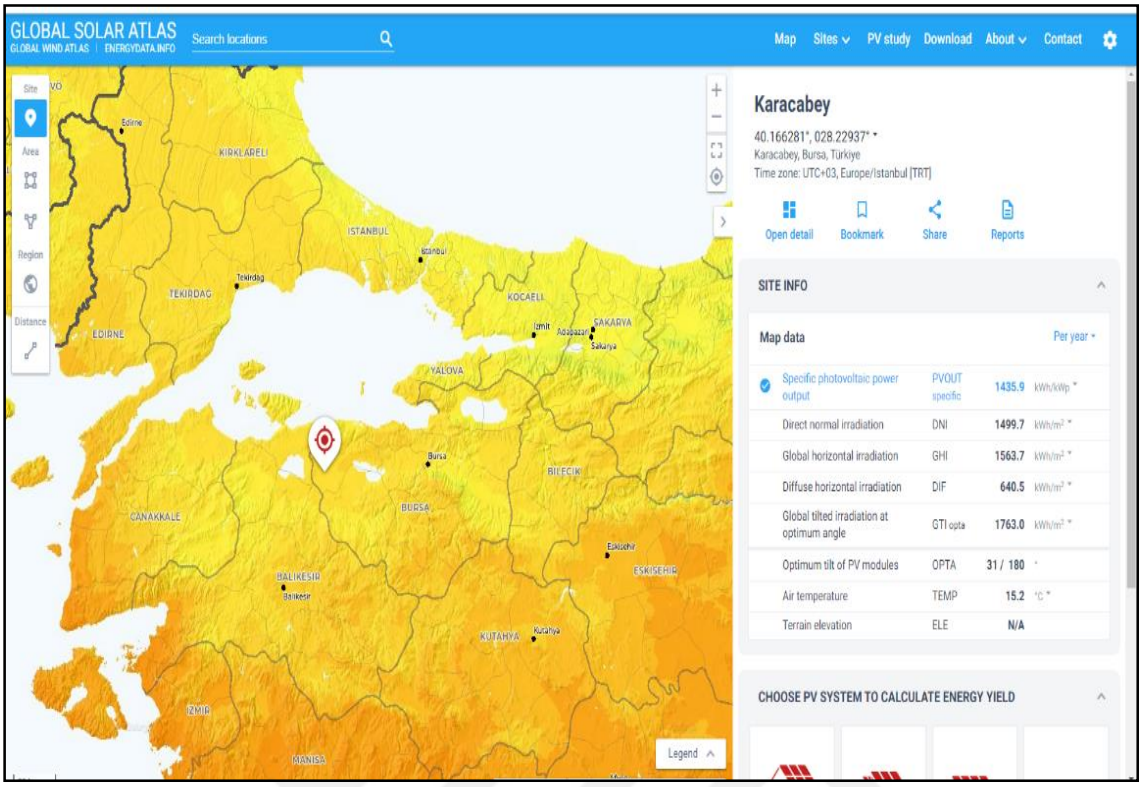


Resim 6.2. Enez civarı aday saha özellikleri [149]

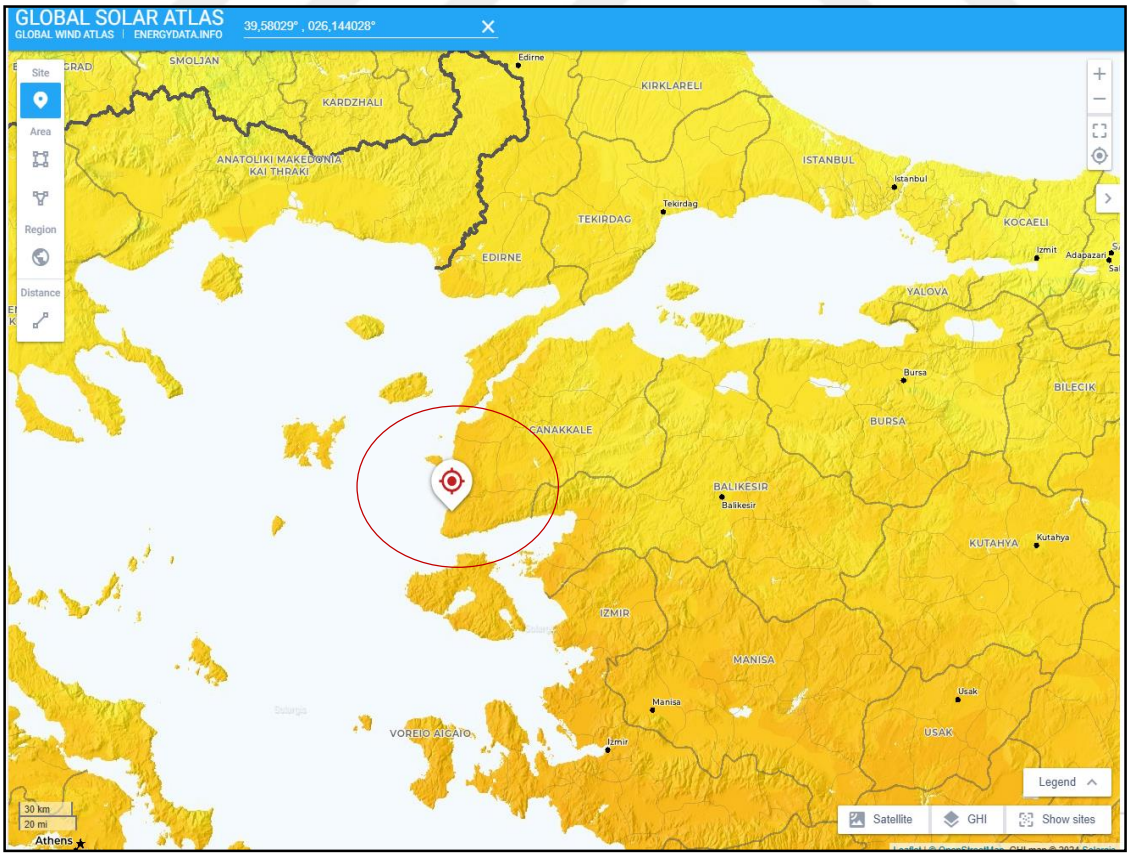
Marmara Bölgesi içinde yapılan inceleme sonucunda; Resim 6.5 ve Resim 6.6'de gösterildiği gibi Çanakkale, Ayvacık bölgesinde yer alan saha (enlem 39,58029° ve boylam 026,144022°), hibrit sistem analizleri için belirlenmiştir [149].



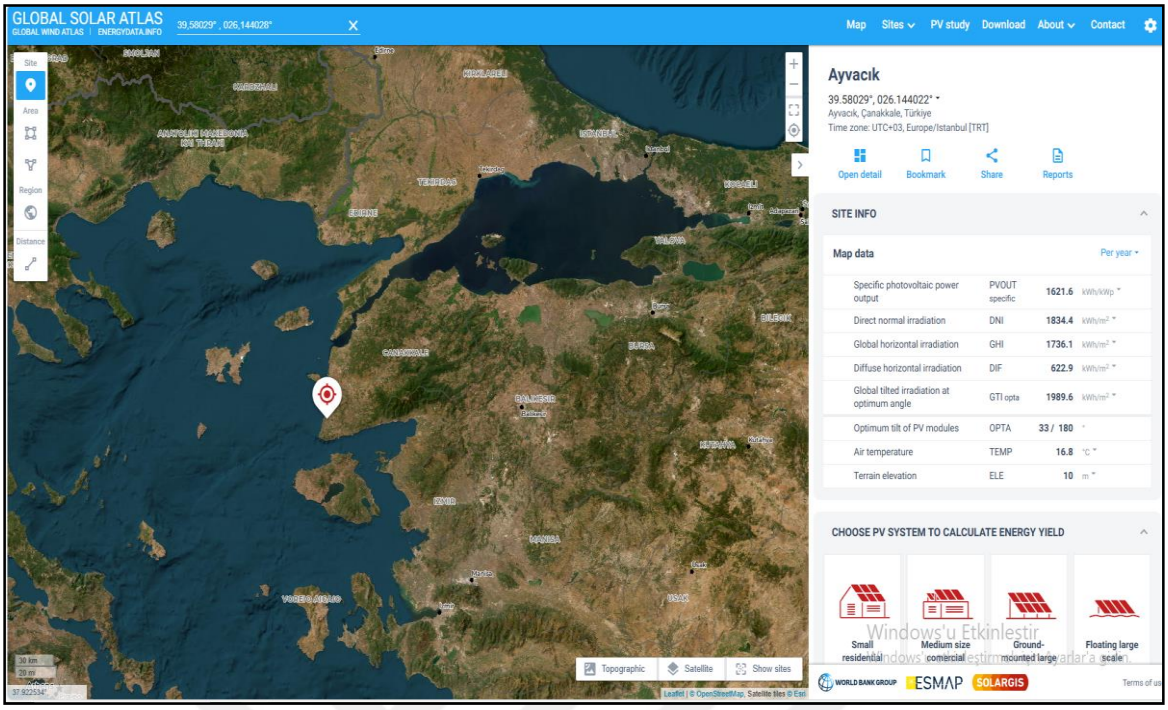
Resim 6.3. Çanakkale Kumkale civarı aday saha özellikleri [149]



Resim 6.4. Bursa Karacabey aday saha özellikleri [149]



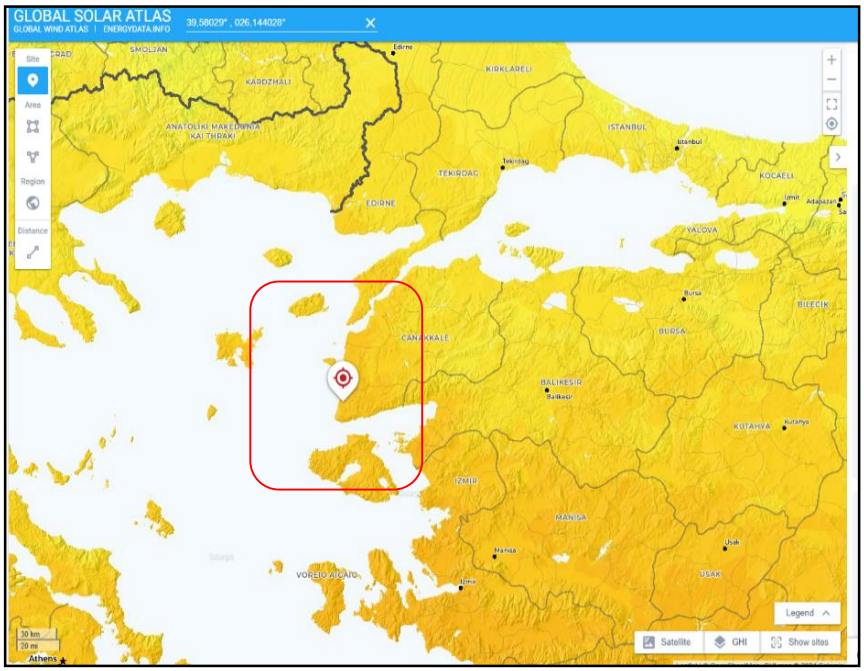
Resim 6.5. Önerilen NYHES sistemi için belirlenen saha Çanakkale Ayvacık [149]



Resim 6.6. Önerilen NYHES sistemi için belirlenen saha Çanakkale Ayvacık (uydu) [149]

Önerilen NYHES için saha özellikleri

Önerilen NYHES için Çanakkale-Ayvacık sahası belirlenmiş ve sahanın ekran görüntüsü, Resim 6.7'deve karakteristik özellikleri Çizelge 6.1'de verilmiştir.



Önerilen saha

Ayvacık Çanakkale Türkiye

39,58029°, 026,144022°

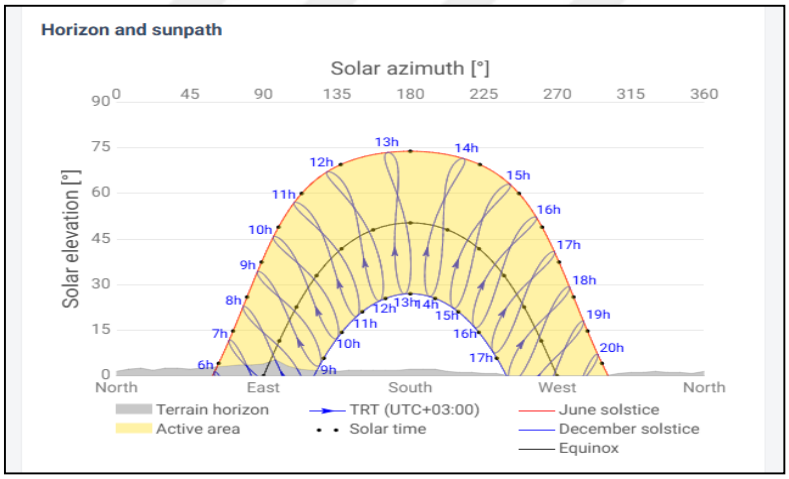
Zaman dilimi: UTC+03, Avrupa/İstanbul [TRT]

Resim 6.7. Önerilen NYHES için belirlenen Çanakkale Ayvacık saha ekran görüntüsü [150]

Çizelge 6.1. Global Solar Sistem'den elde edilen Çanakkale Ayvacık saha özellikleri [150]

SAHANIN GÜNEŞ ÖZELLİKLERİ		
PV Çıkışı (PVOUT)	kWh/kWp	1621,6
Doğrudan Normal Işınım (DNI)	kWh/m^2	1834,4
Küresel Yatay Işınım (GHI)	kWh/m^2	1736,1
Dağınık Yatay Işınım (DIF)	kWh/m^2	622,9
Optimum Açıda Küresel Eğimli Işınım (GTIopta)	kWh/m^2	1989,6
PV Modüllerinin Optimum Eğilimi		33/180
Hava Sıcaklığı (TEMP)	°C	16,8
Arazi Yüksekliği (ELE)	m	10

Belirlenen sahanın ufuk ve güneş yolu değerleri ile bulunduğu yerin güneş kapasitesi, Resim 6.8'de gösterilmektedir.

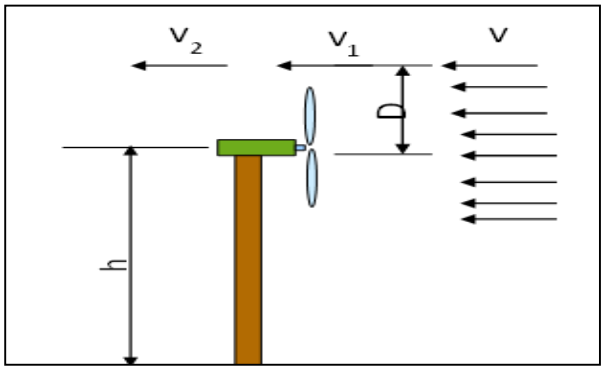


Resim 6.8. Çanakkale Ayvacık sahasının güneş azimut açı değeri (ekran görüntüsü) [150]

6.3.2. Rüzgar enerjisi yer seçimi

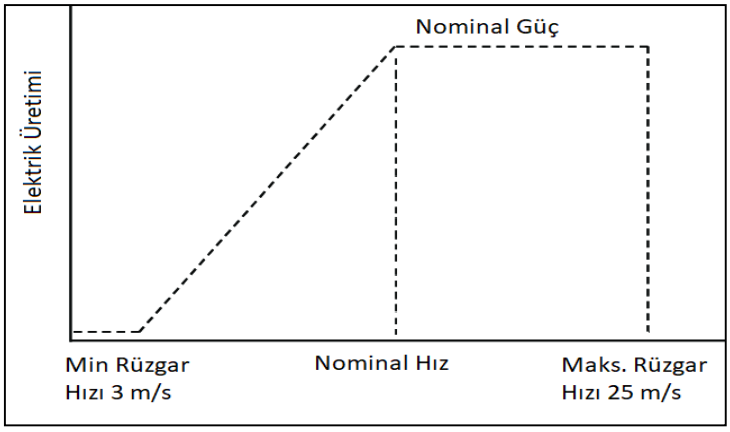
Marmara Bölgesi'ne hizmet etmesi planlanan önerilen NYHES sahası için Çanakkale Ayvacık civarında yer belirlendiğinden rüzgâr türbinlerinin de yakın bir yerde konuşlandırılması hibrit sistem için daha uygulanabilir olur. Bununla birlikte rüzgâr enerjisinin seçiminde de esas alınan kriterler mevcuttur. Rüzgâr enerjisi için en temel

özelliklerin başında, Şekil 6.3'te gösterildiği üzere kanatların dönüşünü ve dolayısıyla gücünü doğrudan ilk etkileyen rüzgar hızı gelmektedir [151-154].



Şekil 6.3. Rüzgar türbin kanatlarını etkileyen özellikler

Üretimin verimli ve ekonomik olabilmesi için rüzgar hızının, en az belli bir değer üzerinde olması beklenirken aynı zamanda türbin-kanat vb. ekipman ve çevre güvenliği için de en fazla belli bir değerde olması beklenir. Bu nedenle 50 m yükseklik için rüzgar hızının en az 7-8 m/s, yoğunluğun 500 W/m^2'ye eşit veya daha yüksek olması genel olarak kabul görmüştür [151]. Güvenlik açısından rüzgar hızının en fazla 25 m/s olmalıdır [151]. En az ve en fazla rüzgar hızı ile elde edilecek nominal güç, Şekil 6.4'de yer aldığı gibi rüzgar türbini güç eğrisi üzerinden (tasarıma bağlı olarak) belirlenir.

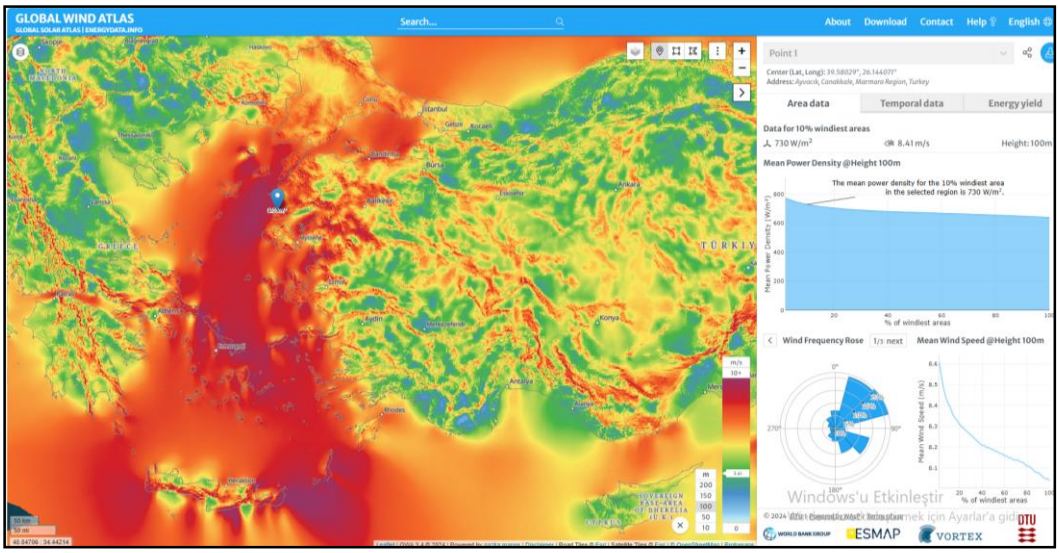


Şekil 6.4. Rüzgar türbini güç eğrisi (tasarıma bağlı olarak)

Kaynaklardan alınan bilgiler çerçevesinde; rüzgar hızı başta olmak üzere rüzgarın kinetik enerjisini belirleyen rüzgar yoğunluğu, arazinin yapısı ve eğimi, türbinin yerden yüksekliği, rüzgar yönü gibi doğrudan rüzgar gücünü belirleyen kriterlerin yanı sıra şebekeye yakınlık,

kablo uzunluğu, askeri bölge yakınlığı, havaalanı yakınlığı, deprem tehlikesi, kuş yolları, gürültü açısından meskenlere yakınlık vb. çevre kriterleri de saha seçimini belirleyen özellikler arasında yer almaktadır [151-154].

Önerilen NYHES için belirlenen Çanakkale Ayvacık civarındaki sahanın (enlem 39,58029° ve boylam 026,144022°) rüzgar değerleri, Global Wind Atlas üzerinden elde edilmiş ve Resim 6.9'da gösterilmektedir [155]. Rüzgar türbin yüksekliği 100 m ve yoğunluk 1052 W/m^2 ve rüzgar hızı 9,39 m/s olarak verilmektedir [155].



Resim 6.9. Çanakkale Ayvacık civarında seçilen saha için rüzgar değerleri [155]

6.3.3. SMR teknolojisi için yer seçimi

Türkiye'de nükleer tesislerin yapımı ve işletilmesine ilişkin faaliyetler, çeşitli kanun ve yönetmeliklerle ile yürütülmektedir ve uygulanmasında NDK, yetkilendirilmiştir. NDK, nükleer tesislerin kurulması ve işletilmesine kadar olan süreçte, üç farklı yetkilendirme uygulamaktadır: Yer lisansı, inşaat lisansı ve işletme lisansı[8] [156].

[8] Yer Lisansı: Sahanın nükleer tesis kurulmasına uygun olup olmadığının değerlendirilmesi ve kurulması öngörülen tesisin tasarımında kullanılması gereken saha özelliklerinin belirlenmesi ve onaylanması süreçlerini içeren bir tür yetki belgesidir.

İnşaat Lisansı: Tesisin güvenli bir tasarıma sahip olup olmadığı ve güvenli bir şekilde kurulup işletilebilirliğinin değerlendirilmesi soncu yapım faaliyetlerine başlanacağını gösteren yetki belgesidir.

İşletme Lisansı: Tesisin kurulmuş olduğu hali ile güvenli işletmeye uygun olduğu çeşitli testlerle değerlendirilmektedir. Tesisin sıcak ve soğuk testlerine başlamak için Hizmete Sokma İzni, nükleer yakıtın

Yer lisansı verilmesi için hazırlanan kılavuzda belirtildiği gibi [157]; nüfus dağlımı, acil durum planlaması, sahanın 20 km içinde yer alan nüfusu, arazinin yapısı ve bağlantı yolları, 10 km alan içindeki konuma ve rotalar, saha yakınında yer alan kimyasal tesisler, boru hatları, depolar, vb. tesislerin belirtilmesi, yakın civarda yer alan liman veya taşımacılık için kullanılan suyolları, havaalanı, sahanın yer aldığı bölgenin iklimi, yerel meteorolojik şartları, olası büyük meteorolojik olaylar, kısa ve uzun dönem atmosferik dağlım analizi, bölgenin hidrosfer yapısı, yer altı sularına radyoaktif maddelerin dağılımı, su kaynaklarının yeterliliği, taşkın olasılıkları, bölgenin jeofizik yapısı, sismolojik yapısı, ekolojinin etkileri, insan kaynaklı dış olaylar, deprem ve hortum gibi doğal dış olaylar, jeoteknik olaylar, santralın radyolojik etkileri, işletme koşulları, acil durum planlaması, tasarıma esas ilgili tüm detayları içeren bir raporun hazırlanması gerekmektedir. Onaylanan rapor ile verilen yer lisansı, bu saha nükleer tesisi yapımı için uygundur anlamına gelir ve inşaatın başlayabilmesi için ikinci aşama olan inşaat lisansına başvurulur. Ülkemizde halen yapımı devam eden Akkuyu Nükleer Santralı için gerekli olan tüm mevzuat bu çerçevede NDK tarafından hazırlanmış ve uygulanmaktadır.

NDK, bir nükleer tesisin yapım ve işletilmesi için gerekli olan üç lisansın alınmasında büyük ölçekli veya küçük modüler santral olarak bir ayrım yapmamış, genel olarak "nükleer tesis" ifadesini kullanmıştır. Hali hazırda uygulanan tüm yönetmelik ve ilgili kılavuzlar, ilk olarak, bir ünitesi 1200 MW kapasiteli olan ve büyük ölçekli santral kapsamında yer alan Akkuyu Nükleer Santralı için uygulanmıştır. SMR teknolojisi, anıldığı gibi küçük olsa da kapasitesi 300 MW'a kadar olan bir nükleer tesistir. Bu nedenle yeni bir uygulamam veya kanun yayınlanıncaya kadar SMR teknolojileri için, halen yürüklükte olan mevzuat geçerlidir. Sahanın uygunluk aldığı yer lisansı belgesi için mevcut mevzuat uygulanır.

SMR teknolojilerinin saha seçimine yönelik, nükleer tesisler konusunda önemli bir deneyime sahip ülkelerde yer alan kurum-kuruluşlar tarafından farklı raporlar hazırlanmıştır. IAEA, saha araştırmaları ve seçimi konusunda bir kılavuz yayınlayarak bu konuya dikkat çekmiş hangi noktalarda detaylı bir araştırma yapılması gerektiğini vurgulamıştır [158].
ABD'de, 1972 yılında kurulan Elektrik Enerjisi Araştırma Enstitüsü (Electric Power

tesise getirilmesi için Yakıt Getirme İzni ve yakıtın yüklenmesi ve işletme testlerine başlanabilmesi için Yakıt Yükleme ve Deneme İşletmelerine Başlama İzni alınması gerekmektedir. Tüm bu test ve denemelerin olumlu sonuçlarla tamamlanması durumunda tesise İşletme Lisansı verilmektedir.

Research Institute, kısaca EPRI) tarafından hazırlanan raporda [159], SMR teknolojisinin de dahil edildiği gelişmiş nükleer teknoloji için saha seçimi ve değerlendirme kriteri raporunda; soğutma suyu temini, tehlikeli alanlara yakınlık, şiddetli veya sıra dışı hava şartları, nüfus, acil durum planlaması, inşaat ve işletme dönemi için sosyoekonomik etkiler, çevresel etkiler, su temini, pompa mesafesi, ulaşım, sahanın kamulaştırılmış olması gibi öncelikli kriterlere göre saha seçiminin yapılmasını belirtmektedir. Yapılan bir çalışmada ise, SMR için saha seçiminde; nüfus yoğunluğu, maliyet, soğutma suyu maliyeti, sismik yapı, tüketiciye erişim kolaylığı gibi maddeleri temel almıştır [160].

Ülkemizde ilk defa bir nükleer santral yapılmakta fakat SMR ile ilgili henüz bir çalışma söz konusu değildir. Bu nedenle büyük ölçekli nükleer santralların yapımında uygulanan mevzuat çerçevesinde benzer kriterlerin etkin olacağı düşünülmektedir. Nükleer alanda olumsuz bir durumla karşılaşmamak için güvenlik kriteri her alanda etkin bir şekilde dikkate alınır. Bu nedenle SMR yapım sürecinde de büyük nükleer santrallarda olduğu gibi sahanın erişim ve terk etme kolaylığı, nüfus, su kaynaklarına yakınlık, ülke şebekesine yakınlık, dış hava olayları, meteorolojik koşullar, deprem ve heyelan gibi saha zeminin yapısı, kültürel varlıklara sahip olup olmaması gibi özellikler saha seçiminde dikkate alınmalıdır.

Marmara Bölgesi, Çanakkale Ayvacık civarında belirlenen yer seçimi, soğutma suyu temini, nüfus bakımından yoğunluk, şebekeye yakınlık vb. kriterleri için uygun görülmektedir ancak deprem değeri, kara ve denizde yapılması gereken detaylı analizler, atmosferik dağılım, çevre ve ekolojik açıdan uygunluk vb. kriterler için seçilen saha genel olarak uygundur kabulü ile çalışma yürütülmüştür.

6.4. SMR İçin Önerilen HTR-PM Özellikleri

Tez çalışmasında, önerilen sistem için HTR-PM merkezli bir tasarım oluşturulmuştur. IAEA tarafından hazırlanan rapora [146] bağlı kalarak Şekil 6.1'de gösterildiği gibi oluşturulan ve numaralandırılan HTR-PM sistemine ait yüksek ve alçak basınç türbin (YBT, ABT), yoğuşturucu, yoğuşturma pompası, ısı değiştiricileri (ID), su-buhar ayrımının yapıldığı degazör, besleme suyu pompası olarak adlandırılan ana sistem pompası, reaktör koru ile aynı gövdede yer alan buhar üreteci (BÜ) ana ekipman analizi için gerekli olan sıcaklık, basınç ve debi gibi temel termodinamik veriler, IAEA raporundan [146] ve konuyla ilgili makalelerden elde edilerek Çizelge 6.2'de gösterildi.

Çizelge 6.2. HTR-PM reaktör temel özellikleri [146]

Tasarım kapasitesi (termal/elektrik)	2x250 MWt / 211 MWe
Birincil soğutma akışkanı	Helyum
Birincil soğutma akış miktarı ı	96 kg/s
Nominal buhar giriş basıncı	13,25 MPa
Nominal buhar giriş sıcaklığı	566 °C
Buhar akışı	671 t/h
Nominal deşarj basıncı (Yoğuşturucu)	4,5 kPa
Soğutma suyu miktarı	27711,4 t/h
Reaktör koru soğutma giriş/çıkış sıcaklığı	250 °C / 750 °C
Reaktör işletme basıncı	7,0 MPa
Buhar üreteci giriş/çıkış sıcaklığı	205 / 567 °C [161]
Nominal soğutma suyu giriş sıcaklığı	16 °C
Maksimum soğutma suyu sıcaklığı	33 °C
Termodinamik çevrim	Rankin

6.5. Metodoloji

Mevcut HTR-PM sistemi analiz edilerek Termodinamik I. ve II. Kanun çerçevesinde hem kütle-enerji dengesi hem de ekserji analizi yapılır. Önerilen NYHES için öncelikle simülasyonu gerçekleştirilir ve ardından benzer termodinamik analizler yapılır. Önerilen sistemin nerde nasıl bir davranış sergilediği belirlenmiş olur. Simülasyon ve enerji-ekserji analizlerinde farklı yardımcı programlarından yararlanılmıştır. Termodinamik analizlerde, Mühendislik Eşitlik Çözücü (Engineering Equation Solver, kısaca EES) uygulamasından yararlanılmıştır. Detaylı açıklama aşağıda verilmiştir. Oluk kolektörün simülasyon ve analizinde, ABD DOE'ye bağlı olarak çalışan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (National Renewable Energy Laboratory-NREL) tarafından geliştirilen System Advisor Model kısaca SAM olarak adlandırılan uygulama kullanılmıştır. SAM, yenilenebilir enerji sektöründe, karar vericilere yardımcı olmak için tasarlanmış bir performans ve finansal modelidir. SAM uygulamasında, önerilen sistem için yer seçimi, türbin tasarım brüt çıkış değeri, ısı aktarım akışkanı (HTF), kolektör ve alıcı tüp (ısı emici boru) seçiminin yapılması gereklidir. SAM, proses ısısı sağlarken ihtiyaç duyulan ısı miktarı MWe değeri olarak belirtmek gerekmektedir. Bu uygulamaların yanı sıra çevrimiçi çalışan bazı temel hesaplamaları yapan uygulamalar da kullanılmıştır.

Analiz ve hesaplamalarda santral sistemlerinde kontrol hacimlerinin adyabatik proses olduğu, ısı değiştiricilerinde faz değişimi olmadığı, kinetik ve potansiyel enerjinin ihmal edilebilir olduğu kabul edilmiştir. Türbin ve nükleer bölüm haricindeki geriye kalan sistemler "tesis dengesi" olarak adlandırılmış (BOP veya yardımcı sistem) ve bu alanlarda kullanılan buhar değerleri hesaplamalarda göz ardı edilmiştir. Bu analizleri gerçekleştirmek üzere aşağıda belirtilen yol ve yöntem izlenmiştir:

Tasarıma esas alınan HTR-PM'in mevcut su buhar çevrimi, Termodinamik yasalar yönünden analiz edilerek kütle, enerji ve ekserji dengesi EES kullanılarak sağlandı ve sistem verimi belirlendi. Mevcut sistem verilerine göre, önerilen NYHES'nin oluk kolektör yapısı SAM ile simüle edildi. Simülasyonun ardından, önerilen sistemin Termodinamik I. ve II. Yasaları açısından kütle, enerji ve ekserji denge analizi EES ile gerçekleştirildi ve sistem verimi belirlendi. Önerilen NYHES için iç enerji ihtiyacına yönelik rüzgar enerjisi tasarlandı ve kapasitesi belirlendi. Rüzgar enerjisinden elde edilen fazla elektrik enerjisi, hidrojen üretimi için değerlendirildi.

Ekserji hesaplamalarında, çevre sıcaklığı (T_0) 25 °C (298 K) ve çevre basıncı (P_0) 1 atm (1,01 bar) olacak şekilde kabul yapıldı. Çevre sıcaklığı ve basınç değerine göre, entalpi (h_0) ile entropi (s_0) değeri EES ile belirlendi.

Önerilen NYHES analizi, belirtilen adımlarla gerçekleştirildi:

1- Önerilen sisteme esas alınan SMR teknolojilerinden HTR-PM'in mevcut su buhar çevrimi, Termodinamik I. ve II. Yasaları açısından analiz edildi. Kütle, enerji ve ekserji denge analizi EES ile simüle edildi.

2- Önerilen NYHESnin oluk kolektör yapısı SAM ile simüle edildi

3- Önerilen NYHES, Termodinamik I. ve II. Yasaları açısından analiz edildi. Kütle, enerji ve ekserji denge analizi gerçekleştirilirken EES ile simüle edildi.

4- Önerilen NYHES için iç enerji ihtiyacına yönelik rüzgar enerjisi tasarlandı ve kapasitesi belirlendi.

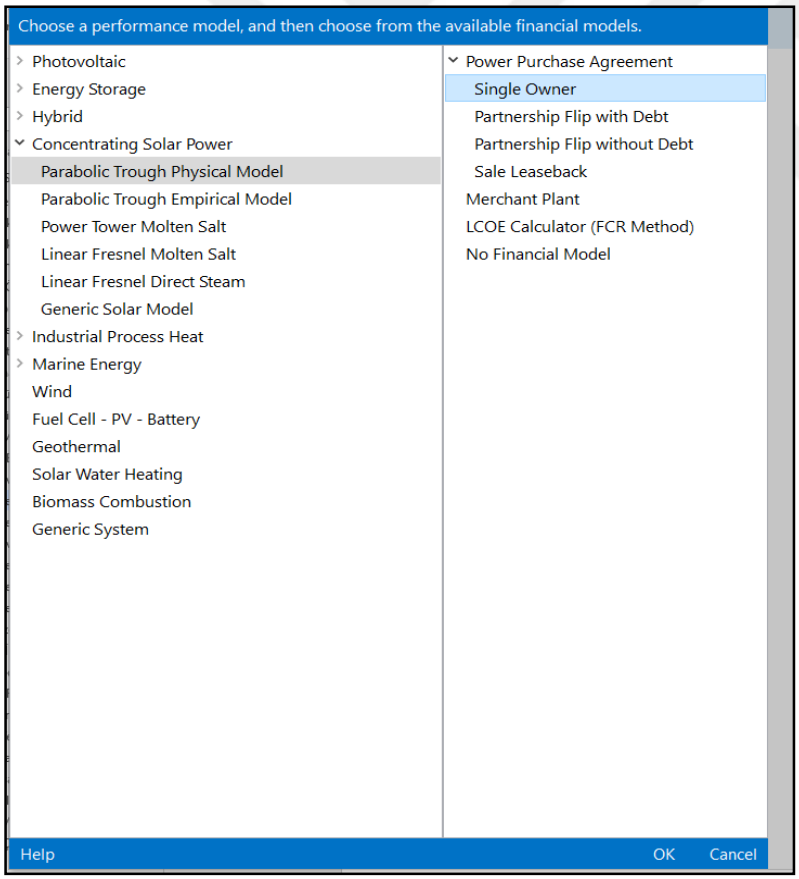
5- Termik santrallarda iç enerji tüketimi tasarıma bağlı olarak %5-10 arasında değişim gösterdiği bilinmektedir. Bu nedenle önerilen NYHES iç enerji tüketimimin %8 olduğu kabulü yapıldı.

6- Mevcut sistem ve önerilen sistemin verimlilikleri karşılaştırıldı.

7- Rüzgar enerjisinden elde edilen fazla elektrik enerjisi ile hidrojen üretildi.

6.5.1. SAM uygulaması

Güneş enerjisi için sistem simülasyonu, SAM vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. SAM için öncelikle belirlenen sahanın istenen özelliklerinin tanımlanması ve ilgili yerlere girdi olarak yazılması gerekmektedir. SAM uygulamasına giriş yapıldığında, önce hangi tür güneş enerji sisteminin kullanılacağı belirlenir. PV, depolama, rüzgar, yakıt hücresi, vb. arasından tez çalışması için yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemi seçilir. Yoğunlaştırılmış güneş enerji sistem uygulamalarından oluk kolektör-fiziksel (parabolic trough-physical) seçilir. Uygulama bu aşamada, ekonomik değerlendirmesi amacıyla yine bir seçim yapılmasını ister. Bu uygulamanın elektrik satın alma anlaşması yoluyla tek kullanıcı için olduğu kabul edilerek seçim yapılmıştır. Bu seçimlere ait SAM ekran görüntüsü Resim 6.10'da gösterilmektedir.



Resim 6.10. Önerilen NYHES sistemi için SAM uygulaması ekran görüntüsü

Temel seçimler sonrası, uygulamanın çalışma aşamasında, yürütülen projeye özgü teknik seçimlerin ve karakteristik özelliklerin verilmesi gerekmektedir.

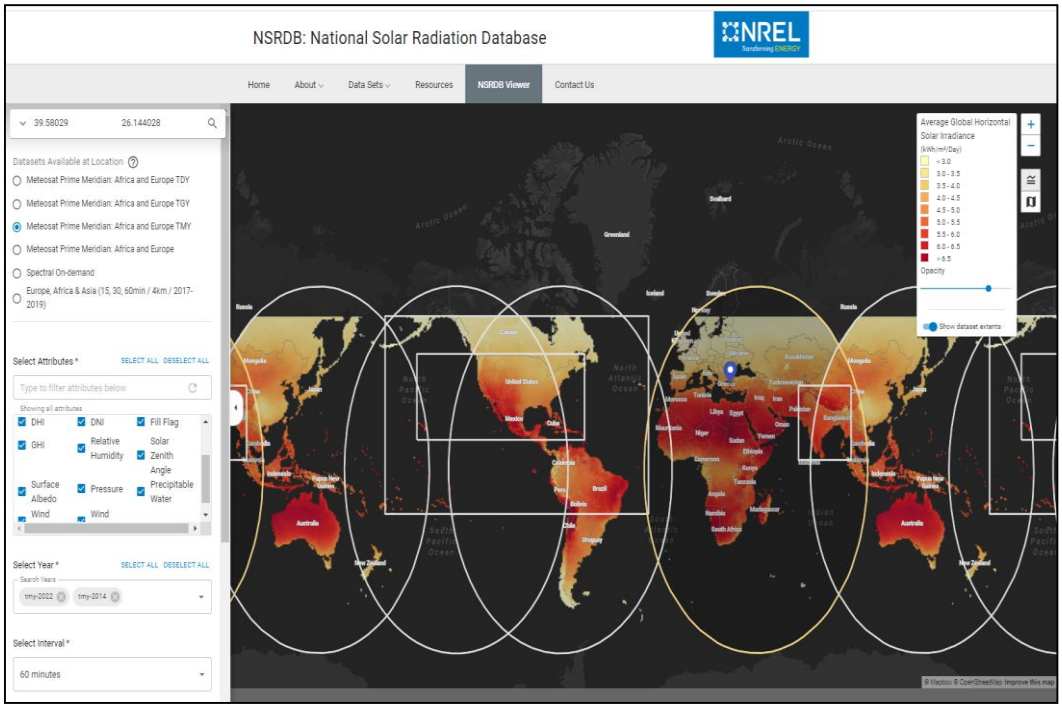
SAM uygulamasında oluk kolektör güneş enerji sistemi için;

- yer ve kaynak,
- sistem tasarımı,
- güneş alanı (kolektör alanı),
- kolektör,
- alıcı tüpler,
- güç çevrimi,
- termal depolama,
- sistem kontrol,
- şebeke sınırları

bölümleri için ya seçim yapılır ya da gerekli bilgiler girilir.

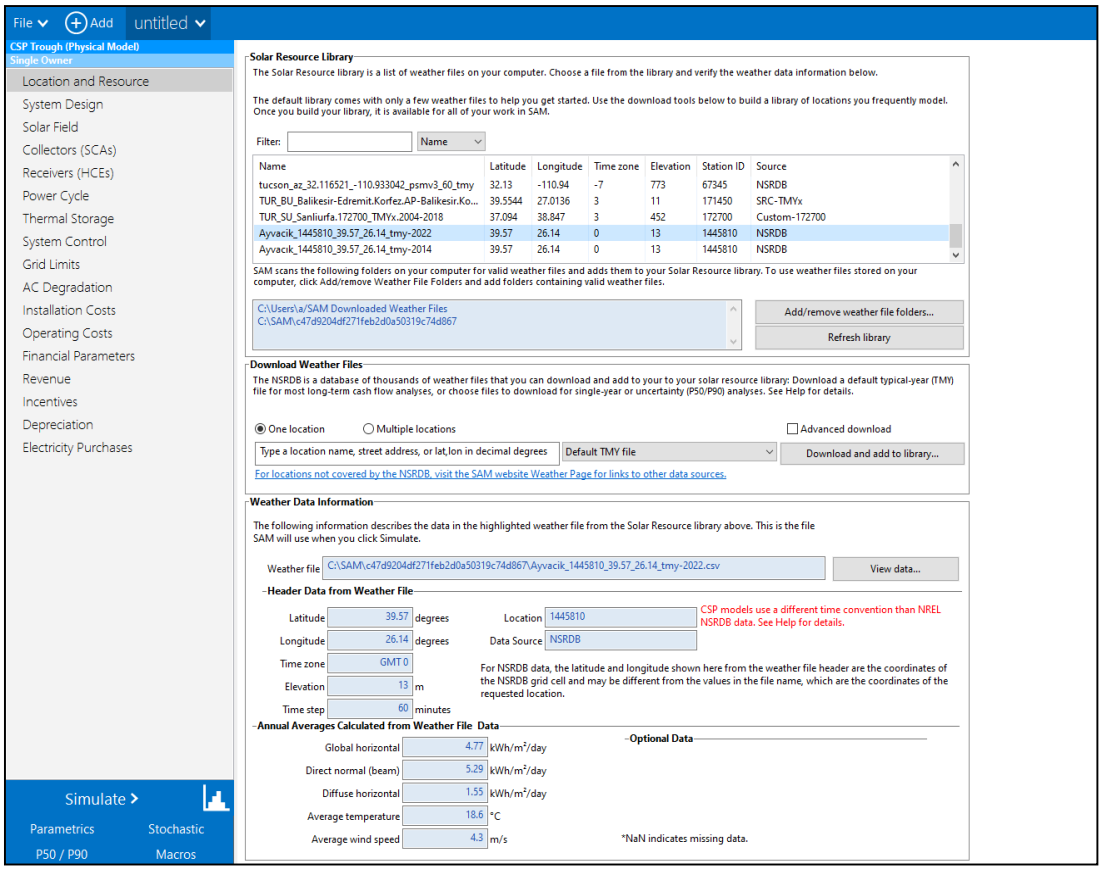
SAM: Yer ve kaynak

İlk veri alanı olan “yer ve kaynak (location and resource)” bölümünde, önerilen NYHESnin yer aldığı Çanakkale-Ayvacık sahasının hava durumu verileri, SAM uygulamasını geliştiren NREL tarafından hazırlanan güneş radyasyon veri tabanı sayfasından [162] elde edilerek SAM içine yüklenir.



Resim 6.11. NREL tarafından sunulan güneş radyasyon veri tabının ekran görüntüsü [162]

NREL güneş radyasyon veri tabanı sayfası; güneş ışınımının en yaygın kullanılan üç ölçümünden; küresel yatay, doğrudan normal ve dağınık yatay ışınım ile diğer meteorolojik verilerden oluşan yüksek zamansal ve uzaysal çözünürlüklü bir veri kümesinden oluşmaktadır ve sayfa ekran görüntüsü Resim 6.11'de gösterilmektedir.



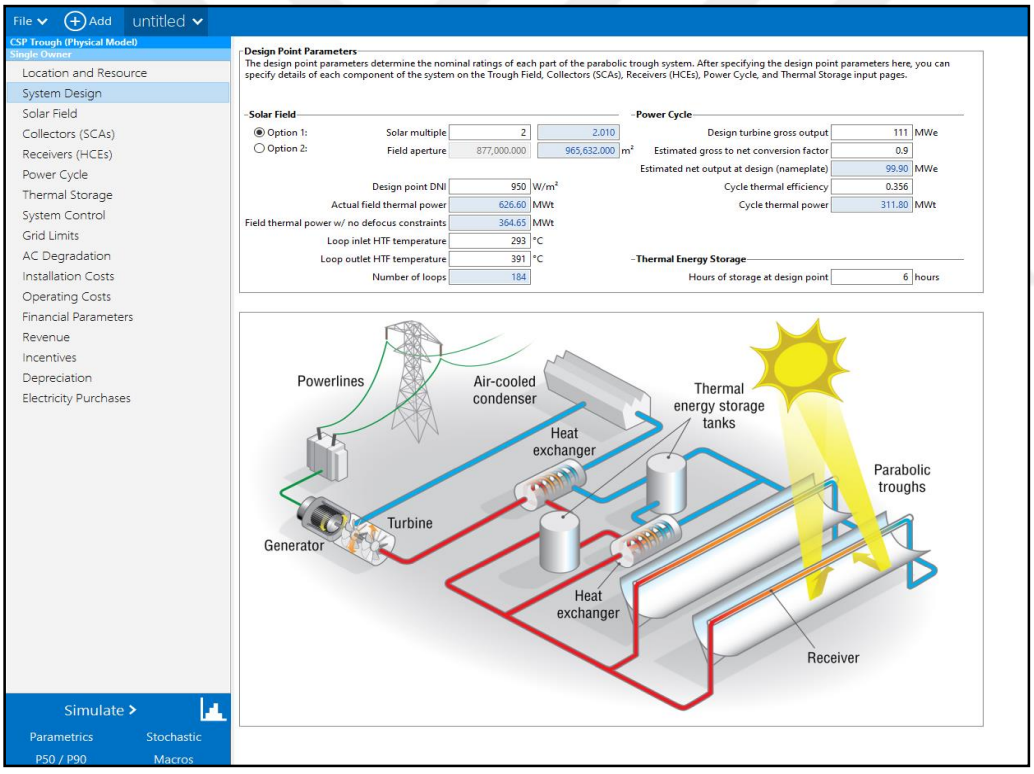
Resim 6.12. SAM uygulaması "yer ve kaynak" veri sayfası ekran görüntüsü

Seçilen Çanakkale-Ayvacık Bölgesinin güneş verileri yüklendikten sonra, SAM, bölgenin küresel yatay, DNI, dağınık yatay, ortalama sıcaklık ve ortalama rüzgar hız değerlerini Resim 6.12'te görüldüğü gibi belirler. Ayvacık 2022 verileri doğrultusunda, sahanın DNI değeri 5,29 kWh/m^2/gün olarak görülmektedir.

SAM: Sistem tasarımı

Uygulamadaki ikinci aşama, Resim 6.13'te ekran görüntüsünün yer aldığı, "sistem tasarım" veri alanıdır. Bu bölümde, ilk olarak iki seçenek bulunmaktadır. Birinci seçenekte güneş çarpanı baz alınırken, ikinci bölümde belirlenen sahanın toplam alan değeri girilmektedir.

Önerilen NYHES sistemi için belli bir alan tanımlanmadığından seçim birinci seçenek olan güneş çarpanı ile devam edilmiştir. Bu bölümde belirlenecek bir diğer veri ise, türbin tasarım çıkış değeridir. Güneş oluk kolektörden ne kadarlık bir ısıya ihtiyaç duyuluyorsa, bu değer, MWe olarak "türbin tasarım çıkış" alanına girilir. Bu değerin belirlenmesinde; mevcut HTR- PM sisteminde degazör öncesinde kullanılan üç adet ID için gerekli olan ısı değeri birinci kolektör grubu için; HTR-PM sisteminde degazör sonrasında yer alan bir adet ID için gerekli olan ısı yükü ise ikinci kolektör grubu için temel alınmıştır. Isı değiştiricileri için gerekli ısı yükü HTR-PM kütle-enerji dengesi ile belirlenmiştir. Isı değiştiricileri için belirlenen değerin birimi MWt olduğundan bu değer MWe'ye dönüştürülür. Dönüşümde, yaygın olarak uygulanan 3 MWt değerinin yaklaşık 1 MWe değerine denk olduğu kabul edilmiştir [163].

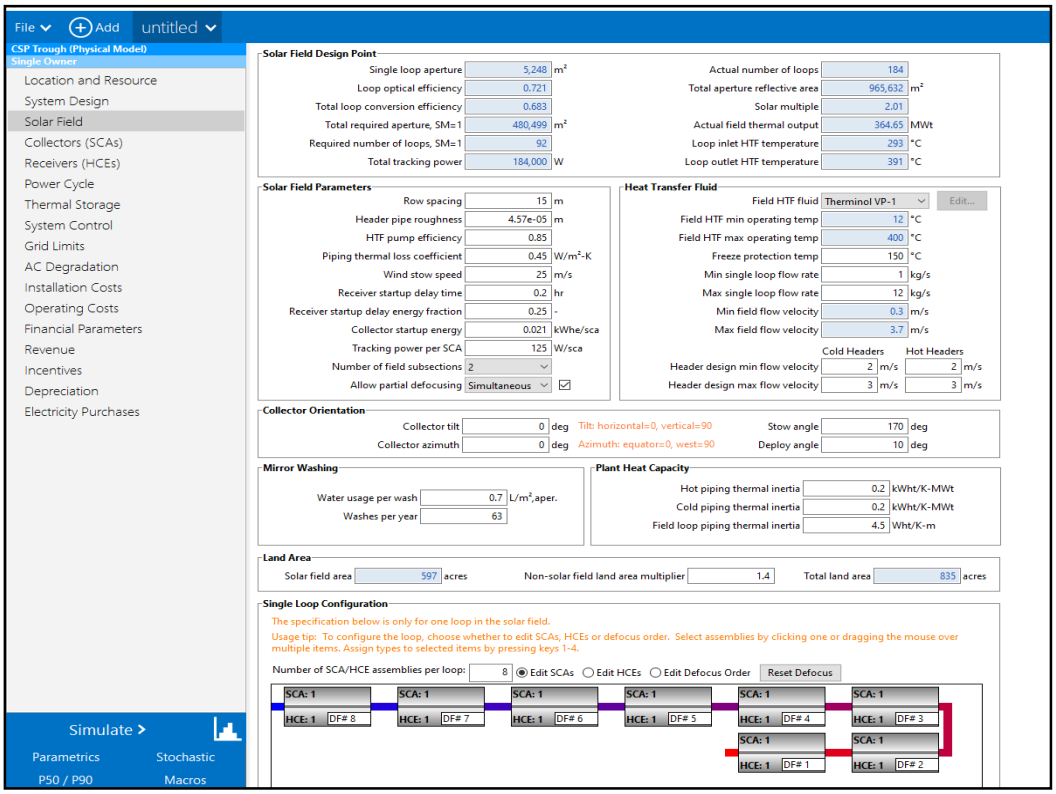


Resim 6.13. SAM uygulaması "sistem tasarım" veri sayfası ekran görüntüsü

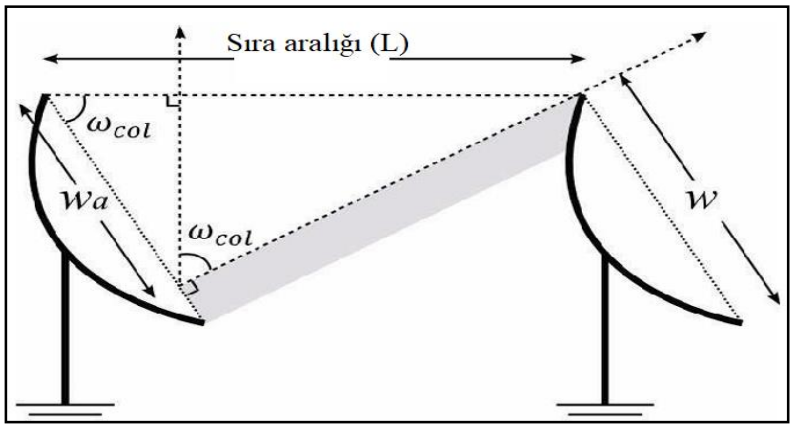
Sistem tasarım aşamasında yer alan bir diğer veri ise kolektörlerin her bir döngüsünün (loop) giriş-çıkış sıcaklık değerleridir. Bu değerin girilmesi için öncelikle HTF'nin belirlenmesi gerekmektedir. HTF, güneş alan bölümünde belirlenmiştir. Bu bölümde yer alan bir diğer veri ise termal depolamanın kaç saat olacağıdır. Bu değer ortalama bir değer alınarak 6 saat olarak kabul edilmiştir.

SAM: Kolektör alanı

SAM uygulaması, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi oluk kolektör hesaplamasındaki üçüncü aşama, Resim 6.14'te ekran görüntüsün yer aldığı, "güneş alanı (kolektör alanı)" kısmıdır. Oluk kolektörlerin yer aldığı alan olarak tanımlanan bu kısımda, iki alıcı tüp arası (sıra aralığı), 15 m olacak şekilde, temsili olarak Resim 6.15'te görüldüğü gibi düzenlenmiştir.



Resim 6.14. SAM uygulaması "güneş alanı" veri sayfası ekran görüntüsü



Resim 6.15. Güneş alanında (kolektör alanı) her bir döngü için yerleşim planı. Kolektör açıklığı (w), sıra aralığı (L) ve güneş takip açısı görünümü [164]

Güneş enerji sisteminin genel performansını olumlu yönde etkilemesi için belirlenen bu mesafe, gölgelemeyi önlemek, alıcı tüplerin verimliliğini artırmak, bakım sürecinde daha kolay erişim sağlamak amacıyla uygulanmaktadır. Kolektörlerin yerleşim planında her döngüde 8 adet oluk kolektör yer almaktadır ve Resim 6.14'te bu yapılanma görülmektedir.

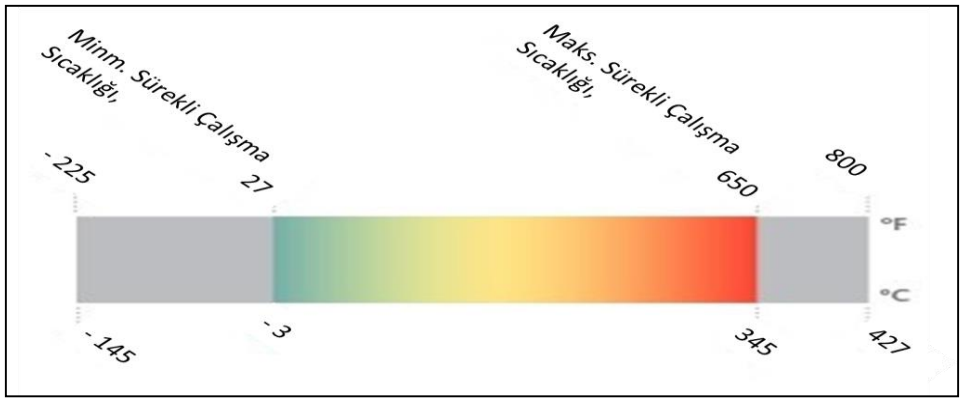
SAM uygulamasının bu bölümünde ayrıca HTF seçimi de yapılır. Birçok farklı kimyasal içerikli ısı aktarım sıvılarının yer aldığı listede HTF için, Terminol-66 akışkan seçimi yapılmıştır. Bu seçimdeki etkenlerden biri, sabit yüksek sıcaklıktaki sağlayan çalışma aralığında olmasıdır.

ABD'de tesis edilmiş oluk kolektör uygulamasına ait fotoğraf, Resim 6.16'da verilmiştir.



Resim 6.16. Güneş alanının (kolektör alanı) yerleşimi [165]

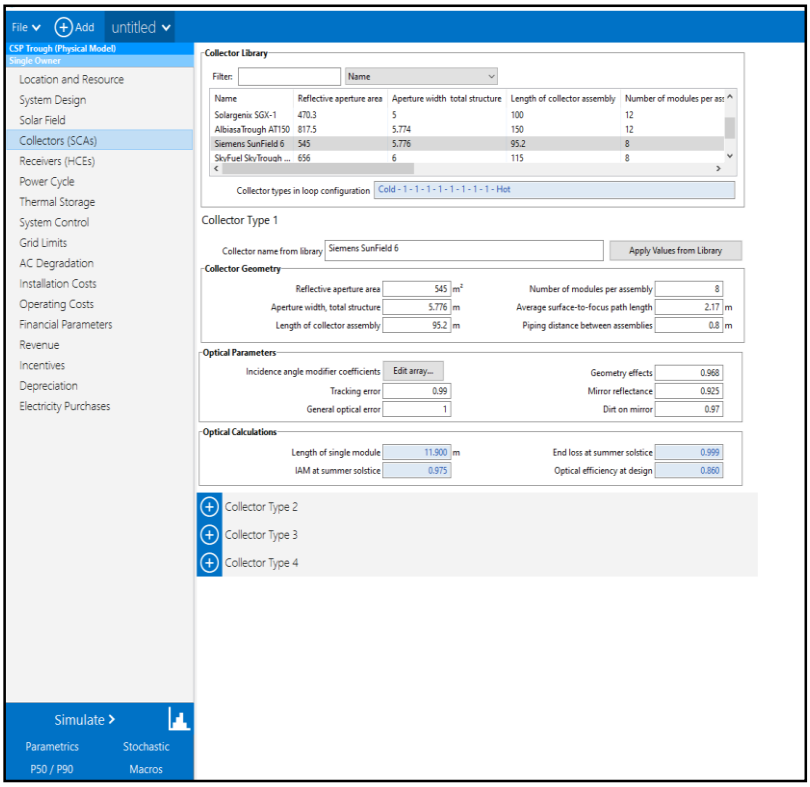
Terminol-66, Resim 6.17'de görüldüğü üzere asgari -3°C ve azami 345 °C sıcaklık aralığında çalışmaktadır [166]. Terminol-66, dünyada yaygın olarak kullanılan düşük basınçta pompalanabilen yüksek sıcaklık sıvı faz ısı aktarım sıvısıdır. Ayrıca yüksek sıcaklıkta termal kararlılık gösteren bir yapıya sahiptir. SAM, Terminol-66 sıvısı için asgari ve azami tek bir döngüden akış oranını 1-12 kg/s olarak vermiştir.



Resim 6.17.Terminol-66 ısı aktarım sıvısı asgari ve azami çalışma sıcaklık değeri [166]

SAM: Oluk kolektörler

SAM uygulamasında yer alan dördüncü aşama, Resim 6.18'da ekran görüntüsün yer aldığı, "kolektör" veri alanıdır. Kolektör için SAM listesinde yer alan 5,776 m açıklık genişliğine ve 95,2 m uzunluğa sahip Siemens SunField 6 seçilmiştir. Kolektörler, güneş hareket yönüne göre ayarlanmış olup güneş izleme sistemi mevcuttur. ABD'de tesis edilmiş oluk kolektör uygulamasına ait fotoğraf, Resim 6.19'de verilmiştir.

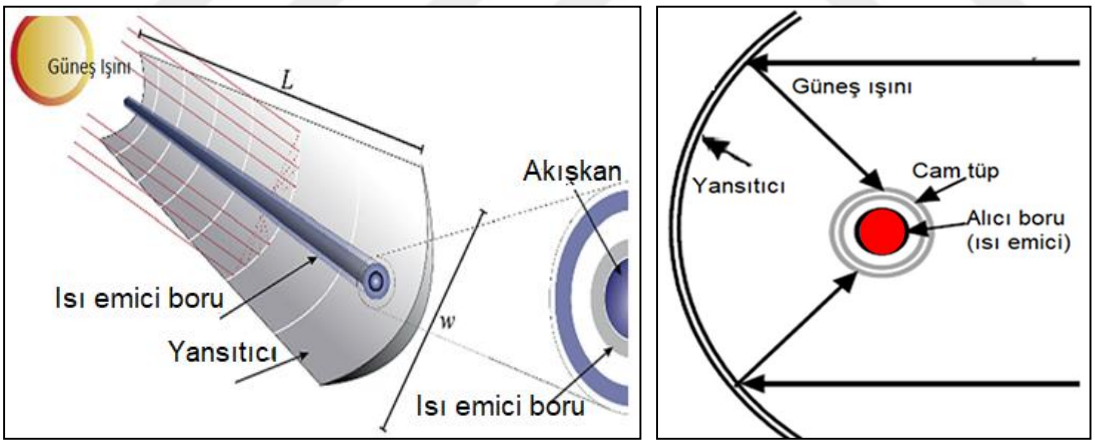


Resim 6.18. SAM uygulaması "kolektör" veri sayfası ekran görüntüsü



Resim 6.19. ABD'de tesis edilmiş oluk kolektör uygulaması [165]

Oluk kolektör sisteminde, güneş ışınları, yansıtıcı görevi yapan aynalara çarpar ve aynanın oluk şeklindeki yapısı nedeniyle bütün ışınlar, oluk yansıtıcının tam orta merkezinde yer alan alıcı tüplere gelir. Böylece güneş ışınları, tüp içindeki akışkana yansır ve akışkan ısınır. Yansıtıcı aynalar, güneşi takip eden bir mekanizmaya sahip olduğundan güneş doğup batıncaya kadar güneş ışınları yansıtıcılara gelmeye devam eder. Oluk kolektör sisteminin genel yapısı Resim 6.20'de gösterilmektedir.

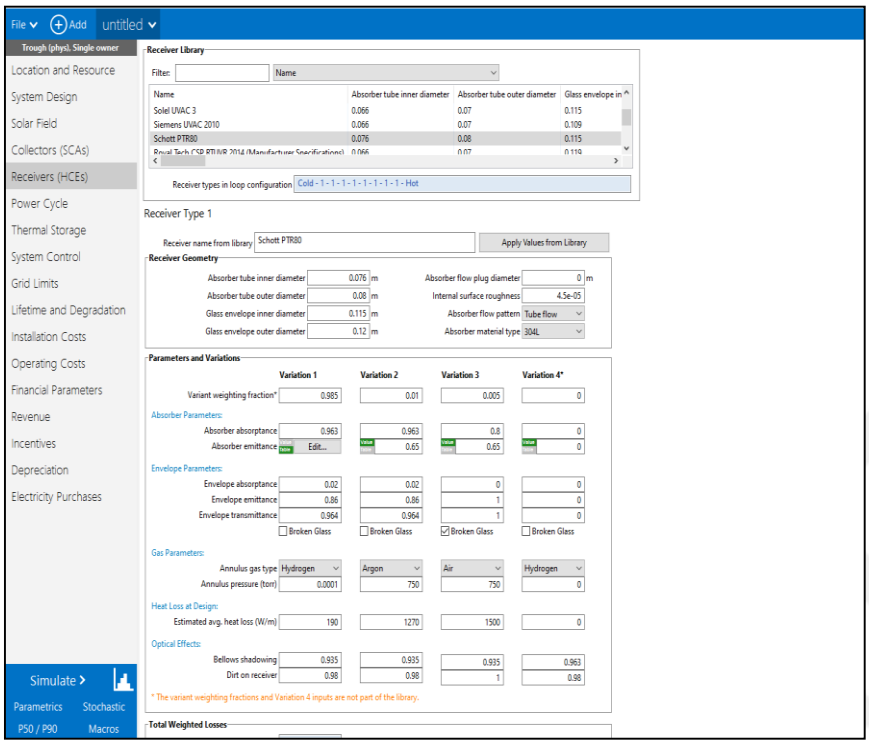


Resim 6.20. Oluk kolektör sisteminin genel yapısı [167]

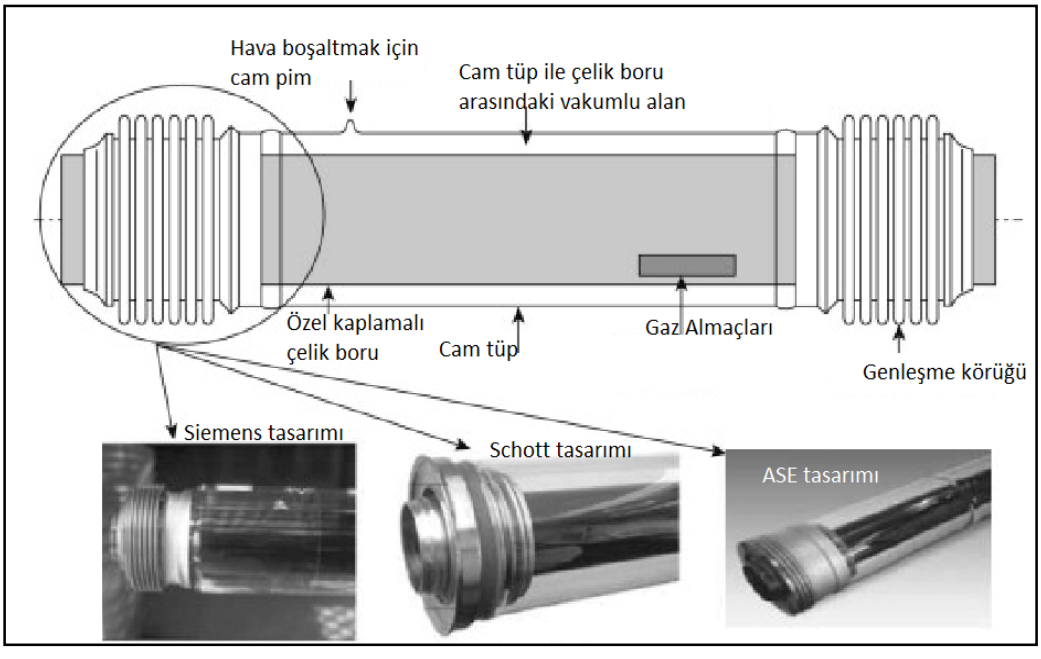
SAM: Alıcı tüp

SAM uygulamasında yer alan beşinci aşama, Resim 6.21'de ekran görüntüsün yer aldığı, "alıcı tüp" veri alanıdır. Alıcı tüp için, çelik tüp iç çapı 0.066 m ve dış çapı 0,07 m; cam kaplı tüpün iç çapı 0.115 ve dış çapı 0,12 m olan Schott PTR 70-2008 seçilmiştir. Alıcı tüpün düşük emittanslı yüksek absorbanslı malzeme ile kaplanmış absorber tüpü ile cam kapak

arasında vakum boşluğu oluşturarak termal kayıpları azaltmak için anti-reflektif ile kaplanmış cam kapaktan oluşan bir yapısı bulunmaktadır. Üç firmaya ait farklı alıcı tüp modelleri ve genel emici boru yapısı Resim 6.22'te gösterilmektedir.



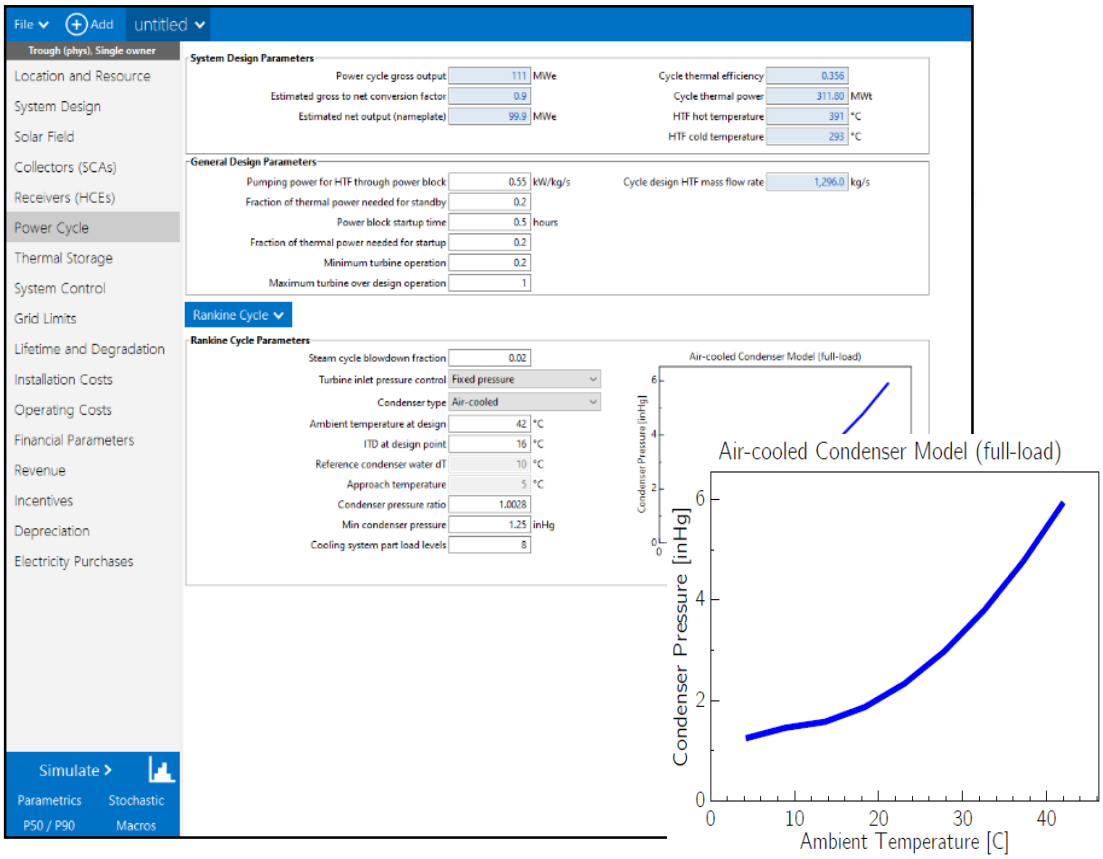
Resim 6.21. SAM uygulaması "alıcı tüp" veri sayfası ekran görüntüsü



Resim 6.22. Oluk kolektörde kullanılan bir alıcı tüpün yapısı ve modelleri [168]

SAM: Güç çevrimi

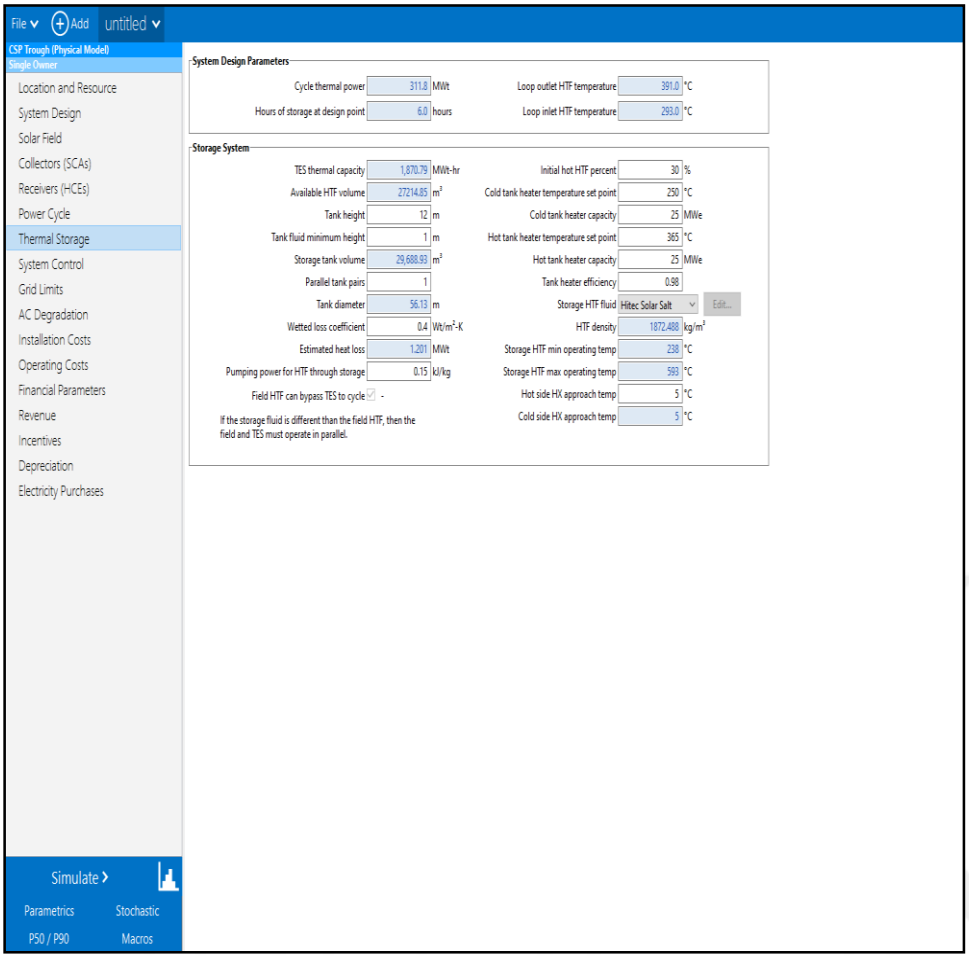
SAM uygulamasında yer alan altıncı aşama, Resim 6.23'te ekran görüntüsün yer aldığı, "güç çevrimi" veri alanıdır. Bu bölüm, bazı sonuçları gösterirken aynı zamanda Rankine çevrimi için türbin iç basınç kontrolü ile yoğuşturucu tipinin belirlenmesi istenir. Yoğuşturucu tipi hava soğutmalı olarak seçildiğinde Resim 6.23'da görülen grafik sonucu verilmektedir.



Resim 6.23. SAM uygulaması "güç çevrimi" veri sayfası ekran görüntüsü ve yoğuşturucu hava soğutmalı olduğunda elde edilen grafik

SAM: Termal depolama

SAM uygulamasında yer alan yedinci aşama, Resim 6.24'de ekran görüntüsün yer aldığı, "termal depolama" veri alanıdır. Önerilen NYHES'de, oluk kolektörler için iki adet tank ile termal depolama sağlanmıştır. Bu bölüm, bazı sonuçları gösterirken aynı zamanda termal depolama sisteminde kullanılacak olan HTF'nin de seçilmesini gerektirir. Termal depolama alanında Hitec güneş tuzu kullanılmıştır. Ergimiş tuz olan malzeme, %60 $NaNO_3$ - %40 KNO_3 karışımı kimyasal bir yapıya sahiptir.



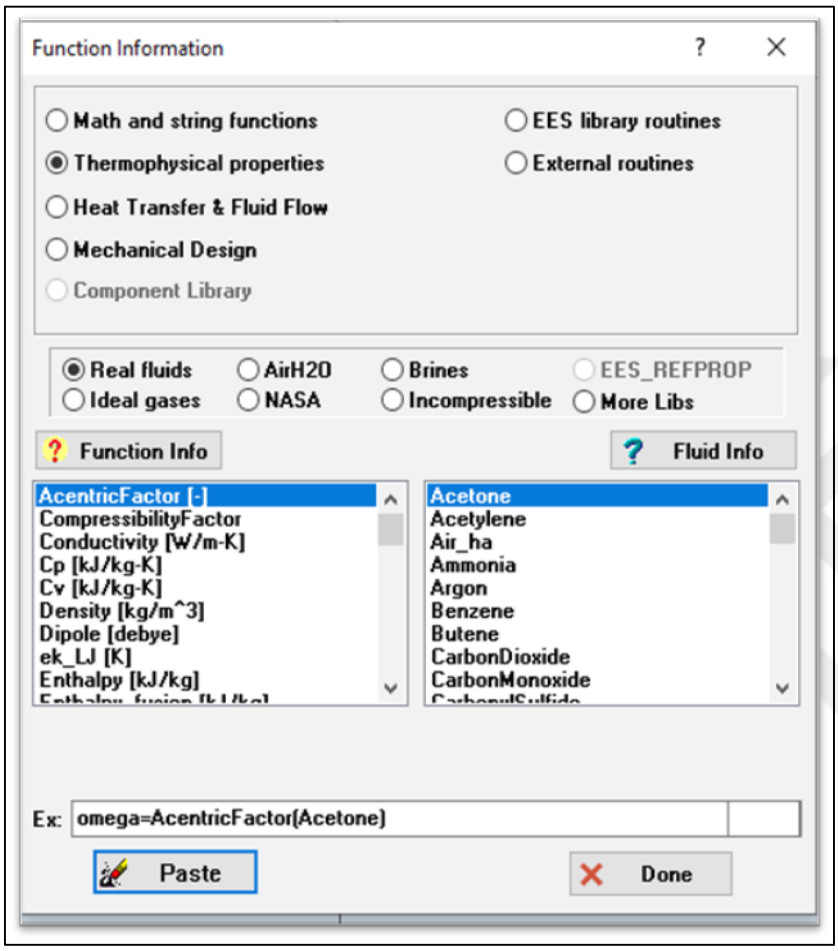
Resim 6.24. SAM uygulaması “termal depolama” veri sayfası ekran görüntüsü

6.5.2. EES uygulaması

Önerilen NYHES’nin Termodinamik I. ve II. Kanun çerçevesinde, kütle, enerji ve ekserji denge analizlerinde, EES uygulamasından yararlanılmıştır. EES, diferansiyel ve integral denklemleri çözmek, optimizasyon yapmak, belirsizlik analizleri sağlamak, doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon yapmak, birimleri dönüştürmek, birim tutarlılığını kontrol etmek ve kaliteli şekiller ile yayın oluşturmak için kullanılan uygulamasıdır [169]. Uygulaması en önemli özelliği, termodinamik açısından yüksek oranda doğruluk sağlamasıdır ve ayrıca birçok farklı madde özelliklilerini içeren veri tabanı ile denklem çözme kabiliyetine sahip olmasıdır [169].

EES hesaplamasın yapabilmek için her bir noktaya ait entalpi veya entropi fonksiyonun yanı sıra kütle ve enerji denge formülleri ana ekrana yazılır. Sıcaklık, basınç ve varsa kuruluk değerine bağlı olarak noktaların entalpi ve entropi fonksiyonları, Resim 6.25’de görüldüğü

gibi ekrana yansıyan “EES fonksiyon seçim kutucuk” üzerinden işaretlenir. Bu kutucukta öncelikle “termodinamik hesaplamalar” işaretlemesi yapıldı. Sonra kullanılan akışkanın gerçek akışkan, ideal gaz, sıkıştırılamaz vb. işaretlemesi yapıldı.



Resim 6.25. EES termodinamik hesaplama fonksiyon seçim ekranı

Akışkan seçimi yapıldıktan sonra sağ alt tarafta su, helyum, CO_2 gibi akışkan türü belirlendi. Sol alt tarafta ise fonksiyon türü belirlendi. Entalpi ve entropi için ayrı ayrı işaretleme yapıldı. Bu aşamadan sonra ilgili fonksiyon ana ekrana yansır. Ana ekran üzerine her bir hat için örnek yazımda olduğu gibi ayrı ayrı ilgili fonksiyon ve değerler yazıldı. EES ana ekrana bir hat noktası için yazılan fonksiyonun örnek bir yazım şekli aşağıda gösterilmiştir.:

"Reaktör Buhar Üreteci Helyum Giriş"
T[24]=750 [C]
P[24]=7000 [kPa]
h[24]=enthalpy(*He*;*T*=T[24])
s[24]=entropy(*He*;*T*=T[24];*P*=P[24])

Fonksiyonların hemen alt kısmına kütle ve enerji korunumu için denge formülleri yazıldı. Formüllerin ardından ana buhar hatlarında kullanılan akışkan kütle değerleri ile helyum debisi veri olarak yazıldı. Bütün yazım işlemi tamamlanması ile EES çalıştırıldı. Hata çıkması durumunda EES uygulaması, hatanın nerede olabileceğini veya hataya dair bir ipucunu ekrana açılan bir kutucukta gösterir. Hata alındıysa, değerler veya formüllerin yazımı gözden geçirilir ve tekrar çalıştırılır. EES uygulaması çalıştırıldığında, sistemin tüm hat noktalarına ait kütle, enerji ve ısı kayıp değerleri belirlenmiş olur. Hata alınmayan EES ile mevcut SMR sisteminin kütle ve enerji dengesi sağlandı.

7. KULLANILAN TERMODİNAMİK EŞİTLİKLERİ

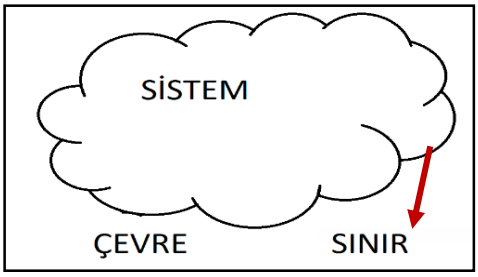
7.1. Termodinamik Tanımlar

Isıyı enerjiye dönüştürme çabaları sonucunda ortaya çıkan ve Latince ısı anlamına gelen therme ve güç-hareket anlamına gelen dynamis kelimelerinden türetilen termodinamik terimi; ısının bir madde üzerindeki etkilerini inceleyen bir bilim alanı olarak tariflenmektedir [170]. Günümüzde, enerji ve enerji dönüşümlerini inceleyen bilim alanı olarak bilinen termodinamikte, sıklıkla kullanılan terimler aşağıda kısaca açıklanmıştır [170]:

Sistem: İncelenecek veya analiz edilecek belirli bir kütleyi veya uzayda belirlenen bir bölgeyi ifade eder. Sistem çok küçük veya çok büyük olabilir.

Sınır: İncelenecek sistem ile çevreyi birbirinden ayıran gerçek veya hayali yüzey olarak tanımlanmaktadır.

Çevre: İncelenecek sistemin dışında kalan kütle veya bölgeyi tarifler. Sistem, sınır ve çevre ilişkisi Şekil 7.1'de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Termodinamik analizlerinde sistem, sınır ve çevre ilişkisi

Açık Sistem: Kontrol hacmi olarak adlandırılan bu terim; türbin, kompresör gibi içinden kütle akışının olduğu makinalarda, mühendislik çözümü için uzayda seçilen bir bölgeyi tarifler.

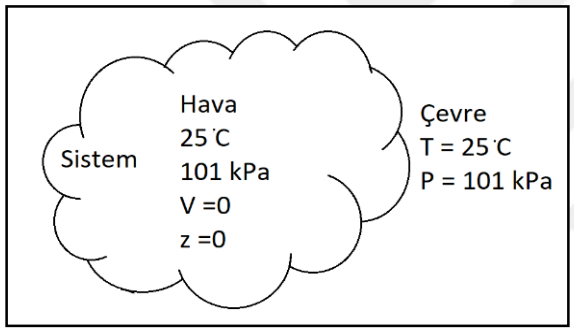
Sürekli Akışlı Açık Sistem: Türbin, lüle, kompresör gibi makinaların giriş-çıkış benzer çalışma koşulları değişmediğinden bu tür makinalara sürekli akışlı açık sistemler denir. "Sürekli" terimi, belirtilen bir noktada zamanla bir değişim olmadığını gösterirken, akışkan

farklı iki noktada, farklı özellikler gösterebilmektedir. Kontrol hacminde, hacim, kütle ve toplam enerji sabittir [170].

Kapalı Sistem: Kontrol kütlesi olarak adlandırılan bu terim, sınırlarında kütle geçişi olmayan diğer bir deyişle, kütle giriş ve çıkışı olmayan ancak enerji, iş ve ısı olaylarının gerçekleştiği sistemdir.

İzoleli Sistem: Sistem sınırları üzerinden kütle, iş ve enerjinin geçmesine izin verilmeyen sistemlerdir.

Ölü hal: Bir sistemin çevresi ile dengede olduğu gösteren durumdur. Sistemin ve çevrenin sıcaklık, basınç gibi özellikleri aynıdır. Ölü hal durumu, Şekil 7.2'te gösterilmektedir.



Şekil 7.2. Ölü hal durumu

Tersinmez durum: Hal değişimleri belirli bir yönde gerçekleşir ve gerçekleşen bu durumun tam tersine dönmesi mümkün değildir. Bu süreç tersinmez olarak adlandırılır. Sıcak bir çay normal oda koşullarında soğur ve tekrar kendiliğinden ısınmaz.

Tersinir durum: Bir proses sürecinde sistem ile çevre etkileşime girmiyorsa, diğer bir deyişle sistem ve çevrenin ilk baştaki koşulları değişmiyorsa, bu proses tersinir olarak adlandırılır. Tersinir olarak adlandırılan ideal ısı makinasının verimi, tersinmez olarak adlandırılan gerçek bir ısı makinasının veriminden büyüktür [170].

Entalpi: Bir maddenin veya sistemin yapısında yer alan toplam enerjiyi ifade eder. Basınç ve hacmi gösteren PVile iç enerjiyi gösteren U ifadesi, birlikte entalpi olarak aldandırılır ve "h" ile gösterilir.

Entropi: Moleküler rasgelelik veya moleküler düzensizlik şeklinde ifade edilebilir. Anlık olarak normal bir halden daha düzensiz bir hale geçen bir sistemin moleküllerin konumları belirsizleştiğinden sistemin entropisi artar [170].

Ekserji: Belirli bir halde bulunan bir miktar enerji içindeki yararlı iş veya iş potansiyeli ekserji olarak adlandırılmaktadır. Ekserji, kısaca kullanılabilir enerji olarak tanımlanmaktadır [170].

7.2. Termodinamik I. Yasası

Termodinamik I. Yasası, doğanın temel prensipleri arasında yer alan kütle ve enerji korunumu açıklar. "*Var olan enerji yok edilemez, olmayan enerji var edilemez, ancak enerji biçim değiştirebilir."* sözü ile özetlenmiştir. Çevresi ile iş ve enerji açısından hiçbir etkileşimi olamayan sistemlerin enerjisi sabittir Bir cismin veya sistemin enerjisi artıyorsa, bu artan enerji, başka bir kaynaktan sağlanıyordur.

Enerji, kendiliğinden oluşan veya ortaya çıkan bir olgu değildir. Enerji korunumuna benzer şekilde kütle korunumu da sağlandığı için sisteme giren ve çıkan kütle eşittir. Kısaca, Termodinamik I. Yasası, hem kütlenin hem enerjinin korunduğunu belirtirken, farklı enerji biçimleri arasındaki ilişkileri ve genel olarak enerji etkileşimlerini esas alarak mühendislik çözümlerine veya analizlerine temel oluşturur [170].

Bu tez çalışmasında, analiz edilecek olan sistem bileşenleri sürekli akışlı açık sistemler olduğundan kütle ve enerji korunumu aşağıda detaylıca açıklanmıştır.

Sürekli akışlı açık sistemlerde kütle korunumu

Birim zamanda, bir kesitten akan kütle miktarı, "*kütle debisi*" olarak adlandırılır ve birim zaman ifadesi kütlenin simgesi olan "m" harfinin üzerine nokta eklenmesi ile oluşan "ṁ" sembolü ile gösterilir [170]. Bir kanal veya boruda geçen akışkanın kütle debisi; kesit alan (A), yoğunluk (ρ) ve hız (V) ile doğrudan orantılı olmak üzere aşağıda belirtilen eşitlik ile çözümlenir [170].

$$\dot{m} = \rho \, V \, A \qquad \text{(kg/s)}$$

"*Bir sistemin kontrol hacmine veya Δt zaman aralığında olan kütle geçişi, aynı zaman aralığında kontrol hacmindeki toplam kütledeki artma veya azalma olarak yansıyan değişime eşit olması"* kütlenin korunumu ilkesi olarak ifade edilmektedir [170].

$$\begin{pmatrix} \Delta T \text{ sürecince} \\ \text{kontrol hacmine} \\ \text{giren toplam kütle} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \Delta T \text{ sürecince} \\ \text{kontrol hacminden} \\ \text{çıkan toplam kütle} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta T \text{ sürecince} \\ \text{kontrol hacmi içinde} \\ \text{toplam kütle değişimi} \end{pmatrix}$$

$$m_g - m_ç = \Delta m_{KH} \quad \text{(kg)}^9$$

Birçok giriş ve çıkış olan sürekli akışlı açık sistemlerde, kütlenin korunumu [170]:

$$\sum_g \dot{m} = \sum_ç \dot{m} \quad \text{(kg/s)} \qquad (7.1)$$

<u>Sürekli akışlı açık sistemlerde enerji korunumu</u>

Sürekli akış koşullarında, kontrol hacminin kütlesi ve enerjisi zaman içinde değişmez. Toplam enerji, sabit olduğundan, enerjideki toplam değişim sıfırdır. Kontrol hacmine giren enerji miktarı, çıkan enerji miktarına eşit olur. [170].

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \text{Sisteme giren} \\ \text{toplam enerji} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \text{Sistemden çıkan} \\ \text{toplam enerji} \end{pmatrix}}_{\begin{pmatrix} \text{Birim zamanda} \\ \text{ısı, iş ve kütle ile olan} \\ \text{enerji geçişi} \end{pmatrix}} = \underbrace{\begin{pmatrix} \text{Sistemin toplam} \\ \text{enerjisindeki değişim} \end{pmatrix}}_{\begin{pmatrix} \text{Birim zamanda sistemin} \\ \text{iç, kinetik, potansiyel, vb.} \\ \text{enerjilerindeki değişim} \end{pmatrix}}$$

$$\dot{E}_g - \dot{E}_ç = \frac{dy}{dt}$$

$$\sum E_g = \sum E_ç \quad \text{(kW)} \qquad (7.2)$$

Akışkan birim kütlesi; akışın kendi enerjisi, iç enerji, potansiyel enerji ve kinetik enerjiye

[9] Eşitliklerde yer alan g ve ç harfleri, sisteme giriş ve çıkış değeri anlamına gelmektedir.

sahiptir. Birim kütle enerjisi "Θ" ile gösterilmiştir [170].

Θ = akış enerjisi + iç enerji + potansiyel enerji + kinetik enerji

$\Theta = P\ V + U + gz + V^2/2$

"PV" değeri yerine, entalpi değeri "h" yazıldığında, aynı eşitlik aşağıdaki şekilde yazılır:

$\Theta = h + U + gz + V^2/2$ (kJ/kg) (7.3)

Bir sistemin ısı ve iş etkileşiminin tam olarak nasıl olduğunu hesaplamak için, sisteme verilen ısı veya ısı girişi (Q̇) ve sistemden elde edilen iş veya üretilen iş (Ẇ) değerleri kullanılır ve aşağıdaki eşitlik ile çözüme ulaşılır.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_ç\, \Theta_ç - \sum \dot{m}_g\, \Theta_g \quad (7.4)$$

Burada yer alan "Θ", akışkanın birim kütlesinin toplam enerjisini ifade eder.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_ç\ (h_ç + \frac{V_ç^2}{2} + gz_ç) - \sum \dot{m}_g\, h_g + \frac{Vg^2}{2} + gz_g)) \quad (7.4)$$

Potansiyel ve kinetik enerjilerin yanı sıra kütle debisinin değişmediği dikkate alındığında ve giriş-çıkış (g-ç) indisleri yerine sırasıyla ile 1-2 indisleri kullanıldığında aynı eşitlik sürekli akışlı açık sistemlerde enerjinin korunumu aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}\ (h_2 - h_1) \quad \text{(kW)} \quad (7.4)$$

İş ihmal edildiğinde ve kütle debisine (ṁ) bölündüğünde, enerji korunumu birim kütle için aşağıdaki gibi yazılır:

$q = h_2 - h_1 = \Delta h$ (kJ/kg) (7.5)

q: Birim zamanda kontrol hacmi ve çevre arasında gerçekleşen ısı geçişi

Δh: Akışkanın entalpi değişimini göstermektedir.

İki farklı nokta için, “c” özgül ısıyı, “T” sıcaklığı göstermek üzere mükemmel gazların olduğu sistemlerde entalpi değişimi (Δh);

$$\Delta h = c_{p,ort}\,(T_2 - T_1) \quad \left(\frac{kJ}{kg\,K}\right) \tag{7.6}$$

Bu durumda elde edilecek ısı:

$$\dot{Q} = \dot{m}\,C\,\Delta T \qquad \text{(kJ/s)} \tag{7.7}$$

Oluk kolektör enerji dengesi

Güneş enerjisi analizleri için oluk kolektörün yer aldığı sistem sürekli rejim kabulü veya denge durumu için Eş. 7-4 dikkate alındığında:

$$\dot{Q}_{Kolektör} = \dot{E}_{T66-g} + \dot{E}_{güneş} = \dot{E}_{T66-ç} - \dot{E}_{kayıp} \tag{7.8}$$

$\dot{E}_{T66-g}$: Kolektöre giren Therminol-66 akışkanının enerjisi

$\dot{E}_{güneş}$: Kolektöre gelen güneş ışınım enerjisi

$\dot{E}_{T66-ç}$: Kolektörden çıkan Therminol-66 akışkanının enerjisi

$\dot{E}_{kayıp}$: Kolektörde oluşan enerji kaybı

Güneşten gelen ışınımlarla oluşan enerjisi, verilen eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$\dot{E}_{güneş} = I_{güneş} A \qquad \text{(W)} \tag{7.9}$$

α: Kolektör camı geçirgenliği

$I_{güneş}$: Doğrudan normal ışınım (Güneş ışınımı) (W/m^2)

A : Kolektör yüzey alanı (m^2)

Oluk kolektörlerinde yutulan miktar, izleme mekanizmaya, yansıtma oranına, aynanın optik kalitesi (ne kadar kusurlu olduğu), alıcı camın optik özellikleri gibi bazı kriterlere bağlıdır. Bu nedenle yutulan ısı miktarı verilen eşitlik ile hesaplanır:

$$\dot{Q}_{yut} = \dot{E}_{güneş} \cdot \eta_{opt} \quad (7.10)$$

$$\eta_{opt} = \alpha\, \tau\, \rho\, \gamma\, K(\theta) \quad (7.11)$$

α: Kolektör yüzey geçirgenliği (0-1 arasında)

τ: intercept faktörü (örtü geçirgenliği) (0-1 arasında)

ρ: açıklık alanı yansıtma oranı (0-1 arasında)

γ: Kesme faktörü, ışığın yüzeye geliş açısı (dik veya paralel olduğunu gösterir ve Cos(θ) ile adlandırılır. 0-1 arasındadır.)

K(θ): Düşüş açısı düzeltme değeri (0-1 arasında)

Kolektör alıcısına ulaşan ısı miktarı, yutulan ısı ve kayıp ısı dikkate alınarak verilen eşitlik ile hesaplanır:

$$\dot{Q}_{kol} = \dot{Q}_{yut} - \dot{Q}_{kayıp} \quad (7.12)$$

Oluşan ısı kayıpları, ışınım ve taşınım ısı kayıpları şeklinde oluşmaktadır. Ayrıca rüzgar ile oluşan ısı kaybı da dikkate alınır. Bu nedenle oluşan enerji kayıpları verilen eşitliklarla hesaplanmaktadır.

$$\dot{Q}_{rüzgar-kayıp} = A_{cam-boru} * h_{çıkış} * (T_{cam-boru} - T_{ortam}) \quad (7.13)$$

$A_{cam-boru}$: Cam boru alanı

$h_{çıkış}$: Taşınım ısı katsayısı

$T_{cam-boru}$: Cam borunun sıcaklığı

T_{ortam}: Ortam sıcaklığı

$$h_{çıkış} = \frac{4 * V_{rüzgar}^{0,58}}{D_{cam-boru}^{0,42}} \quad (7.14)$$

$V_{rüzgar}$: Rüzgar hızı

$D_{cam-boru}$: Alıcı cam borunun çapı

$$\dot{Q}_{termal-kayıp} = \dot{Q}_{ışınım} + \dot{Q}_{taşınım} \quad (7.15)$$

$$\dot{Q}_{ışınım} = \varepsilon_{cam-boru}\, \sigma\, A_{boru}\, \left(T^4_{cam-boru} - T^4_{gökyüzü}\right) \quad (7.16)$$

ε: Kolektör camının yayıcılığı
σ: Stefan-Boltzman sabiti
A: Alan (m^2)
Tyüzey: Kolektör yüzey sıcaklığı (K)
Tgökyüzü Gökyüzü sıcaklığı (K)

$T_{gökyüzü} = 0{,}0553\, .T^{1,5}_{çevre}$ [171].

$$\dot{Q}_{taşınım} = \overline{h}\, A\, \left(T_{yüzey} - T_{çevre}\right) \quad (7.17)$$

$\overline{h}$: Isı transfer katsayısı ($W/m^2 \cdot K$)
A Alan (m^2)
T: Sıcaklık (K)

Bu eşitlikte yer alan "$\overline{h}$" ısı transfer katsayısı, alıcı boru içinde kullanılan Therminol-66 akışkanının türbülanslı olması tercih edileceğinden Nusselt Sayısını (Nu) eşitliği kullanılarak belirlenir.

$$Nu = \frac{h\, D}{k} \quad (7.18)$$

Nu Nusselt saysı
$\overline{h}$: Isı transfer katsayısı ($W/m^2 \cdot K$)
D Çap (m)
k: Isı iletkenliği (W/m.K)

Boyutsuz sayıların hesaplanmasında kullanılan eşiklikler aşağıda sırayla verilmiştir.

$$Nu_{hava} = 0{,}193\, Re^{0{,}618}_{hava}\, Pr^{0{,}33}_{hava} \quad (7.19)$$

$$Re = \frac{\mathrm{VD}}{\gamma} = \frac{4\,\dot{m}}{\Pi\, D\, \mu} \qquad Pr = \frac{\mu\, C_p}{k} \tag{7.20}$$

Re Reynolds sayısı

Pr: Prandtl sayısı

D Çap (m)

V: Akışkan hızı (m/s)

γ: Kinematik vizkozite (m^2/s) [γ =μ/ρ]

$\dot{m}$ Kütle akışı (m^3/s)

μ: Dinamik vizkozite (kg/(m·s))

ρ: Yoğunluk (kg/m^3)

C_p Özgül ısı (J/kg·K)

I. Yasa için verim

Rankin çevriminde, sisteme verilen enerji, türbin tarafından üretilen güç ve ana pompa tarafından tüketilen güç dikkate alınarak sistem verimi hesaplanır. Mekanik enerji geçişlerindeki verim, türbin vasıtasıyla gerçekleştiğinden, türbin ile yapılan iş ile aynı kabul edilir [170]:

Sistem verimliliği

$$\eta_S = \frac{Alınan\ mekanik\ enerji}{Verilen\ mekanik\ enerji} = \frac{Net\ elde\ edılen\ enerjı}{Toplan\ gıren\ enerjı} = \frac{W_{net}}{Q_{giriş}} = \frac{\dot{W}_{türbın} - \dot{W}_{pompa}}{\dot{Q}_{HTR-PM}} \tag{7.21}$$

$$\dot{W}_{türbın} = \dot{W}_{YBT} + \dot{W}_{ABT} \tag{7.22}$$

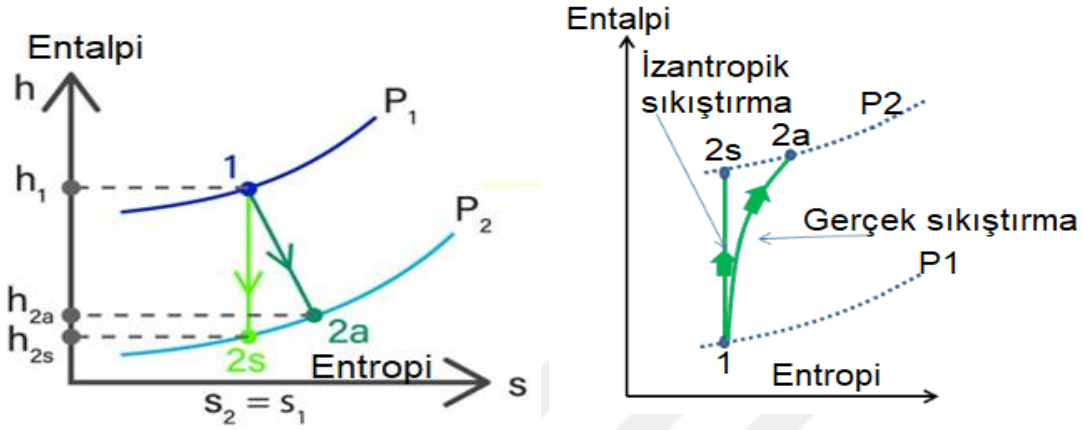
Önerilen sistem için verimlilik

$$\eta_{s-yeni} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} = \frac{\dot{W}_{türbın} - \dot{W}_{pompa} + \dot{W}_{wınd}}{\dot{Q}_{HTR-PM} + \dot{Q}_{sun}}$$

Sürekli akışlı düzeneklerin izantropik verimliliği

Türbinden geçen akışkanın kinetik ve potansiyel enerjideki değişimler, entalpi değişimlerine

göre daha küçük olduğundan göz ardı edilmektedir ve bu durumda adyabatik bir türbinin işi entalpi değişimine eşit olur. Türbin ve pompa izantropik verimi, Şekil 7.3'te gösterilen h-s diyagramında yer alan s; ideal durumu, a; gerçek durumu göstermek üzere aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanır:



Şekil 7.3. Türbin (sol) ve pompa (sağ) için ideal ve gerçek durum

Türbinin izantropik verimi, eşitlik ile hesaplanır.

$$\eta_T = \frac{Gerçek\ türbin\ işi}{İzantropik\ (ideal) türbin\ işi} = \frac{W_a}{W_s} = \frac{h_1 - h_{2a-gerçek}}{h_1 - h_{2s-ideal}} \tag{7.23}$$

Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmiş bir pompa için izantropik verim

$$\eta_P = \frac{Ideal\ izantropik\ iş}{Gerçek\ iş} = \frac{W_s}{W_a} = \frac{h_{2s-ideal} - h_1}{h_{2a-gerçek} - h_1} \tag{7.24}$$

Güneş oluk kolektör verim analizi için Eş. 7-9'da yer alan $\dot{E}_{güneş}$ ve Eş. 7-8'de yer alan $\dot{Q}_{Kolektör}$ enerji değerleri üzerinden hesaplama yapılır.

$$\eta_{kol} = \frac{Elde\ edilen\ net\ enerji}{Güneşten\ alınan\ enerji} = \frac{\dot{Q}_{Kolektör}}{\dot{E}_{güneş-g}} \tag{7.25}$$

7.3. Termodinamik II. Yasası

Termodinamik ikinci yasası, enerjinin miktarının (niceliği) yanında, kalitesinin de (niteliği) de önemli olduğunu belirtir. Bir miktar sıcak su, normal oda koşullarında, kendiliğinden

soğuyabilirken, bu durumun tam tersi, odadaki soğuk su kendiliğinden sıcak hale gelmez [170]. Sıcak hale gelebilmesi için bir iş yapılmasına ihtiyaç duyulur. Mühendislik sistemlerinde bu durum, enerjinin işe dönüştürülmesi olarak incelenir.

Termodinamik ikinci yasası, farklı bilim insanları tarafından yorumlanmış ve tüm bu yorumların geçerli olduğu kabul edilmiştir. Bu ifadelerden en yaygın bilinen ikisi aşağıda açıklanmıştır [170].

Termodinamiğin II. Yasası: Kelvin-Planck ifadesi

Bir iş, enerjinin farklı biçimlerine dönüştürülür ancak enerjinin işe dönüştürülmesi için özel aygıtlara ihtiyaç duyulur ve bu aygıtlar ısı makinaları olarak adlandırılır [170]. Buharlı enerji santralı, ısı makinası için en iyi örnektir. Isı makinaları, gerekli olan ısıyı kazan veya reaktör gibi bir kaynaktan alır ve dönen bir mil vasıtasıyla bu ısının bir miktarını işe dönüştürür. Geriye kalan ısı ise, nehir veya atmosfer gibi bir ısı kuyusuna verirler ve böylece bir çevrim gerçekleştirmiş olurlar [170]. Bu durum, Kelvin-Planck ifadesinin temelini oluşturmaktadır.

"*Termodinamik bir çevrim gerçekleştirerek çalışan bir makinanın yalnızca bir kaynaktan ısı alıp net iş üretmesi olanaksızdır."* [170].

Bir ısı makinası hem yüksek sıcaklık sağlayan kaynakla hem de düşük sıcaklık sağlayan ısı kuyusu ile ısı alışverişinde bulunur ve böylece sürekli çalışır. Bu nedenle;

"*bir ısı makinasının ısıl verimi %100 olamaz"* ifadesi, bu yasanın özeti kabul edilir [170].

Termodinamiğin II. Yasası: Clausius ifadesi

Isının, soğuk bir ortamdan sıcak bir ortama kendiliğinden geçmesi için bir miktar enerjinin iş biçiminde verilmesi gerekmektedir [170].

"Termodinamik bir çevrim gerçekleştirerek çalışan ısı makinasının hiçbir enerji etkileşiminde bulunmadan düşük sıcaklığa sahip bir cisimden ısı alarak, yüksek sıcaklığa sahip bir cisme vermesi imkansızdır."

Entropi ifadesi, Clausius eşitliği olarak bilinen ve aşağıda gösterilen eşitlik ile tanımlanmaktadır. Ortasında halka işaretinin olduğu integral işareti, bir çevrim boyunca işlem yapıldığını göstermektedir. Tersinir veya tersinmez bütün çevrimler için geçerli olan Clausius eşitliğinde, "δQ/T" ifadesi, termodinamik bir çevrim üzerindeki integralinin sıfırdan küçük veya sıfıra eşit olduğunu belirtir [170].

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \qquad \text{(kJ/K)} \qquad (7.26)$$

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \qquad \text{(kJ/K)} \qquad (7.27)$$

Termodinamiğin ikinci yasası, izole bir sistemin toplam entropisinin zamanla daima arttığını veya sistemin kararlı halde olduğu veya tersinir bir proseste sabit kaldığını ifade eder. Sistemlerde kullanılan farklı maddeler için entropi dengesi aşağı açıklanmıştır [170].

Saf maddeler için entropi dengesi

Saf maddelerin entropisinin hesaplanmasında, entalpi (h), iç enerji (U) ve özgül hacim (V) gibi ölçülebilir özellik değerlerinden faydalanılarak çözüme ulaşılır. Doymuş sıvı-buhar karışımının entropisi için verilen eşitlik kullanılır [170].

$$s = s_f + x s_{fg} \qquad \text{(kJ/kg.K)} \qquad (7.28)$$

x: Buharın kuruluk derecesi (buhar kalitesi)

s_f ve s_{fg} doyma tablolarında yer alan değerlerdir.

Kapalı bir sistemde, hal değişimi sırasında, bir m kütlesinin entropi değişimi verilen eşitlik ile elde edilir.

$$\Delta S = m\Delta s = m\,(s_2 - s_1) \qquad \text{(kJ/K)} \qquad (7.29)$$

Sıvı ve katıların entropi dengesi

Bir hal değişimi sırasında, özgül hacimlerinin sabit kalmasına bağlı olarak sıvı ve katılar sıkıştırılamaz maddeler olarak kabul edilir ve verilen eşitlik uygulanır [170]:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 c\,(T)\frac{dT}{T} = c_{ort}\ln\frac{T_2}{T_1} \qquad \text{(kJ/kg.K)} \qquad (7.30)$$

İzantropik hal değişimi:

Bir hal değişiminde, entropinin sabit kaldığı hal değişimine izantropik hal değişimi denir ve izantropik hal değişimi için entropi değişimi verilen eşitlik ile hesaplanır [170]:

$$S_2 - S_1 = c_{ort}\ln\frac{T_2}{T_1} = 0 \qquad \rightarrow \qquad T_2 = T_1 \qquad (7.31)$$

Mükemmel gazların entropi değişimleri

Bir hal değişimi sırasında, mükemmel gazların özgül ısılarının sabit olduğu kabul edilerek verilen eşiklikler ile entropi hesaplanır [170]:

$$S_2 - S_1 = c_{V,ort}\ln\frac{T_2}{T_1} + R\ln\frac{V_2}{V_1} \qquad \text{(kJ/kg.K)} \qquad (7.32)$$

$$S_2 - S_1 = c_{P,ort}\ln\frac{T_2}{T_1} + R\ln\frac{P}{P_1} \qquad \text{(kJ/kg.K)} \qquad (7.33)$$

Sürekli akışlı açık sistemlerde entropi dengesi

Herhangi bir sistem için entropi artış ilkesi, verilen eşitlikte görülmektedir [170].

$$\begin{pmatrix} Giren \\ toplam \\ entropi \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Çıkan \\ toplam \\ entropi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Üretilen \\ toplam \\ entropi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Sistemdeki \\ toplam \\ entropi\ değişimi \end{pmatrix}$$

$$S_g - S_ç + S_ü = \Delta S_{sistem} \qquad \text{(kJ/kg.K)} \qquad (7.34)$$

Entropi Değişimi;

$$\begin{pmatrix} Entropi \\ değişimi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Son\ durumdaki \\ entropi \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} İlk\ durumdaki \\ entropi \end{pmatrix}$$

$$\Delta S_{sistem} = S_{son} - S_{ilk} = S_2 - S_1 \text{ (kJ/kg.K)} \quad (7.35)$$

Kontrol hacimlerinin sürekli olduğu türbin, kompresör, ısı değiştiricileri, lüle, borular ve kanallarda entropide değişim olmadığından, aşağıda verilen eşitlik kullanılır:

$$\dot{S}_{üretim} = \sum \dot{m}_ç s_ç - \sum \dot{m}_g s_g - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \quad \text{(kJ/kg.K)} \quad (7.36)$$

Ekserji

Bölümün başında tanımlandığı gibi belirli bir halde bulunan bir miktar enerji içindeki yararlı iş veya iş potansiyeli olarak adlandırılan ekserji hem teknik hem de ekonomik yönden tasarlanacak bir sistemin belirlenmesinde önemli rol oynar [170].

Bir sistemde; nükleer, manyetik, elektrik ve yüzey gerilim etkileri bulunmuyorsa, bu sistem fiziksel, kimyasal, kinetik ve potansiyel olmak üzere dört farklı ekserjiye sahip olabilir. Fiziksel (E^{FE}), Kinetik (E^{KN}), Potansiyel (E^{PE}) ve Kimyasal (E^{KM}). Hepsinin toplanmasıyla toplam ekserji değeri elde edilir [172]. Çalışmalarda, fiziksel, kinetik ve potansiyel ekserjinin toplamı literatürde genellikle termo-mekanik ekserji olarak yer almaktadır [172].

$$E = E^{FE} + E^{KN} + E^{PE} + E^{KM} \quad \text{(kJ)} \quad (7.37)$$

Ekserji hesaplamalarında, genellikle kütle veya molar bazda çalışıldığı için Eş. 7.32, aşağıdaki şekilde yer alır [172].

$$e = e^{FE} + e^{KN} + e^{PE} + e^{KM} \quad \text{(kJ/kg)} \quad (7.38)$$

Potansiyel ve kinetik ekserji:

Mekanik enerjinin bir çeşididir ve bu enerjilerin tamamı işe dönüştürülebildiğinden,

ekserjileri, çevre sıcaklık ve basıncına bakılmaksızın kendi enerjilerine eşittir [139].

$$e^{KN} = \frac{V^2}{2} \tag{7.39}$$

$$e^{PE} = gz \tag{7.40}$$

Fiziksel ekserji:

Bir kapalı sistemde belirli bir halde, U iç enerji, V hacim ve S entropi olmak üzere ve aynı özelliklerin sınırlı ölü haldeki durumları 0 indisi ile gösterilirse fiziksel ekserji verilen eşitlik ile hesaplanır [172]. P ve T sırasıyla basıncı ve sıcaklığı ifade eder.

$$E^{FE} = (U - U_0) + P_0\,(V - V_0) - T_0\,(S - S_0) \quad \text{(kJ)} \tag{7.41}$$

Fiziksel ekserji genel olarak verilen eşitlik ile hesap edilir.

$$e_n^{EF} = (\mathrm{h_n} - \mathrm{h_0}) - \mathrm{T_0}(\mathrm{s_n} - \mathrm{s_0}) \quad \text{(kJ/kg)} \tag{7.42}$$

$$Ex_1 = \dot{\mathrm{m}}_1\, e_1^{EF} = \dot{\mathrm{m}}_1[(\mathrm{h_1} - \mathrm{h_0}) - \mathrm{T_0}(\mathrm{S_1} - \mathrm{S_0})] \quad \text{kJ/s} \tag{7.43}$$

Kimyasal ekserji:

Bir sistemin kimyasal bileşenlerinin çevre sıcaklık ve basıncı ile kimyasal dengeye ulaşması sürecinde en fazla iş elde edilir ve bu kimyasal ekserji olarak tanımlanır [139]. Kimyasal ekserji hesaplamasında farklı bilim insanları farklı yaklaşımlar izlemiştir. Bu çalışmada, Bejan, Tsatsaronis ve Moran tarafından 1995 yılında yayınlanan ekserji analiz çalışmasındaki yöntem esas alınmıştır.

Gazların ve gaz karışımlarının standart kimyasal ekserjileri

Havada yer alan azot, oksijen, karbondioksit ve gaz fazındaki su vb. gaz fazında olan bileşenler için analiz yapılır [139]. Gaz karışımları için standart kimyasal ekserji, verilen eşitlik ile hesaplanır.

$$e_k^{-KM} = -\bar{R}\,T_0 \ln x_k^e \frac{P_0}{P_0} = -\bar{R}\,T_0 \ln x_k^e \qquad \text{(kJ/kg)} \qquad (7.44)$$

$$e^{-KM} = -\bar{R}\,T_0 \sum x_k \ln \frac{x_k^e}{x_k} \qquad \text{(kJ/kg)} \qquad (7.45)$$

$$e^{-KM} = \sum x_k\, e_k^{-KM} + \bar{R}\,T_0 \sum x_k\, lnx_k \qquad \text{(kJ/kg)} \qquad (7.46)$$

x_k^e : k gazının çevresel gaz fazındaki mol kesrini ifade eder.

x_k: İdeal gazın mol oranı (Model I veya II den seçim yapılabilir)

e^{-KM}: Herhangi bir ideal gazın kimyasal ekserjisi (kJ/mol)

$\bar{R}$: Molar üniversal gaz sabiti (8,3144 kJ/kmol.K)

T_0: Referans çevre sıcaklığı

Saf maddelerin standart kimyasal ekserji değerleri, oluşturulmuş hazır çizelgelerden yararlanılarak hesaplanmaktadır.

Yakıtların standart kimyasal ekserjileri

Çevrede bulunmayan bir madde, kimyasal reaksiyon ile açığa çıkıyorsa, bu maddenin standart kimyasal ekserjisi için, kimyasal reaksiyon veya yanma reaksiyon süreci esas alınır. Örneğin C_aH_b şeklindeki yakıtın yanma reaksiyonu sonucunda açığa çıkan ürünlerin üst ısıl değerinin (UID) yer aldığı standart kimyasal ekserjisi erilen eşitlik ile hesaplanır [139].

$$e_Y^{-KM} = UID\,(T_0\,, P_0) - T_0 \left[S_Y + \left(a + \frac{b}{4}\right) S_{O_2} - a\,S_{CO_2} - \frac{b}{2} S_{H_2O(s)}\right](T_0\,, P_0) + [a e_{CO_2}^{-KM} + \frac{b}{2}\, e_{H_2O\,(s)}^{-KM} - (a + \frac{b}{4}) e_{O_2}^{-KM} \qquad \text{(kJ/kg)} \qquad (7.47)$$

UID: Üst ısıl değer

S_Y : Standart yakıtın entropisi

e_k^{-KM}: Standart ekserji

Ekserji geçişi

Ekserji, tıpkı enerji geçişinde olduğu gibi, bir hal değişimi sırasında, sistem sınırlarından

geçiş yapabilir ancak bu geçen ekserji kazanılan veya kaybedilen ekserjiyi temsil ettiğinden olduğu gibi kabul edilir [170]. Ekserji geçişi, ısı, iş ve kütle olmak üzere üç şekilde gerçekleşir.

Isı ile ekserji geçişi

Enerjinin düzenli olmayan bir şekli olan ısının sadece bir kısmı işe dönüştürülebilir [170].

$$X_{ısı} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q \qquad \text{(kJ/kg)} \qquad (7.48)$$

$X_{ısı}$: Ekserji geçişi
T : Isı kaynağındaki sıcaklık
T_0 : Çevre sıcaklığı

İş ile ekserji geçişi

İş ile gerçekleşen ekserji geçişi verilen eşitlik ile hesaplanır [170].

$$X_{ısı} = \begin{cases} W\text{-}W_{çevre} & \text{(Sınır işi için)} \\ W & \text{(işin diğer şekilleri için)} \end{cases} \qquad (7.49)$$

$X_{ısı}$, iş ile ekserji geçişini gösterirken, $W_{çevre} = P_0 (\mathbb{V}_2 - \mathbb{V}_1)$ olacak şekilde bir yapıya sahiptir. P_0, atmosfer basıncını, $\mathbb{V}_1$ sistemin ilk hacmini ve $\mathbb{V}_2$ son hacmi göstermektedir.

Kütle ile ekserji geçişi

Bir kütle, hem enerji hem de ekserji içerdiğinden bir sitemin enerjisi, entropisi ve ekserjisi kütle ile orantılıdır [170]. Sisteme m miktarında kütle girdiğinde veya ayrıldığında oluşan ekserji:

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \qquad (7.50)$$

Kütle ile ekserji geçişi $X_{kütle} = m\ \psi$

$$E = \dot{m}\ [(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (7.51)$$

$\dot{m}$: Kütle

h: Sistemdeki bölgenin entalpisi

h_0: Çevrenin entalpisi

T_0: Çevrenin sıcaklığı

S: Sistemdeki bölgenin entropisi

S_0: Çevrenin entropisi

Ekserji dengesi

Ekserjinin azalması ilkesi olarak da adlandırılan ekserji dengesinde, entropinin yapısının tam tersi şekilde, ekserji yok edilebilir ama yaratılmazdır. Sistemin ekserji değişimi; ısı, iş ve kütle ile ekserji geçişi ile bir hal değişim sırasındaki ekserji yok oluşunun farkına eşittir.

$$\begin{pmatrix} Toplam \\ ekserji \\ girişi \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Toplam \\ ekserji \\ çıkışı \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Toplam \\ ekserji \\ yok\ oluşu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Sistemin\ toplam \\ ekserjisindeki \\ değişim \end{pmatrix}$$

$$\underbrace{X_{giren} - X_{çıkan}}_{\begin{pmatrix} ısı, iş\ ve\ kütle\ ile \\ ekserji\ geçişi \end{pmatrix}} - \underbrace{X_{yok\ olan}}_{\begin{pmatrix} ekserji \\ yok\ oluşu \end{pmatrix}} = \underbrace{\Delta X_{sistem}}_{\begin{pmatrix} ekserjideki \\ değişim \end{pmatrix}} \quad \text{(kJ)} \quad (7.52)$$

Sürekli akışlı sistemlerin ekserji dengesi

Türbin, kompresör, lüle, ısı değiştiriciler, boru ve kanallar gibi kontrol hacimleri sürekli çalıştığından kütle, enerji, entropi ve ekserji içeriklerinde değişiklik olmaz. Bu durumda ekserji dengesi verilen eşitlik ile hesaplanır [170].

$$\sum(1 - \frac{T_0}{T_k})\dot{Q}_k - \dot{W} + \sum_g \dot{m}\psi - \sum_ç \dot{m}\psi - \dot{X}_{yok\ olan} = 0 \quad \text{(kJ)} \quad (7.53)$$

Güneş enerjisi oluk kolektörü için ekserji dengesi

Güneş enerjisinden yararlanmak üzere kullanılan oluk kolektör için ekserji dengesi verilen eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$\dot{E}x_{HTF-g} + \dot{E}x_{güneş} = \dot{E}x_{HTF-ç} + \dot{E}x_{kayıp} + \dot{E}x_{yıkım} \quad (7.54)$$

$\dot{E}x_{T66-g}$: Terminol-66 için giren ekserji

$\dot{E}x_{güneş}$: Gelen güneş ışınımı ekserjisi

$\dot{E}x_{T66-ç}$: Terminol-66 için çıkan ekserji

$\dot{E}x_{kayıp}$: Kolektörün ekserji kaybı

$\dot{E}x_{yıkım}$: Kolektörün ekserji yıkımı

Güneş oluk kolektöründe Terminol-66 için giren veya çıkan ekserji değeri verilen eşitlik ile hesaplanır:

$$\dot{E}x_{HTF-g} = \acute{m}_{HTF}\, C_{P-HTF} \left[\left(T_{HTF-g} - T_0\right) - T_0 \ln\left(\frac{T_{HTF-g}}{T_0}\right)\right] \quad (7.55)$$

$\acute{m}_{HTF}$: Kolektörde dolaşan HTF debisi

C_{P-HTF} : HTF özgül ısısı

T_{HTF-g}: Kolektöre giren HTF sıcaklığı (K)

T_0: Çevre sıcaklığı (K)

Güneş oluk kolektörüne gelen güneş ışınımı için ekserji değeri verilen eşitlik ile hesaplanır:

$$\dot{E}x_{güneş} = I_{güneş}\, A \left[1 + \frac{1}{3}\left(\frac{T_{çevre}}{T_{güneş}}\right)^4 - \frac{4}{3}\left(\frac{T_{çevre}}{T_{güneş}}\right)\right] \quad (7.56)$$

α : Kolektör camı geçirgenliği

$I_{güneş}$: Güneş ışınımı

A: Kolektör yüzey alanı

T_0: Çevre sıcaklığı (K)

$T_{güneş}$: Güneşim yüzey sıcaklığı (K)

Oluk kolektörünün ekserji kaybı, taşınım ve ışınım kayıplar yoluyla olduğundan, bu iki ekserjinin toplamı ile hesaplanır ve Eş. 7-48 esas alınır:

$$\dot{E}x_{kayıp} = \dot{E}x_{taşınım-kayıp} + \dot{E}x_{ışınım-kayıp} \quad (7.57)$$

$$\dot{E}x_{taşınım-kayıp} = \dot{Q}_{taşınım}(1 - \frac{T_0}{T_{ort}}))$$

$$\dot{E}x_{ışınım-kayıp} = \dot{Q}_{ışınım}(1 - \frac{T_0}{T_{ort}})$$

T_{ort} (K), hava ve kolektör yüzey sıcaklıklarının ortalaması alınır:

$$T_{ort} = (\frac{T_0 + T_{yüzey}}{2}) \quad (7.58)$$

$$\dot{E}x_{toplam-kayıp} = \dot{Q}_{taşınım}\left(1 - \frac{T_0}{T_{ort}}\right) + \dot{Q}_{ışınım}(1 - \frac{T_0}{T_{ort}})$$

Oluk kolektörünün ekserji yıkımı ise, Eş. 7.54 ekserji denge eşitliği ile hesaplanır.

$$\dot{E}x_{yıkım} = \dot{E}x_{T66-g} + \dot{E}x_{güneş-g} - \dot{E}x_{T66-ç} - \dot{E}x_{kayıp}$$

II. Yasa için verim

Sürekli akışlı düzeneklerin II. Yasa verimliliği

$$\eta = \frac{elde\ edilen\ ekserji}{sağlanan\ ekserji} = 1 - \frac{ekserji\ yok\ oluşu}{sağlanan\ ekserji} \quad (7.59)$$

Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri göz ardı edilen adyabatik türbin için verim [170]:

$$\eta_{türbin} = \frac{W_ç}{\psi_1 - \psi_2} = \frac{h_1 - h_2}{\psi_1 - \psi_2} = \frac{W_ç}{W_{tr,ç}} = 1 - \frac{T_0 S_{üretim}}{(\psi_1 - \psi_2)} \quad (7.60)$$

Akışkanların karışmadığı iki akışlı adyabatik ısı değiştiricisi için verim [170]:

$$\eta_{ısı\ değiş} = \frac{\dot{m}_{soğuk}\,(\psi_4 - \psi_3)}{\dot{m}_{sıcak}\,(\psi_1 - \psi_2)} = 1 - \frac{T_0 S_{üretim}}{\dot{m}_{sıcak}\,(\psi_1 - \psi_2)} \quad (7.61)$$

Oluk kolektörünün ekserji verimi

$$\psi = \frac{\Delta \dot{E}x_{T66}}{\dot{E}x_{güneş-g}} * 100 = \frac{\dot{E}x_{T66-ç} - \dot{E}x_{T66-g}}{\dot{E}x_{güneş-g}} * 100 \quad (7.62)$$

Ekserji kayıp oranı

Sistemde her bir bileşen için ekserji kayıp oranı hesaplaması için tüm sistemdeki ekserji kaybı bulunur ve bileşenin ekserji kaybı bu değer ile oranlanır.

$$\text{Bir bileşendeki ekserji kayıp oranı} = \frac{\text{Bir bileşendeki ekserji kaybı}}{\text{tüm sistemdeki ekserji kaybı}} \quad (7.63)$$

Ekserji kayıp katsayısı

Sistemde her bir bileşen için ekserji kayıp katsayısı hesaplaması için, sisteme yakıt vasıtasıyla giren ekserjiye oranlama yoluyla elde edilir.

Önerilen sistemde nükleer reaktörden ve oluk kolektöründen sağlanan ekserji değerinin toplanması ile elde edilen toplam sistem ekserjisi bulunur ve bileşenin ekserji kaybı bu değere oranlanır.

$$\text{Ekserji kayıp katsayısı} = \frac{\text{Bir bileşendeki ekserji kaybı}}{\text{tüm sistemde yakıtla giren toplam ekserji}} \quad (7.64)$$

Birim ekserji tüketimi

Sistemde her bir bileşen için giriş ve çıkış ekserji değerleri hesaplandıktan sonra, giriş ekserji değerinin çıkış ekserji değerine oranlaması ile elde edilen değerdir.

$$\text{Bileşen ekserji tüketimi} = \frac{\text{Bileşenin giriş ekserjisi}}{\text{Bileşenin çıkış ekserjisi}} \quad (7.65)$$

7.4. Rüzgar Enerjisi Kapasite Faktörü

Önerilen sistemin iç enerji tüketimini karşılamak üzere rüzgar enerjisinden yararlanıldı. Önerilen NYHES iç enerji tüketimi %8 kabul edildiği için, geliştirilen HTR-PM tasarımı 211 MWe kapasiteye sahip olduğundan, tesisin iç enerji tüketiminin yaklaşık 17 MWe olduğu kabul edildi. Bu ihtiyacı karşılamak üzere kaç adet rüzgar türbini gerektiğinin analizi için Türkiye rüzgar kapasite faktörü esas alındı.

Türkiye rüzgar kapasite faktörü, TEİAŞ tarafından hazırlanan iki rapor temel alınarak hesaplandı; "Türkiye'nin Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretiminin Birincil Enerji Kaynaklarına Göre Yıllık Dağılımı (2023)" ve "2023 Kurulu Kapasitesinin Birincil Enerji Kaynaklarına Göre Dağılımı". TEİAŞ tarafından hazırlanan ilk rapora göre, 2023 yılında Türkiye'deki "rüzgar" üretimi 34.109,05 GWh'tir. Ancak ikinci rapora göre 2023 yılında Türkiye'deki toplam rüzgâr kurulu gücü 11.806,1 MW'tır. Rüzgar türbinleri tüm yıl boyunca 8760 saat çalışabildiği için toplam çalışma süresi hesabı:

8760 h x 11806,1MW = 103421.436 MWh

2023 yılı rüzgar enerjisinden gerçekleşen üretim 34109,05 GWh olduğundan;

Kapasite faktörü = $\frac{34109{,}050\ MWh}{103421{,}436\ \text{MWh}}$ X 100 = 32,98

sonucu elde edilir. Bu nedenle Türkiye için rüzgar kapasite faktörü %33 kabul edildi.

Rüzgarın iç enerji ihtiyacını karşılamasından sonra elde edilen fazla üretim, hidrojen üretimi için kullanıldı Hidrojen üretimi için elektroliz yöntemi esas alındı ve Bölüm 3.7.'de açıklandığı üzere elektroliz yöntemlerinden "Proton Değişim Membranlı (PEM) elektrolizi" yöntemi ile önerilen sistemde hidrojen üretimi gerçekleştirildi.

7.5. Hidrojen Üretimi

Önerilen sistemde, sistemin iç enerji tüketimi rüzgar enerjisinden karşılanacaktır. Rüzgarın tam kapasite olduğu zamanlarda hidrojen üretimi yapılması tasarlandı. Hidrojen üretiminde

PEM elektroliz yöntemi tercih edildi. Elektroliz sisteminde suyun ayrıştırılması sürecinde bir miktar enerjiye ihtiyaç vardır. Bu enerji miktarının minimum değeri, "Gibbs Serbest Enerji (ΔG)" eşitliği ile hesaplanmaktadır [173].

$$\Delta G = n\,F\,E_{tersinir-V} \tag{7.66}$$

n: Reaksiyona katılan elektron sayısı

F: Faraday sabiti (96500 C/mol) 1 mol elektronu taşıyan yük miktarı

$E_{tersinir-V}$: Tersinir voltaj

Burada yer alan tersinir voltaj, geri döndürülebilir voltaj olarak bilinir ve reaksiyonun tersine çevrilmesi için gereken değeri gösterir. Bu değer, sistemde enerji kaybının olmadığı ideal olan değerdir. Gerçekte ise sistemde kayıplar olacağından bu voltaj değeri, daha yüksek olmaktadır. Yukarıdaki eşitlikten $E_{tersinir\text{-}V}$ [173]:

$$E_{tersinir-V} = \frac{\Delta G}{nF} = 1{,}23\ V$$

Suyun oksijen ve hidrojene ayrışması sürecinde, termodinamik açıdan bir miktar entropi üretileceğinden ΔG yerine ΔH ifadesinin kullanılması yaklaşımı izlenir. Normal şartlar altında, entalpi değişimi (ΔH) ve Gibbs Serbest Enerjisi değişimi (ΔG) aşağıdaki gibidir:

ΔH = 285,84 kJ/mol

ΔG = 237,22 kJ/mol

Bu durumda, suyun elektrolizi için gerekli minimum enerji miktarının (V_{TN}), ΔS; entropi değişimi ve T sıcaklık olmak üzere verilen eşitlik ile hesaplanır [173]:

$$V_{T-N} = \frac{\Delta H}{nF} = \frac{\Delta G}{nF} + \frac{T\,\Delta S}{nF} = 1{,}48\ V$$

V_{TN}: Termo-nötral[10] voltaj

[10] Termo-nötral: Bir sistemin kimyasal veya fiziksel bir işlem sırasında ne ısı yaydığı ne de ısıya ihtiyaç

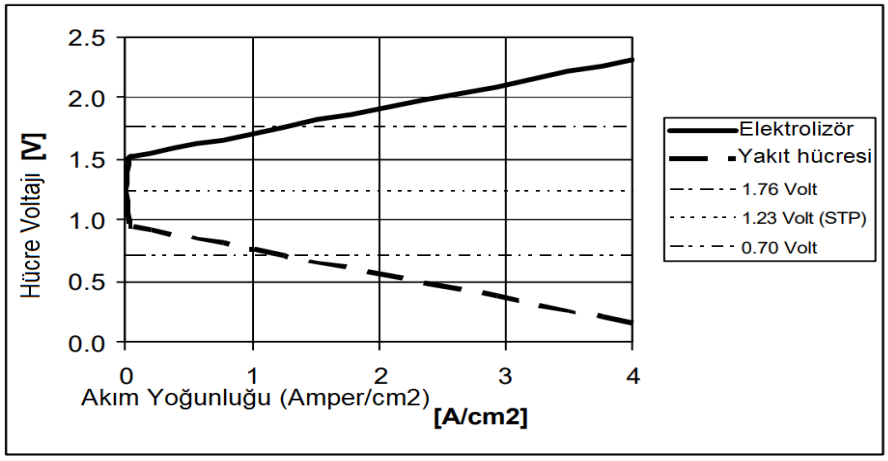
Elektroliz verimliliği, hidrojenin yüksek ısıtma değeri kullanılarak verilen eşitlik ile hesaplanır [173].

$$\eta = \frac{V_{TN}}{V_{hücre}} \tag{7.67}$$

$V_{hücre}$ Elektroliz hücresinin gerçek voltajı

Bir PEM elektrolizörünün verimliliği, akım yoğunluğu ile hesaplanabilir. Çalışma voltajı, düşük akım yoğunluklarında, daha düşük olduğundan, elektrolizörün verimliliği artar. Ticari elektrolizörlerden bazılarının çalışma akım yoğunluğu, yüksek verimlilik ve düşük soğutma gereksinimi sağlamak amacıyla 1 A/cm²'nin altında tutulmaktadır [173]:

Elektrolizör veya yakıt pilinin hiçbir yük taşımazken, yani elektrik akışının olmadığı durumunda çalıştığı koşul olan açık devre koşullarında, elektro-kimyasal potansiyeli diğer bir deyişle elektroliz veya yakıt pili reaksiyonlarının başlaması için gereken voltaj seviyesi 20°C'de 1,23 Volt'tur [174]



Şekil 7.4. Bir elektroliz veya yakıt hücresinin voltaj-akım yapısı [174]

Hidrojen üretiminde elektrolizin ihtiyaç duyduğu enerji miktarı için yapılan araştırmada sonucunda, ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı tarafından hazırlanan bir raporda, verimliliği de dikkate alarak yenilenebilir olan ve olmayan enerji kaynakları ile 1 kg hidrojen

---

duyduğu denge durumunu ifade eder. Reaksiyon sırasında sistemin enerjisi değişmez, sistem çevreye ısı salmaz veya çevreden ısı almaz. Bu durumda entropi de değişmez.

üretimi için gerekli olan enerji miktarı belirlenmiş ve Çizelge 7.1'de gösterilmiştir [175]. Çizelge7.1'de görüleceği üzere, rüzgar, güneş, su ve jeotermal için düşük sıcaklık elektroliz yöntemiyle ve yaklaşık %65 verim ile gerekli olan enerji miktarı 51,3 kWh verilmiştir. Yapılan literatür araştırmasında da 1 kg hidrojen üretmek için %100 verimli bir elektrolizde 39,4 kWh enerjiye ihtiyaç olduğu ancak verim dikkate alındığında yaklaşık 50 kWh enerjiye ihtiyaç olduğu benimsenmiştir. Önerilen sistemde yüksek sıcaklık PEM elektroliz yöntemi tercih edildi. Ticari olarak piyasada yer alan PEM elektroliz markaları ise elektrolize verilen su miktarına bağlı olarak tüketimi geniş bir aralıkta tutmuştur. Bu nedenle analizlerde enerji tüketimi 50 kWh olarak kabul yapıldı.

Çizelge 7.1. Yenilenebilir olan ve olmayan enerji kaynakları ile 1 kg hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı [175]

KAYNAK	YÖNTEM	1 kg H_2 üretmek için gereken miktar		Verim (Eç/Eg AID)
Doğal gaz	Buhar metan reformu	167 scf*	165 MJ	%73
Kömür	K. Gazlaştırma	8,6 kg	225 MJ	%53,3
Nükleer	Yüksek sıcaklık elektroliz	4,62×10-5 kg Uranyum	240 MJ	%50,2
Biokütle	B Gazlaştırma	13 kg kuru biokütle	242 MJ	%48,3
Bio metan	Buhar metan reformu	3,29 kg metan	165 MJ	%73
Rüzgar Güneş Su Jeotermal	Düşük sıcaklık elektroliz	51,3 kWh	185 MJ	%64,9
* scf: Standart metreküp feet (Standard Cubic Feet) (1 atm basınç ve 60°F (yaklaşık 15,6°C) koşullarında ölçülen doğalgaz				

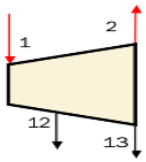
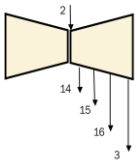
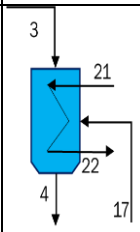
8. ANALİZLER VE SONUÇLARI

Mevcut HTR-PM ve önerilen NYHES, EES ve SAM uygulamaları ile simüle edildikten sonra Termodinamik I. ve II. Yasa çerçevesinde analiz edilmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Önerilen NYHES iç enerji ihtiyacını karşılamak üzere rüzgar enerjisinden yararlanılmış ve kapasite faktörüne göre üretim gerçekleştirilmiştir. Rüzgar enerjisinin kapasite faktörüne bağlı olarak elde edilen fazla üretimi, H_2 üretiminde değerlendirilmiştir. Termodinamik analizler için gerekli olan veriler, farklı bilimsel makaleler ve farklı kurum ve kuruluşlardan elde edilen santral bilgilerinin yanı sıra kamuya açık bilgilerden yararlanılarak sağlanmıştır. Sıcaklık ve basınç gibi tam olarak bilinmeyen veya elde edilemeyen veriler, EES ile parametrik olarak hesaplanmış veya kabul yapılmıştır.

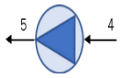
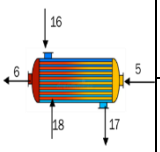
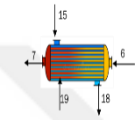
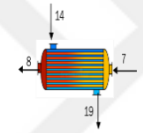
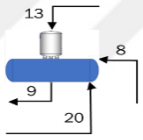
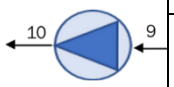
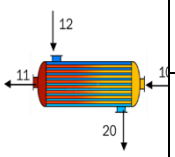
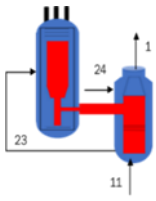
8.1. SMR (HTR-PM) Sistemin Kütle ve Enerji Dengesi

HTR-PM ana ekipman için Termodinamik I. Yasa çerçevesinde oluşturulan kütle ve enerji denge analizi, Çizelge 8.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 8.1. HTR-PM sistemi ekipman kütle ve enerji denge eşitliği

EKİPMAN	HAT NO	KÜTLE VE ENERJİ EŞİTSİZLİKLERİ
Yüksek Basınç Türbini (YBT)		$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_{12} + \dot{m}_{13}$
		$\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_{12} h_{12} + \dot{m}_{13} h_{13} + \dot{W}_{YBT}$
Alçak Basınç Türbini (ABT)		$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_{14} + \dot{m}_{15} + \dot{m}_{16}$
		$\dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{14} h_{14} + \dot{m}_{15} h_{15} + \dot{m}_{16} h_{16} + \dot{W}_{ABT}$
Yoğuşturucu		$\dot{m}_3 + \dot{m}_{17} = \dot{m}_4 \quad \dot{m}_{21} = \dot{m}_{22}$
		$\dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{17} h_{17} + \dot{m}_{21} h_{21} = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_{22} h_{22} + \dot{Q}_{ygs}$

Çizelge 8.1. (devam) HTR-PM sistemi ekipman kütle ve enerji denge eşitliği

EKİPMAN	HAT NO	KÜTLE VE ENERJİ EŞİTSİZLİKLERİ
Pompa-1		$\dot{m}_4 = \dot{m}_5$ $\dot{m}_4 h_4 + \dot{W}_{P1} = \dot{m}_5 h_5$
Isı Değiştirici-1		$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 \qquad \dot{m}_{16} + \dot{m}_{18} = \dot{m}_{17}$ $\dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_{16} h_{16} + \dot{m}_{18} h_{18} = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{17} h_{17} + \dot{Q}_{ID-1}$
Isı Değiştirici-2		$\dot{m}_6 = \dot{m}_7 \qquad \dot{m}_{15} + \dot{m}_{19} = \dot{m}_{18}$ $\dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{15} h_{15} + \dot{m}_{19} h_{19} = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{18} h_{18} + \dot{Q}_{ID-2}$
Isı Değiştirici-3		$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 \qquad \dot{m}_{14} = \dot{m}_{19}$ $\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{14} h_{14} = \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{19} h_{19} + \dot{Q}_{ID-3}$
Degazör		$\dot{m}_8 + \dot{m}_{13} + \dot{m}_{20} = \dot{m}_9$ $\dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{13} h_{13} + \dot{m}_{20} h_{20} = \dot{m}_9 h_9 + \dot{Q}_{DEG}$
Pompa-2 (Besleme-suyu Pompası)		$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$ $\dot{m}_9 h_9 + \dot{W}_{P2} = \dot{m}_{10} h_{10}$
Isı Değiştirici-4		$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} \qquad \dot{m}_{12} = \dot{m}_{20}$ $\dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{12} h_{12} = \dot{m}_{11} h_{11} + \dot{m}_{20} h_{20} + \dot{Q}_{ID-4}$
Reaktör Buhar Üreteci*		$\frac{\dot{m}_{11}}{2} = \frac{\dot{m}_1}{2} \qquad \dot{m}_{H23} = \dot{m}_{H24}$ $\frac{\dot{m}_{11} h_{11}}{2} + \dot{m}_{H24} h_{24} = \frac{\dot{m}_1 h_1}{2} + \dot{m}_{H23} h_{23} + \dot{Q}_{BU}$
*Şekil 6.1'de görülen 11 nolu hat, iki ayrı buhar üreteci için iki dala ayrılır ve çıkışta 1 nolu hat olarak tekrar birleşir.		

Mevcut sistem analizi için HTR-PM sisteminin kütle ve enerji dengesi, Çizelge 8.1'de belirtilen eşitlikler çerçevesinde, EES vasıtasıyla hesaplandı. Termodinamik hesaplamalar için ihtiyaç duyulan entalpi ve entropi değerlerini, sistemdeki ilgili noktanın sıcaklık-basınç veya kuruluk değerlerini dikkate alarak EES ile hesaplandı.

Sistemde elde edilen iş, pompa enerji ihtiyacı ve ısı kayıp değerleri, Çizelge 8.2'e aktarıldı. Elde edilen kütle ve enerji denge değerleri Çizelge 8.3'e aktarıldı.

Çizelge 8.2. Mevcut HTR-PM sistemin elde edilen enerji ve ısı kayıpları

Bileşen		Değeri	
YB Türbin	$\dot{W}_{YBT}$	4,378E+08	[kJ/h]
AB Türbini	$\dot{W}_{ABT}$	2,904E+08	[kJ/h]
Yoğuşturucu	$\dot{Q}_{YGS}$	3,335E+08	[kJ/h]
Pompa-1	$\dot{W}_{P1}$	696016	[kJ/h]
Isı Değiştiricisi-1	$\dot{Q}_{ID-1}$	5,566E+06	[kJ/h]
Isı Değiştiricisi-2	$\dot{Q}_{ID-2}$	4,861E+06	[kJ/h]
Isı Değiştiricisi-3	$\dot{Q}_{ID-3}$	103517	[kJ/h]
Degazör	$\dot{Q}_{DEG}$	7,024E+06	[kJ/h]
Pompa-2	$\dot{W}_{P2}$	1,163E+07	[kJ/h]
Isı Değiştiricisi-4	$\dot{Q}_{ID-4}$	3,232E+06	[kJ/h]
Buhar Üreteci	$\dot{Q}_{BU}$	1,300E+07	[kJ/h]

Elde edilen sonuçlar ile ısı değiştiricileri için gerekli olan ısı ihtiyacı hesaplandı ve SAM uygulamasına veri olarak aktarıldı. Mevcut HTR-PM sisteminin kütle ve enerji dengesi sağlandıktan sonra ekserji analizi gerçekleştirildi.

Çizelge 8.3. HTR-PM için kütle ve enerji değerleri

Hat No	Faz Durumu	Debi	Enerji
		ṁ (kg/s)	kW (kJ/s)
1	Buhar	186,39	654 411,39
2	Buhar	161,97	461 296,10
3	Buhar	131,22	300 882,36
4	Sıvı	161,97	21 250,72
5	Sıvı	161,97	21 445,09
6	Sıvı	161,97	34 694,39
7	Sıvı	161,97	63 590,19
8	Sıvı	161,97	91 352,18
9	Sıvı	186,39	133 063,03
10	Sıvı	186,39	136 306,19
11	Sıvı	186,39	163 164,83
12	Buhar	12,30	36 954,21
13	Buhar	12,12	34 480,08
14	Buhar	13,05	35 305,78
15	Buhar	13,05	33 205,18
16	Buhar	4,66	11 211,29
17	Sıvı	30,75	6 888,93
18	Sıvı	26,09	10 476,92
19	Sıvı	13,05	7 519,11
20	Sıvı	12,30	9 185,65
21	Sıvı	7697,61	806 709,64
22	Sıvı	7697,61	1 000 689,44
23	Gaz	96	112 128,00
24	Gaz	96	361 344,00

Mevcut sistem verimi

Bölüm 7.2'de açıklandığı üzere Eş. 7-22 ve Eş. 7-21 ile verim hesaplandı:

$$\dot{W}_{türbın} = \dot{W}_{YBT} + \dot{W}_{ABT}$$

$$\dot{W}_{türbın} = 121\,681 + 80\,691{,}48 = 202\,372{,}48 \text{ kJ/s} = 202{,}4 \text{ MW}$$

Sistem verimliliği

$$\eta_S = \frac{W_{net}}{Q_{giriş}} = \frac{\dot{W}_{türbın} - \dot{W}_{pompa}}{\dot{Q}_{HTR-PM}} \qquad \eta_S = \frac{202{,}4 - 3{,}24}{654{,}412}$$

$$\eta_S = \%30{,}4$$

YB Türbini izantropik verimi (Eş. 7-23):

$$\eta_{YBT} = \frac{W_a}{W_s} = \frac{h_1 - h_{2a-gerçek}}{h_1 - h_{2s-ideal}}$$

h_1 ile h_2 noktasının izentropik durum gereği entropileri eşittir ($s_1 = s_2$) ve ideal s noktası ile a gerçek noktasının basınçları eşittir. P2a =P2s Bu iki değer kullanılarak EES vasıtasıyla 2s noktasının entalpisi bulundu ve izantropik verim her iki türbin için hesaplandı.

YB Türbini izantropik verimi: $\eta_{YBT} = \%87{,}9$

$$\eta_{ABT} = \frac{W_a}{W_s} = \frac{h_2 - h_{3a-gerçek}}{h_2 - h_{3s-ideal}}$$

AB Türbini izantropik verimi: $\eta_{ABT} = \%71{,}8$

Ana pompa için izantropik verim (Eş. 7-24)

$s_9 = s_{10}$ ve $P_{10a} = P_{10s}$ verileri ile 10 nolu ideal durumun entalpisi EES ile bulundu ve eşitlikte

yerine yazılmasıyla pompanın izantropik verimi elde edildi.

Ana pompa izantropik verimi: $\eta_{ana-pompa} = \%74{,}23$

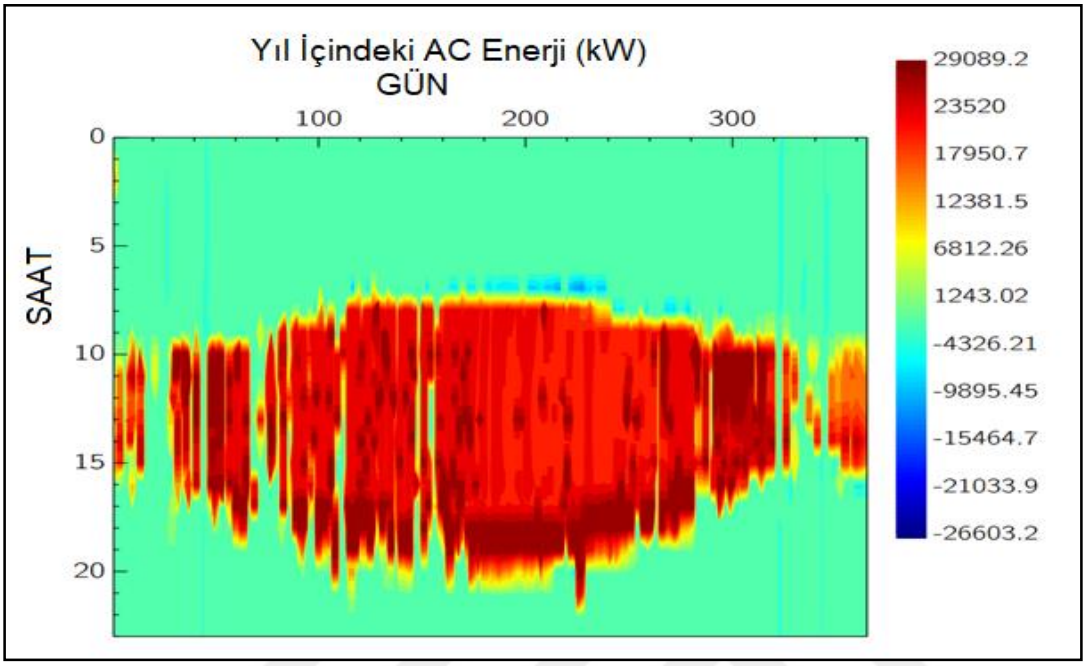
8.2. Önerilen NYHES SAM Simülasyonu

Önerilen NYHES sistemi için, Bölüm 6.4.1'de açıklandığı üzere Çanakkale Ayvacık sahası belirlendi. Bölüm 7.4'de açıklandığı gibi NREL güneş radyasyon veri tabanından [162] sahaya ait elde edilen hava durumu verileri SAM uygulamasına yüklendi. SAM analizinde, birinci ve ikinci bölüm kolektör için ayrı ayrı simülasyon ve analiz yapıldı. Birinci bölüm kolektör analizi için gerekli ısı değeri, Şekil 6.1'de yer alan SMR sistemindeki degazör öncesi üç ısı değiştiricisine 14-15-16 nolu hatlardan sağlanan toplam ısı ile bulundu. Elde edilen değerlere göre ısı değiştirici 1-2-3 için toplam 72 833,3 kJ/s ısıya ihtiyaç olduğu hesaplandı. Termal enerji değerini SAM uygulamasına MWe şeklinde yazmak için Bölüm 7.4'te yer alan "SAM sistem tasarımı" başlığında açıklandığı gibi 1/3 oranı, 24 277,76 kJ/s olarak hesaplandı. Birinci oluk kolektör sisteminden gerekli ısı ihtiyacı hesaplama 25 MWe olarak alındı.

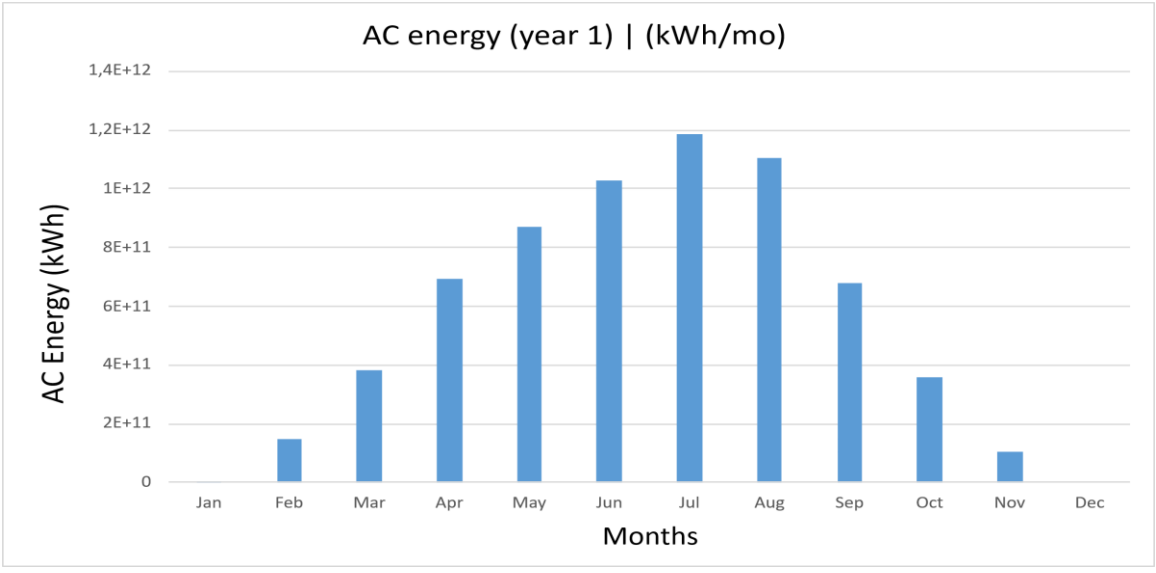
SAM analizinde, Bölüm 7.4.'te açıklandığı gibi, alıcı tüp olarak Schott PTR70 2008, kolektör olarak Siemens SunField 6, ısı aktarma akışkanı olarak Terminol-66 seçimleri yapıldıktan sonra sistem simule edildi. Simülasyon için uygulama çalıştırıldığında, herhangi bir hata alınmadı. Uygulamasının "kolektör alanı" bölümünde seçilen -3/345 °C çalışma sıcaklık aralığına sahip Terminol-66'nın 280-340 °C çalışma değerleri çerçevesinde, 48 adet kolektör döngüsüne ihtiyaç olduğu belirlenmiştir.

İkinci kolektör analizi için gerekli ısı değeri; Şekil 6.1'de yer alan SMR sistemindeki degazör sonrasındaki ısı değiştiricisine 12 nolu hattan sağlanan ısı değeri baz alındı İkinci oluk kolektör için gerekli olan ısı ihtiyacı 27.768,5 kJ/s olarak hesaplandı. Yine aynı şekilde MWe cinsinden yazmak üzere 1/3 oranı alındığında yaklaşık 9256 kJ/s ısı kullanıldığı belirlendiğinden yaklaşık 10 000 kJ/s (10 MWe) talep ihtiyacı olarak SAM uygulamasına yazıldı. Alıcı tüp, kolektör ve HTF seçimleri birinci kollektör ile aynı olmak üzere sistem simüle edildi. Hata alınmayan simülasyon sonucunda, 20 adet kolektöre döngüsüne ihtiyaç olduğu hesaplandı.

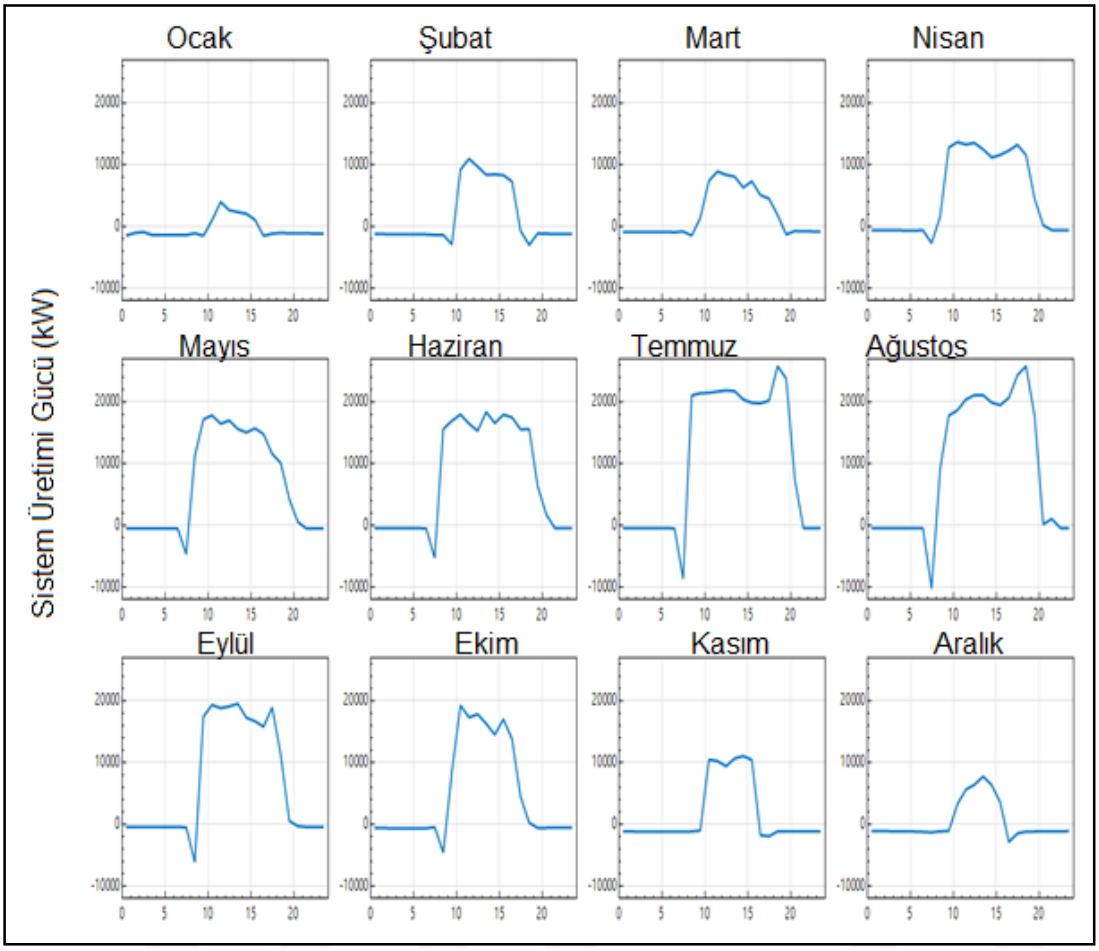
SAM uygulamasının simüle edilmesi sonucunda oluk kolektörden elde edilen enerji ile ilgili değerler Şekil 8.1, Şekil 8.2 ve Şekil 8.3'te gösterilmiştir.



Şekil 8.1. Önerilen NYHES için SAM simülasyonundan elde edilen yıllık AC enerji miktarı



Şekil 8.2. Önerilen NYHES için SAM simülasyonundan elde edilen AC enerjinin aylara göre dağılımı



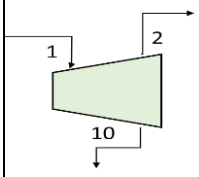
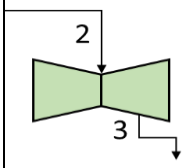
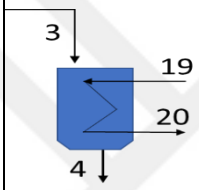
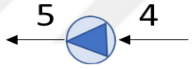
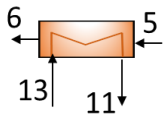
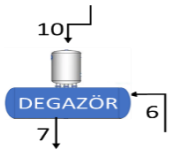
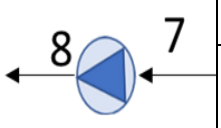
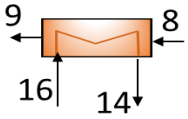
Şekil 8.3. Önerilen NYHES için SAM simülasyonundan elde edilen üretilen enerji (kW) ay-saat

8.3. Önerilen NYHES Kütle-Enerji Dengesi

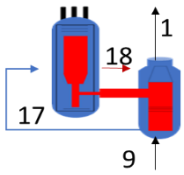
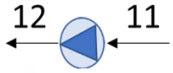
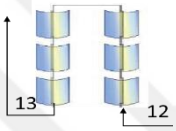
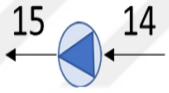
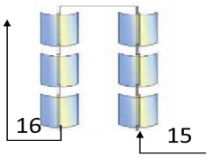
Bu tez kapsamında önerilen ve Şekil 6.2'de gösterilen numaralandırmaya göre, NYHES ekipmanın Termodinamik I. Yasa analizi, Çizelge 8.4'te gösterilen eşitlikler ile yürütüldü.

EES ana ekranına, sistemdeki tüm noktaların basınç, sıcaklık vb. gerekli olan değerleri mevcut HTR-PM sistem hesaplamasında olduğu gibi her bir hattaki akışkan cinsine göre fonksiyon seçimi yapılarak yazıldı.

Çizelge 8.4. Önerilen NYHES sistemi ekipman kütle ve enerji denge eşitliği

EKİPMAN	HAT NO	KÜTLE VE ENERJİ EŞİTSİZLİKLERİ
Yüksek Basınç Türbini (YBT)		$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_{10}$ $\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_{10} h_{10} + \dot{W}_{YBT-y}$
Alçak Basınç Türbini (ABT)		$\dot{m}_2 = \dot{m}_3$ $\dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{W}_{ABT-y}$
Yoğuşturucu		$\dot{m}_3 = \dot{m}_4$ $\dot{m}_{19} = \dot{m}_{20}$ $\dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{19} h_{19} = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_{20} h_{20} + \dot{Q}_{ygs-y}$
Pompa-1		$\dot{m}_4 = \dot{m}_5$ $\dot{m}_4 h_4 + \dot{W}_{P1-y} = \dot{m}_5 h_5$
Isı Değiştirici-1		$\dot{m}_5 = \dot{m}_6$ $\dot{m}_{13} = \dot{m}_{11}$ $\dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_{13} h_{13} = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{11} h_{11} + \dot{Q}_{ID1-y}$
Degazör		$\dot{m}_6 + \dot{m}_{10} = \dot{m}_7$ $\dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{10} h_{10} = \dot{m}_7 h_7 + \dot{Q}_{DEG-y}$
Pompa-2		$\dot{m}_7 = \dot{m}_8$ $\dot{m}_7 h_7 + \dot{W}_{P2-y} = \dot{m}_8 h_8$
Isı Değiştirici-2		$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 \qquad \dot{m}_{14} = \dot{m}_{16}$ $\dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{16} h_{16} = \dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{14} h_{14} + \dot{Q}_{ID2-y}$

Çizelge 8.4. (devam) Önerilen NYHES sistemi ekipman kütle ve enerji denge eşitliği

EKİPMAN	HAT NO	KÜTLE VE ENERJİ EŞİTSİZLİKLERİ
Reaktör Buhar Üreteci**		$\frac{\dot{m}_9}{2} = \frac{\dot{m}_1}{2}$ $\dot{m}_{H17} = \dot{m}_{H18}$
		$\frac{\dot{m}_9 h_9}{2} + \dot{m}_{H18} h_{H18} = \frac{\dot{m}_1 h_1}{2} + \dot{m}_{H17} h_{H17} + \dot{Q}_{BÜ-y}$
Kolektör Pompa-1		$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12}$
		$\dot{m}_{11} h_{11} + \dot{W}_{P3-y} = \dot{m}_{12} h_{12}$
Kolektör-1		$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13}$
		$\dot{m}_{12} h_{12} + \dot{Q}_{KOL1} = \dot{m}_{13} h_{13}$
Kolektör Pompa 2		$\dot{m}_{14} = \dot{m}_{15}$
		$\dot{m}_{14} h_{14} + \dot{W}_{P4-y} = \dot{m}_{15} h_{15}$
Kolektör-2		$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{16}$
		$\dot{m}_{15} h_{15} + \dot{Q}_{KOL2} = \dot{m}_{16} h_{16}$
**Şekil 6.2'de görülen "9" nolu hat, iki ayrı buhar üreteci için iki dala ayrılır ve çıkışta "1" nolu hat olarak tekrar birleşir.		

HTR-PM sisteminin güvenlik gereksinimi nedeniyle, buhar üreteci, türbin, yoğuşturucu, yoğuşturma pompası, degazör ve besleme suyu pompası gibi ana ekipmanın giriş ve çıkış değerleri değiştirilmeden mevcut sistem ile aynı alındı. EES, termodinamik hesaplamalar için ihtiyaç duyulan entalpi ve entropi değerlerini sistemdeki ilgili noktanın sıcaklık-basınç veya kuruluk değerlerini dikkate alarak kendi hesapladı. Kütle dengesi için Çizelge 8.4'te verilen eşitlikler ve ardından bilinen "ṁ" sayısal değerleri, EES ana ekranına yazıldı. EES çalıştırıldı ve hata alınmadı. EES ekranında, kütle eşitliklerinin devamına enerji eşitlikleri yazıldı ve tekrar uygulama çalıştırıldı. Hata alınmadan kütle ve enerji dengesi sağlandı. EES

çalıştırıldığında, sistemin tüm hat noktalarına ait kütle ve enerji dengesinin sağlanmasının yanı sıra oluşan ısı kayıpları ve türbin-pompa enerji değerleri de belirlendi. EES ile elde edilen ana bileşen enerji değerleri, Çizelge 8.5'te, kütle ve enerji değerleri, Çizelge 8.6'da ve bileşenlerin sistem olarak enerji giriş-çıkış değeri ile oluşan enerji kayıpları Çizelge 8.7'de gösterildi.

Çizelge 8.5. Önerilen sistemin (NYHES) EES sonuçları

Bileşen		Değeri	
YB Türbin	$\dot{W}_{yYBT}$	4,422E+08	[kJ/h]
AB Türbini	$\dot{W}_{yABT}$	3,504E+08	[kJ/h]
Yoğuşturucu	$\dot{Q}_{yYGS}$	6,484+08	[kJ/h]
Pompa-1	$\dot{W}_{yP1}$	1,244E+6	[kJ/h]
Isı Değiştiricisi-1	$\dot{Q}_{yID1}$	732013	[kJ/h]
Degazör	$\dot{Q}_{yDEG}$	1,003E+07	[kJ/h]
Pompa-2	$\dot{W}_{yP2}$	1,081E+07	[kJ/h]
Isı Değiştiricisi-2	$\dot{Q}_{yID2}$	1,569E+06	[kJ/h]
Buhar Üreteci	$\dot{Q}_{yBU}$	1,372E+07	[kJ/h]
Pompa-3	$\dot{W}_{yP3}$	1,973E+6	[kJ/h]
Kolektör-1	$\dot{Q}_{KOL-1}$	2,685E+08	[kJ/h]
Pompa-4	$\dot{W}_{yP4}$	548 999	[kJ/h]
Kolektör-2	$\dot{Q}_{KOL-2}$	1,001E+08	[kJ/h]

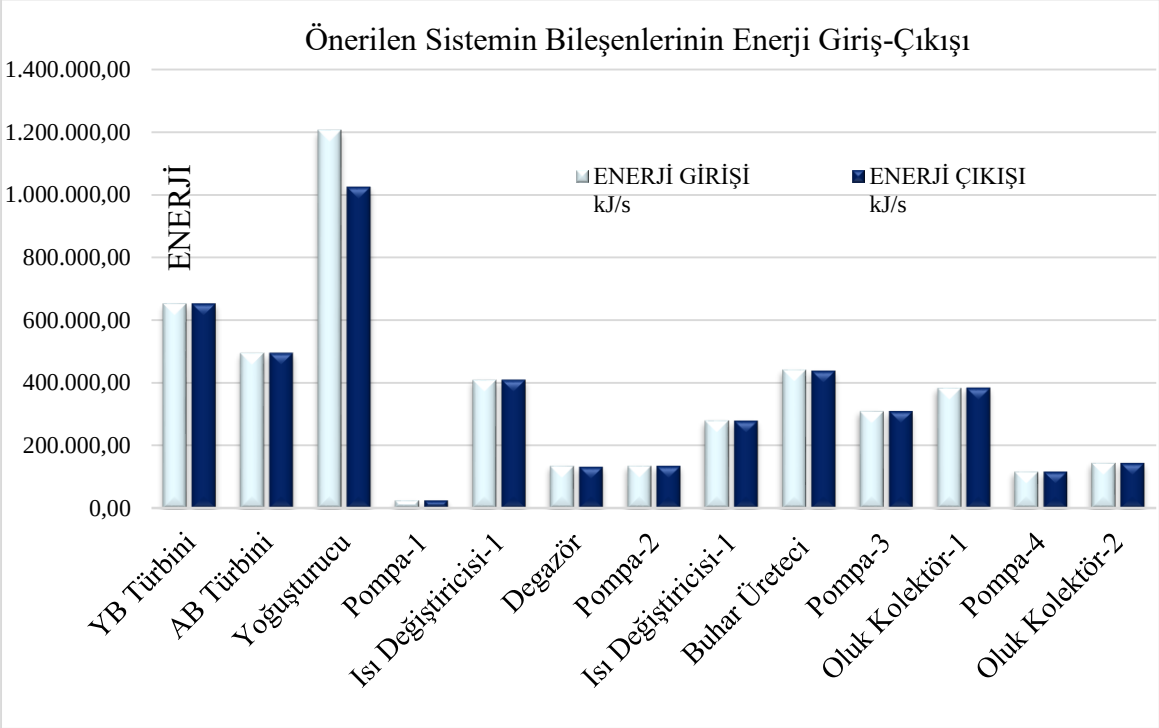
Çizelge 8.6. Önerilen NYHES için kütle ve enerji denge değerleri

Hat No	Faz Durumu	Debi (Kütle)	Enerji
		ṁ (kg/s)	kW (kJ/s)
1	Buhar (su)	186,4	654 411,39
2	Buhar (su)	174,3	497 028,34
3	Buhar (su)	174,3	399 609,39
4	Buhar (su)	174,3	25 635,65
5	Buhar (su)	174,3	25 966,77
6	Buhar (su)	174,3	100 886,99
7	Sıvı (su)	186,4	132 652,97
8	Sıvı (su)	186,4	135 653,83
9	Sıvı (su)	186,4	163 164,83
10	Sıvı (su)	12,12	34 552,77
11	Sıvı (Terminol-66))	538,9	310 130,56
12	Sıvı (Terminol-66))	538,9	310 669,44
13	Sıvı (Terminol-66))	538,9	385 251,67
14	Sıvı (Terminol-66))	202,8	116 901,39
15	Sıvı (Terminol-66))	202,8	117 043,33
16	Sıvı (Terminol-66))	202,8	144 844,17
17	Gaz (Helyum)	96	112 032,00
18	Gaz (Helyum)	96	361 440,00
19	Sıvı (su)	7697,6	806 709,64
20	Sıvı (su)	7697,6	1 000 689,44

Çizelge 8.7. Önerilen NYHES bileşenleri toplam enerji giriş-çıkış ile enerji kayıp değeri

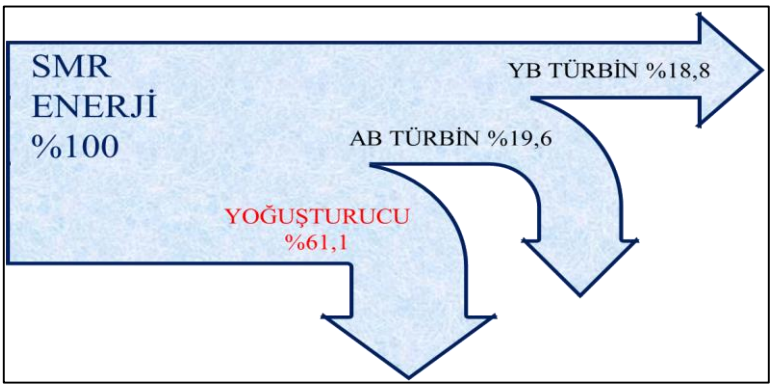
BİLEŞEN	ENERJİ GİRİŞİ kJ/s	ENERJİ ÇIKIŞI kJ/s	ENERJİ KAYBI kJ/s
YB Türbin	E1	E2, E10, W-YB	0,00
	654 411,39	654 411,39	
AB Türbin	E2	E3, W-AB	0,00
	497 028,34	497 028,34	
Yoğuşturucu	E3, E19	E4, E20	179.993,94
	1 206 319,03	1 026 325,09	
Pompa-1	E4, P1	E5	14,44
	25 981,20	25 966,77	
Isı Değiştiricisi -1	E5, E13	E6, E11	200,89
	411 218,43	411 017,55	
Degazör	E6, E10	E7	2.786,79
	135 439,77	132 652,97	
Pompa-2	E7, P2	E8	1,92
	135 655,75	135 653,83	
Isı Değiştiricisi -2	E8, E16	E9, E14	431,78
	280 498,00	280 066,22	
Buhar Üreteci	E9/2, E18	E1/2, E17	3.784,72
	443 022,42	439 237,69	
Pompa-3	E11, P3	E12	9,17
	310 678,61	310 669,44	
Oluk Kolektör -1	E12, Egüneş-1	E13	1,11
	385 252,78	385 251,67	
Pompa-4	E14, P4	E15	10,56
	117 053,89	117 043,33	
Oluk Kolektör-2	E15, Egüneş2	E16	4,72
	144 848,89	144 844,17	

Önerilen NYHES bileşenlerine ait toplam enerji giriş-çıkış değerleri, Şekil 8.4'te ve enerji kayıp değerleri ise Şekil 8.5'te yer almaktadır.



Şekil 8.4. Önerilen NYHES bileşenleri enerji değerleri

Önerilen NYHES içinde ısı kaynağı olan HTR-PM sisteminden elde edilen ısı %100 kabul edildiğinde, bu ısının %18,8'i YB türbini ve %19,6'sı AB türbini vasıtasıyla enerjiye dönüştürülmüştür. Geriye kalan ısı, yoğuşturucuda enerjiye dönüştürülemeden veya farklı bir şekilde kullanılamadan atık olarak kalmıştır. Önerilen NYHES'de SMR vasıtasıyla elde edilen ısının dağılımını gösteren sankey şekli, Şekil 8.5'de yer almaktadır.



Şekil 8.5. Önerilen NYHES'de SMR enerji üretiminin dağılımı

Önerilen NYHES verimi

Bölüm 7.2'te açıklandığı üzere Eş 7.21 ve Eş. 7.22 ile sistem verimliliği hesaplandı.

$\dot{W}_{türbın} = \dot{W}_{yYBT} + \dot{W}_{yABT}$ = 122 830,28 + 97 418,95

$\dot{W}_{türbın}$ = 220 249,23 kJ/s = 220,25 MW

$$\eta_S = \frac{W_{net}}{Q_{giriş}} = \frac{\dot{W}_{türbın} - \dot{W}_{pompa1-2-3-4}}{\dot{Q}_{HTR-PM} + \dot{Q}_{kol1} + \dot{Q}_{kol2}}$$

$$\eta_S = \frac{220\,249{,}23 - 4048{,}89}{(654\,411{,}39 - 163\,164{,}83) + (385\,251{,}67 - 310\,669{,}44) + (144\,844{,}17 - 117\,043{,}33)}$$

$\eta_S = \%36$

YB Türbini izantropik verimi, YB türbini giriş 1 nolu hat ile türbin çıkışı 2 nolu hat arasındaki basınç ve entropi değerleri ile elde edildi.

$$\eta_{YBT} = \frac{W_a}{W_s} = \frac{h_1 - h_{2a-gerçek}}{h_1 - h_{2s-ideal}}$$

$S_1 = S_2 = 6{,}648$ kJ/kg.K ve $P_{2s} = P_{2a}$ =780 kPa

YB türbin giriş-çıkış değerlerinde çok değişiklik olmadığından izantropik değer, mevcut önceki sistem ile hemen hemen aynı elde edildi.

$\eta_{YBT} = \%87{,}49$

AB Türbini izantropik verimi:

$S_2 = S_3 = 6{,}854$ kJ/kg.K ve $P3_s = P3_a$ = 4,5 kPa

$$\eta_{ABT} = \frac{h_2 - h_{3a-gerçek}}{h_2 - h_{3s-ideal}} = \%72{,}02$$

Pompa-1 (Yoğuşturma pompası) için

$$\eta_{P1} = \frac{h_{10s-ideal} - h_9}{h_{10a-gerçek} - h_9}$$

$S_4 = S_{5ideal} = 0{,}05065$ kJ/kg.K ve $P_{5ideal} = P_{5a} = 1750$ kPa

$$\eta_{pompa-1} = \frac{h_{5s-ideal} - h_4}{h_{5a-gerçek} - h_4}$$

$$\eta_{pompa-1} = \%88{,}47$$

Pompa-2 (besleme suyu pompası) için

$S_7 = S_8 = 2{,}023$ kJ/kg.K ve $P_{2s} = P_{2a} = 13\,370$ kPa

$$\eta_{ana-pompa} = \frac{h_{8s-ideal} - h_7}{h_{8a-gerçek} - h_7}$$

$$\eta_{ana-pompa} = \%80{,}48$$

<u>Güneş oluk kolektör verimi</u>

Güneş oluk kolektör verimi, güneşten elde edilen ısı, kolektörde yutulan ısı, alıcı boru içindeki akışkanın özellikleri çerçevesinde, Eş. 7-12, 7-13, 7-14 ve 7-15 ile elde edilen verilerle hesaplandı:

$$\dot{E}_{güneş} = I_{güneş} A = 5{,}776\ \text{m} * 95{,}2\ \text{m} * 200 * 886{,}84 \frac{\text{W}}{m^2}$$

$$\dot{E}_{güneş} = 97\,530.264{,}47\ \text{W} = 97\,530{,}26\ \frac{kJ}{s}$$

Kolektörün yansıtıcı yüzeylerinden alıcı borulara yansıyan güneş ışınımları, optik kayıplardan dolayı bir miktar azalır. Bu nedenle, yutulan enerji aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$\eta_{opt} = \alpha\tau\rho\gamma K(\theta) = 0{,}92x\ 1x1x1x0{,}95 = 0{,}874$$

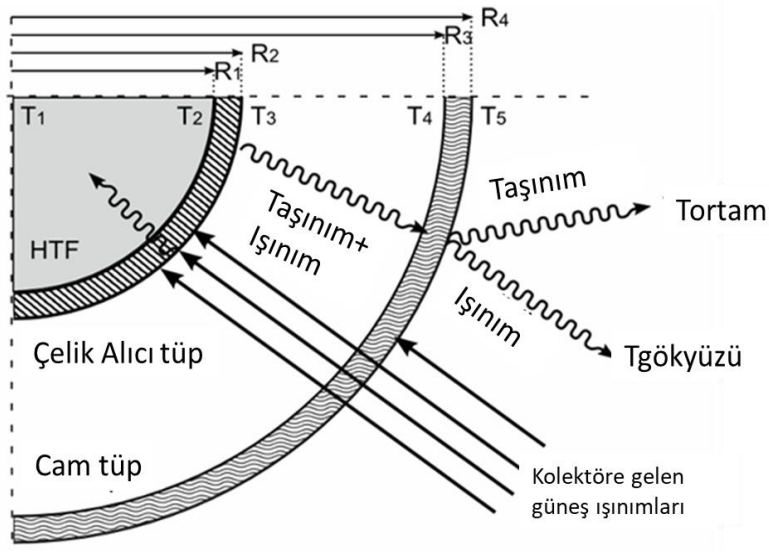
$$\dot{Q}_{yut} = \dot{E}_{güneş-g}\ .\ \eta_{opt} = 0{,}874 * 97\ 530\ 264{,}47\ \text{W}$$

$$\dot{Q}_{yut} = 85\ 241\ 451{,}15\ \text{W} = 85\ 241{,}45\ \frac{kJ}{s}$$

Bölüm 6.5.1'te açıklandığı üzere çelik bir tüp olan alıcı tüplerin çevresi vakumlu cam ile kaplıdır. Söz konusu vakumdan dolayı sadece ışınım yoluyla ısı geçişi gerçekleşir, taşınım ile ısı geçişi olmaz. Sürekli rejim için kolektör yüzeyinde oluşan toplam ısı geçişi, seçilen Schott PTR 70-2008 cam yüzeyinde oluşan ısı geçişine eşittir [176]. Bu ısı alışveriş sürecinde gerçekleşen ısı kaybı aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$\dot{Q}_{kayıp} = A_{boru} * h_{dış} * (T_{yüzey} - T_{ortam}) + \varepsilon_{boru} * \sigma * A_{boru}\left(T^4_{yüzey} - T^4_{gökyüzü}\right)$$

Önerilen NYHES içindeki oluk kolektör alıcısına gelen, yansıyan ve yutulan güneş ışınları ile oluşan sıcaklıklar, SAM teknik el kitabımdaki eşitlikler esas alınmış ve Şekil 8.6'de gösterilmektedir [164]



T2 = T1+2 °C
T3 = T2+5 °C
T4 = T3−0.8·(T3−Tort)
T5 = T4−2 °C
$T_1 = 335\ °C$
$T_2 = 337\ °C$
$T_3 = 343\ °C$
$T_4 = 88{,}6\ °C$
$T_5 = 86{,}6\ °C$

Şekil 8.6. Önerilen NYHES içindeki oluk kolektör alıcı çevresindeki sıcaklıklar [164]

$T_{ortam} = 25\ ^{o}C$ kabulü ile;

$T_{gökyüzü} = 0{,}0553\ T_{\text{ortam}}^{1{,}5}$

$T_{gökyüzü} = 0{,}0553 \text{ x } (25 + 273)^{1{,}5} = 284{,}5 \text{ K}$

Rüzgar hızı 2 m/s ve Schott PTR 70-2008 camın yayıcılığı 0,9 alındı [177].

$$h_{dış} = \frac{4 * V_{rüzgar}^{0,58}}{D_{cam-boru}^{0,42}} = \frac{4*2^{0,58}}{0{,}12^{0,42}} = 14{,}57\ \frac{\text{W}}{m^2\ \text{K}}$$

$$\dot{Q}_{kayıp} = A_{boru} * h_{dış} * (T_{yüzey} - T_{ortam}) + \varepsilon_{boru} * \sigma * A_{boru} \left(T_{yüzey}^4 - T_{gökyüzü}^4\right)$$

$$\dot{Q}_{kayıp} = (210 * 95{,}2\ \text{m} * \pi * 0{,}12\text{m}) * 14{,}57 * (359{,}6 - 298) + 0{,}9 * 5{,}67\ 10^{-8} \frac{\text{W}}{m^2K^4} * 210 * 95{,}2\ \text{m} * \pi * 0{,}12\text{m} * (359{,}6^4 - 284{,}5^4)\ K^4$$

$$\dot{Q}_{kayıp} = 10\ 162\ 236{,}57 \quad \text{W} = 10\ 162{,}23 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{Q}_{kol-1} = \dot{Q}_{yut} - \dot{Q}_{kayıp} = 85\ 241.451{,}15 \ \ W - 10\ 162\ 236{,}57 \quad \text{W}$$

$$\dot{Q}_{kol-1} = 75\ 079\ 214{,}58 \quad W = 75\ 079{,}93 \ \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

Kolektör -2 için aynı hesap yapıldı.

$$\dot{E}_{güneş} = I_{güneş} A = 5{,}776\ \text{m} * 95{,}2\ \text{m} * 80 * 886{,}84 \frac{\text{W}}{m^2}$$

$$\dot{\text{E}}_{güneş-2} = 39\ 012\ 105{,}8\ \text{W} = 39\ 012{,}1\ \frac{kJ}{s}$$

$$\dot{Q}_{yut-2} = \dot{\text{E}}_{güneş-2}\ .\ \eta_{opt} = 0{,}874 * 39\ 012\ 105{,}8\ \text{W}$$

$$\dot{Q}_{yut-2} = 34\ 096\ 580{,}4\ \text{W} = 34\ 096{,}6 \ \frac{kJ}{s}$$

$$\dot{Q}_{kayıp-2} = 80 * 95{,}2\ \text{m} * \pi * 0{,}12\text{m} * 14{,}57 * (359{,}6 - 298) + 0{,}9 * 5{,}67\ 10^{-8} \frac{\text{W}}{m^2K^4} * 80 * 95{,}2\ \text{m} * \pi * 0{,}12\text{m} * (359{,}6^4 - 284{,}5^4)\ K^4$$

$$\dot{Q}_{kayıp-2} = 4\ 064\ 894{,}63 \quad \text{W} = 4\ 064{,}89 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{Q}_{kol-2} = \dot{Q}_{yut-2} - \dot{Q}_{kayıp-2} = 34\ 096\ 580{,}4\ W - 4\ 064\ 894{,}63 \quad \text{W}$$

$$\dot{Q}_{kol-2} = 30\ 031\ 685{,}83 \quad W \ = \ 30\ 031{,}68 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

Birinci ve ikinci kolektör için verim

$$\eta_{kol-1} = \frac{\dot{Q}_{Kolektör}}{\dot{\text{E}}_{güneş1-g}}$$

$$\eta_{kol-1} = \frac{75\ 079\ 214{,}58 \quad W}{97\ 530\ 264{,}47 \quad W} = \%76{,}9$$

$$\eta_{kol-2} = \frac{30\ 031\ 685{,}83 \quad W}{39\ 012\ 105{,}79 \quad W} = \%76{,}9$$

8.4. Önerilen NYHES Ekserji Analizi

Önerilen NYHES'nin ekserji analizi, Şekil 6.2'de gösterilen numaralandırmaya göre Termodinamik II. Yasa uygulanarak yürütüldü ve ana ekipmanın iş yapabilme potansiyeli hesaplandı. Reaktörden çıkan ve türbin, yoğuşturucu, pompa, ısı değiştiricisi, degazör ve buhar üreteci hatlarından geçen su/buharı için 1-10 numara arası hat ile 19-20 nolu numaralı hattın fiziksel ve kimyasal ekserji değeri ayrı ayrı hesaplandı. Sistemin buhar çevriminde yer alan suyun kimyasal ekserjisi için e^{EF} değeri 2,5 kJ/kg alınarak ilgili hattın debisi ile çarpıldı [178]. Ekserji hesaplaması için gerekli olan ana ekipman hatlarına ait entalpi ve entropi değerleri, EES ile elde edildi ve her bir hat için aşağıda ayrı ayrı hesaplandı. Akışkan olarak helyum kullanılan 17 ve 18 nolu hat ile therminol-66 kullanan 11-12-13-14-15-16 nolu hatlar için ekserji ayrı olarak hesaplandı

8.4.1. Su-buhar hattı ekserji analizi

1 nolu hat için (buhar üreteci-YBT arası)

Fiziksel ekserji $\dot{E}x_{1-f} = \dot{m}_1\, e_1^{EF} = \dot{m}_1\,[(h_1 - h_0) - T_0(S_1 - S_0)]\ \frac{kJ}{s}$

Kimyasal ekserji $\dot{E}x_{1-k} = \dot{m}_1\ (\frac{kJ}{kg}) * 2{,}5\ (\frac{kJ}{kg})$

Toplam ekserji $\dot{E}x_1 = \dot{E}x_{1-f} + \dot{E}x_{1-k}\ \frac{kJ}{s}$

2 nolu hat için (YBT-ABT arası)

$$\dot{E}x_{2-f} = \dot{m}_2\, e_2^{EF} = \dot{m}_2\,[(h_2 - h_0) - T_0(S_2 - S_0)]\ \frac{kJ}{s}$$

$$\dot{E}x_{2-k} = \dot{m}_2\ (\frac{kJ}{kg}) * 2{,}5\ (\frac{kJ}{kg})$$

$$\dot{E}x_2 = \dot{E}x_{2-f} + \dot{E}x_{2-k}\ \frac{kJ}{s}$$

3 nolu hat için (ABT-kondenser arası)

$$\dot{E}x_{3-f} = \dot{m}_3\,[(h_3 - h_0) - T_0(S_3 - S_0)]\ \frac{kJ}{s}$$

$$\dot{E}x_{3-k} = \dot{m}_3\ (\frac{kJ}{kg}) * 2{,}5\ (\frac{kJ}{kg})$$

$$\dot{E}x_3 = \dot{E}x_{3-f} + \dot{E}x_{3-k}\ \frac{kJ}{s}$$

4 nolu hat için (kondenser-kondensat pompası arası)

$$\dot{E}x_{4-f} = \dot{m}_4\ [(h_4 - h_0) - T_0(S_4 - S_0)]\ \frac{kJ}{s}$$

$$\dot{E}x_{4-k} = \dot{m}_4\ (\frac{kJ}{kg}) * 2{,}5\ (\frac{kJ}{kg})$$

$$\dot{E}x_4 = \dot{E}x_{4-f} + \dot{E}x_{4-k}\ \frac{kJ}{s}$$

5 nolu hat için (kondensat pompası-ısı değiştiricisi-1 arası)

$$\dot{E}x_{5-f} = \dot{m}_5\ [(h_5 - h_0) - T_0(S_5 - S_0)]\quad \frac{kJ}{s}$$

$$\dot{E}x_{5-k} = \dot{m}_5\ (\frac{kJ}{kg}) * 2{,}5\ (\frac{kJ}{kg})$$

$$\dot{E}x_5 = \dot{E}x_{5-f} + \dot{E}x_{5-k}\quad \frac{kJ}{s}$$

6 nolu hat için (ısı değiştiricisi 1-degazör arası)

$$\dot{E}x_{6-f} = \dot{m}_6\ [(h_6 - h_0) - T_0(S_6 - S_0)]\quad \frac{kJ}{s}$$

$$\dot{E}x_{6-k} = \dot{m}_6\ (\frac{kJ}{kg}) * 2{,}5\ (\frac{kJ}{kg})$$

$$\dot{E}x_6 = \dot{E}x_{6-f} + \dot{E}x_{6-k}\quad \frac{kJ}{s}$$

7 nolu hat için (degazör-ana pompa arası)

$$\dot{E}x_{7-f} = \dot{m}_7[(h_7 - h_0) - T_0(S_7 - S_0)]\quad \frac{kJ}{s}$$

$$\dot{E}x_{7-k} = \dot{m}_7 \ (\frac{kJ}{kg}) \ * \ 2{,}5 \ (\frac{kJ}{kg})$$

$$\dot{E}x_7 = \ \dot{E}x_{7-f} + \dot{E}x_{7-k} \quad \frac{kJ}{s}$$

8 nolu hat için (ana pompa-ısı değiştiricisi arası-2)

$$\dot{E}x_{8-f} = \ \dot{m}_8 \ [(h_8 - h_0) - \ T_0(S_8 - S_0)] \ \frac{kJ}{s}$$

$$\dot{E}x_{8-k} = \dot{m}_8 \ (\frac{kJ}{kg}) \ * \ 2{,}5 \ (\frac{kJ}{kg})$$

$$\dot{E}x_8 = \ \dot{E}x_{8-f} + \dot{E}x_{8-k} \quad \frac{kJ}{s}$$

9 nolu hat için (ısı değiştiricisi-2 -buhar üreteci arası)

$$\dot{E}x_{9-f} \ = \ \dot{m}_9 \ [(h_9 - h_0) - \ T_0(S_9 - S_0)] \quad \frac{kJ}{s}$$

$$\dot{E}x_{9-k} = \dot{m}_9 \quad (\frac{kJ}{kg}) \ * \ 2{,}5 \ (\frac{kJ}{kg})$$

$$\dot{E}x_9 = \ \dot{E}x_{9-f} + \dot{E}x_{9-k} \quad \frac{kJ}{s}$$

10 nolu hat için (YBT-degazör arası)

$$\dot{E}x_{10-f} \ = \ \dot{m}_{10}[(h_{10} - h_0) - \ T_0(S_{10} - S_0)] \quad \frac{kJ}{s}$$

$$\dot{E}x_{10-k} = \dot{m}_{10} \ (\frac{kJ}{kg}) \ * \ 2{,}5 \ (\frac{kJ}{kg})$$

$$\dot{E}x_{10} = \dot{E}x_{10-f} + \dot{E}x_{10-k} \quad \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

Kolektör -1 hattını oluşturan 11-12-13 nolu hatlar ile kolektör-2 hattını oluşturan e 14-15-16 noılu hatların analizleri 8.4.2 başlığı altında yer almaktadır.

17 nolu hat için (buhar üreteci – reaktör koru arası)

$$\dot{E}x_{17} = \dot{Q}_{17}\,(1 - \frac{T_0}{T_{17}}) = 112.224 * (1 - \frac{298}{523{,}2}) = 48.304{,}37 \ \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

18 nolu hat için (reaktör koru - buhar üreteci arası)

$$\dot{E}x_{18} = \dot{Q}_{18}\,(1 - \frac{T_0}{T_{18}}) = 361.344 * (1 - \frac{298}{1022{,}9}) = 256.074{,}17 \ \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

19 nolu hat için (ısı kuyusu- kondenser arası)

$$\dot{E}x_{19-f} = \dot{\text{m}}_{19} * [(\text{h}_{19} - \text{h}_0) - \text{T}_0(\text{S}_{19} - \text{S}_0)] \quad \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{E}x_{19-k} = \dot{\text{m}}_{19}\,(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) * 2{,}5\,(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}})$$

$$\dot{E}x_{19} = \dot{E}x_{19-f} + \dot{E}x_{19-k} \quad (\frac{\text{kJ}}{\text{s}})$$

20 nolu hat için (kondenser-ısı kuyusu arası)

$$\dot{E}x_{20-f} = \dot{\text{m}}_{20}[(\text{h}_{20} - \text{h}_0) - \text{T}_0(\text{S}_{20} - \text{S}_0) \quad (\frac{\text{kJ}}{\text{s}})$$

$$\dot{E}x_{20-k} = \dot{\text{m}}_{20} \quad (\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) * 2{,}5\,(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}})$$

$$\dot{E}x_{20} = \dot{E}x_{20-f} + \dot{E}x_{20-k} \quad (\frac{\text{kJ}}{\text{s}})$$

Elde edilen değerler Çizelge 8.8'e aktarıldı.

8.4.2. Kolektör ekserji analizi

Güneş enerjisinden yararlanmak üzere kullanılan oluk kolektör bölümüne ait 11-12-13-14-15-16 nolu hatlar için ekserji analizi ayrı olarak hesaplandı. Ekserji analizi Eş. 7.54 ve Eş. 7.56 bulunarak yürütüldü.

$$\dot{E}x_{güneş-g} + \dot{E}x_{T66-g} = \dot{E}x_{T66-ç} + \dot{E}x_{kayıp} + \dot{E}x_{yıkım}$$

$$\dot{E}x_{güneş} = I_{güneş}\, A \left[1 + \frac{1}{3}\,(\frac{T_{çevre}}{T_{güneş}})^4 - \frac{4}{3}(\frac{T_{çevre}}{T_{güneş}})\right]$$

Güneş sıcaklığı, 5770 K olduğu kabul edildi [171].

$$\dot{E}x_{güneş-1} = 5{,}776\ \text{m} * 95{,}2\ \text{m} * 200 * 886{,}84 \frac{\text{W}}{m^2} \left[1 + \frac{1}{3}\,(\frac{298}{5770})^4 - \frac{4}{3}(\frac{298}{5770})\right]$$

$$\dot{E}x_{güneş-1} = 90.814.373{,}58\ W = 90.814{,}37\ \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{E}x_{kayıp-1} = \dot{Q}_{kayıp}\,(1 - \frac{T_0}{T_{ort}})$$

$$T_{ort} = (\frac{T_0 + T_{yüzey}}{2}) = (\frac{298 + 608}{2}) = 453\ K$$

$$\dot{E}x_{kayıp-1} = 10.670{,}5\ (1 - \frac{298}{453}) = 3.651{,}05 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{E}x_{T66-g} = \acute{m}_{T66}\, C_{P-T66} \left[(T_{T66-g} - T_0) - T_0 \ln\left(\frac{T_{T66-g}}{T_0}\right)\right]$$

$$\dot{E}x_{11} = 538{,}9\ \frac{kg}{s} * 2{,}5044\ \frac{kJ}{kgK} * \left[(556{,}7 - 298) - 298 * \ln\left(\frac{556{,}7}{298}\right)\right]$$

$$\dot{E}x_{11} = 97.807\ \ \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{E}x_{12} = 538{,}9\ \frac{kg}{s} * 2{,}504\ \frac{kJ}{kgK} * \left[(556{,}9 - 298) - 298 * \ln\left(\frac{556{,}9}{298}\right)\right]$$

$$\dot{E}x_{12} = 97.963{,}74\ \ \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{E}x_{13} = 538{,}9\ \frac{kg}{s} * 2{,}7164\ \frac{kJ}{kgK} * \left[(609{,}9 - 298) - 298 * \ln\left(\frac{609{,}9}{298}\right)\right]$$

$$\dot{E}x_{13} = 144.149{,}93\ \ \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{E}x_{yıkım} = \dot{E}x_{T66-g} + \dot{E}x_{güneş-g} - \dot{E}x_{T66-ç} - \dot{E}x_{kayıp}$$

$$\dot{E}x_{yıkım-1} = 97.963{,}74 + 90.814{,}37 - 144.149{,}93 - 3.651{,}05$$

$$\dot{E}x_{yıkım-1} = 40.977{,}14\ \ \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{E}x_{güneş-2} = 5{,}776\ \text{m} * 95{,}2\ \text{m} * 80 * 886{,}84 \frac{\text{W}}{m^2}\ \left[1 + \frac{1}{3}\left(\frac{298}{5770}\right)^4 - \frac{4}{3}\left(\frac{298}{5770}\right)\right]$$

$$\dot{E}x_{güneş-2} = 36.325.749{,}4\ W = 36.325{,}75\ \ \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{E}x_{kayıp-2} = \dot{Q}_{kayıp-2}\left(1 - \frac{T_0}{T_{ort}}\right)$$

$$\dot{E}x_{kayıp-2} = 4.064{,}95 * \left(1 - \frac{298}{453}\right) = 1.390{,}8\ \ \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{E}x_{14} = 202{,}8\ \frac{kg}{s} * 2{,}5064\ \frac{kJ}{kgK} * \left[(557{,}1 - 298) - 298 * \ln\left(\frac{557{,}1}{298}\right)\right]$$

$$\dot{E}x_{14} = 36.930{,}85\ \ \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{E}x_{15} = 202{,}8\ \frac{kg}{s} * 2{,}5068 \frac{kJ}{kgK} * \left[(557{,}2 - 298) - 298 * \ln\left(\frac{557{,}2}{298}\right)\right]$$

$$\dot{E}x_{15} = 36.960{,}39\ \ \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{E}x_{16} = 202{,}8\ \frac{kg}{s} * 2{,}7168\ \frac{kJ}{kgK} * \left[(609{,}7 - 298) - 298 * \ln\left(\frac{609{,}7}{298}\right)\right]$$

$$\dot{E}x_{16} = 54.198{,}45\ \ \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{E}x_{yıkım-2} = \dot{E}x_{güneş} + \dot{E}x_{T66-g} - \dot{E}x_{T66-ç} - \dot{E}x_{kayıp}$$

$$\dot{E}x_{yıkım} = 36.960{,}85 + 36.325{,}7 - 54.198{,}45 - 1.390{,}8$$

$$\dot{E}x_{yıkım} = 17.696{,}89\ \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

Entropi değerleri EES ile kütle-enerji denge hesaplaması sırasında elde edildi. Önerilen NYHES için elde edilen toplam ekserji, kayıp ekserji ve yıkım ekserji olmak üzere elde edilen değerler Çizelge 8.8'e eklendi.

Çizelge 8.8. Önerilen NYHES bileşenleri fiziksel ve kimyasal ekserji değerleri

Akım No	Faz Durumu	Debi (Kütle)	Fiziksel Ekserji	Kimyasal Ekserji	Toplam Ekserji
		ṁ (kg/s)	kJ/s	kJ/s	kJ/s
1	Buhar (su)	186,4	286 017,78	465,97	286 483,7
2	Buhar (su)	174,2	141 882,00	435,68	142 317,7
3	Buhar (su)	174,3	22 599,04	435,68	23 034,7
4	Buhar (su)	174,3	137,43	435,68	573,1
5	Buhar	174,3	432,20	435,68	867,9
6	Buhar (su)	174,3	12 834,83	435,68	13 270,5
7	Sıvı (su)	186,4	21 149,85	465,97	21 615,8
8	Sıvı (su)	186,4	23 761,90	465,97	24 227,9
9	Sıvı (su)	186,4	33 443,31	465,97	33 909,3
10	Sıvı (su)	12,1	9 863,45	30,29	9.893,7
11	Sıvı (Terminol-66)	538,9	84 471,91		84 471,9
12	Sıvı (Terminol-66)	538,9	85 010,80		85 010,8
13	Sıvı (Terminol-66)	538,9	121 533,46		121 533,5
14	Sıvı (Terminol-66)	202,8	32 334,05		32 334,1
15	Sıvı (Terminol-66)	202,8	32 415,57		32 415,6
16	Sıvı (Terminol-66)	202,8	46 076,30		46.076,3
17	Gaz (Helyum)	96,0	269 089,92		269 089,9
18	Gaz (Helyum)	96,0	429 813,12		429 813,1
19	Sıvı (su)	7697,6	0,00	19 244,03	19 244,0
20	Sıvı (su)	7697,6	2 898,92	19 244,03	22 142,9

8.4.3. Ana ekipman ekserji kayıpları

YB Türbini için ekserji kaybı:

$$\dot{E}x_1 = \dot{E}x_2 + \dot{E}x_{10} + \dot{W}_{YBT} + \dot{E}x_{k-YBT} \qquad (\frac{\text{kJ}}{\text{s}})$$

AB Türbini için ekserji kaybı:

$$\dot{E}x_2 = \dot{E}x_3 + \dot{W}_{ABT} + \dot{E}x_{k-ABT} \qquad (\frac{\text{kJ}}{\text{s}})$$

Yoğuşturucu ekserji kaybı:

$$\dot{E}x_3 + \dot{E}x_{19} = \dot{E}x_4 + \dot{E}x_{20} + \dot{E}x_{k-yog} \qquad (\frac{\text{kJ}}{\text{s}})$$

Yoğuşturucu pompası ekserji kaybı:

$$W_{P1} = \dot{E}x_5 - \dot{E}x_4 + \dot{E}x_{k-P1} \qquad (\frac{\text{kJ}}{\text{s}})$$

Isı değiştiricisi-I ekserji kaybı:

$$\dot{E}x_5 + \dot{E}x_{13} = \dot{E}x_6 + \dot{E}x_{11} + \dot{E}x_{k-ID1} \qquad (\frac{\text{kJ}}{\text{s}})$$

Degazör ekserji kaybı:

$$\dot{E}x_6 + \dot{E}x_{10} = \dot{E}x_7 + \dot{E}x_{k-DE} \qquad (\frac{\text{kJ}}{\text{s}})$$

Ana pompa ekserji kaybı:

$$W_{P2} = \dot{E}x_8 - \dot{E}x_7 + \dot{E}x_{k-P2} \qquad (\frac{\text{kJ}}{\text{s}})$$

Isı değiştiricisi-II ekserji kaybı:

$$\dot{E}x_8 + \dot{E}x_{16} = \dot{E}x_9 + \dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{k-ID2} \qquad (\frac{\text{kJ}}{\text{s}})$$

Buhar üreteci ekserji kaybı:

$$\frac{\dot{E}x_9}{2} + \dot{E}x_{18} = \frac{\dot{E}x_1}{2} + \dot{E}x_{17} + \dot{E}x_{k-B\ddot{U}} \qquad (\frac{\text{kJ}}{\text{s}})$$

Pompa-3 ekserji kaybı:

$$W_{P3} = \dot{E}x_{12} - \dot{E}x_{11} + \dot{E}x_{k-P3} \qquad (\frac{\text{kJ}}{\text{s}})$$

Kolektör-I ekserji kaybı:

$$\dot{E}x_{güneş} = \dot{E}x_{13} - \dot{E}x_{12} + \dot{E}x_{k-kolketör-1} \qquad (\frac{\text{kJ}}{\text{s}})$$

Pompa-4 ekserji kaybı:

$$W_{P4} = \dot{E}x_{15} - \dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{k-P4} \qquad (\frac{\text{kJ}}{\text{s}})$$

Kolektör-II ekserji kaybı:

$$\dot{E}x_{güneş} = \dot{E}x_{16} - \dot{E}x_{15} + \dot{E}x_{k-kolketör-2} \qquad (\frac{\text{kJ}}{\text{s}})$$

8.4.4. Önerilen NYHES Termodinamik II. Yasa verimi

YB Türbinleri için ekserji verimi

$$\Psi_{YBT} = \frac{\dot{E}x_1}{\dot{E}x_3 + \dot{E}x_{10} + \dot{W}_{YBT}}$$

AB Türbinleri için ekserji verimi

$$\Psi_{ABT} = \frac{\dot{E}x_2}{\dot{E}x_3 + \dot{W}_{ABT}}$$

Yoğuşturucu ekserji verimi

$$\Psi_{yog} = \frac{\dot{E}x_3 + \dot{E}x_{19}}{\dot{E}x_4 + \dot{E}x_{20}}$$

Yoğuşturucu pompası ekserji verimi

$$\Psi_{P1} = \frac{\dot{E}x_4 + P_1}{\dot{E}x_5}$$

Isı değiştiricisi-I ekserji verimi

$$\Psi_{ID1} = \frac{\dot{E}x_5 + \dot{E}x_{13}}{\dot{E}x_6 + \dot{E}x_{11}}$$

Degazör ekserji verimi

$$\Psi_{DE} = \frac{\dot{E}x_6 + \dot{E}x_{10}}{\dot{E}x_7}$$

Ana pompa ekserji verimi

$$\Psi_{P2} = \frac{\dot{E}x_7 + P_2}{\dot{E}x_8}$$

Isı değiştiricisi-II ekserji verimi

$$\Psi_{ID2} = \frac{\dot{E}x_8 + \dot{E}x_{16}}{\dot{E}x_9 + \dot{E}x_{14}}$$

Buhar üreteci ekserji verimi

$$\Psi_{B\ddot{U}} = \frac{\frac{\dot{E}x_9}{2} + \dot{E}x_{18}}{\frac{\dot{E}x_1}{2} + \dot{E}x_{17}}$$

Pompa-3 ekserji verimi

$$\Psi_{P3} = \frac{\dot{E}x_{11} + P_3}{\dot{E}x_{12}}$$

Kolektör -I ekserji verimi

$$\Psi_{ID1} = \frac{\dot{E}x_{12} + \dot{E}x_{güneş1}}{\dot{E}x_{13}}$$

Pompa-4 ekserji verimi

$$\Psi_{P4} = \frac{\dot{E}x_{14} + P_4}{\dot{E}x_{15}}$$

Kolektör -II ekserji verimi

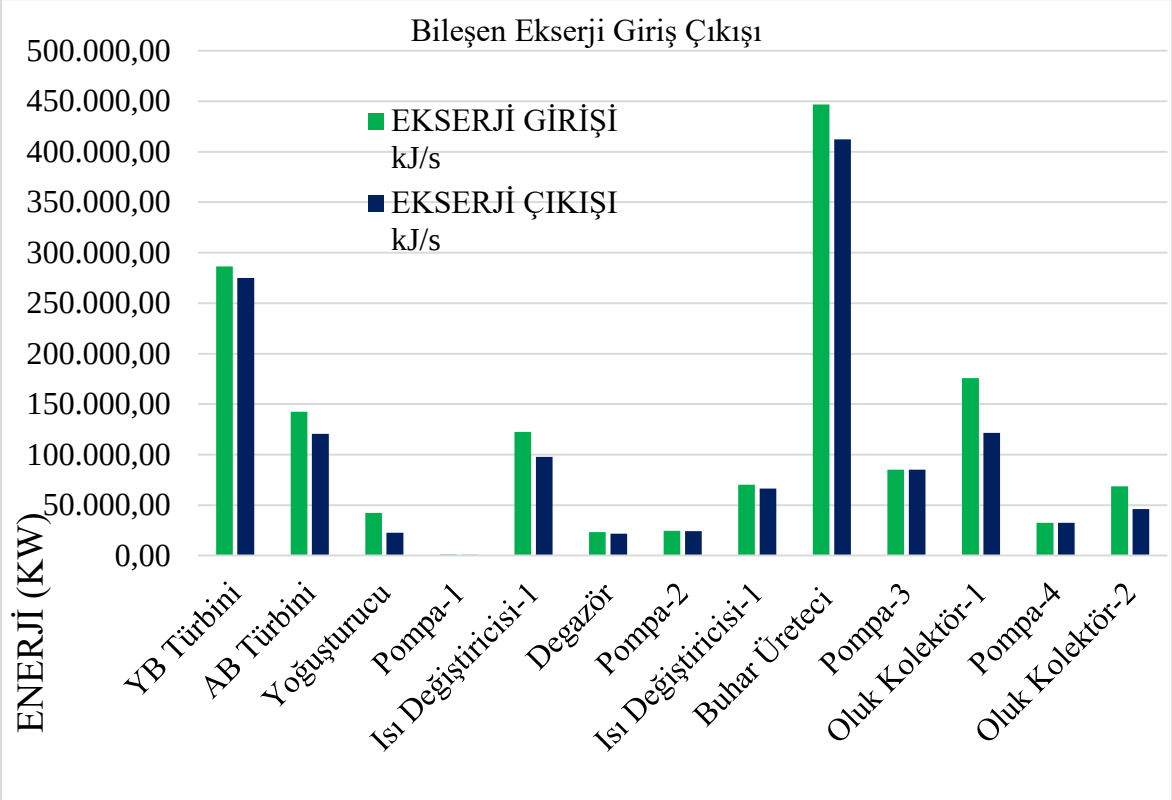
$$\Psi_{ID1} = \frac{\dot{E}x_{15} + \dot{E}x_{güneş2}}{\dot{E}x_{16}}$$

Bu hesaplamaların özet hali ve elde edilen değerler Çizelge8.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 8.9. Önerilen NYHES için ekserji sonuçları

EKİPMAN	EKSERJİ GİRİŞ	EKSERJİ ÇIKIŞ	EKSERJİ KAYIP	EKSERJİ VERİM	EKSERJİ KAYIP ORANI	EKSERJİ KAYIP KATSAYISI	BİRİM EKSERJİ TÜKETİMİ
	(kJ/s)	(kJ/s)	(kJ/s)	(%)	(%)	(%)	(kJ/kJ)
YB TÜRBİN	286.483,75	275.041,71	11.442,04	0,96	0,06	0,01	1,04
AB TÜRBİN	142.317,69	120.453,67	21.864,02	0,85	0,11	0,03	1,18
YOĞUŞTURUCU	42.278,75	22.716,06	19.562,68	0,54	0,10	0,02	1,86
POMPA1	918,67	867,88	50,79	0,94	0,00	0,00	1,06
ISI DEĞİŞTİRİCİSİ-1	122.401,34	97.742,43	24.658,91	0,80	0,13	0,03	1,25
DEGAZÖR	23.164,26	21.615,82	1.548,44	0,93	0,01	0,00	1,07
POMPA-2	24.618,60	24.227,87	390,72	0,98	0,00	0,00	1,02
ISI DEĞİŞTİRİCİSİ-2	70.304,17	66.243,34	4.060,84	0,94	0,02	0,00	1,06
BUHAR ÜRETECİ	446.767,76	412.331,79	34.435,97	0,92	0,18	0,04	1,08
POMPA-3	85.019,97	85.010,80	9,17	1,00	0,00	0,00	1,00
KOLEKTÖR-1	175.825,17	121.533,46	54.291,72	0,69	0,28	0,07	1,45
POMPA-4	32.486,55	32.415,57	70,98	1,00	0,00	0,00	1,00
KOLEKTÖR-2	68.741,32	46.076,30	22.665,02	0,67	0,12	0,03	1,49

Önerilen NYHES bileşenlerine ait toplam ekserji giriş-çıkış değerleri, Şekil 8.7'de ve ekserji kayıp değerleri ise Şekil 8.8'de yer almaktadır.



Şekil 8.7. Önerilen NHYES bileşenlerine ait ekserji giriş çıkış değerleri



Şekil 8.8. Önerilen NHYES bileşenlerine ait ekserji kayıp değeri

8.5. Rüzgar Enerjisi Analizi

Önerilen NYHES iç enerji ihtiyacı 17 MWe olduğundan kapasite faktörüne bağlı olarak rüzgar türbininden en az;

17x100/33 = 51,5 MW

güç elde edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle her biri 4 MWe kapasiteye sahip rüzgar türbininden 13 adet rüzgar türbini tasarlanması gerektiği hesaplandı.

Rüzgar türbin sayısı ve kurulu gücü: 13 adet x 4 MW ünite = 52 MWe kurulu güç

Önerilen NYHES sistemin 17 MW'lık iç enerji ihtiyacı %33 kapasite faktörüne bağlı olarak rüzgar türbinlerinden karşılanacağı için, iç tüketimin üç katı kadar kurulu güç tasarlanarak her biri 4 MW olan rüzgar türbininden toplam 13 adet olması gerektiği hesaplandı.

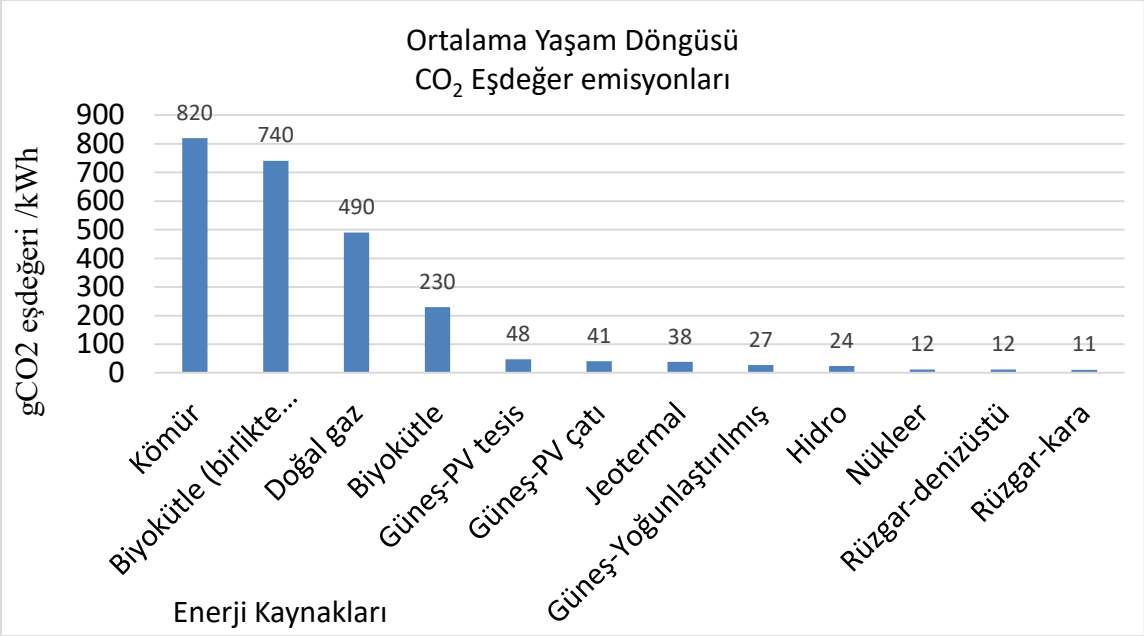
8.6. Hidrojen Üretim Analizi

Bölüm 7.5'te açıklandığı üzere, 1 kg hidrojen üretmek için 50 kWh enerjiye ihtiyaç bulunmaktadır. Önerilen sistemin toplam rüzgar kurulu gücü 52 MW olup bunun 17 MW'ı iç enerji ihtiyacı için kullanıldı. Kurulu gücün en fazla kullanılabilecek 35 MW'ı hidrojen üretimi için ayrılmış durumdadır. Rüzgar tam kapasite esmesi durumunda elde edilebilecek maksimum 35 MW ile 700 kg hidrojen elde edilebilecektir.

8.7. Karbon Salımı

Hibrit sistemler vasıtasıyla elektrik üretiminin amaçlarından biri, karbonsuz elektrik üretilmesi ve böylece 2050 net sıfır karbon hedefinin en hızlı şekilde sağlanmasıdır. Önerilen hibrit sistem ile 220 MW elektrik üretilmiştir. Bu üretim ile ne kadar CO_2 azaltıldığının analizi için Birleşmiş Milletler (BM) Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından hazırlanan raporun Ek-3 "Teknolojiye Özgü Maliyet ve Performans Parametreleri" bölümünde yer alan "Çizelge A.III.2, Seçilmiş Elektrik Üretim Teknolojileri Emisyonları (gCO2 eş./ kWh)" yararlanılmıştır [179]. Çizelgede ticari olarak üretim yapan

mevcut teknolojileri baz almıştır. Çizelgede yer alan albedo[11] etkisinin en az/orta/en çok şeklinde dahil edildiği yaşam döngüsü emisyonları ortalama (medyan) değer baz alınarak Şekil 8.9'da listelenmiştir. Yapılan hesaplamaya göre nükleer sistemlerin eşdeğer CO_2 emisyon oranı 12 gCO_2/kWh'tır.



Şekil 8.9. Enerji üretim kaynaklarına göre eşdeğer CO2 emisyon değerleri

Tez için önerilen hibrit sistem ile yaklaşık 220 MW üretim yapıldığı hesaplanmıştı. Bu nedenle HTR-PM sistemi de nükleer santral kapsamında olduğu kabul edilip CO_2 emisyon oranı 12 gCO_2/kWh, güneş yoğunlaştırılmış 27 gCO_2/kWh ve rüzgar için 11 gCO_2/kWh olarak alındı.

Önerilen hibrit sistemde;

Nükleer için	220 000 kWh*12 gCO_2/kWh = 2 640 000 gCO_2 eş.
Rüzgar kara	52 000 kWh*11 gCO_2/kWh = 572 000 gCO_2 eş.
Yoğunlaştırılmış kolektör	35 000 kWh *27 gCO_2/kWh = 945 000 gCO_2 eş.
Toplam	4 157 gCO_2/kWh

[11] Albedo Etkisi: Arazi kullanımı ve enerji altyapısı nedeniyle yüzey albedosunda meydana gelen değişiklikler, radyatif zorlamayı ve bölgesel iklimi önemli ölçüde etkileyebilir. Tanım olarak kısaca; bir yüzeyin güneş ışığını yansıtma kapasitesinin değişmesiyle, çevresel ısınma veya soğuma üzerindeki etkisidir. Enerji teknolojilerinin yaşam döngüsü analiz hesaplamasında dikkate alınmaktadır (IPCC, 2014)

Hibrit sistemle, nükleer, güneş ve rüzgar enerjileri ile toplamda en fazla 307 MW üretim gerçekleştirilmektedir. 307 MW için 4 157 gCO_2 eş./kWh karbon salımı olduğu hesaplanmıştır. Aynı üretim miktarı kömür ile gerçekleştirilseydi 251 740 000 gCO_2/kWh karbon salımı olacaktı. Mevcut HTR-PM sistemde gerçekleşen 202 MW im üretim için 2424 gCO_2/kWh salımı hesaplanmıştır.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, SMR sistemini merkeze alarak yenilenebilir enerji sistemlerinden güneş ve rüzgar enerjisinin değişken üretim yapısını daha stabil hale getirerek daha fazla faydalanmayı, aynı zamanda enerji geçişi olan hidrojen üretimini de sağlamayı amaçlayan bir hibrit sistemi analiz etmiştir. Tez çalışması ile SMR sistemine güneş ve rüzgar enerjisin entegre edildiği hibrit bir sistem önerilmiş ve performans analizi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle IAEA'dan alınan temel verilerle mevcut SMR sisteminin akış şeması üzerinde her bir enerji düğüm noktaları belirlenmiş ve enerji dengesi sağlanmıştır. Türbinlerden toplam 202,3 MW üretim elde edilmiştir. Degazör öncesinde kullanılan üç adet ısı değiştiricisi için toplam 72833,3 kJ/s ve degazör sonrasında kullanılan bir adet ısı değiştiricisi için 27768,5 kJ/s enerjiye ihtiyaç olduğu hesaplanmıştır. Bu değerlere karşılık, SAM vasıtasıyla gerekli kolektör sayısı belirlenmiştir.

Önerilen hibrit sistem analizi için mevcut SMR yapısı esas alınarak hibrit sistemin akış şeması oluşturulmuş ve enerji düğüm noktaları belirlenmiştir. Hibrit sistemde yer alan YB ve AB türbinleri, yoğuşturucu, yoğuşturma pompası (Pompa-1), ısı değiştiricisi-1, degazör, besleme suyu pompası (Pompa- 2), ısı değiştiricisi-2, buhar üreteci, kolektör-1 pompası (Pompa-3), kolektör- 1, kolektör- 2 pompası (Pompa-4) ve kolektör-2 bileşenleri için enerji ve ekserji dengesi sağlanarak elde edilen enerji ve oluşan kayıplar hesaplanmıştır. Türbinlerden toplam 220,25 MW elde edilmiştir. Mevcut SMR istemine kıyasla; YB türbininden 1,15 MW ve AB türbininden 17,9 MW olmak üzere toplam %8,8'lik bir atışla 17,88 MW fazla üretim sağlanmıştır. YB türbini izantropik verimi %87,49, AB türbini izantropik verimi %72,02 olarak elde edilmiştir. Pompa-1 izantropik verimi %88,47 olarak hesaplanırken, sistemin besleme suyu pompası olan Pompa- 2'de %80,48 olarak hesaplanmıştır. Mevcut sistemin verimi %30,4 iken önerilen hibrit sistemin verimi %36,4 olarak hesaplanmıştır. Sistemde en çok yoğuşturucuda enerji kaybı hesaplanmıştır.

Hibrit sistemin ekserji hesaplaması sonucunda, sistemin iş yapılmasını sağlayan noktalar olan oluk kolektörde ve SMR buhar üretecinde olduğu görülmektedir. En çok ekserji kaybı ise yoğuşturucuda olduğu belirlenmiştir. En çok ekserji kaybının olduğu bileşenler, iyileştirmenin ihtiyaç duyulduğu yerlerdir. Bu açıdan ekserji analizi mühendislik sistemlerinde önemli bir yere sahiptir.

Hibrit sistemler, özellikle iklim değişikliği ile mücadele kapsamında öne çıkan bir sistem olmuştur. İklim değişikliği mücadelesinde karbonsuz bir ortamı elde etmek için fosil yakıtlardan vazgeçilerek ve yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması benimsenmiştir. Ancak bu geçiş hem ekonomik hem de teknik anlamda kolay olmayacağından süreç içinde hibrit sistemlerin kullanılması bir çözüm aracı olarak değerlendirilmektedir.

Yeni nesil nükleer enerji teknolojisi olarak son yıllarda gelişimine önem verilen ve yakın gelecekte daha yaygın kullanılması beklenen SMR merkezli tez çalışmasının amacı; bu sistemlerin net sıfır karbon hedefi için enerji geçiş sürecinde yenilenebilir sistemlerle birlikte kullanılması ve böylece daha verimli ve kesintisiz enerji üretiminin sağlanmasıdır. Mevcut sistem ile önerilen sistem karşılaştırıldığında, %6,4 oranında kayda değer verim artışının sağlandığı, ayrıca 17 MW fazladan elektrik üretimi ve 700 kg hidrojen üretildiği hesaplanmıştır. Böylece baz yük gibi çalıştırılamayan yenilenebilir enerji sistemlerinden daha etkin şekilde yararlandığı belirlenmiştir.

SMR'lar geleneksel büyük kapasiteli santralların sadece kapasite olarak küçültülmüşü veya bazı bileşenlerin birleştirilerek tek parça halinde sunulan bir minyatürü olarak görmek yerine, bu reaktörlerin nükleer enerji dünyasına yeni bir yaklaşım ve yeni bir vizyon sunduğu değerlendirilmelidir. İklim değişikliği çalışmaları kapsamında alınan önlemler ve uygulamalar sonucunda, net-sıfır karbon hedefini yakalamak için hemen hemen her alanda dijitalleşme, elektrifikasyon ve sürdürülebilirlik konularına odaklanılmıştır. Tam bu noktada SMRlar, modüler olarak fabrikada üretilen ve taşınarak istenilen sahada montajı gerçekleştirilen, dijitalle entegre edilmiş yeni bir sistem olarak dikkat çekmektedir. Bu entegrasyon yüksek verimlilik, esneklik, farklı sahalarda kullanılabilmesi (çok sıcak/çok soğuk bölgelerde) gibi birçok yönden önemli bir tercih nedenidir. SMR'larda, kullanılan yeni tip yakıtlar, doğrudan pasif güvenlik sağladığından, nükleerin istenmeyen durumlarına karşı güvenlik adımını karşılaması da yine önemli bir tercih nedenidir. Enerji geçişi hidrojen üretimi ve endüstriyel ısı gibi farklı alanlara yönelik kullanılabilmesi de önemli bir özellik olarak değerlendirilmektedir.

SMR'ların baz yük olarak kararlı ve sürekli üretim yapmasının yanı sıra dijital yapıya ve akıllı uygulamalara sahip olması, akıllı şebekeler için bir alternatif değil, bir dengeleyici unsur olarak ele alınmalıdır. Bu nedenle özellikle yüksek talep bölgelerine veya küçük/zayıf

şebeke bölgelerine konuşlandırılmaları şebeke yönünden de önemli bir tercih nedenidir. 2025 Nisan ayı sonunda İspanya'da şebeke sisteminde yaşanan dalgalanma sonucu ülkenin her yerinde elektrik kesintisi yaşanmış ve enerji sistemleri kapanmıştır. Böyle bir durumun yaratacağı ekonomik zararın boyutu tahmin edilemiyor. Bu nedenle şebekelerin dengede kalması için baz yük sistemlerin önemi daha net görülmüş ve anlaşılmıştır.

Hibrit sistemler, yeni kullanılmaya ve süreç içinde geliştirilmeye çalışıldığından, bu tür sistemlerin hala araştırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle şebeke açısından entegrasyonun nasıl olacağı, piyasa hala araştırılmaktadır.

Öneriler

- Enerji arz güvenliği ve şebeke esnekliğini sağlamak amacıyla, nükleer enerji sistemlerinin yenilenebilir kaynaklarla entegre biçimde kullanılacağı hibrit sistemlerin geliştirilmesi teşvik edilmelidir.
- Nükleer enerji teknolojileri (büyük ve küçük kapasiteli) ve yenilenebilir enerji sistemlerinin dahil olduğu hibrit sistemler, düşük karbon hedeflerine katkı sağlayacak en önemli enerji üretim sistemleri olduğu için yaygınlaştırılmalıdır.
- Dijitalleşme, elektrifikasyon ve sürdürülebilirlik kavramlarını dikkate alan enerjide dönüşüm sürecinde, hibrit enerji sistemleri ile enerji üretimi sağlanmalıdır.
- Nükleer enerji teknolojileri (büyük ve küçük kapasiteli), baz yük çalıştırılarak güvenilir, kesintisiz, verimli enerji üretimi sağladıkları için enerji üretim sistemleri içinde yer almalıdır. Nükleer santralların yapım maliyetlerinin yüksek olduğu bilinmekle birlikte, SMR sistemleri yeni geliştirildiğinden, henüz maliyet ve yapım süresi konusunda çok fazla tecrübe sağlanmadığından kamu-özel sektör iş birliği dikkate alınmalıdır.
- SMR'ların fabrikada üretilmesi, taşınabilirliği, daha kolay kurulumu ve pasif güvenlik sistemleri gibi avantajları dikkate alınarak, özellikle ulaşılması güç bölgelerde uygulanmasına yönelik projeler başlatılmalıdır.
- Nükleer Santralların güvenli bir şekilde yapımı için yer ve inşaat lisansını veren NDK, büyük veya küçük ölçekli nükleer santralları içeren hibrit sistemlerin lisanslanmasına yönelik gerekli mevzuat düzenlemeleri için şimdiden çalışma başlatmalıdır.

- Nükleer ve yenilenebilir bileşenlerden oluşan büyük hibrit enerji sistemlerinin etkin ve güvenli bir şekilde yönetilebilmesi için sistem güvenliği ve kararlılığını sağlamak amacıyla entegre bir kontrol algoritması geliştirilmelidir.
- Oluk kolektörler ve diğer güneş enerji sistemleri, özellikle kullanılmayan tarım arazilerinde ve özellikle şebeke/trafo merkezlerine yakın atıl alanlarda değerlendirilmelidir. Böylece arazi kullanımında da verimlilik dikkate alınmalıdır.
- Nükleer ve yenilenebilir enerji sistemleri gibi temiz enerji kaynaklarının üretim payı arttırılarak karbon salımları düşürülmeli ve karbon vergisi yükleri azaltılmalıdır.
- Enerji ve ekserji analizleri hemen hemen tüm enerji sistemlerine uygulanmalı ve böylece verimlilik artıcı uygulamalar yaygınlaştırılmalıdır.
- Termik santral veya hibrit sistem gibi büyük tesislerin verimlilik çalışmaları sonuçlarına göre, özellikle en büyük ısı kayıplarının oluştuğu soğutma sistemleri gibi noktalarda, atık ısısının tekrar değerlendirilmesi dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, tesis kurulmadan önce, tasarım aşamasında gerekli analiz çalışması yapılmalı ve tesis bu yönde yapılmalıdır.
- Termik santral veya hibrit sistemlerin atık ısılarının değerlendirilmesinde, binaların ısıtılmasına yönelik bölgesel ısıtma, ısıtılması, seracılık, kurutuma işlemleri gibi ısıya çok ihtiyaç duyulan yerlerde daha etkin bir şekilde kullanılıp değerlendirilmesi dikkate alınmalıdır.
- Son yıllarda enerji geçişinde önemi artan hidrojenin gelecekteki rolü dikkate alınarak Ar- Ge ve yatırımlar artırılmalı ve özellikle nükleer enerji teknolojileri ile entegre olacak şekilde düşünülmelidir.
- Büyük ölçekli hibrit enerji sistemlerinin uygulanabilirliğinin artırılması için teknik analizlerin yanı sıra yatırım maliyetlerinin dikkate alındığı maliyet-etkinlik analizleri ve ekonomik fizibilitesi değerlendirilmeli ve detaylı bir şekilde analiz edilmelidir.

Bu çalışmada, nükleer, güneş, rüzgar ve hidrojen gibi temiz enerji kaynaklarının entegre edildiği hibrit enerji sistemleri teknik yönden incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, daha verimli sistemler olarak hibrit sistemlerin yalnızca enerji üretiminde değil, aynı zamanda net sıfır karbon hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

Geleceğin enerji altyapısının, sürdürülebilirlik ilkesini esas alan, düşük emisyonlu ve yüksek verimli hibrit çözümler üzerine kurulması gerekliliği açıktır. Bu doğrultuda, temiz enerji sistemlerinin bütüncül bir yaklaşımla ele alınması, sadece çevresel sorumluluk değil; aynı

zamanda küresel enerji dönüşümünde öncü bir rol üstlenmenin anahtarıdır.

"Nükleer enerji sistemlerinde güvenlik kültürü yalnızca bir zorunluluk değil, aynı zamanda tüm süreçleri dönüştüren bir kalite anlayışıdır. Bu anlayış; teknoloji geliştirmeden insan kaynağına, yönetimden altyapıya kadar geniş bir yelpazede iyileştirici bir etki yaratarak nükleer enerjinin bir kaldıraç görevi üstlenmesini sağlar. Bu nedenle nükleer enerji, sadece enerji üreten santraller değil, yüksek standartlı bir gelecek vizyonu sunan kendine özgür bir dünyadır. Bu dünyada yer almak için kalite ve güvenlik çerçevesinde daha fazla gayret gösterilmelidir."

KAYNAKLAR

1. Green, M., Sabharwall, P., Mckellar, M. G., Yoon, S., Abel, C., Petrovic, B., Curtis, D., (2013). *Nuclear Hybrid Energy System: Molten Salt Energy Storage*, Idaho National Laboratory, Idaho, ABD.

2. Norouzi, N., Talebi, S., Fani, M., Khajehpour, H., (2021). Exergy and exergoeconomic analysis of hydrogen and power cogeneration using an HTR plant, *Nucleer Engineering and Technology*, 53(8), 2753-2760

3. Temiz, M., Dinçer, I., (2021). Design and analysis of a new renewable-nuclear hybrid energy system for production of hydrogen, fresh water and power, *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 1, 100021.

4. Al-Zareer, M., Dincer, I., Rosen, M. A. (2020). Analysis and assessment of the integrated generation IV gas-cooled fast nuclear reactor and copper-chlorine cycle for hydrogen and electricity production, *Energy Conversion and Management*, 205, 112387.

5. Kowalczyk, T., Badur, J., Bryk, M., (2019). Energy and exergy analysis of hydrogen production combined with electric energy generation in a nuclear cogeneration cycle, *Energy Conversion and Management*, 198, 111805.

6. Pirmohamadi, A., Ghaebi, H., Ziapour, B. M., Ebadollahi, M., (2021). Exergoeconomic Analysis of a Novel Hybrid System by Integrating the Kalina and Heat Pump Cycles with a Nitrogen Closed Brayton System, *Energy Reports*, 7, 546-564.

7. Ho, A., Hill, D., Hedengren, J., Powell, K. M., (2022). A nuclear-hydrogen hybrid energy system with large-scale storage: A study in optimal dispatch and economic performance in a real-world market, *Journal of Energy Storage*, 51, 104510.

8. Abdussami, M. R., Adham, M. I., Gabbar, H. A., (2020). Modeling and performance analysis of nuclear-renewable micro hybrid energy system based on different coupling methods, *Energy Reports*, 6, 189-206.

9. Sun; L.; Huang; W.; Xiao; Z.; Jiang; Z.; Luo; L.; & Liu; J., (2022). Conceptual design and preliminary analysis, *Part A: Recovery; Utilization; and Environmental Effects*, 44(3), 5916-5928.

10. Zhao, Z., Cheng, B., Liu, M., Dai, C., (2018). Conceptual design and preliminary performance analysis of a hybrid nuclear-solar power system with molten-salt packed-bed thermal energy storage for on-demand power supply, *Energy Conversion Management*, 166, 174-186.

11. Borissova, A., (2015). Analysis and Synthesis of a Hybrid Nuclear-Solar Power Plant *BgNS Transactions*, 20(1), 58-61

12. Son, I. W., Jeong, Y., Son, S., Park, J. H., Lee, J. I., (2022). Techno-economic evaluation of solar-nuclear hybrid system for isolated grid, *Applied Energy*, 306, 118046.

13. Gabbar, H. A., Siddique, A. B., (2022). Technical and economic evaluation of nuclear powered hybrid renewable energy system for fast charging station, *Energy Conversion Management: X*, 17, 100342

14. Bamshad, A., Safarzadeh, O., (2023). Uncertainty and sensitivity analysis of generation expansion planning in hybrid nuclear and renewable energy system, *Progress in Nuclear Energy*, 163, 104812.

15. Redfoot, E. K., Verner, K. M., Borrelli, R. A., (2021). Applying analytic hierarchy process to industrial process design in a Nuclear Renewable Hybrid Energy System, *Progress in Nuclear Energy*, 145, 104083.

16. Norouzi, N., Fani, M, Talebi, S., (2021). Exergetic design and analysis of a nuclear SMR reactor tetrageneration (combined water, heat, power, and chemicals) with designed PCM energy storage and a CO2 gas turbine inner cycle, *Nuclear Engineering and Technology*, 53(2), 677-687.

17. Aktekin, M., Genç, M. S., Azgın, S. T., Genç, G., (2024). Assessment of techno-economic analyzes of grid-connected nuclear and PV/wind/battery/hydrogen renewable hybrid system for sustainable and clean energy production in Mersin-Türkiye, *Process Safety and Environmental Protection*, 190, 340–353.

18. İnternet: United Nations, What is climate change?, URL: https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change%0D, Son Erişim Tarihi: 1 Mart 2024

19. İnternet: United Nations, 1992 United Nations Framework Conventıon On Climate Change (FCCC/INFORMAL/84 GE.05-62220 (E)), https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf, Son Erişim Tarihi: 1 Mart 2024

20. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2018). Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. URL: https://www.ipcc.ch/sr15/, Son Erişim Tarihi: 10 Şubat 2025

21. Kıvılcım, İ., (2013), *2020'ye Doğru Kyoto-Tipi İklim Değişikliği Müzakereleri Avrupa Birliği'nin Yeterliliği ve Türkiye'nin Konumu*, (1. Baskı), İstanbul: İktisadi Kalkınma Vakfı Yayınları.

22. İnternet: Histroy, Climate Change History, URL: https://www.history.com/topics/natural-disasters-and-environment/history-of-climate-change, Son Erişim Tarihi 2 Mart 2024

23. İnternet: UC San Diego University, The Keeling Curve, URL: https://keelingcurve.ucsd.edu/, Son Erişim Tarihi: 2 Mart 2024

24. İnternet: ACS Chemistry for Life, The Keeling Curve: Carbon Dioxide Measurements at Mauna Loa URL: https://www.acs.org/education/whatischemistry/landmarks/keeling-curve.html, Son Erişim Tarihi: 2 Mart 2024

25. İnternet: UC San Diego University, 'The Keeling Curve, full record, URL: https://keelingcurve.ucsd.edu/, Son Erişim Tarihi 3 Mart 2024

26. İnternet: United Nations, From Stockholm to Kyoto: A Brief History of Climate Change, URL: https://www.un.org/en/chronicle/article/stockholm-kyoto-brief-history-climate-change, Son Erişim Tarihi 3 Mart 2024

27. İnternet: I. The Intergovernmental Panel on Climate Change, History of IPCC, URL: https://www.ipcc.ch/about/history/, Son Erişim Tarihi: 3 Mart 2024

28. İnternet: S. Weart, The Discovery of Global Warming- Timeline (Milestone), URL: https://history.aip.org/climate/timeline.htm, Son Erişim Tarihi: 4 Mart 2024

29. İnternet: United Nations Climate Chnage, What is the Kyoto Protocol?, URL: https://unfccc.int/kyoto_protocol, Son Erişim Tarihi: 4 Mart 2024.

30. İnternet: TC Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Kyoto Protokolü, URL: https://iklim.gov.tr/kyoto-protokolu-i-35, Son Erişim Tarihi: 5 Ekim 2023

31. İnternet: TC Dişişleri Bakanlığı, Kyoto Protokolü, URL: https://www.mfa.gov.tr/kyoto-protokolu.tr.mfa, Son Erişim Tarihi: 6 Mart 2024

32. İnternet: TC Dişişleri Bakanlığı, Paris Anlaşması, URL: https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa, Son Erişim Tarihi: 6 Mart 2024.

33. İnternet: TC Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Türkiye Ulusal Katkı Beyanı'nı COP27'de Açıkladı, URL: https://iklim.gov.tr/turkiye-ulusal-katki-beyani-ni-cop27-de-acikladi-haber-84, Son Erişim Tarihi: 10 Mart 2024

34. İnternet: European Council, Council of the European Union, European Council, 20-21 June 2019 URL: https://www.consilium.europa.eu/en/meetings/european-council/2019/06/20-21/, Son Erişim Tarihi: 12 Mart 2024.

35. İnternet: European Council, Brussel, 20 June 2019, (European Council meeting (20 June 2019)) URL: https://www.consilium.europa.eu/media/39922/20-21-euco-final-conclusions-en.pdf, Son Erişim Tarihi: 15 Mart 2024.

36. İnternet: Avrupa Birliği Komisyonu, Avrupa Yeşil Mutabakatı (The European Green Deal). URL: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF, Son Erişim Tarihi: 20 Mart 2024

37. İnternet: CBI Hollanda Dışişleri Bakanlığı, AB Yeşil Mutabakatı – How will it impact my business?, URL: https://www.cbi.eu/market-information/eu-green-deal-how-will-it-impact-my-business, Son Erişim Tarihi: 25 Mart 2024

38. İnternet: Avrupa Birliği Komisyonu, Avrupa Yeşil Mutabakatı, URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en, Son Erişim Tarihi: 1 Nisan 2024.

39. İnternet: Avrupa Birliği Komisyonu, EU taxonomy for sustainable activities, URL: https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities_en, Son Erişim Tarihi 2 Nisan 2024.

40. Alagöz, İ., Sümer, A., Tokgöz, A., Yavuz, B., Babalı, B., Bulut, E., Alan, E., Eker, F., Akyol, F., Demirhan Başbilen, G., Koca, G., Bülbül, G., Özek Sadıkoğlu, H., Atan, İ., Ergün, İ., Artantaş, O. Ç., Tutuş, R., Ülker, S., Deniz, S. S., Aksoy, S., (2023). *Taksonomi,* Ankara: Tesab Yayınları.

41. İnternet: European Comission, EU Taxonomy Navigator, URL: https://ec.europa.eu/sustainable-finance-taxonomy/, Son Erişim Tarihi: 10 Nisan 2024

42. İnternet: Oxford Net Zero, What is net zero?, URL: https://netzeroclimate.org/what-is-net-zero-2/, Son Erişim Tarihi: 15 Nisan 2024

43. İnternet: International Energy Agency (IEA), Net Zero by 2050, URL: https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050, Son Erişim Tarihi: 25 Nisan 2024

44. İnternet: International Energy Agency (IEA), Consumption, URL: https://www.iea.org/reports/coal-information-overview/consumption, Son Erişim Tarihi: 5 Mayıs 2024

45. İnternet: International Monetary Fund (IMF), GDP, current prices, URL: https://www.imf.org/external/datamapper/NGDPD@WEO/WEOWORLD, Son Erişim Tarihi: 10 Mayıs 2024

46. İnternet: Anadolu Ajansı, Almanya. URL: https://www.aa.com.tr/tr/ulke-profilleri/almanya/901459, Son Erişim Tarihi: 10 Mayıs 2024

47. İnternet: U.S. Energy Information Administration Coal reserves 2022, URL: https://www.eia.gov/international/rankings/world?pa=264&u=0&f=A&v=none&y=01%2F01%2F2022&ev=false, Son Erişim Tarihi: 15 Mayıs 2024

48. İnternet: Bloomberg HT, Almanya Kömüre Dönüyor, URL: https://www.bloomberght.com/almanya-komure-donuyor-2321762, Son Erişim Tarihi: 15 Mayıs 2024

49. İnternet: International Energy Agency (IEA), Where does Germany get its electricity?, URL: https://www.iea.org/countries/germany/electricity#where-does-germany-get-its-electricity, Son Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2024

50. İnternet: Ember, Coal-Share of total electricty production (%), URL: https://ember-climate.org/topics/coal/, Son Erişim Tarihi: 21 Mayıs 2024

51. İnternet: Almanya Federal Ministry of Justice, 12 December 2019 Federal Climate Action Act, (Bundes-Klimaschutzgesetz – KSG), URL: https://www.gesetze-im-internet.de/englisch_ksg/englisch_ksg.html, Son Erişim Tarihi: 22 Mayıs 2024

52. İnternet: International Atomic Energy Agency (IAEA), Germany, URL: https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=DE, Son Erişim Tarihi: 25 Mayıs 2024

53. İnternet: World Nuclear Association (WNA), Nuclear Power in Germany, URL: https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/germany, Son Erişim Tarihi: 28 Mayıs 2024

54. İnternet: Anadolu Ajansı, Çin Halk Cumhuriyeti, URL: https://www.aa.com.tr/tr/ulke-profilleri/cin-halk-cumhuriyeti/901507, Son Erişim Tarihi: 1 Haziran 2024

55. İnternet: United Nations, World Population Dashboard, URL: https://www.unfpa.org/data/world-population-dashboard, Son Erişim Tarihi: 1 Haziran 2024

56. İnternet: International Energy Agency (IEA), China-Where does China get its energy?, URL: https://www.iea.org/countries/china/energy-mix, Son Erişim Tarihi: 1 Haziran 2024

57. İnternet: Ember, China electricty generation by source, URL: https://ember-climate.org/countries-and-regions/countries/china/, Son Erişim Tarihi: 2 Haziran 2024

58. İnternet: International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook 2023, URL: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023, Son Erişim Tarihi: 2 Haziran 2024

59. İnternet: Reuters, President Xi says China will start cutting coal consumption from 2026, URL: https://www.reuters.com/world/china/chinas-xi-says-china-will-phase-down-coal-consumption-over-2026-2030-2021-04-22/, Son Erişim Tarihi: 3 Haziran 2024

60. İnternet: Energy Foundation China, China's 14th Five-Year Plans on Renewable Energy Development and Modern Energy System, URL: https://www.efchina.org/Blog-en/blog-20220905-en#:~:text=The plan targets a 50,China%27s incremental electricity and energy, Son Erişim Tarihi: 5 Haziran 2024

61. İnternet: Climate Cooperation China, China released its 14th Five-Year Plan for Renewable Energy with quantitative targets for 2025, URL: https://climatecooperation.cn/climate/china-released-its-14th-five-year-plan-for-renewable-energy-with-quantitative-targets-for-2025/, Son Erişim Tarihi: 5 Haziran 2024

62. İnternet: Reuters, China can't quit coal by 2040, researchers say, despite global climate goals'. URL: https://www.reuters.com/world/china/china-cant-quit-coal-by-2040-researchers-say-despite-global-climate-goals-2024-04-23/, Son Erişim Tarihi: 6 Haziran 2024

63. İnternet: Reuters, In China's coal country, full steam ahead with new power plants despite climate pledges, URL: https://www.reuters.com/sustainability/chinas-coal-country-full-steam-ahead-with-new-power-plants-despite-climate-2023-11-30/, Son Erişim Tarihi: 7 Haziran 2024

64. İnternet: International Atomic Energy Agency (IAEA), China People's Repuclic of', URL: https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=CN, Son Erişim Tarihi: 8 Haziran 2024

65. İnternet: Anadolu Ajansı, Hindistan, URL: https://www.aa.com.tr/tr/ulke-profilleri/hindistan/902411, Son Erişim Tarihi: 10 Haziran 2024

66. İnternet: Dış Ekonomik İlişkiler Kurulu (DEIK), Hindistan ülke bülteni Aralık 2011, URL: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.deik.org.tr%2Fuploads%2Fhindistan-ulke-bulteni.doc&wdOrigin=BROWSELINK, Son Erişim Tarihi: 10 Haziran 2024

67. İnternet: International Energy Agency (IEA), India-Energy system of India, URL: https://www.iea.org/countries/india, Son Erişim Tarihi: 11 Haziran 2024

68. İnternet: Ember, India-Electricity generation by source-2023, URL: https://ember-climate.org/countries-and-regions/countries/india/, Son Erişim Tarihi: 11 Haziran 2024

69. İnternet: Government of India Ministry Of Power-Central Electricity Authority, National Energy Plan. URL: https://cea.nic.in/wp-content/uploads/irp/2023/05/NEP_2022_32_FINAL_GAZETTE-1.pdf, Son Erişim Tarihi: 15 Haziran 2024

70. İnternet: International Atomic Energy Agency (IAEA), India, URL: https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=IN, Son Erişim Tarihi: 15 Haziran 2024

71. İnternet: Anadolu Ajansı, Polonya. URL: https://www.avrupaulkeleri.com/2016/06/polonya-nerede.html, Son Erişim Tarihi: 20 Haziran 2024

72. İnternet: Eurocoal, Eurocoal-Poland, (6th Ed.), URL: https://euracoal.eu/library/archive/poland-6/, Son Erişim Tarihi: 21 Haziran 2024

73. İnternet: International Energy Agency (IEA), Poland-Energy system of Poland, URL: https://www.iea.org/countries/poland, Son Erişim Tarihi: 21 Haziran 2024

74. İnternet: Ember, Poland electricity generation byu source URL: https://ember-climate.org/countries-and-regions/countries/poland/, Son Erişim Tarihi: 22 Haziran 2024

75. İnternet: European Comission, National energy and climate plans (NECPs), URL: https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/implementation-eu-countries/energy-and-climate-governance-and-reporting/national-energy-and-climate-plans_en, Son Erişim Tarihi: 23 Haziran 2024

76. İnternet: Ministry of Climate and Environment Republic of Poland, Energy Policy of Poland until 2040 (EPP2040), URL: https://www.gov.pl/web/climate/energy-policy-of-poland-until-2040-epp2040, Son Erişim Tarihi: 23 Haziran 2024

77. İnternet: Beyond Fossil Fuels, Avrupa Ülkelerindeki Kömürden Çıkış Duyurularına Genel Bakış, URL: https://beyondfossilfuels.org/wp-content/uploads/2021/03/AB-kömürden-çikiş-liste_2103.pdf, Son Erişim Tarihi: 25 Haziran 2024

78. İnternet: Reuters (Kate Abnett), Poland plans to set end date for coal power, URL: https://www.reuters.com/sustainability/poland-plans-set-end-date-coal-power-2024-01-15/, Son Erişim Tarihi: 25 Haziran 2024

79. İnternet: International Atomic Energy Agency (IAEA), Country Nuclear Power Profiles 2018 Edition Poland, URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/cnpp2018/countryprofiles/Poland/Poland.htm, Son Erişim Tarihi: 26 Haziran 2024

80. İnternet: United Nations, Specifications for the application of the United Nations Framework Classification for Fossil Energy and Mineral Reserves and Resources 2009 to Renewable Energy Resources, (Cenova-2016), URL: https://unece.org/DAM/energy/se/pdfs/comm25/ECE_ENERGY_2016_4.pdf, Son Erişim Tarihi: 27 Haziran 2024

81. İnternet: Türkiye Uzay Ajansı, Güneş, URL: https://www.tua.gov.tr/tr/blog/gunes/gunes, Son Erişim Tarihi: 27 Haziran 2024

82. İnternet: International Atomic Energy Agency (IAEA), What is nuclear fusion?, URL: https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-nuclear-fusion, Son Erişim Tarihi: 1 Temmuz 2024

83. İnternet: U. S. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Solar Energy Basics, URL: https://www.nrel.gov/research/re-solar.html, Son Erişim Tarihi: 2 Temmuz 2024

84. İnternet: Antalya Enerji, Güneş pili- solar pil nedir?, URL: https://www.antalyaenerji.com/gunes-fotovoltaik-pili-nedir-ve-nasil-calisir/, Son Erişim Tarihi: 3 Temmuz 2024

85. İnternet: U. S. Office of Energy Energy Efficiency & Renewable, Concentrating Solar-Thermal Power, URL: https://www.energy.gov/eere/solar/concentrating-solar-thermal-power#:~:text=Concentrating solar-thermal power (CSP,enhanced oil recovery%2C food processing%2C, Son Erişim Tarihi: 4 Temmuz 2024

86. İnternet: Solar Power World, World's Largest Aperture Parabolic Trough Installation, URL: https://www.solarpowerworldonline.com/2012/05/worlds-largest-aperture-parabolic-trough-installation/, Son Erişim Tarihi: 5 Temmuz 2024

87. Scalco, P., Copetti, J., Macagnan, M., Diehl de Oliveira, J., (1-5 Kasım 2021). *Linear Fresnel Solar Collector Concentrator - A Review*, 26. ABCM Uluslararası Makina Mühendisliği Kongresi'nde sunuldu, Florianópolis, Brezilya.

88. Howard, D., Harley, R. G., (25-29 Temmuz 2010). *Modeling of dish-Stirling solar thermal power generation*, IEEE Power & Energy Society General Meeting (PES 2010), Minnesota, ABD, 1-7.

89. İnternet: USA Office of Energy Energy Efficiency & Renewable, Dish/Engine System Concentrating Solar-Thermal Power Basic, URL: https://www.energy.gov/eere/solar/dishengine-system-concentrating-solar-thermal-power-basics, Son Erişim Tarihi: 10 Temmuz 2024

90. Belgasim, B., Aldali, Y., Abdunnabi, M., Hashem, G., Hossin, K., (2018). The potential of concentrating solar power (CSP) for electricity generation in Libya, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90(C), 1-15.

91. İnternet: U.S. Energy Information Administration, Crescent Dunes concentrating solar plant begins producing electricity, URL: https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=25212, Son Erişim Tarihi: 11 Temmuz 2024

92. Betz, A. (1966). *Introduction to the Theory of Flow Machines*, (Karlsruhe): Pergamon Yayın.

93. Ebrahimpour, M., Shafaghat, R., Alamian, R., Shadloo, M. S., (2019). Numerical Investigation of the Savonius Vertical Axis Wind Turbine and Evaluation of the Effect of the Overlap Parameter in Both Horizontal and Vertical Directions on Its Performance, *Symmetry*, 11, 6.

94. İnternet: International Energy Agency (IEA), (2019). Offshore Wind Outlook 2019 World Energy Outlook Special Report, URL: https://www.iea.org/reports/offshore-wind-outlook-2019, Son Erişim Tarihi: 15 Temmuz 2024

95. İnternet: U.S. Energy Information Administration, Wind explained-Types of wind turbines, URL: https://www.eia.gov/energyexplained/wind/types-of-wind-turbines.php, Son Erişim Tarihi: 15 Temmuz 2024

96. Al-Ahmar, E., Benbouzid, M., Amirat, Y., Benelghali, S., (6-9 Eylül 2008). *DFIG-Based Wind Turbine Fault Diagnosis Using a Specific Discrete Wavelet Transform*, Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, ICEM'08'de sunuldu, Algarve, Portekiz, 1-6.

97. İnternet: U. S. Office of Energy Energy Efficiency & Renewable, Geothermal Basics, URL: https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics, Son Erişim Tarihi: 16 Temmuz 2024

98. İnternet: Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), Jeotermal. URL: https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-jeotermal, Son Erişim Tarihi: 17 Temmuz 2024

99. İnternet: Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), Biyokütle. URL: https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-biyokutle, Son Erişim Tarihi: 18 Temmuz 2024

100. İnternet: International Energy Agency (IEA), Bioenergy, URL: https://www.iea.org/energy-system/renewables/bioenergy, Son Erişim Tarihi: 18 Temmuz 2024

101. İnternet: Enerji Sistemleri Mühendisliği, Hidroelektrik Santral Nedir?, URL: https://www.enerjisistemlerimuhendisligi.com/hidroelektrik-santral/2535/, Son Erişim Tarihi: 20 Temmuz 2024

102. İnternet: U. S. Office of Energy Energy Efficiency & Renewable, Types of Hydropower Turbines, URL: https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-turbines, Son Erişim Tarihi: 20 Temmuz 2024

103. İnternet: Yeşeren Enerji Dergisi, Su altı akıntı türbinleri, URL: https://yeserenerji.com/su-alti-akinti-turbinleri/#kaynak16, Son Erişim Tarihi: 22 Temmuz 2024

104. İnternet: U. S. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Hydrogen Basics. URL: https://www.nrel.gov/research/eds-hydrogen.html, Son Erişim Tarihi: 23 Temmuz 2024

105. İnternet: International Renewable Energy Agency (IRENA), Hydrogen. URL: https://www.irena.org/Energy-Transition/Policy/Policies-for-green-hydrogen, Son Erişim Tarihi: 25 Temmuz 2024

106. İnternet: Dinçer, İ., Eroğlu, İ., Öztürk, M., (2021) Türkiye İçin Hidrojen Teknolojileri Yol Haritası, Hidrojen Teknolojileri Derneği, URL: https://www.hidrojenteknolojileri.org/HTD/Turkiye_icin_Hidrojen_Teknolojileri_Yol_Haritasi_Raporu_2021.pdf, Son Erişim Tarihi: 25 Temmuz 2024

107. İnternet: Tenmak, Elektrolizör, URL: https://temen.tenmak.gov.tr/tr/temiz-enerji/hidrojen/elektrolizor.html, Son Erişim Tarihi: 1 Ağustos 2024

108. İnternet: International Renewable Energy Agency (IRENA), Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.50C Climate Goal, URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf, Son Erişim Tarihi: 2 Ağustos 2024

109. İnternet: Thyssenkrupp Nucera, The Four Main Types of Water Electrolysis Technology. URL: https://www.new-era-insights.com/article/the-four-main-types-of-water-electrolysis-technology/, Son Erişim Tarihi: 3 Ağustos 2024

110. İnternet: Scottish Government, Assessment of electrolysers: report, URL: https://www.gov.scot/publications/assessment-electrolysers-report/pages/2/, Son Erişim Tarihi: 4 Ağustos 2024

111. Kumar, S. S., Himabindu, V., (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review, *Materials Science for Energy Technologies,* 2(3), 442-454.

112. İnternet: International Energy Agency (IEA), Electrolysers, Technology Deployment, URL: https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/electrolysers, Son Erişim Tarihi: 5 Ağustos 2024

113. Alagöz, İ., Koca, G., Başaran, M., Karapınar, İ. S., Küçükaslan, G., Yardımcı, M. Y., Kılıç, B. M., Döner, U., Günay, N., Hocaoğlu, F., Ergin, C., Aydın, K., Öztürk, Ö., Aktürk, C., Küpçüoğlu, S., Özyıldırım, M., (2022). *Küçük Modüler Reaktörler (SMR),* Ankara: Tesab Yayınları

114. İnternet: World Nuclear Association-WNA, Outline History of Nuclear Energy, URL: https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/outline-history-of-nuclear-energy, Son Erişim Tarihi: 6 Ağustos 2024

115. Lamarsh, J. R., Baratta, A. J., (1982). *Introduction to Nuclear Engineering,* (Üçüncü Baskı), New Jersey, ABD.

116. İnternet: World Nuclear News -WNN, First UAE nuclear reactor reaches full power. URL: https://world-nuclear-news.org/Articles/First-UAE-nuclear-reactor-reaches-full-power, Son Erişim Tarihi: 7 Ağustos 2024

117. Park, Y. J., Parka, N., Lee, S., Park, Y., (2017). Seismic analysis of the APR1400 nuclear reactor system using a verified beam element mode, *Nuclear Engineering and Design*, 313, 108-117

118. İnternet: World Nuclear Association-WNA, How is used nuclear fuel managed? URL: https://world-nuclear.org/our-association/publications/technical-positions/how-is-used-nuclear-fuel-managed, Son Erişim Tarihi: 10 Ağustos 2024

119. Benguigui, W., (2018). *Numerical simulation of two-phase flow induced vibration*, Doktora Tezi, Paris-Saclay Üniversitesi, Mekanik ve Enerji Bilimleri, Malzeme ve Yer Bilimleri Enstitüsü, Fransa.

120. İnternet: Westinghouse, Steam Generator Engineering Product Portfolio. URL: https://westinghousenuclear.com/data-sheet-library/steam-generator-engineering-product-portfolio/, Son Erişim Tarihi: 15 Ağustos 2024

121. İnternet: World Nuclear Association-WNA, Small Nuclear Power Reactors, URL: https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors, Son Erişim Tarihi: 16 Ağustos 2024

122. İnternet: International Atomic Energy Agency (IAEA), In Operation & Suspended Operation Reactors, URL: https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByType.aspx, Son Erişim Tarihi: 10 Aralık 2024

123. İnternet: U. S. Nuclear Regulatory Commision-US NRC, The Pressurized Water Reactor (PWR), URL: https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/animated-pwr.htm, Son Erişim Tarihi: 20 Ağustos 2024

124. International Atomic Energy Agency (IAEA), (2008), *Heavy Component Replacement in Nuclear Power Plants: Experience and Guidelines,* IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.2 Avusturya.

125. Tabadar, Z., Aghajanpour, S., Jabbari, M., Khaleghi, M., Hashemi-Tilehnoee, M., (2018). Thermal-hydraulic analysis of VVER-1000 residual heat removal system using RELAP5 code, an evaluation at the boundary of reactor repair mode, *Alexandria Engineering Journal,* 57(3), 1249-1259

126. İnternet: U. S. Nuclear Regulatory Commision-US NRC), The Boiling Water Reactor (BWR). URL: https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/animated-bwr.html, Son Erişim Tarihi: 25 Ağustos 2024

127. İnternet: Hitachi-GE Nuclear Energy Ltd., Boiling Water Reactor. URL: https://www.hitachi-hgne.co.jp/en/download/abwr.pdf, Son Erişim Tarihi: 27 Ağustos 2024

128. İnternet: Energy Encyclopedia, Heavy Water Reactor (PHWR). URL: https://www.energyencyclopedia.com/en/nuclear-energy/the-nuclear-reactors/heavy-water-reactor-phwr, Son Erişim Tarihi: 1 Eylül 2024

129. İnternet: GEN-IV International Forum (GIF), Origins of the GIF, URL: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9334/origins, Son Erişim Tarihi: 2 Eylül 2024

130. Internet: International Atomic Energy Agency (IAEA), What are Small Modular Reactors (SMRs)?, URL: https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs, Son Erişim Tarihi: 5 Eylül 2024

131. Ahn, K., Lee, K.-H., Lee, J.-S., Won, C., Yoon, J., (2020). Analytic springback prediction in cylindrical tube bending for helical tube steam generator, *Nuclear Engineering and Technology*, 52(9), 2100-2106.

132. Condon, C. A., Ivanusa, P., Whiting, J. M., Mirick, P. P., Bunn, A. L., Varnum-Lowry, C. B., Jensen, P. J., (2021). Fate and transport of unruptured tri-structural isotropic (TRISO) fuel particles in the event of environmental release for advanced and micro reactor applications, *Journal of Environmental Radioactivity*, 234, 106630.

133. İnternet: World Nuclear News -WNN, China's demonstration HTR-PM enters commercial operation. URL: https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Chinese-HTR-PM-Demo-begins-commercial-operation, Son Erişim Tarihi: 10 Eylül 2024

134. İnternet: T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), Kurum Hakkında. URL: https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/1-1051/kurumumuztarihce, Son Erişim Tarihi: 15 Eylül 2024

135. İnternet: Elektrik Üretim AŞ (EÜAŞ), EÜAŞ Hakkında. URL: https://www.euas.gov.tr/hakkimizda, Son Erişim Tarihi: 15 Eylül 2024

136. İnternet: Enerji Piyasaları İşletme AŞ (EPİAŞ), EPİAŞ Biz kimiz?. URL: https://www.epias.com.tr/epias-kurumsal/biz-kimiz/, Son Erişim Tarihi: 15 Eylül 2024

137. İnternet: Nükleer Düzenleme Kurumu, NDK Hakkına, URL: https://www.ndk.gov.tr/ndk-hakkinda, Son Erişim Tarihi: 16 Eylül 2024

138. İnternet: Nükleer Teknik Destek AŞ (NÜTED), Nüted Tarihçemiz. URL: https://nuted.com.tr/tarihcemiz, Son Erişim Tarihi: 17 Eylül 2024

139. İnternet: Türkiye Nükleer Enerji AŞ (TÜNAŞ), TÜNAŞ Hakkımızda, URL: https://tunas.gov.tr/tr/kurumsal/hakkimizda, Son Erişim Tarihi: 17 Eylül 2024

140. Sümer, A., Uçan, B., Özdemirci, E., Gürbüz, H., Özdemir, N., Çalıklıoğlu, E., Karayılanoğlu, Z., Erkan Yıldız, E., Özaydın, M. İ., Gazioğlu, K., Demirhan Başbilen, G., Koca, G., Koçar, G., Arıcı, Ş., Eryaşar, A., Kara, H. M., Jeotermal Elektrik Santral Yatırımcıları Derneği (JESDER), Bilgen, M., Türkoğlu, G., Yılmaz, T., Kalaycı, D., Başaran, M., Ozan, N., Erkişi, S., Ülker, S., Atan, İ., Tiryakioğlu Işık, Ş. Ş., Armağan, T. Y., Bekircan, Y., Sonbay, Z., (2023). *Cumhuriyetin 100. Yılında Türkiye Elektrik Tarihi,* Ankara: Tesab Yayınları

141. İnternet: Türkiye Elektrik İletim AŞ (TEİAŞ), Türkiye Elektrik Üretim İstatistikleri, I-Kurulu Güç 2023, Grafik I.I- Türkiye Kurulu Gücünün Yıllar İtibariyle Gelişimi, URL: https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri, Son Erişim Tarihi: 20 Eylül 2024

142. İnternet: Türkiye Elektrik İletim AŞ. (TEİAŞ), 2022 yılı Kurulu Kapasitenin Birincil Enerji Kaynaklarına Göre Dağılımı, URL: https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri, Son Erişim Tarihi: 20 Eylül 2024

143. İnternet: Türkiye Elektrik İletim AŞ. (TEİAŞ), Türkiye Elektrik Üretim İstatistikleri, Grafik III.I - 2023 Yılı Türkiye Elektrik Enerjisi Üretiminin Kaynaklara Göre Dağılımı, URL: https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri, Son Erişim Tarihi: 20 Eylül 2024

144. İnternet: Statista, Distribution of electricity generation worldwide in 2023, by energy source, URL: https://www.statista.com/statistics/269811/world-electricity-production-by-energy-source/#:~:text=Fossil fuels remain the greatest,with a 23 percent share. Son Erişim Tarihi: 21 Eylül 2024

145. İnternet: U.S. Department of Energy (DOE), Hybrid Energy Systems: Opportunities for Coordinated Research, URL: https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/77503.pdf. Son Erişim Tarihi: 22 Eylül 2024

146. İnternet: International Atomic Energy Agency (IAEA), IAEA Status Report for Advanced Nuclear Reactor Designs - High Temperature Gas Cooled Reactor - Pebble-Bed Module, Report-96. URL: https://aris.iaea.org/PDF/HTR-PM.pdf, Son Erişim Tarihi: 1 Ekim 2023

147. İnternet: Savree, Steam Turbine Condenser Explained. URL: https://savree.com/en/encyclopedia/steam-turbine-condenser, Son Erişim Tarihi: 23 Eylül 2024

148. Kaygusuz, K., (2011). Prospect of concentrating solar power in Turkey: The sustainable future, *Renewable and Sustainable Energy Reviews,*. 15(1), 808-814.

149. İnternet: Global Solar Atlas, Global Solar Atlas Ayvacık Region. URL: https://globalsolaratlas.info/map?c=39.854938,26.867065,8&s=39.58029,26.144022&m=site, Son Erişim Tarihi: 5 Temmuz 2024

150. İnternet: Global Solar Atlas, Global Solar Atlas Ayvacık Sahası. URL: https://globalsolaratlas.info/map?c=39.481255,26.509323,10&s=39.58029,26.144022&m=site&pv=small,180,33,1, Son Erişim Tarihi: 5 Temmuz 2024

151. Rediske, G., Burin, H. P., Rigo, P. D., Rosa, C. B., Michels, L., Siluk, J. C. M., (2021). Wind power plant site selection: A systematic review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 148, 111293.

152. Ayalke, Z. G., Şişman, A., (2022). Site selection for wind farms using geographic information system with best-worst method: A case study Amhara Region of Ethiopia, *Advanced Land Management,* 2(2), 69-78.

153. Caceoğlu, E., Yildiz, H. K., Oğuz, E., Huvaj, N., Guerrero, J. M., (2022). Offshore wind power plant site selection using Analytical Hierarchy Process for Northwest Turkey, *Ocean Engineering,* 252, 111178.

154. Kabak, M., Taşkınöz, G., (2020). Determination of The Installation Sites Of Wind Power Plants With Spatial Analysis: A Model Proposal, *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences,* 38(1), 441-457.

155. İnternet: Global Wind Atlas, Global Wind Atlas Çanakkale Ayvacık. URL: https://globalwindatlas.info/en, Son Erişim Tarihi: 6 Temmuz 2024

156. İnternet: Nükleer Düzenleme Kurumu (NDK), Nükleer Tesislere İlişkin İşlemler. URL: https://www.ndk.gov.tr/nukleer-tesislere-iliskin-islemler, Son Erişim Tarihi: 17 Eylül 2024

157. İnternet: Nükleer Düzenleme Kurumu (NDK), Nükleer Güç Santralları İçin Yer Raporu Biçim ve İçeriği Kılavuzu/GK-GR-01, URL: https://webim.ndk.gov.tr/file/9c16fdb8-e3a4-4935-8ebc-8fd36119302d, Son Erişim Tarihi: 18 Eylül 2024

158. Uluslararası Atom Enerji Ajansı (IAEA), (2015). *Site Survey and Site Selection for Nuclear Installations,* IAEA Safety Standards Series No. SSG-35, Avusturya.

159. Electric Power Research Institute (EPRI), (2022). *Advanced Nuclear Technology: Site Selection and Evaluation Criteria for New Nuclear Energy Generation Facilities (Siting Guide) 2022 Revision*, Palo Alto, ABD.

160. Devanand, A., Kraft, M., Karimi, I. A., (2019). Optimal site selection for modular nuclear power plants, *Computers & Chemical Engineering*, 125, 339-350.

161. Zhang, Z., Wu, Z., Sun, Y., Li, F., (2006). Design aspects of the Chinese modular high-temperature gas-cooled reactor HTR-PM, *Nuclear Engineering and Design,* 236 (5-6), 485–490

162. İnternet: U. S. National Renewable Energy Laboratory (NREL), NSRDB: National Solar Radiation Database. URL: https://nsrdb.nrel.gov/data-viewer, Son Erişim Tarihi: 10 Temmuz 2024

163. İnternet: World Nuclear Association -WNA, Nuclear Process Heat for Industry. URL: https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/industry/nuclear-process-heat-for-industry, Son Erişim Tarihi: 20 Eylül 2024

164. Wagner, M. J., Gilman, P., (2011). *Technical manual for the SAM physical trough model*, National Renewable Energy Laboratory-NREL, NREL/TP-5500-51825 Colorado, ABD.

165. İnternet: U. S. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Image Gallery. URL: https://images.nrel.gov/MX/Profiles/en/default/, Son Erişim Tarihi: 20 Eylül 2024

166. İnternet: Therminol, Therminol 66 Heat Transfer Fluid, URL: https://www.therminol.com/product/71093438?pn=Therminol-66-Heat-Transfer-Fluid, Son Erişim Tarihi: 10 Temmuz 2024

167. Agagna, B., Smaili, A., (2021). Effects of Rim Angle on Performance Predictions of a Parabolic Trough Solar Collector - *Advances in Green Energies and Materials Technology edited by M. A. Ghriga, Springer*, 375–382.

168. Morales, A., Vicente, G., (2017). A new generation of absorber tubes for concentrating solar thermal (CST) systems. In M. Blanco & L. R. Santigosa (Eds.), *Advances in concentrating solar thermal research and technology,* 59–73.

169. İnternet: F-Chart Software, Engineering Equation Solver (EES) Overview. URL: https://fchartsoftware.com/ees/, Son Erişim Tarihi: 20 Eylül 2023

170. Cengel, M. A., Boles, Y., (2013), *Thermodynamics: An Engineering Approach, (*7. Baskı), (New York): McGraw-Hill yayınevi.

171. Bellos, E., Tzivanidis, C., (2018). Assessment of the thermal enhancement methods in parabolic trough collectors, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 9(1), 59-70.

172. Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M., (1996), *Thermal Design and Optimization*, (New York): John Wiley & Sons (Wiley-Interscience) yayınevi.

173. Selamet, Ö. F., Becerikli, F., Mat, M. D., Kaplan, Y., (2011). Development and testing of a highly efficient proton exchange membrane (PEM) electrolyzer stack, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36 (17), 11480–11487.

174. Bossel, U., (2003). Hydrogen economy is dirty without renewables, *Fuel Cells Bulletin*, 6, 4

175. İnternet: Connelly, E., Penev, M., Milbrandt, A., Roberts, B., Gilroy, N., Melaina, M., (2020), Resource Assessment for Hydrogen Production, National Renewable Energy Laboratory (NREL/TP-5400-77198), URL: https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/77198.pdf, Son Erişim Tarihi: 1 Ekim 2024

176. Bellos E., Tzivanidis, C., (2017). A detailed exergetic analysis of parabolic trough collectors, *Energy Conversion and Management*, 149, 275–292,

177. İnternet: Duffie, J. A., Beckman, W. A., (2020), Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind Emeritus Professor of Mechanical Engineering, 5. URL: www.wiley.com/go/permissions. Son Erişim Tarihi: 3 Ekim 2024

178. Arslan, O., Ceylan, N., Köse, R., (3-7 Temmuz 2005). *Exergetic Evaluation of Coal Fired Power Plant Seyitömer Case Study*, The 2nd International Exergy, Energy and Environment Symposium'da sunuldu, No:42, Kos Yunanistan,.

179. Schlömer S., T. Bruckner, L. Fulton, E. Hertwich, A. McKinnon, D. Perczyk, J. Roy, R. Schaeffer, R. Sims, P. Smith, R. Wiser, (2014). *Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

180. İnternet: European Council Brussels, 12 December 2019, European Council meeting (12 December 2019), URL: https://www.consilium.europa.eu/media/41768/12-euco-final-conclusions-en.pdf, Son Erişim Tarihi: 5 Ağustos 2024

181. İnternet: International Atomic Energy Agency (IAEA), What is Nuclear Energy? The Science of Nuclear Power. URL: https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-nuclear-energy-the-science-of-nuclear-power, Son Erişim Tarihi: 15 Haziran 2024

EKLER

EK-1. Paris Anlaşması Önemli Maddeleri

Paris Anlaşmanın öne çıkan maddeleri aşağıda özetlenmiştir [32].

- İnsan kaynaklı sera gazlarının neden olduğu küresel sıcaklık artışını, sanayileşme öncesi döneme kıyasla 2 °C'nin altında kalmak üzere sınırlandırarak 1,5°C'yi yakalamak üzere hedef belirlemiştir.
- "Ortak fakat farklılaştırılmış sorumluluk ve göreceli kabiliyetler" ilkesi çerçevesinde, ülkelerin iklim değişikliği mücadelesine katkıda bulunmaları teyit edilmiştir.
- UNFCCC ile karşılaştırıldığında, tüm ülkelerin katkılarına dayanacak bir sistem öngörülmüştür.
- Gelişmiş ve gelişmekte olan ülke sınıflandırması yapılarak ülkelerin kendi kabiliyetlerine göre sorumluluk üstlenmesi anlayışı kabul edilmiş ancak gelişmiş/gelişmekte olan ülke sınıflandırmasının yapılabilmesi için bir kıstas belirlenmemiştir.
- İklim değişikliğinin olumsuz etkilerine maruz kalan ülkelerin uyum ve direnç kabiliyetlerinin ve sera gazı emisyon azaltım kapasitelerinin artırılması amacıyla öncelikle gelişmiş ülkelerin, en az gelişmiş ülkeler ve küçük ada devletleri başta olmak üzere, ihtiyacı olan gelişmekte olan ülkelere finansman, teknoloji transferi ve kapasite geliştirme imkanı sağlaması öngörmektedir.
- Gelişmiş ülkelerin mutlak emisyon azaltımı hedeflerini sürdürmeleri; gelişmekte olan ülkelerin ise emisyon azaltımı hedeflerini yükselterek, zaman içinde tüm ekonomiyi kapsayacak yeni, artırılmış hedefler benimsemeleri istenmiştir.
- Hedeflerin uygulamaya konulması kapsamında ülkelerin iklim değişikliği mücadele hedeflerini içeren Ulusal Katkı Beyanları (Nationally Determined Contributions-NDCs), Anlaşma'nın önemli sac ayaklarından birini oluşturmaktadır.

EK-2. Avrupa Yeşil Mutabakatı için Alınan Kararlar

Avrupa Konseyi'nin 12 Aralık 2019 tarihinde gerçekleştirdiği toplantısında, iklim değişikliği mücadelesi konusunda aşağıda belirtilen kararlar alınarak önemli bir ilerleme sağlanmıştır [180]:

1. Avrupa Konseyi, Paris Anlaşması'nın amaçları doğrultusunda, 2050 yılına kadar nötr-iklim bir AB'ye ulaşma hedefini onayladı.
2. Nötr-iklime geçiş, ekonomik büyüme potansiyeli, yeni iş modelleri ve pazarlar, yeni işler ve teknolojik gelişmeler gibi önemli fırsatlar getirecektir. İleriye dönük araştırma, geliştirme ve inovasyon politikalarının kilit bir rolü olacaktır.
3. Nötr-iklime ulaşmak, zorlu bir süreç olduğundan tüm Üye Devletlerin yararına olacak şekilde farklı ulusal koşulları dikkate alarak uygun maliyetli, adil ve sosyal açıdan dengeli ve adil bir geçiş sağlamak için yeterli araçları, teşvikleri, desteği ve yatırımları kapsayan uygun bir çerçeve oluşturulacaktır.
4. Geçiş, önemli kamu ve özel yatırımlar gerektirdiğinden Avrupa Konseyi, 2021'den 2030'a kadar iklim eylemi ve çevresel sürdürülebilirliğe 1 trilyon Euro'luk yatırımı sağlamak üzere EIB'nı destekleyecektir. InvestEU uygulaması önemli bir rol oynayacaktır. Geçişten en çok etkilenen bölgeler ve sektörlere özel destek, Adil Geçiş Mekanizması (Just Transition Mechanism) ile sağlanacaktır. Adil Geçiş Mekanizması ile 100 milyar Euro'luk yatırım sağlanacak ve dönüşüm çabalarına finansman desteği 2030'dan sonra devam edecektir.
5. Tüm ilgili AB mevzuatı ve politikaları, eşit şartlara saygı gösterirken iklim tarafsızlığı hedefi konusunda tutarlı olmalı ve katkıda bulunmalıdır.
6. Avrupa Konseyi, enerji güvenliğini sağlayacak ve Üye Devletlerin enerji çeşitliliğine karar verme ve teknolojiyi seçme hakkına saygı gösterecektir. Bazı Üye Devletler, nükleer enerjiyi yaşamlarının bir parçası olarak kullandıklarını belirtmişlerdir.
7. Komisyon, devlet yardımı ve kamu alımları da dahil olmak üzere mevcut kuralları gözden geçirecek ve nötr-iklime geçiş için, çevresel ve sosyo-ekonomik etkileri hakkında düzenli olarak rapor verecektir. Nört-iklim hedefi, karbon kaçağına yönelik etkili önlemler dahil olacak şekilde AB'nin rekabet edebilirlik değerlerini koruyacaktır. Bu nedenle, Avrupa Komisyonu, karbon-yoğun sektörlerle ilgili bir karbon sınırı ayarlama mekanizması önerecektir. Üçüncü ülkelerdeki tesislerin en yüksek uluslararası çevre standartlarına ve güvenlik standartları uyması gerekir.

EK-2. (devam) Avrupa Yeşil Mutabakatı için Alınan Kararlar

8. AB'nin uzun vadeli stratejisi, 2020'de en kısa sürede hazırlanarak UNFCCC'ye sunulacaktır.
9. COP-26 tarihinden önce AB'nin 2030 ulusal katkısı (NDC) güncellenecek ve kapsamlı bir etki değerlendirmesi hazırlanacaktır.
10. Uluslararası katılım, başarı için çok önemlidir.
11. AB'nin 2050'ye kadar nötr-iklim hedefine yönelik ilerlemesi, gözlem altında ve stratejik rehberlik ile takip edilecektir.

EK-3. PWR Reaktör Teknolojisi Ekipmanı

Basınçlandırıcı

Basınçlı su reaktör tip tasarımlarında kullanılan bir ekipmandır. Tasarımın adından da anlaşılacağı üzere, reaktör soğutma suyunda kaynama istenmediğinden çok yüksek basınç altında çalıştırılır.

Reaktörde kullanılan su sıkıştırılamaz olduğundan, hacim miktarındaki en küçük bir değişiklik basınç değerinde büyük değişikliklere neden olur ve sistem için istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle bu tip reaktör tasarımlarında buhar üreteçleri ile reaktör koru arasında yani sistemin sıcak hat olarak tanımlandığı birincil devre üzerinde tüm sistemin basınç kontrolünü sağlayan bir basınçlandırıcı yer alır. Böylece PWR sisteminde kullanılan suyun kaynaması engellenmiş olur [115]. Basınçlandırıcı içinde bir miktar su vardır; basınç düştüğü zaman bu su, elektrikli ısıtıcılarla ısıtılırken; basınç yükseldiği zaman emniyet vanaları açılmasıyla denge sağlanmış olur [113].

EK-4. Elektroliz Gelişimi

I. Nesil (1800-19850): Elektrolizörler, çoğunlukla düşük maliyetli elektrik kullanarak amonyak üretimi için kullanılıyordu. 1900'larda, 400'den fazla endüstriyel elektrolizör vardı. Norveç, Peru, Zimbabve ve Mısır'da elektrolizörler endüstriyel amaç için kullanıldı. Elektrolizörler ayrıca, klor üretimi için de kullanıldı. Aynı elektrokimyasal prensibi kullanılan klor üretiminde, ham madde olarak suyun içinde yüksek konsantre sodyum klorür kullanılıyordu ve yan ürün olarak da hidrojen üretiliyordu. Bu üretim türü, 19. yüzyılın başından itibaren elektrolizin önemli bir uygulaması olarak yer almıştır. Kullanılan tek teknoloji olan alkali elektrolizörler, atmosferik basınçta çalışıyor ve yoğun aşındırıcı bazik çözeltiler (örn. potasyum hidroksit [KOH]) ile asbest gaz ayırıcılar (diyafram) kullanılıyordu. Asbestin sağlık açısından zararlı olduğu 20. yüzyılın sonlarına doğru anlaşılınca, asbest, zirkon gibi diğer malzemelerle değiştirilmeye başlandı. Kompozit zirkonyum oksit (ZrO2) ayırıcılar, çok iyi bir seçim olmamasına rağmen, yüzyılın ortalarından itibaren çok tercih edildi [108].

II. Nesil (1950-1980): 1940 yılında Dupont firmasının keşfettiği proton taşıma kapasitesi olan malzeme ile PEM elektrolizörlerinin temeli oluştu. PEM elektrolizörleri, alkalin sistemlerdeki gibi korozif çözeltiler yerine saf su kullanıyordu. General Electric, Siemens, ABB ve Hamilton Sundstrand gibi şirketler, PEM elektrolizörlerinin geliştirilmesinde öncülük etti. Bu teknolojinin kullanım ve öğrenilmesi, özellikle uzay programları ve denizaltılardaki askeri yaşam destek sistemleri ile hız kazandı [108]..

III. Nesil (1950-1980): PEM elektrolizörleri için, tasarımın basitleştirilmesini, maliyetin düşürülmesini ve kapasitesinin birkaç yüz kW'a çıkarılmasına yönelik gelişmeler oldu. Böylece, daha yüksek sistem verimliliği, daha düşük sermaye maliyetleri ve 50.000 saatin ötesinde dayanıklılık elde edildi Alkali için, başlangıçta büyük hidroelektrik santrallarıyla entegre olurken, daha küçük ve basınçlı üniteler haline getirildi. Daha az hidrojen talebi olan alanlara yönelik tasarımla, elektrolizler, büyük ölçekli projeler yerine daha küçük ve çeşitli uygulamalara uygun hale geldi [108]..

IV. Nesil (1950-1980): Bu nesli karakterize eden üç eğilim bulunmaktadır. Birincisi, PV kurulu kapasitesi 14 kat ve rüzgar kurulu kapasitesi 3 kat büyürken maliyetler PV, kara rüzgarı ve açık deniz rüzgarı için sırasıyla %82, %47 ve %39 oranında azaldı [108]. Böylece

EK-4. (devam) Elektroliz Gelişimi

yeşil hidrojen için ana maliyet bileşeni olan elektriği çok daha ucuz hale getirirdi ve ilgiyi artırdı. İkincisi, iklim değişikliği kapsamında önemli rol üstlenebileceği anlaşıldı. Üçüncüsü, gelişmiş elektrolizörlerinin sürekli artan kapasitesi, elektrolizörler için daha düşük sermaye harcamasına yol açarak enerji politikasında daha öne çıktı [108].

V. Nesil (2020 sonrası): Elektroliz yapısının MW'tan GW ölçeğine, potansiyelden gerçeğe taşınması bekleniyor. Bu dönemde, daha düşük maliyet (<USD 200/kW), yüksek dayanıklılık (>50.000 saat) ve yüksek verimlilik (%80'e varan alt ısıl değer) hedefleri yer alıyor. Bunun için büyük ölçekli ekonominin yanı sıra daha büyük üretim kapasitesi ve Ar- Ge yoluyla teknolojik atılımların yapılması gerekmektedir [108].

EK-5. Therminol-66 ısı aktarma akışkanın sıcaklıklara göre sıvı özellikleri



Şekil 5.1. Therminol-66 ısı aktarma akışkanı özellikleri

EK-5. (devam) Therminol-66 ısı aktarma akışkanın sıcaklıklara göre sıvı özellikleri

Çizelge 5.1. Therminol-66 ısı aktarma akışkanı özellikleri

Temperature		Liquid density	Liquid heat capacity	Heat of vaporization	Liquid enthalpy[b]	Liquid thermal conductivity	Liquid viscosity[c]		Vapor pressure[d]
°C	°F								
–3	27	1023	1.49	415.6	22.0	0.1180	2050	2000	—
0	32	1021	1.49	414.3	26.0	0.1183	1320	1300	—
10	50	1015	1.53	409.6	41.2	0.1179	344	339	—
20	68	1008	1.56	405.0	56.6	0.1176	123	122	—
30	86	1002	1.60	400.5	72.4	0.1172	55.6	55.5	—
40	104	995	1.63	396.1	88.5	0.1167	29.5	29.6	—
50	122	989	1.66	391.8	105.0	0.1163	17.6	17.8	—
60	140	982	1.70	387.5	121.8	0.1158	11.5	11.7	—
70	158	975	1.73	383.3	139.0	0.1152	8.06	8.26	0.011
80	176	969	1.77	379.2	156.5	0.1147	5.93	6.12	0.018
90	194	962	1.80	375.1	174.4	0.1141	4.55	4.73	0.030
100	212	955	1.84	371.1	192.6	0.1135	3.60	3.77	0.048
110	230	948	1.87	367.1	211.1	0.1128	2.92	3.08	0.077
120	248	941	1.91	363.2	230.0	0.1121	2.42	2.57	0.119
130	266	934	1.94	359.4	249.3	0.1114	2.05	2.19	0.181
140	284	928	1.98	355.5	268.9	0.1107	1.75	1.89	0.271
150	302	921	2.01	351.7	288.8	0.1099	1.52	1.65	0.400
160	320	914	2.05	347.9	309.1	0.1091	1.33	1.46	0.579
170	338	907	2.09	344.2	329.8	0.1083	1.18	1.30	0.827
180	356	899	2.12	340.4	350.9	0.1074	1.06	1.17	1.17
190	374	892	2.16	336.7	372.3	0.1065	0.950	1.06	1.62
200	392	885	2.19	332.9	394.0	0.1056	0.860	0.972	2.23
210	410	878	2.23	329.1	416.1	0.1046	0.784	0.893	3.02
220	428	870	2.27	325.3	438.6	0.1036	0.718	0.825	4.06
230	446	863	2.30	321.5	461.5	0.1026	0.661	0.766	5.39
240	464	856	2.34	317.7	484.7	0.1015	0.611	0.714	7.10
250	482	848	2.38	313.7	508.3	0.1004	0.567	0.669	9.25
260	500	840	2.42	309.8	532.3	0.0993	0.529	0.629	12.0
270	518	832	2.45	305.8	556.7	0.0982	0.495	0.594	15.3
280	536	825	2.49	301.7	581.4	0.0970	0.464	0.563	19.5
290	554	817	2.53	297.5	606.5	0.0958	0.437	0.535	24.5
300	572	809	2.57	293.2	632.0	0.0946	0.413	0.510	30.7
310	590	800	2.61	288.8	657.9	0.0933	0.391	0.488	38.2
320	608	792	2.65	284.3	684.2	0.0920	0.371	0.468	47.2
330	626	783	2.69	279.7	710.8	0.0906	0.353	0.450	57.9
340	644	775	2.73	274.9	737.9	0.0893	0.336	0.434	70.7
350	662	766	2.77	270.0	765.4	0.0879	0.321	0.420	85.7
360	680	757	2.81	264.9	793.2	0.0865	0.308	0.406	103
370	698	748	2.85	259.6	821.5	0.0850	0.295	0.395	124

emperature 345°C (650°F). These data are based on samples tested in the laboratoryand are not guaranteed for all samples. Contact us for complete sales specifications for Therminol 66 fluid. [b]Liquid enthalpy basis is –17.8°C (0°F). [c]1 cSt = 1 mm²/s and 1 mPa•s = 1 cP. [d]100 kPa = 1 bar

EK-6. Termodinamik kanunlarının özetli

Kütle Dengesi	$m_g - m_ç = \Delta m_{sistem}$
Enerji Dengesi	$\underbrace{\dot{E}_g - \dot{E}_ç}_{\substack{Isı, iş\ ve\ kütle\ ile \\ net\ enerji\ geçişi}} = \underbrace{\Delta E_{sistem}}_{\substack{\text{iç, kinetik, potansiyel, vb.} \\ \text{enerjideki değişim}}}$
Entropi Dengesi	$\underbrace{S_g - S_ç}_{\substack{Isı\ ve\ kütle\ ile \\ net\ etropi\ geçişi}} + \underbrace{S_ü}_{\substack{Entropi \\ üretimi}} = \underbrace{\Delta S_{sistem}}_{\substack{Entropideki \\ değişim}}$
Ekserji Dengesi	$\underbrace{X_{giren} - X_{çıkan}}_{\substack{ısı, iş\ ve\ kütle\ ile \\ ekserji\ geçişi}} - \underbrace{X_{yok\ olan}}_{\substack{ekserji \\ yok\ oluşu}} = \underbrace{\Delta X_{sistem}}_{\substack{ekserjideki \\ değişim}}$



Gazili olmak ayrıcalıktır