

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TERMİK SANTRALLERDE KARBONDİOKSİT YAKALAMA VE BUHAR
YOĞUŞTURMA İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİR, YENİLİKÇİ BİR SİSTEM
TASARIMI**

DOKTORA TEZİ

Bevin AKÇADAĞ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

ŞUBAT 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TERMİK SANTRALLERDE KARBONDİOKSİT YAKALAMA VE BUHAR
YOĞUŞTURMA İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİR, YENİLİKÇİ BİR SİSTEM
TASARIMI**

DOKTORA TEZİ

Bevin AKÇADAĞ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mahnaz GÜMRÜKÇÜOĞLU YİĞİT

ŞUBAT 2025

Bevin AKÇADAĞ tarafından hazırlanan “**TERMİK SANTRALLERDE KARBONDİOKSİT YAKALAMA VE BUHAR YOĞUŞTURMA İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİR, YENİLİKÇİ BİR SİSTEM TASARIMI**” adlı tez çalışması 12.02.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

- Jüri Başkanı : Doç. Dr. Mahnaz GÜMRÜKÇÜOĞLU YİĞİT (Danışman).....**
Sakarya Üniversitesi
- Jüri Üyesi : Prof.Dr. Hülya KARABAŞ**
Sakarya Üniversitesi
- Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ayhan KARADEMİR**
Kocaeli Üniversitesi
- Jüri Üyesi : Doç. Dr. Beytullah EREN**
Sakarya Üniversitesi
- Jüri Üyesi : Doç. Dr. Şenay Ç. DOĞRUPARMAK**
Kocaeli Üniversitesi.



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “**TERMİK SANTRALLERDE KARBONDİOKSİT YAKALAMA VE BUHAR YOĞUŞTURMA İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİR, YENİLİKÇİ BİR SİSTEM TASARIMI**” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(12/02/2025).

Bevin AKÇADAĞ





Sevgili anneciğime...



TEŞEKKÜR

Bu doktora tezinin hazırlanması ve tamamlanması sürecinde, değerli katkıları ve destekleriyle yanımda olan herkese şükranlarımı sunarım.

Öncelikle, tez sürecimin her aşamasında bana yol gösteren, akademik çalışmalarına ışık tutan ve beni sürekli destekleyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Mahnaz GÜMRÜKÇÜOĞLU YİĞİT'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisi, yalnızca akademik bilgi ve rehberliğiyle değil, aynı zamanda zor zamanlarımda bana moral ve motivasyon kaynağı olarak bu zorlu süreci aşmamda önemli bir rol oynamış, yolumu aydınlatmıştır.

Tez İzleme Komitemde yer alan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Aykan KARADEMİR ve Prof. Dr. Hülya KARABAŞ'a da teşekkürü bir borç bilirim. Her tez izleme toplantısını, bilgilendirici ve destekleyici yaklaşımlarıyla benim için eşsiz bir öğrenme ve gelişim sürecine dönüştürmüşlerdir. Akademik gelişimime yaptıkları katkılar ve gösterdikleri destek için kendilerine sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca, tez sürecinde değerli bilgi ve yönlendirmeleriyle bana yol gösteren Doç. Dr. Gökhan COŞKUN hocama da en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecinde, sabırları ve anlayışlarıyla beni her zaman destekleyen aileme en derin teşekkürlerimi sunarım. Kızım Ceylin Vera, oğlum Muhammed Emir ve eşim Serkan AKÇADAĞ, bu süreçte bana zaman ve alan sağlayarak manevi desteklerini esirgememiştir. Gösterdikleri sevgi, sabır ve fedakârlık, bu tezin tamamlanmasında büyük bir motivasyon kaynağı olmuştur.

Tezimin tamamlanmasında emeği geçen tüm hocalarıma, anneciğime ve kardeşlerime ve bana destek olan herkese teşekkürlerimi sunarım.

Bevin AKÇADAĞ



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xv
SİMGELER	xvii
TABLO LİSTESİ	xix
ŞEKİL LİSTESİ	xxi
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç	5
2. GENEL TANIMLAR	7
2.1. Enerji ve Çevre İlişkisi	9
2.2. Küresel İklim Değişikliği ve Enerji Sektörü	11
2.3. Temel Enerji Kaynakları	13
2.4. Dünyada Enerji Kaynakları Kullanımının Dağılımı	20
2.5. Türkiye'nin Enerji İhtiyacı ve Enerji Kaynakları	21
2.5.1. Türkiye'nin hidroelektrik enerji potansiyeli ve kullanım durumu	24
2.5.2. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli	24
2.5.3. Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyeli	25
2.5.4. Türkiye'nin jeotermal enerji potansiyeli	25
2.5.5. Türkiye'nin biyokütle (Canlı Kütle) enerjisi potansiyeli	26
2.5.6. Türkiye'nin enerji potansiyeliyle ilgili 2023 yılı verileri	26
2.6. Türkiye'nin Enerji İhtiyacı	27
2.7. Kömürden Vazgeçilememesinin Sebepleri	28
2.8. Türkiye'de Kömürün Ekonomik Rolü	30
2.9. Türkiye'de ve Dünya'da Kömürün Önemi	33
2.10. Dünya ve Türkiye'deki Kömür Rezervleri	35
2.11. Kömür Yakıtlı Termik Santrallerin Dünyadaki ve Türkiye'deki Durumu ...	38
3. TERMİK SANTRALLER	43
3.1. Katı Yakıtlı (Kömür-Linyit) Termik Santraller	43
3.2. Sıvı Yakıtlı (Fuel-Oil) Termik Santraller	45
3.3. Gaz yakıtlı (Doğalgaz) termik santralleri	45
3.4. Termik Santralin Çalışma Prensibi ve Bölümleri	46
3.5. Termik Santrallerin Avantaj ve Dezavantajları	55
3.6. Termik Santrallerin Çevre Üzerine Etkileri	55
3.6.1. Termik santrallerin hava kalitesi üzerindeki etkileri	55
3.6.2. Termik santrallerin su kalitesi üzerindeki etkileri	60
3.6.3. Termik santrallerin toprak kalitesi üzerindeki etkileri	62
3.6.4. Termik santrallerin fauna üzerindeki etkileri	63
3.6.5. Termik santrallerin flora üzerine etkisi	64

3.6.6. Termik santrallerin arazi kullanımı üzerindeki etkileri.....	64
3.6.7. Termik santrallerin çevre ve insan sağlığına olumsuz etkilerinin azaltılması için alınabilecek teknik önlemler	65
3.7. Termik Santral Karbon Ayak İzi	66
3.8. Termik Santral ve Termal Kirlenme.....	67
3.9. Termik Santral Soğutma Suyu Kullanımı	69
3.10. Termik Santral Atık Isısının Konutların Isıtılmasında Kullanılması	76
3.11. Termik Santrallerin Türkiye Ekonomisi İçin Önemi.....	78
3.12. Termik Santral Emisyonları	80
3.13. Karbondioksit yakalama, kullanma ve depolama teknolojileri (carbon capture, utilisation and storage–CCUS)	86
3.13.1. CO ₂ 'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri	89
3.13.2. CO ₂ yakalama teknolojileri	90
3.13.3. CO ₂ depolama yöntemleri	93
3.13.4. CO ₂ 'nin yeniden kullanım alanları.....	94
3.14. CCUS Konusunda Yapılmış Yurt İçi ve Yurt Dışı Çalışmalar	94
4. MATERYAL METOD	99
4.1. Hesaplamalarda Kullanılan Denklemler.....	102
4.2. Sıkıştırma Sistemi ve CO ₂ Sıvılaştırma Süreci.....	108
4.3. Linde-Hampson Sistemi	110
4.4. Feng Chen ve Tatiana Morosuk sistemi	110
4.5. Tasarlanan Sistem ve İşleyişi	111
4.5.1. Sistemin detayları.....	115
4.6. Doğal Soğutmalı Kanatlı ve Oluklu Tanklar.....	124
4.7. Sıkıştırma Öncesi Arıtılmış Baca Gazının Soğutulması için Gerekli CO ₂ Miktarının Hesaplanması.....	129
4.8. ABG İçinde Bulunan N ₂ , CO ₂ ve Su Buharının Kütlesel Debi Hesaplamaları	130
4.9. CO ₂ Hacmine Soğutma ve Sıkıştırma İşlemlerinin Etkileri	133
4.10. KETS Bacasından Yakalanan CO ₂ 'nin Ağaç ve Orman Alanı İhtiyacı	142
4.11. Ön Bekletme Tank Sayısının Hesaplanması	143
4.12. Sıkıştırma İşleminin CO ₂ Sıcaklığında Meydana Getireceği Artışın Hesaplanması.....	144
4.13. Gazın Yoğuşma Sıcaklığına Soğutulması	145
4.14. Yoğuşma Süreci ve Gizli Isı Hesaplamaları.....	145
4.15. Kompresörün Çalışması için Gerekli Enerji Miktarının Hesaplanması	149
4.15.1. N ₂ gazının termodinamik özellikleri ve CO ₂ sıvılaştırma sürecindeki rolü	150
4.15.2. Kompresör enerji kullanımında N ₂ 'nin etkisi	152
4.16. Mevcut Termik Santrallerle Tasarlanan Sistemin Maliyet Açısından Kıyaslanması	156
4.16.1. Mevcut sistemin yatırım maliyetleri	157
4.16.1.1. Soğutma kulesi inşaat maliyeti:.....	157
4.16.1.2. Pompa ve Boru Sisteminin Yatırım Maliyeti.....	159
4.16.1.3. Yıllık karbon emisyonlarına göre finansal yükümlülüklerin hesaplanması	160
4.16.1.4. Mevcut sistemin toplam maliyet analizi.....	161
4.16.2. Tasarlanan sistemin maliyet analizi	161
4.16.2.1. ABG toplama haznesinin boyutlandırılması ve maliyet analizi....	162

4.16.2.2. Yoğuşmuş su toplama haznesi ve depolama sisteminin boyutlandırılması ve maliyeti.....	163
4.16.2.3. CO ₂ Sıkıştırma ve Sıvılaştırma Sistemi Hesaplamaları	165
4.17. Çürük Buharın Yoğuşturulmasında CO ₂ Kullanımı.....	168
4.17.1. Buhar yoğuşturma prosesi.....	168
4.17.1.1. Çürük buhar (Exhaust Steam)	169
4.17.1.2. Su soğutmalı yoğuşturucular (Kondenserler).....	170
4.17.1.3. Hava soğutmalı yoğuşturucular (Air-Cooled Condensers)	170
4.17.1.4. Evaporatif soğutma sistemleri.....	170
4.17.1.5. Isı geri kazanım yoğuşturucuları (Heat Recovery Condensers)....	170
4.17.1.6. Vakum yoğuşturucular	171
4.17.2. Su yoğuşturma sistemi hesaplamaları	174
5. BULGULAR	179
5.1. Sıkıştırma İşleminin CO ₂ Sıcaklığı Üzerine Etkisi	181
5.2. CO ₂ Salımının Ağaçlarla Bağlanması için Gerekli Ağaç Sayısı ve Orman Alanı	183
5.3. Kullanılan Kompresörün Enerji İhtiyacı	184
5.4. ABG İçindeki CO ₂ 'nin Sıkıştırılması	185
5.5. ABG İçindeki CO ₂ ve Soğutma için Kullanılan CO ₂ 'nin Sıkıştırılması.....	186
5.6. ABG İçindeki CO ₂ , Soğutma İçin Kullanılan CO ₂ ve ABG İçindeki N ₂ 'nin Sıkıştırılması.....	186
5.7. ABG İçindeki CO ₂ ve ABG İçindeki N ₂ 'nin Sıkıştırılması	186
5.8. Su Buharının Ayırıştırılması, Depolanması ve Yeniden Kullanımı	187
5.9. Uçucu Kül	188
5.10. Çürük Buharın Yoğuşturulması	188
5.11. CO ₂ Kullanımının Avantajları ve Üstünlükleri	189
5.12. Yakalanan CO ₂ 'nin Tasarlanan Sistemde Kullanımı	191
5.13. Mevcut Sistem ve Tasarlanan Sistemin Maliyet Kıyaslaması	192
6. TARTIŞMA	195
6.1. Linde-Hampson ve Feng Chen - Tatiana Morosuk Sistemlerinin Entegrasyonu ile Baca Gazından CO ₂ Yakalama ve Sıvılaştırma: Yenilikçi Bir Yaklaşım	195
6.2. Tasarlanan Sistem ve Diğer Soğuk Ortamda Basınç Altında CO ₂ Sıkıştırma ve Sıvılaştırma Sistemlerin Kıyaslaması.....	196
6.2.1. Linde-Hampson sistemi ile tasarlanan sistem kıyaslaması ve tasarlanan sisteminin üstünlükleri	197
6.3. Tasarlanan Sistemin Mevcut CO ₂ Yakalama Teknolojileriyle Kıyaslanması	203
6.3.1. Kimyasal absorpsiyon ve soğuk ortamda basınç altında sıvılaştırma sistemlerinin kıyaslanması	203
6.3.2. Fiziksel absorpsiyon ve tasarlanan sistemin kıyaslanması	205
6.3.3. Adsorpsiyon (Adsorption) ve tasarlanan sistemin karşılaştırması.....	206
6.3.4. Membran ayırma (Membrane Separation) ve tasarlanan sistemin karşılaştırması	208
6.3.5. Kriyojenik ayırıştırma (Cryogenic Separation) ve tasarlanan sistemin karşılaştırması	211
6.3.6. Karbonat döngüsü (Calcium Looping) ve tasarlanan sistemin karşılaştırması	213
7. ÖNERİLER	215
7.1. Karşı Ağırlık Prensibine Dayalı Yeni Sıkıştırma Sistemleri.....	215
7.2. Membran Teknolojisi Kullanımı ile CO ₂ ve N ₂ 'nin Ayırıştırılması.....	215

7.3. Kompresör Enerji İhtiyacını Azaltmak için ABG Toplama Haznesine Yüzey Soğutmalı Boyler Entegrasyonu.....	216
7.4. Karbon Yakalama ve Yeniden Kullanım (CCU) Süreçleri	216
7.5. Süperkritik CO ₂ 'nin Enerji Üretiminde Kullanımı.....	216
7.6. CO ₂ 'nin Topraksız Tarımdaki Kullanımı	217
7.7. Akıllı Kontrol Sistemleri Entegrasyonu	217
7.8. Faz Değişim Malzemelerinin (PCM) Kullanımı	217
7.9. Yenilenebilir Enerji Kullanımı	218
7.10. Sıkıştırma Sırasında Açığa Çıkan Isı Enerjisinin Kullanımı	218
7.11. Modüler Tasarım	218
8. SONUÇ	219
KAYNAKLAR.....	223
EKLER.....	257
ÖZGEÇMİŞ	259



KISALTMALAR

ABG	:Arıtılmış Baca Gazı
BMİDÇS	:Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Sözleşmesi
EOR	:Gelişmiş Petrol Geri Kazanımı
EPRI	:Elektrik Gücü Araştırma Enstitüsü
FAO	:Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü
FAOSTAT	:Gıda ve Tarım Örgütü Kurumsal İstatistik Veritabanı
GSYİH	:Gayri safi yurtiçi hasıla
IPCC	:Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
ITCZ	:Ekinoksal Çatı Noktası
KETS	:Kabul Edilen Termik Santral
MMO	:Makine Mühendisleri Odası
MTPA	:Yılda milyon ton
NAO	:Kuzey Atlantik salınımı
NASA	:Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
OECD	:Ekonomik Kalkınma ve İş Birliği Örgütü
TPES	:Toplam Birincil Enerji Arzı
UNEP	:Birleşmiş Milletler Çevre Programı
UNWTO	:Birleşmiş Milletler Dünya Turizm Örgütü
USD	:United States Dollar
WHO	:Dünya Sağlık Örgütü



SİMGELER

CFC	: Kloroflorokarbon
CO₂	: Karbon dioksit
Cp	: Özgül ısı kapasitesi
E	: Enerji
h	: Entalpi
H₂	: Hidrojen
H₂O	: Su Buharı
H₂S	: Hidrojen Sülfür
J	: Joule
K	: Kelvin
kW	: Kilowatt
m	: Kütleli debi
MW	: Megawatt
NO_x	: Azot Oksitleri
P	: Basınç
Pa	: Pascal
°C	: Derece Santigrad
ppm	: Partspermillion
SO₂	: Kükürt Dioksit
SO_x	: Kükürt Oksit
T	: Sıcaklık
v̇	: Hacimsel debi
V	: Hacim
W	: Watt
ρ	: Yoğunluk
η	: Verim



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Yakıt türlerinin alacağı paylara göre TPES (Total Primary Energy Supply) senaryoları (%).	11
Tablo 2.2. Farklı kömür türlerinin özellikleri.....	30
Tablo 2.3. Türkiye’de kömür ve linyit yakıtlı termik santraller	41
Tablo 4.1. KETS’e ait özellikler.....	99
Tablo 4.2. KETS bacasından atmosfere salınan maddelerin hacimsel debilerine göre yıllık miktarları(m ³ /yıl).	100
Tablo 4.3. Sıkıştırma, soğutma, yoğunlaştırma ve sıvılaştırma aşamalarında CO ₂ ’nin hacmi ve fazında meydana gelen değişiklikler.	140
Tablo 4.4. Yoğuşmuş Su Toplama Haznesi ve Depolama Sistemi Maliyeti	165
Tablo 4.5. Soğutma boyleri tasarımı için kullanılan; çürük buhar, CO ₂ ve deniz suyuna ait parametreler.	174
Tablo 5.1. Kompresör enerji ihtiyacı.....	185
Tablo 5.2. Mevcut Sistemin Maliyetleri.....	192
Tablo 5.3. Tasarlanan Sistemin Maliyetleri	192
Tablo 10.1. Kömür Hazırlama, İşleme ve Enerji Üretme Tesisleri (Soğutma Suları ve Benzerleri)*	257



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. 2019'a Göre küresel GSYİH, toplam birincil enerji talebi ve enerji ile ilgili CO2 emisyonlarının gelişimi .	20
Şekil 2.2. Dünyanın genel enerji kullanımının kaynaklara göre dağılımı.	20
Şekil 2.3. Dünyanın fosil enerji kullanımının kaynaklara göre dağılımı.	21
Şekil 2.4. Türkiye enerji haritası).	22
Şekil 2.5. Türkiye'nin kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı	23
Şekil 2.6. Türkiye'nin yıllara göre kömür ithalatı (1980-2021).	31
Şekil 2.7. Türkiye'nin toplam kurulu gücü içerisinde yerli ve ithal kömürün yıllara göre dağılımları (2000-2020) (%).	31
Şekil 2.8. Kullanım yerlerine göre ülkemiz yerli ve ithal taşkömürü tüketimi.	32
Şekil 2.9. Kömür arzının sektörlere göre tüketim dağılımı, 2021.	32
Şekil 2.10. Elektrik üretimi içinde kaynakların payı, 2022	33
Şekil 2.11. Türkiye linyit üretimi.	36
Şekil 2.12. Türkiye taş kömürü üretimi.	37
Şekil 2.13. Kömürden elektrik üretiminin payı, 2022	40
Şekil 2.14. 50MW'tan fazla kömür yakan termik santraller.	40
Şekil 3.1. Kömürlü termik santralin blok diyagramı.	43
Şekil 3.2. Bir termik santral akış şeması.	47
Şekil 3.3. Kazan ve ön ısıtıcıların akış şeması.	48
Şekil 3.4. Reküperatif ve regeneratif tip hava ön ısıtıcıları.	48
Şekil 3.5. Döner rejeneratör	49
Şekil 3.6. Çelik kanatlı tüp reküperatörü.	50
Şekil 3.7. Bacagazı emisyonlarının etki alanları.	57
Şekil 3.8. Doğal hava akımlı kuru tip soğutma kuleleri (Kapalı sistem- Açık sistem)	71
Şekil 3.9. Soğutma kulelerinde hava akımı oluşturma teknikleri	72
Şekil 3.10. Doğal akımlı mekanik akımlı ve hibrit kuru soğutma kuleleri	72
Şekil 3.11. Tipik bölgesel ısıtma sistemi.	77
Şekil 3.12. Pulverize kömür yakma teknolojisinden yararlanılan termik santralde uçucu külün meydana gelmesi.	81
Şekil 3.13. Elektrostatik filtrenin çalışma ilkesi.	82
Şekil 3.14. Uçucu kül kontaminasyon yolları.	84
Şekil 3.15. CCUS'de uçucu kül uygulaması için yollar	85
Şekil 3.16. Solvent ile yanma sonrası karbon tutma teknolojisi.	91
Şekil 3.17. Yanma öncesi karbon tutma teknolojisi.	92
Şekil 3.18. Oksi-yakıt yakma teknolojisi.	93
Şekil 4.1. KETS baca gazı içeriğindeki maddeler ve oranları.	100
Şekil 4.2. KETS bacasından atmosfere salınan maddelerin hacimsel debilerine göre oranları	101
Şekil 4.3. Linde-Hampson CO ₂ sıvılaştırma sistemi	109

Şekil 4.4. Feng Chen ve Tatiana Morosuk tarafından geliştirilen CO ₂ sıvılaştırma sistemi.....	110
Şekil 4.5. Tasarlanan CO ₂ sıkıştırma, sıvılaştırma ve depolama sistemi.	112
Şekil 4.6. ABG soğutma; su buharı yoğunlaştırma, ayrıştırma; CO ₂ sıkıştırma, sıvılaştırma ve depolama sistemi genel görünümü.	114
Şekil 4.7. ABG girişi ve ABG toplama haznesi.....	115
Şekil 4.8. ABG'nin soğuk CO ₂ ile karışım noktası.....	117
Şekil 4.9. Yoğuşmuş su buharını toplama haznesi.....	118
Şekil 4.10. ABG içeriğindeki su buharının suya dönüşümü sonrası su toplama, tahliye ve depolama sistemi	119
Şekil 4.11. Su buharından arındırılmış ABG'nin kompresöre iletim hattı, kompresör ve zamanlayıcı.....	121
Şekil 4.12. Ön bekletme tankları.....	122
Şekil 4.13. Kompresör ve ön bekletme tankları.....	123
Şekil 4.14. Doğal soğutmalı, kanatlı ve oluklu tank görünümü.....	124
Şekil 4.15. Nihai depolama tankları.....	127
Şekil 4.16. CO ₂ 'nin faz diyagramı.	129
Şekil 4.17. Arıtılmış baca gazı içinde bulunan gazların oranlarına göre dağılımı..	130
Şekil 4.18. Arıtılmış baca gazı içinde bulunan gazların hacimsel debilerine göre dağılımı.....	131
Şekil 4.19. ABG+ CO ₂ karışım noktası, öncesi ve sonrası.	134
Şekil 4.20. Kompresör (3) ve pasif soğutma sonrası (4) CO ₂	136
Şekil 4.21. Gaz basınç ve sıcaklık değerleri için hesaplama yapılan noktaların gösterimi.....	140
Şekil 4.22. N ₂ faz diyagramı.	151
Şekil 4.23. Mevcut sistemlerdeki çürük buhar yoğunlaştırma boyleri.	171
Şekil 4.24. Tasarlanan çürük buhar yoğunlaştırma boyleri.	172

TERMİK SANTRALLERDE KARBONDİOKSİT YAKALAMA VE BUHAR YOĞUŞTURMA İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİR, YENİLİKÇİ BİR SİSTEM TASARIMI

ÖZET

Bu doktora tezi, kömür yakan termik santrallerde baca gazı emisyonlarının azaltılması ve karbon emisyonlarının çevresel ve ekonomik değer taşıyan yenilikçi yöntemlerle yeniden değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Bu kapsamda, termik santral baca gazlarından kaynaklanan karbondioksit (CO_2) emisyonlarını azaltmak ve atıksız bir teknoloji geliştirmek üzere yeni bir sistem önerilmiştir. Önerilen sistemin performansı, mevcut literatürdeki solvent bazlı karbon yakalama teknolojileri ve membran sistemleriyle karşılaştırılmış; enerji verimliliği, çevresel etkiler ve uzun vadeli ekonomik faydalar açısından detaylı analizler gerçekleştirilmiştir.

Bu yenilikçi sistem, düşük sıcaklık ve yüksek basınç koşullarında çalışan CO_2 sıvılaştırma teknolojilerinin, termik santral baca gazlarından CO_2 yakalama ve sıvılaştırma süreçlerine entegre edilmesi üzerine tasarlanmıştır. Sistem, baca gazında bulunan CO_2 'nin sıkıştırılarak sıvı hale dönüştürülmesini sağlamak ve soğuk ortam koşullarını oluşturmak için sıvılaştırılmış CO_2 'nin kapalı bir döngüde yeniden kullanılmasını mümkün kılmaktadır.

Sistemde baca gazını soğutmak için ayrı bir cooler sistemi kullanmak yerine, sistemden elde edilmiş ve sıcaklığı $-56,4\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye düşürülmüş CO_2 'nin direkt olarak baca gazı içine verilmesinin avantajları ve dezavantajları irdelenmiştir. CO_2 'nin bu şekilde kullanılması, yakalanan CO_2 için yeni bir kullanım alanı sağlamaktadır. Sistemde baca gazı sıcaklığı ($95\text{ }^\circ\text{C}$), CO_2 sıvılaştırma işlemi için kritik sıcaklık noktası olan $31,1\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin altına ($31\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye) düşürülmektedir. Baca gazının soğutulması için gerekli CO_2 debisi $713,5\text{ kg/s}$ olarak hesaplanmıştır.

CO_2 'nin, baca gazı soğutulması için kullanılması ve sıcaklığının $31\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye düşürülmesi sırasında, baca gazı içinde bulunan su buharı da ayrı bir yoğuşturucuya ihtiyaç duyulmaksızın yoğuşacaktır. Yoğuşmuş su, baca gazı soğutma ve CO_2 yakalayarak sıvılaştırma sistemine entegre edilen yoğuşmuş su toplama, tahliye ve depolama sistemi ile ayrıştırılacaktır. Baca gazından yoğuşturularak elde edilen bu suyun debisi $13,28\text{ kg/s}$, elde edilen yıllık su miktarı $418.798,08$ tondur.

Depolanan su yine termik santralden yakalanan uçucu külün ısıtılmasında kullanılacaktır. Termik santral bacasından yakalanan uçucu külün debisi $9,6\text{ kg/s}$ ve yıllık yakalanan kül miktarı $302.745,6$ ton olarak hesaplanmıştır. Çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri bulunan uçucu külün yakalanması, bu etkilerin giderilmesine katkı sağlamakla birlikte, belirli sanayi sektörlerine hammadde temini için de önemli bir fırsat sunmaktadır. Özellikle çimento ve yapı malzemeleri gibi endüstrilerde geniş kullanım alanına sahip olan uçucu kül, termik santraller için ek bir gelir kaynağı oluşturabilir. Bu durum, çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesinin yanı sıra ekonomik faydaların artırılmasına da olanak tanımaktadır.

Sistemde kullanılan kompresörün enerji ihtiyacının yüksek olduğu tespit edilmiştir (306,6 MW). Ancak, membran teknolojisinin entegrasyonu ile baca gazı soğutma işlemi için yüzey soğutmalı bir boylerin ABG soğutma haznesine eklenmesi, enerji tüketimini önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir (14 MW). Bu entegrasyon, elde edilen CO₂'nin %100 saflıkta olması sayesinde yeniden kullanım alanlarının genişlemesi ve piyasaya arz edilmesiyle sağlanacak ekonomik kazançların yalnızca sistem maliyetlerini dengelemekle kalmayıp, aynı zamanda önemli ölçüde kârlılık sağlayabileceğini göstermektedir. Bu durum, sistemin ekonomik sürdürülebilirliğini artırarak yenilikçi bir yatırım modeli olarak öne çıkmasına katkıda bulunmaktadır.

Çalışma kapsamında, termik santral baca gazlarından kaynaklanan yıllık 10.596.096 ton CO₂ emisyonunun yakalanması için yaklaşık 481 milyon ağaç ve 1.059.610 hektar orman alanına ihtiyaç duyulduğu hesaplanmıştır. Bu alan, Türkiye'nin toplam orman varlığının %4,56'sına ve toplam yüzölçümünün %1,4'üne tekabül etmektedir. Böyle bir alanın yalnızca karbon emisyonlarını dengelemek için tahsis edilmesinin ekolojik ve ekonomik açıdan sürdürülebilir bir alternatif olmadığı ortaya konmuş; bu durum, karbon yakalama teknolojilerinin gerekliliğini güçlü bir şekilde vurgulamıştır.

Tezin ikinci bölümünde, termik santral baca gazından elde edilen CO₂'nin çürük buharın yoğunlaştırılması için kullanımı analiz edilmiştir. Termik santrallerde çürük buhar yoğunlaştırma işleminde kullanılan soğutma suyu, genellikle iki farklı yöntemle yönetilmektedir. Kapalı döngü sistemlerde soğutma suyu, soğutma kuleleri veya havuzlarda soğutularak yeniden kullanılmak üzere sisteme geri döndürülür. Bu yöntem, su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde tercih edilmektedir. Açık döngü sistemlerde ise soğutma suyu, sıcaklığı arttıktan sonra doğrudan kaynağına (deniz, göl veya nehir) deşarj edilmektedir. Bu işlem, özellikle su kaynaklarının bol olduğu bölgelerde yaygın olmakla birlikte, termal kirlilik ve ekosistem üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle çevresel düzenlemelerle sınırlandırılmaktadır. Her iki yöntem de çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik açısından dikkatle değerlendirilmesi gereken süreçlerdir.

Deniz suyunun çürük buhar yoğunlaştırma sürecindeki rolü incelenmiş ve bu işlem için yıllık 1.823.231.064 ton deniz suyuna ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir. Termik santrallerin soğutma suyu kullanımına bağlı olarak ortaya çıkan çevresel etkiler, su ve atmosfer üzerinde ciddi sonuçlar doğurmaktadır. Kullanılan soğutma suyunun yaklaşık %5'i atmosfere su buharı olarak salındığında, hem ısı adası etkisinin şiddetlenmesine neden olmakta hem de güçlü bir sera gazı olan su buharının atmosferde birikimi nedeniyle sera etkisini artırmaktadır. Atmosferdeki su buharı birikimi, yerel sıcaklık artışlarına ve iklim dengesizliklerine yol açarken, atmosferik nem oranındaki artış ise aşırı hava olaylarının sıklığını ve şiddetini artırarak ekosistemler ve insan yaşamı üzerinde önemli olumsuz sonuçlara neden olmaktadır.

Soğutma suyunun kalan %95'i ise sıcaklığı artmış bir şekilde çevredeki su kaynaklarına, genellikle denizlere, göllere ve nehirlerle, deşarj edilmektedir. Bu durum, termal kirlilik olarak bilinen bir etkiye yol açmakta ve yalnızca deniz ekosistemlerini değil, aynı zamanda tatlı su ekosistemlerini de olumsuz etkilemektedir. Denizlerde ve tatlı sularda doğal sıcaklık dengesinin bozulması, balık, amfibi ve plankton gibi birçok türün metabolik oranlarını etkileyerek büyüme hızlarını ve üreme kapasitelerini azaltmakta, oksijen çözünürlüğünü düşürerek oksijene bağımlı türlerin yok olmasına neden olmaktadır. Ayrıca, termal kirlilik istilacı türlerin yayılmasına zemin hazırlamakta ve biyoçeşitliliğin azalmasına yol açmaktadır.

Tasarlanan sistemde, deniz suyu yerine kapalı devrede CO₂ kullanımı önerilmektedir. Bu yöntem, santralin mevcut çürük buhar yoğunlaştırma sisteminin kullanılmaya devam etmesini sağlayarak ek yatırım maliyetlerini önlemektedir. Mevcut sistemin yalnızca modifiye edilmesiyle, yoğunlaştırma boylerinde soğutucu akışkan olarak su yerine CO₂ kullanımı mümkün hale getirilecektir. Bu yenilikçi yaklaşım, yakalanan CO₂'nin yeniden kullanım alanlarını genişletmekte ve çevresel faydalarını artırmaktadır. Sistem analizleri, çürük buharın yoğunlaştırılması için gerekli olan CO₂ debisini 7.823,8 kg/s olarak hesaplamıştır. Sistemin CO₂'yi kapalı devrede döngüsel olarak kullanması, bu gazın çevreye veya insan sağlığına herhangi bir olumsuz etkisinin bulunmamasını garanti etmektedir. Bu yaklaşım, CO₂'nin kontrol altında tutulmasını sağlayarak hem çevresel sürdürülebilirliği desteklemekte hem de insan sağlığına yönelik riskleri tamamen ortadan kaldırmaktadır.

Bu yöntem, yalnızca çevresel etkileri azaltmakla kalmayıp, su tüketimini ve termal kirliliği önemli ölçüde düşürme potansiyeline sahiptir. Deniz ve tatlı su kaynakları üzerindeki baskının azaltılması, ekosistemlerin korunmasına katkı sağlarken, aynı zamanda suyun sürdürülebilir kullanımını desteklemektedir. Bu yaklaşım, termik santrallerde su kaynaklarına bağımlılığı azaltarak, enerji üretiminde çevre dostu bir paradigma değişikliği sunmaktadır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, termik santrallerde karbon emisyonlarını ortadan kaldırmaya yönelik yenilikçi ve uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır. Önerilen sistem, karbon ayak izinin azaltılması, enerji maliyetlerinin düşürülmesi ve doğal kaynakların korunması gibi kritik alanlarda uygulanabilir bir model oluşturmanın yanı sıra, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine de katkı sağlamaktadır. Tasarlanan CO₂ yakalama ve sıvılaştırma sistemi, yalnızca termik santrallerde değil, aynı zamanda baca gazıyla CO₂ salınımı gerçekleştiren çimento fabrikaları, çelik üretim tesisleri ve petrokimya endüstrisi gibi çeşitli sanayi dallarında da uygulanabilecek geniş bir potansiyele sahiptir. Ayrıca, çürük buhar yoğunlaştırma sisteminin sunduğu çözüm, yalnızca enerji santralleriyle sınırlı kalmayıp, endüstriyel tesislerdeki yoğunlaştırma ihtiyaçlarını karşılamak için de etkin bir alternatif sunmaktadır.

Bu çalışma, karbon yakalama ve yeniden kullanım süreçlerinin enerji sektörü dışındaki uygulamalarını da kapsayarak, çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayacak öncü bir teknoloji olabileceğini kanıtlamaktadır. Bu yönüyle, önerilen sistem, küresel ölçekte karbon yönetimi ve kaynak verimliliği hedeflerine ulaşmada yenilikçi bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Karbondioksit Yakalama, Termik Santral, Pasif Soğutma, Çevresel Sürdürülebilirlik, Enerji Verimliliği, Çürük Buhar Yoğunlaştırma için CO₂ Kullanımı



A SUSTAINABLE AND INNOVATIVE SYSTEM DESIGN FOR CARBON DIOXIDE CAPTURE AND STEAM CONDENSATION IN THERMAL POWER PLANTS

SUMMARY

This doctoral thesis aims to reduce flue gas emissions and reevaluate carbon emissions from coal-fired thermal power plants through innovative methods with environmental and economic value. Within this scope, a novel system has been proposed to mitigate carbon dioxide (CO₂) emissions from thermal power plant flue gases and to develop a zero-waste technology. The performance of the proposed system has been analyzed in comparison with solvent-based carbon capture technologies and membrane systems in the literature, focusing on energy efficiency, environmental impacts, and long-term economic benefits.

This innovative system is designed based on CO₂ liquefaction technologies operating under low temperatures and high pressures, integrating these processes into carbon capture and liquefaction systems for thermal power plant flue gases. The system enables the compression and liquefaction of CO₂ present in the flue gas and facilitates its reuse in a closed-loop cycle to create cold ambient conditions.

Instead of using a separate cooler system for flue gas cooling, the system utilizes CO₂ cooled to -56.4°C directly within the flue gas. The advantages and disadvantages of this approach have been examined. This method provides a new utilization pathway for captured CO₂. The flue gas temperature (95°C) is reduced to 31°C, which is below the critical temperature for CO₂ liquefaction (31.1°C). The required CO₂ flow rate for flue gas cooling has been calculated as 713.5 kg/s.

During the cooling of the flue gas with CO₂ and its reduction to 31°C, the water vapor in the flue gas will condense without requiring an additional condenser. The condensed water will be separated via a water collection, discharge, and storage system integrated into the flue gas cooling and CO₂ capture-liquefaction system. The flow rate of condensed water recovered from the flue gas is 13.28 kg/s, yielding an annual water recovery of 418,798.08 tons.

The stored water will be reused for wetting the fly ash captured from the thermal power plant. The fly ash capture rate has been calculated as 9.6 kg/s, corresponding to an annual capture of 302,745.6 tons. Capturing fly ash, which has adverse effects on human health and the environment, not only mitigates these impacts but also provides a significant opportunity for supplying raw materials to certain industrial sectors. Particularly in industries such as cement and building materials, fly ash has a broad range of applications, potentially creating an additional revenue stream for thermal power plants. This contributes to both environmental sustainability and increased economic benefits.

The energy requirement of the compressor used in the system has been identified as high (306.6 MW). However, integrating membrane technology and incorporating a

surface-cooled boiler into the flue gas cooling chamber (ABG cooling chamber) holds the potential to significantly reduce energy consumption (by 14 MW). This integration enables the production of CO₂ with 100% purity, facilitating the expansion of its reuse areas and economic gains from market supply. These advantages not only offset the system costs but also demonstrate significant profitability, enhancing the economic sustainability of the system as an innovative investment model.

As part of this study, the annual CO₂ emissions of 10,596,096 tons from thermal power plant flue gases have been analyzed. It has been calculated that approximately 481 million trees and 1,059,610 hectares of forest area would be required to offset this carbon emission. This area corresponds to 4.56% of Turkey's total forest assets and 1.4% of its total land area. Dedicating such an area solely to balance carbon emissions has been demonstrated to be neither ecologically nor economically sustainable, emphasizing the necessity of carbon capture technologies.

In the second part of the thesis, the use of CO₂ captured from thermal power plant flue gases for condensing low-pressure steam (exhaust steam) has been analyzed. Cooling water management in thermal power plants has been categorized into two main methods. In closed-loop systems, cooling water is recirculated back into the system after being cooled in towers or ponds. This method is commonly preferred in regions with limited water resources. In open-loop systems, heated cooling water is discharged directly into its source (sea, lake, or river). Although prevalent in areas with abundant water resources, open-loop systems are limited by environmental regulations due to their thermal pollution and negative effects on ecosystems. Both methods require careful consideration of environmental impacts and sustainability.

The role of seawater in the condensing process of low-pressure steam has been examined, revealing an annual requirement of 1,823,231,064 tons of seawater for this purpose. The environmental impacts of cooling water usage in thermal power plants have severe consequences for both water and atmospheric systems. Approximately 5% of the used cooling water is released into the atmosphere as water vapor, intensifying urban heat island effects and contributing to the greenhouse effect due to water vapor being a potent greenhouse gas. The accumulation of water vapor in the atmosphere leads to localized temperature increases, climate imbalances, and an uptick in extreme weather events, causing significant negative effects on ecosystems and human life.

The remaining 95% of the cooling water is discharged, heated, into surrounding water sources, such as seas, lakes, and rivers. This results in thermal pollution, adversely impacting not only marine ecosystems but also freshwater ecosystems. The disruption of natural temperature equilibrium in these systems affects species like fish, amphibians, and plankton, reducing their growth and reproductive capacities while decreasing oxygen solubility, leading to the extinction of oxygen-dependent species. Thermal pollution also promotes the spread of invasive species, reducing biodiversity.

The use of freshwater resources for cooling water supply, particularly in water-stressed countries like Turkey, exacerbates the challenges of sustainable water use. Strategic freshwater sources, such as lakes and rivers, face increased pressure from this usage, creating environmental, social, and economic issues. This underscores the importance of minimizing freshwater dependency in thermal power plants to ensure environmental sustainability.

The proposed system recommends replacing seawater with a closed-loop CO₂ system. This approach allows the continued use of the existing low-pressure steam condensation system, avoiding additional investment costs. By modifying the current

system, CO₂ can replace water as the cooling medium in condenser coils. This innovative solution expands the reuse areas of captured CO₂ while amplifying its environmental benefits. System analyses determined the required CO₂ flow rate for low-pressure steam condensation as 7,823.8 kg/s. The closed-loop circulation of CO₂ ensures that it has no adverse impacts on the environment or human health. This approach maintains control over CO₂, supporting environmental sustainability while eliminating health risks.

This method not only reduces environmental impacts but also significantly decreases water consumption and thermal pollution. By alleviating the pressure on marine and freshwater sources, it supports ecosystem preservation and the sustainable use of water resources. This approach offers an environmentally friendly paradigm shift in energy production by reducing water dependency in thermal power plants.

In conclusion, this thesis presents an innovative and feasible solution for eliminating carbon emissions in thermal power plants. The proposed system establishes a practical model for reducing carbon footprints, lowering energy costs, and conserving natural resources while contributing to environmental sustainability goals. The designed CO₂ capture and liquefaction system has wide applicability, not only in thermal power plants but also in various industrial sectors, such as cement factories, steel production facilities, and petrochemical industries, where CO₂ emissions are generated. Furthermore, the low-pressure steam condensation system provides a viable alternative for condensation requirements in industrial facilities beyond energy plants.

This study demonstrates that carbon capture and reuse processes can extend beyond the energy sector to support environmental sustainability, establishing the proposed system as a pioneering technology. This innovative approach offers a valuable contribution to global carbon management and resource efficiency goals.

Keywords: Carbon Capture, Thermal Power Plant, Passive Cooling, Environmental Sustainability, Energy Efficiency, CO₂ Utilization for Exhaust Steam Condensation



1. GİRİŞ

Fosil kökenli yakıtlar, modern sanayileşmenin temel taşlarından biri olarak ekonomik büyüme ve teknolojik ilerlemenin itici gücünü oluşturmuştur. Ancak, bu yakıtların yaygın kullanımı, çevresel sürdürülebilirlik açısından ciddi sorunlara yol açmış ve küresel ölçekte iklim değişikliği, hava kirliliği ve doğal kaynakların tükenmesi gibi kritik meseleleri gündeme getirmiştir. Fosil kökenli yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan CO₂ ve diğer sera gazlarının atmosferde birikmesi, ısıyı hapsederek sera etkisine sebep olmuş, küresel ısınmayı hızlandırmış ve dünya genelinde sıcaklıkların artışına neden olmuştur. Bu durum, 21. yüzyılın en ciddi çevresel sorunlarından biri olan küresel iklim değişikliğini insanlık için varoluşsal bir tehdit haline getirmiştir.

Küresel iklim değişikliği, insan kaynaklı faaliyetler ile doğrudan ilişkilidir. Fosil kökenli yakıtların enerji üretiminde yoğun bir şekilde kullanılması, sanayileşme, nüfus artışı, kentleşme, arazi kullanımı değişiklikleri, ormansızlaşma, tarım ve hayvancılık gibi faktörler, sera gazı emisyonlarının artışını hızlandırarak iklim değişikliğini şiddetlendirmiştir. Bunun sonucunda, sıcaklıkların yükselmesi, mevsimsel kaymalar, canlı türlerinin göç zamanlarındaki değişiklikler ve artan orman yangınları, seller ve kuraklık gibi doğa kaynaklı afetler dünya genelinde etkisini göstermiştir. Bu afetlerin sıklık ve şiddetindeki artış, yalnızca ekosistemleri değil, aynı zamanda ekonomik ve sosyal yapıları da olumsuz etkilemektedir. Özellikle tarımsal üretimdeki azalmalar, gıda arzını tehlikeye sokarak insanlığı gelecekte yaygın açlık ve kıtlık riskiyle karşı karşıya bırakmaktadır.

Fosil kökenli yakıtlarla çalışan termik santraller, karbon emisyonlarının başlıca kaynaklarından biri olarak öne çıkmaktadır. Bu tesisler, yüksek verimlilikten ziyade, fosil kökenli yakıtların görece düşük maliyetli olması, dünya genelinde geniş bir erişilebilirliğe sahip bulunması ve kolay temin edilebilmesi gibi nedenlerle enerji üretiminde tercih edilmektedir. Ancak fosil kökenli yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan karbon emisyonları, küresel ölçekte iklim değişikliğinin başlıca nedenlerinden biri olarak bu tesisleri çevresel sürdürülebilirlik açısından tartışmalı hale getirmektedir.

Fosil yakıtlı termik santraller, küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %40'ından sorumlu olup, bu durum küresel ısınmayı hızlandıran en büyük etkenlerden biri olarak dikkat çekmektedir. 2023 yılı verilerine göre, küresel ortalama yüzey sıcaklıkları, sanayi öncesi dönem ortalamasının 1,48°C üzerine çıkarak 1850'den bu yana kaydedilen en yüksek seviyeye ulaşmıştır (Copernicus Climate Change Service, 2023). Benzer şekilde, Berkeley Earth iklim araştırma kuruluşu, 2023 yılında küresel sıcaklık artışının sanayi öncesi döneme göre 1,54°C'ye ulaştığını ve Paris Anlaşması'nın hedeflediği 1,5°C limitinin ilk kez aşıldığını bildirmiştir (Berkeley Earth, 2023). CO₂'nin atmosferdeki birikimi, ısıyı hapsederek sera etkisini artırmakta ve bu durum dünya genelinde sıcaklıkların yükselmesine neden olmaktadır. Fosil yakıt kaynaklı emisyonların, sanayi devriminden bu yana gözlemlenen bu sıcaklık artışına büyük ölçüde katkı sağladığı belirtilmektedir. Bu gerçeklik, fosil yakıt kaynaklı CO₂'nin yakalanması, depolanması ve yeniden kullanılması (CCUS) teknolojilerinin geliştirilmesini ve enerji üretim süreçlerinde yaygın bir şekilde uygulanmasını zorunlu hale getirmektedir.

Global CCS Institute tarafından 2021 yılında yayımlanan *Global Status of CCS 2021* raporuna göre, dünya genelinde CO₂ yakalama kapasitesine sahip termik santral sayısı yalnızca 26'dır ve bu santrallerin toplam CO₂ yakalama kapasitesi yıllık yaklaşık 40 milyon ton olarak belirtilmiştir. Ancak dünya genelinde faaliyet gösteren termik santrallerin sayısı binlerle ifade edilmektedir. Bu bağlamda, CO₂ yakalama teknolojisine sahip santrallerin toplam termik santraller içindeki oranı %1'in altında kalmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından 2021 yılında yayımlanan *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector* raporu, CO₂ yakalama ve depolama teknolojilerinin potansiyelini ve mevcut durumunu kapsamlı bir şekilde ele almıştır. Raporda, bu teknolojilerin yaygınlaşmasının önündeki başlıca engeller arasında yüksek maliyetler, enerji verimliliğindeki kayıplar ve depolama alanlarının sınırlılığı gibi faktörler vurgulanmıştır. Bu zorluklar, CO₂ yakalama teknolojilerinin geniş çapta uygulanabilirliğini kısıtlayan temel unsurlar olarak öne çıkmaktadır.

Termik santraller, enerji üretim işlevlerinin yanı sıra çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik yenilikçi teknolojilerin uygulanabileceği stratejik öneme sahip alanlar olarak ele alınmalıdır. Bu bağlamda, baca gazı arıtma sistemleri, karbon yakalama ve depolama teknolojileri, enerji verimliliğini artıran tasarımlar ve alternatif soğutma

yöntemleri gibi yenilikçi çözümler, termik santrallerin çevresel etkilerini en aza indirmek için geliştirilmektedir. Bu teknolojiler, yalnızca karbon ayak izini azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda enerji üretim süreçlerinin ekonomik ve operasyonel verimliliğini artırarak sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılmasına katkıda bulunmaktadır.

Atıkların değerlendirilmesi ve yeniden kullanımı, sürdürülebilirlik ilkelerinin temel taşlarından biri olarak kabul edilmektedir. 1860'larda Hector Urquhart'ın *Popular Tales of the West Highlands* adlı eserinde yer alan "One man's rubbish may be another's treasure" (Birinin çöprü, bir başkasının hazinesidir) ifadesi, bu yaklaşımı özlü bir şekilde özetlemektedir. Bu felsefe, atık üreten tüm sektörlerde olduğu gibi enerji sektöründe de önemli bir rehber niteliğindedir. Bu bağlamda, termik santrallerde ortaya çıkan atıkların yalnızca bertaraf edilmesi değil, ekonomik ve çevresel faydalar sağlayacak şekilde değerlendirilmesi büyük bir önem taşımaktadır.

Bu bağlamda, atıksız teknoloji uygulamalarının termik santrallerde hayata geçirilmesi, enerji üretim süreçlerinde daha sürdürülebilir ve verimli bir model oluşturmayı mümkün kılmaktadır. Termik santral kaynaklı atıkların değerlendirilmesi, yalnızca atık yönetiminde değil, aynı zamanda enerji sektörünün çevre dostu dönüşümünde de önemli bir adım olarak öne çıkmaktadır. Bu kapsamda, termik santral kaynaklı atıkların çeşitliliği ve potansiyel kullanım alanları değerlendirilerek, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlayacak çözümler geliştirilmelidir. Hâlihazırda, termik santral kaynaklı atıkların yeniden kullanımı için yapılmış çeşitli çalışmalar ve uygulamalar bulunmaktadır.

Termik santrallerde enerji üretim süreçlerinden kaynaklanan atıkların yeniden kullanımı, döngüsel ekonomi ilkelerine uyum sağlamada önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, baca gazından yakalanan kükürt oksitlerin (SO_x), kireç taşı (CaCO₃) veya kalsiyum oksit (CaO) ile reaksiyona girerek kalsiyum sülfat (CaSO₄) formunda bağlanması, bu ürünün yapı malzemesi üretiminde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, uçucu kül, taban külü ve cüruf gibi yan ürünler, beton ve çimento üretiminde, yol yapımında ve tarımsal toprak düzenleyicisi olarak değerlendirilmektedir.

Bunun yanı sıra, karbon isi (karbon karası), elektrostatik filtrelerle yakalanarak otomotiv lastiği, mürekkep ve boya üretiminde hammadde olarak kullanılmaktadır.

Yakalanan karbon isı, yüksek katma değerli sanayi ürünlerinde kullanılarak çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliğe katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, termik santrallerden açığa çıkan atık ısı, bölgesel ısıtma sistemlerinde veya endüstriyel proseslerde yeniden kullanılarak enerji tasarrufu sağlanmakta ve çevresel fayda artırılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, termik santrallerde baca gazındaki su buharının yoğunlaştırılması ve baca gazı soğutma işlemlerini tek bir adımda gerçekleştiren yenilikçi bir sistem tasarlanmıştır. Doğal konveksiyon ve pasif soğutma prensiplerine dayanan bu sistem, enerji tüketimini minimize ederek çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Sistemin en dikkat çekici özelliği, soğutma işlemlerinde kullanılacak olan CO₂'nin sistemin kendisinden elde edilmesi ve sıvılaştırılarak doğal soğutmalı, kanatlı ve oluklu ön bekletme tanklarında depolanmasıdır. Yüksek basınç dayanımı ve optimize edilmiş yapıları sayesinde bu tanklar, enerji verimliliğini artırırken operasyonel maliyetleri de düşürmektedir. Bu çözüm, harici bir soğutma sistemine veya ek bir soğutucu akışkana ihtiyaç duyulmaması nedeniyle ekonomik açıdan avantaj sağlamaktadır.

Tezin bir diğer önemli odak noktası, termik santrallerde çürük buharın yoğunlaştırılmasıdır. Geleneksel olarak, bu işlem genellikle deniz, göl veya akarsulardan sağlanan soğutma suyu ile gerçekleştirilmektedir. Ancak, bu yöntem yüksek miktarda su tüketimine yol açmakta ve sucul ekosistemlerde termal kirlilik gibi ciddi çevresel sorunlara neden olmaktadır. Buna ek olarak, soğutma işlemi sırasında buharlaşan su, ısı adası etkisini artırarak atmosferik dengenin bozulmasına katkıda bulunmaktadır.

Bu çalışmada, geleneksel soğutma yöntemlerine alternatif olarak CO₂'nin soğutucu akışkan olarak kullanılması önerilmiş ve bu yöntemin çevresel etkileri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Çürük buhar yoğunlaştırma sürecinde, sistemden elde edilen CO₂'nin kapalı devre bir sistem içinde döngüsel olarak kullanılması, soğutma sürecinden kaynaklanan ek bir karbon salınımını tamamen ortadan kaldırmaktadır. Bu yaklaşım, yalnızca su tüketimini azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda termik santrallerin operasyonel maliyetlerini düşürerek çevresel sürdürülebilirliği güçlendirmektedir.

Ayrıca, tasarlanan sistem CO₂'nin yeniden kullanımına dayalı bir karbon yakalama ve kullanım (CCU) yöntemi sunmaktadır. Bu sayede, karbon döngüsüne entegre edilen

CO₂, endüstriyel süreçlerde verimli bir şekilde yeniden değerlendirilebilmektedir. Bu yenilikçi yaklaşım, karbon ayak izinin azaltılması ve fosil yakıtlı enerji üretiminin çevresel etkilerinin minimize edilmesi açısından önemli bir adımı temsil etmektedir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, termik santrallerde karbon emisyonlarının azaltılması ve su kaynaklarının korunması için sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Önerilen sistem, enerji üretim süreçlerinde çevresel etkileri en aza indirirken, maliyet etkinliği sağlayan yenilikçi bir yaklaşım ortaya koymaktadır.

1.1. Amaç

Bu çalışmanın temel amacı, termik santral bacalarından salınan CO₂'nin etkin bir şekilde yakalanması, sera etkisi ve küresel iklim değişikliğinin önlenmesine katkıda bulunulmasıdır. Bu hedefe ulaşılırken, soğuk ortamda basınç altında CO₂ sıkıştırma ve sıvılaştırma sistemlerinin kullanılması, bu sistemlerde enerji yoğunluğu yüksek olan cooler birimlerinin kullanımına son verilerek enerji maliyetlerinin azaltılması, karbon ayak izinin küçültülmesi ve çevresel olumsuz etkilerin ortadan kaldırılması hedeflenmiştir. Aynı zamanda, CO₂ yakalama sistemlerinin maliyetlerinin düşürülmesi ve çürük buhar yoğunlaştırma, baca gazı soğutmada CO₂'nin yenilikçi bir şekilde kullanılması için yeni bir alan açılması amaçlanmaktadır. Bu yaklaşım, kıt su kaynaklarının korunmasını sağlayacak ve yoğunlaştırma sırasında soğutma suyunun buharlaşmasından kaynaklanan ısı adası etkisi ile termal kirliliğin önlenmesine katkı sunacaktır. Tatlı su kaynaklarının soğutma suyu temini için kullanılması, özellikle su stresi yaşayan Türkiye gibi ülkelerde, kıt su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımını daha da zorlaştırmaktadır. Göller ve nehirler gibi içme suyu ve tarımsal sulama açısından stratejik öneme sahip tatlı su kaynakları üzerindeki bu kullanım baskısı, çevresel etkilerin yanı sıra sosyal ve ekonomik sorunları da beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda, tatlı su kaynaklarının termik santrallerde soğutma suyu olarak kullanımı hem çevresel sürdürülebilirliği hem de insan yaşamını tehdit eden bir uygulama olarak dikkat çekmektedir. Elde edilecek sıvı CO₂'nin %100 saflıkta olması, yeniden kullanım alanlarını genişletecek ve sistemin genel verimliliğini artıracaktır.

Bu doğrultuda, tez çalışmasında mevcut CO₂ yakalama ve sıvılaştırma teknolojileri olan Linde-Hampson sistemi ile bu sistemin geliştirilmiş versiyonu olan Feng Chen ve Tatiana Morosuk sistemlerinin, bir termik santral baca gazından çıkan CO₂'nin yakalanması, sıkıştırılması ve sıvılaştırılması süreçleri için entegrasyonu

incelenmiştir. Mevcut sistemlerde, CO₂ sıkıştırma işlemi sırasında artan iç enerjinin uzaklaştırılması amacıyla kullanılan cooler birimlerinin enerji yoğunluğu göz önünde bulundurularak, bu birimlerin kullanımına son verilmesi hedeflenmiştir. Tasarlanan yenilikçi sistemde, CO₂'nin sıkıştırma işlemi tek bir kompresörle tek seferde gerçekleştirilirken, sıkıştırma sırasında iç enerjisi artan CO₂'nin soğutulması için basınca dayanıklı, kanatlı ve oluklu doğal soğutmalı tanklar kullanılmıştır. Ayrıca, CO₂ kompresöre girmeden önce içine soğuk CO₂ verilerek bir ön soğutma sağlanmıştır. Bu doğal soğutma yaklaşımı, enerji kullanımını optimize ederek sistemin toplam verimliliğini artırmayı ve operasyonel maliyetleri düşürmeyi hedeflemektedir. Çalışmanın ikinci kısmında, mevcut termik santrallerde çürük buharın yoğunlaştırılması amacıyla kullanılan soğutma suyunun tamamen ortadan kaldırılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda, termik santral baca gazından elde edilen, sıkıştırılmış ve sıvılaştırılmış soğuk CO₂'nin soğutma sürecinde bir ısı taşıyıcı olarak kullanılması incelenmiştir. Önerilen bu yöntem, soğutma suyu kullanımından kaynaklanan çevresel etkileri azaltmayı ve sistemin genel enerji verimliliğini artırmayı amaçlamaktadır. Yenilikçi ve sürdürülebilir bu soğutma çözümü, termik santral uygulamalarında çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir katkı sağlamaktadır.

Bu tez, CO₂'nin etkin bir şekilde yakalanması ve sıvılaştırılmasına yönelik yenilikçi yaklaşımı ile termik santrallerdeki mevcut soğutma süreçlerine alternatif bir çözüm sunmaktadır. Çalışma, enerji verimliliğini artırmayı ve çevresel sürdürülebilirliği desteklemeyi hedeflemekte, aynı zamanda karbon ayak izinin azaltılması ve operasyonel maliyetlerin düşürülmesine katkı sağlamaktadır. Önerilen yöntemler, mevcut uygulamalara kıyasla önemli iyileştirmeler sunarak enerji ve çevre alanlarında değerli bir perspektif ortaya koymaktadır.

2. GENEL TANIMLAR

Çevre kirliliği üç temel kategoride incelenmektedir: fiziksel, kimyasal ve biyolojik kirlenme. Fiziksel kirlenme hava, toprak ve suyun yapısal değişimlerini kapsarken, kimyasal kirlenme endüstriyel maddelerin kontrolsüz kullanımı ve yayılımından kaynaklanmaktadır. Biyolojik kirlenme ise çevredeki mikroorganizmaların etkileşimiyle oluşarak insan sağlığını tehdit etmektedir (İbadullayeva vd., 2019).

Hava kirliliği, doğal ve yapay kaynaklardan ortaya çıkan kirleticilerle oluşmaktadır. Özellikle kentleşme, endüstriyel faaliyetler ve enerji üretimi gibi insan kaynaklı aktiviteler sonucu oluşan kirleticiler, küresel ısınmaya neden olan sera gazlarının artmasına yol açmaktadır. Bu gazlar atmosferde birikerek iklim değişikliklerine neden olmaktadır (Çepel ve Ergün, 2004).

Su kirliliği ise suyun doğal yapısını bozan fiziksel, kimyasal ve biyolojik değişimler sonucu ortaya çıkmaktadır. Dünya'daki tatlı su rezervlerinin yalnızca %3'lük bir orana sahip olması ve 1945'ten bu yana sulu tarım alanlarının üç kat artması, su kaynakları üzerinde ciddi bir baskı oluşturmaktadır. Bu durum, yaşam için temel olan temiz su kaynaklarının giderek azalmasına neden olmaktadır. Dünya genelinde tatlı su rezervlerinin neredeyse sadece %3'ünü oluşturan su, kolay bulunabilen ve ucuz bir madde olmasına rağmen, su kirliliği sorunlarıyla karşı karşıyadır (Özdilek, 2004).

Toprak, su ve hava sistemleri ile ilişkili olduğundan, asit yağmurları ve su kirliliği gibi faktörler toprak kirliliğine önemli katkılarda bulunmaktadır. Ayrıca, kirli hava ve su taşıyan unsurların yanı sıra, tarımsal faaliyetlere bağlı gübreleme, ilaçlama; sulama nedeniyle tuzlanma, sanayi ve kentleşme amaçlı toprak tahsisi gibi süreçler toprağı kirletmektedir (Başol, Durman ve Önder, 2007). Su kirliliği, hava kirliliği ve endüstriyel emisyonlar, çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratan önemli sorunlardır. Temiz su kaynaklarının korunması, hava kirliliğinin kontrol altına alınması ve endüstriyel tesislerin çevre dostu uygulamalara geçişi, sürdürülebilir bir çevre için kritik önem taşımaktadır.

Sera gazları, karbon dioksit, metan ve diğer antropojenik etkenler, küresel ısınmaya katkıda bulunarak iklim değişikliğine önemli ölçüde etki eder. Bu değişimler, deniz seviyesindeki artışlar, sıcaklık değişimleri, aşırı hava olayları, kuraklık ve seller gibi olaylar şeklinde kendini gösterebilir (NASA, 2023a). Sanayi Devrimi ile birlikte madencilik, fosil yakıtların kullanımı, makineleşme, orman alanlarının endüstriyel tarıma açılması gibi insan faaliyetleri, atmosfere zararlı gazların salınımını artırmış ve iklim üzerinde etkiler yaratmıştır. Doğal sera etkisi oluşturan gazlar, Yerküre tarafından yayılan kızılötesi radyasyonun bir kısmını emerek ve geri yansıtarak sera etkisini meydana getirir. Atmosferin yalnızca %1'ini oluşturan bu gazlar, güneşten gelen ışınların uzaya geri kaçmasını engelleyerek yeryüzündeki sıcaklığın dengeli bir şekilde dağılmasına katkıda bulunur (Erol, 2010). Ancak günümüzde, endüstrileşme, fosil yakıt tüketimindeki artış ve büyük ölçekli üretim gibi insan kaynaklı faktörler, sera gazlarının miktarını önemli ölçüde artırarak iklim değişikliğine sebep olmaktadır.

Sera gazları arasında su buharı, CO₂, metan, ozon, azot oksit, kloroflorokarbonlar ve hidroflorür karbonlar bulunmaktadır (IPCC, 2014). CO₂'nin atmosferdeki miktarı endüstri çağı öncesinde 280 ppm iken, 2023 Mayıs ayında 421 ppm olarak ölçülmüştür (NASA, 2023b).

Sera Etkisine Sebep Olan Gazlar

- CO₂: Karbondioksit, atmosferde %0-0,4 arasında bulunmasına rağmen, klimatolojik koşulları önemli ölçüde etkileyen ve atmosferik değişkenleri/sapmaları belirleyen önemli bir faktördür (Türkeş, 2016). İnsanlar ve diğer canlı türleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olan bu gazın kaynakları arasında volkanik aktiviteler, maden suları ve endüstriyel faaliyetler bulunmaktadır. CO₂, atmosferdeki miktarına karşın, canlıları tehdit edecek oranlara ulaşmaz. Denizler, atmosferdeki fazla CO₂'yi eritir ve bu gazı düşük olduğunda atmosfere geri verir, bu da bir denge oluşturur. Suyun sıcaklığı arttıkça CO₂ miktarı da artar. Ağır bir gaz olan CO₂, hava basıncı arttıkça alt katmanlarda birikir ve toprağa sızarak yer altı boşluklarına ulaşır. Basıncı azaldığında ise yukarı doğru yükselir. Bu değişimler, yaşama ve iklimlere önemli ölçüde etki eder (Erol, 2010). CO₂'nin atmosferdeki miktarının %80-85'i fosil yakıtların kullanımından kaynaklanmaktadır. Ormanların yakılması veya tahrip edilmesi, atmosferdeki CO₂ salımını artırır, çünkü ormanlar

atmosferdeki CO₂'yi absorbe eden önemli alanlardır (Kurnaz, 2022). Bu nedenle, küresel ısınma ile mücadelede en öncelikli adımlardan biri, CO₂ salımlarının azaltılmasıdır.

- **Metan:** Metan, oksijensiz koşullarda organik atıkların parçalanması sonucu ortaya çıkan bir gazdır. Metan gazı, çiftlik gübreleri, pirinç tarlaları, çöplükler ve bataklıklar gibi doğal ve insan kaynaklı süreçlerden oluşmaktadır. Küresel ısınmaya olan etkisi yaklaşık %16 seviyesindedir ve atmosferdeki molekül ömrü oldukça kısadır. İnsan faaliyetleri, metan gazı oluşumuna pirinç üretimi, depolama alanları, fosil yakıt tüketimi ve çiftlik hayvancılığı gibi etkenler aracılığıyla katkıda bulunmaktadır (Jackson vd., 2020). Doğalgazın büyük bir bölümü metan gazından oluşur ve bu gaz, karbon dioksitten daha etkili bir şekilde küresel ısınmaya katkıda bulunur. Boru hatlarındaki sızıntılar, metan salınımını artıran önemli faktörler arasında yer alır. Endüstriyel hayvancılık ise metan gazının başlıca kaynaklarından biridir. Ayrıca, insan faaliyetleri sonucunda oluşan atıklar, özellikle oksijensiz ortamlarda bakterilerin organik maddeleri çürüterek metan gazı üretmesiyle, metan salınımını destekler. Atık su arıtma süreçleri sırasında da metan gazı açığa çıkmaktadır (Jackson vd., 2020).
- **Azot Oksitler:** Yerkürenin yüzeyinde doğal olarak oluşabileceği gibi, insan faaliyetleri sonucunda endüstriyel olarak da meydana gelebilir. Fosil yakıtların yakılması, egzoz gazları ve gübre kullanımı, bu gazların başlıca kaynaklarıdır. Azot oksitlerin her ton salımı, 10-15 kg azot oksit emisyonuna neden olabilir. Özellikle otomobil motorlarındaki yanma süreçleri ve elektrik santrallerindeki yakıt tüketimi, azot oksit emisyonlarını artırarak ciddi hava kirliliğine yol açar. Sanayi Devrimi öncesinde atmosferdeki azot oksit seviyesi 270 ppb civarındayken, günümüzde bu değer 330 ppb'ye ulaşmıştır. Azot oksitlerin küresel sera etkisine katkısı yaklaşık %7'dir (WMO, 2022).

2.1. Enerji ve Çevre İlişkisi

Enerji ile çevre arasındaki ilişki, enerjinin üretimi, taşınması, ticareti, kullanımı ve dönüşümünün çeşitli kirlilik türlerine yol açtığını gösterir. Dahl (2004) tarafından belirtildiği gibi, fosil yakıtların yanması CO₂, azot oksit, sülfür dioksit ve karbonmonoksit gibi gazların atmosfere salınmasına sebep olur. Su kaynakları da enerji kaynaklarından ortaya çıkan gazlar, partiküller ve atıkların su sistemlerine

karişması sonucu kirlenir. (Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği, 2004). Bu bağlamda, enerji üretimi ve kullanımıyla ilgili çevresel etkileri azaltmak adına sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelme ve temiz teknolojilere geçiş, çevre kirliliği sorunlarına karşı etkili bir çözüml olabilir (Pipe, 2013a). Bu önlemler, hem enerji ihtiyacını karşılamak hem de çevre dostu bir yaklaşım benimsemek açısından önem taşıır.

Enerji kaynaklarının çevresel etkileri incelendiğinde, kömürün çevreye en fazla zarar veren yakıt olduğu görölmektedir. Kömürün yanması sırasında yüksek miktarda CO₂ gazı açığa çıkar, bu da atmosferde sera gazlarının birikmesine neden olarak küresel ısınmaya katkıda bulunur. Ayrıca, termik santrallerde kullanılan kömür, kükürtdioksit salınımına da yol açarak solunum yolu hastalıklarına neden olabilir (Pipe, 2013b). Petrol, fosil yakıtlar arasında kömürün ardından gelen bir kaynaktır ve sera gazı üretimi bakımından önemli bir etkiye sahiptir. Petrol kaynaklı enerji santralleri, motorlu taşıtlar ve endüstri tesisleri, atmosfere önemli miktarda sera gazı salmaktadır.

Fosil kaynaklı enerji kullanımı sırasında ortaya çıkan atıkların çevre ve doğa üzerindeki olumsuz etkileri, iklim değişikliğinde önemli bir faktör haline gelmiştir (Karakaya, 2008). Dünya genelinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına yönelik çalışmalar yapılmakta olup, fosil kaynakların sınırlı ve yenilenemez olduğu gerçeği bilinmektedir. Bu kaynaklar arasında doğalgaz, kömür ve petrol bulunmaktadır. Doğalgaz, yeryüzünün alt katmanlarında milyonlarca yıl süren doğal dönüşüm sonucu oluşan organik maddelerden elde edilmektedir (Türkyılmaz ve Çevratoğlu 2006). Bu enerji kaynağı, %90 oranında metan içermekte olup, kullanıma uygun bir şekilde çıkarılabilir. Doğalgaz, günümüzde enerji ihtiyaçlarının yanı sıra kimyasal üretimde de kullanılabilir (EIA 2016). Kömür, enerji kaynakları arasında önemli bir yer tutmakta olup, özellikle sanayi ve ısınma alanlarında kullanılmaktadır. Bitki kalıntılarının çürümesi ve biyokimyasal etkileşimlerin sonucunda oluşan kömür, farklı tiplerde madencililiği yapılan bir enerji kaynağıdır (Spellman 2013). Petrol, milyonlarca yıl önce yaşamış bitki ve hayvan kalıntılarında oluşan bir fosil yakıttır. Karbon, hidrojen ve hidrokarbonlardan meydana gelen petrol, ham petrol olarak çıkarılarak rafinasyon işlemlerine tabi tutulur ve çeşitli petrol ürünleri elde edilir (EIA 2016).

Tablo 2.1. Yakıt türlerinin alacağı paylara göre TPES (Total Primary Energy Supply) senaryoları (%). (IEA, 2005).

Yakıt Türü	2010	2030
Petrol	35,3	35
Kömür	22,7	21,8
Doğalgaz	22,2	25
Nükleer enerji	6,4	4,6
Hidrojen enerjisi	2,3	2,2
Diğer yakıt türleri	11,2	11,3

Bu fosil yakıtların kullanımı, enerji ihtiyacını karşılamak için etkili olabilir, ancak atmosfere salınan sera gazları ve diğer zararlı atıklar iklim değişikliği ve çevresel sorunlara neden olmaktadır. Tablo 2.1, yakıt türlerinin alacağı paylara göre farklı senaryoları göstermektedir. IPCC'nin hazırladığı bu senaryolar, enerji üretiminde kullanılan yakıt türlerinin gelecekteki kullanımının nasıl şekillenebileceğini öngörmekte ve bu durumun sera gazları emisyonlarına etkilerini değerlendirmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları, çevre dostu olarak kabul edilir, ancak dezavantajları da bulunmaktadır. Rüzgâr santralleri, görüntü ve gürültü kirliliği oluşturabilir. Hidroelektrik enerji, baraj gölünün genişlemesi nedeniyle ekosistemlere ve yerleşim yerlerine etki edebilir. Güneş enerjisi, maliyeti yüksek olabilir ve üretim sürekliliği konusunda zorluklar yaşanabilir. Jeotermal enerji, çeşitli çevresel etkilerle ilişkilidir.

Biyokütle, enerji bitkileri ve organik atıkların kullanımıyla elde edilen bir enerji kaynağıdır. Bu kaynak, çevre dostu bir alternatif olarak değerlendirilir. Ancak, biyokütle enerjisi de üretim ve kullanım süreçlerinde çeşitli çevresel etkilere neden olabilir (Erdoğan, 2020).

2.2. Küresel İklim Değişikliği ve Enerji Sektörü

İklim değişikliğinin enerji sistemleri üzerindeki etkileri genellikle enerji arzı, talebi ve sistem entegrasyonu boyutları üzerinden ele alınmaktadır. Arz tarafında, termik santrallerden biyoenerjiye, hidroelektrikten rüzgâr ve güneş enerjisine kadar birçok kaynak, iklim değişikliğinin etkilerinden etkilenebilir. Özellikle termik santraller, sıcaklık değişikliklerinin yanı sıra soğutma sistemleri üzerindeki etkilerle karşı

karşıyadır (Craig vd., 2018). Ayrıca, iklim değişikliği ve ulusal çevre düzenlemeleri nedeniyle termik santrallerin su kullanımı konusunda sıkıntılar yaşanabilir, bu da elektrik üretiminde kesintilere neden olabilir (Liu, Jiang ve Xie, 2019).

Biyoenerji potansiyeli üzerindeki iklim değişikliğinin etkileri ise sıcaklık, yağış ve arazi kullanımı ile ilgili belirsizlikler nedeniyle karmaşık olmaya devam etmektedir. Rüzgâr enerjisi potansiyeli açısından da bölgesel farklılıklar görülmektedir, örneğin Avrupa'da artışlar ve düşüşler rapor edilmiştir (Jerez vd., 2019).

Enerji talebi açısından bakıldığında, iklim değişikliği, ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını değiştirerek enerji tüketimini dolaylı olarak etkileyebilir. Aşırı hava olaylarının artmasıyla birlikte enerji talebinde de belirgin bir yükseliş beklenmektedir. Bu artışın, gelecekte enerji tüketim oranlarından daha hızlı bir şekilde gerçekleşeceği öngörülmektedir. Bu durum, enerji talebi öngörülerinde değişikliklere yol açarak, enerji sistemlerinin tasarım ve işleyişini ciddi şekilde etkileyebilir (Van Ruijven vd., 2019). Ayrıca, iklim değişikliği, enerji iletim altyapısı ve tesis yerleşimleri üzerinde de etkili olabilir. Bu durum, enerji sistemlerinin esneklik kapasitesini ve enerji arzının güvenilirliğini tehdit edebilir (IPCC, 2018). Özellikle tatlı su kaynaklarına dayalı soğutma sistemlerine sahip termoelektrik santrallerin kırılganlığına ilişkin küresel düzeyde yapılan değerlendirmeler, bu tür tesislerin kullanılabilir kapasitelerinde belirgin azalmalar yaşanabileceğini göstermektedir (Miarav vd., 2017). Elektrik santrallerinde soğutma sorunları ve hidroelektrik üretimi için gerekli su tedarikinin bozulması gibi faktörler, enerji arzını olumsuz yönde etkileyebilir.

Turner ve diğer araştırmacıların (2017) çalışmaları, Latin Amerika, Avrupa ve Orta Doğu'daki hidroelektrik santrallerinin, iklim değişikliğinin neden olduğu elektrik altyapısı üzerindeki etkileri azaltmak için ek yatırımlara ihtiyaç duyabileceğini göstermektedir. Bu durum, enerji sistemlerinin gelecekteki güvenilirliğini sağlamak için yeni önlemlerin alınmasını gerektirmektedir.

Enerji sistemleri üzerindeki iklim etkilerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi, tüm ölçeklerde tutarlı veriler ve yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmelidir. Bu süreçte, belirsizliklerin dikkatlice analiz edilmesi ve uzun vadeli enerji güvenliği, ekonomik kalkınma ve çevresel hedefler doğrultusunda yatırımların planlanması büyük önem taşır.

2.3. Temel Enerji Kaynakları

Enerji kaynaklarının yöntemsel sınıflandırılması, günümüzde "yenilenebilir enerji kaynakları" ve "yenilenemeyen enerji kaynakları" şeklinde genel bir tasnife dayanmaktadır. Bu sınıflandırmada, enerji kaynağının doğada var olan formlarına göre ayrışması ve yenilenebilirliğin mümkün olup olmaması temel bir öneme sahiptir. Bu temel ayrıma geçmeden önce enerji kaynaklarının dönüştürülebilirlik, depolanabilirlik, elde ediliş ve kaynağın oluşum şekli açısından detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir (İnan, Akbulut ve Aslan, 2018; Koç ve Şenel, 2013).

a) Dönüştürülebilirliklerine göre sınıflandırma

Enerji kaynakları mevcut sınıflandırmaya göre birincil ve ikincil enerji kaynakları olarak iki ana grupta incelenir. Birincil enerji kaynakları, doğada bulunan ve doğrudan kullanılabilen enerji kaynaklarıdır, örneğin güneş, rüzgâr, su, biokütle, kömür, petrol, doğal gaz ve nükleer enerji. Bu kaynaklar, genellikle bir ham madde kullanılarak enerji üretir ve çeşitli işlemlerden geçerek elektrik, ısı gibi farklı enerji formlarına dönüştürülebilir. İkincil enerji kaynakları ise doğal kaynakların dönüştürülmesiyle elde edilen kaynaklardır, örneğin elektrik, sıvılaştırılmış doğal gaz, hava gazı ve petrol türevleri. Bu kaynaklar, birincil enerji kaynaklarından üretilir ve genellikle son kullanıcıya faydalı veya nihai enerji olarak iletilebilir. Enerji kaynakları, çeşitli dönüşüm ve aktarma süreçleriyle farklı kullanım alanlarında değerlendirilir. Örneğin, hidroelektrik santrallerinde depolanan su, elektriğe dönüştürülerek kullanılır. Bu kaynaklar, enerjinin çeşitli şekillerde dönüştürülmesi ve transferi için önemlidir (Koç ve Şenel, 2013).

b) Depolanabilirliğine göre sınıflandırma

Kömür ve petrol gibi kaynaklar depolanabilirken, güneş, rüzgâr ve hidrolik gibi kaynaklar kısmen veya hiç depolanamaz. Bu günümüzde enerjinin sınırlı kaynakları nedeniyle, depolama teknolojileri çeşitlenmiş ve enerjinin depolanması giderek önem kazanmıştır. Biyolojik, kimyasal, potansiyel, elektriksel ve ısı depolama gibi farklı depolama tipleri mevcuttur. Depolama, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının ileri teknolojilerle depolanmasıyla enerji tasarrufu ve verimliliği sağlar. Bu yöntem, tüketicilere daha esnek, güvenilir ve verimli enerji kullanımı sunmanın yanı sıra, yenilenebilir enerji tedarikini kolaylaştırır. Depolama teknikleri, ısıtma sistemlerinde

kış aylarında %22'ye ve iklimlendirme sistemlerinde yaz aylarında %40'a kadar enerji tasarrufu sağlayabilir (Kozak ve Kozak, 2012).

c) Kullanışlarına göre sınıflandırma

Kullanışlarına göre yapılan sınıflandırma, enerji kaynakları açısından yaygın ve kabul gören bir sistemdir. Bu sınıflandırmada, yenilenebilirlik kavramı temel bir kıstas olarak kullanılarak, kaynakların tükenme durumu göz önünde bulundurulmaktadır. Yenilenebilir kaynaklar, fosil ve nükleer yakıtlardan elde edilmeyen doğal kaynaklar olarak tanımlanmaktadır (Cambridge, 2023). Bu sınıflandırmaya göre, doğada doğrudan kullanılabilen, ikinci bir işleme gerek duymadan üretilen ve kullanılmasına rağmen azalmayan enerji kaynakları yenilenebilir olarak kabul edilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi, giderek tükenen ve çevresel etkilere yol açan yenilenemez kaynaklara alternatif oluşturmasıyla artmaktadır. Bu bağlamda, enerji çeşitliliğinin sağlanması ve sürdürülebilirlik amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımların artırılması önem taşımaktadır (Koç ve Kaya, 2015).

- Fosil enerji kaynakları

Fosil yakıtlar, milyonlarca yıl süren ısı ve basınç etkisiyle ölü bitki ve hayvan kalıntılarından oluşan yenilenemeyen enerji kaynaklarıdır. Kömür, petrol ve doğalgaz, bu kategoride yer alan başlıca kaynaklardır (Demirel, 2016; Öztürk, 2013). Fosil enerji kaynaklarının temelde güneş enerjisinin bir türevidir, kullanımları nispeten basit enerji tesisleri gerektirir, gaz ve sıvı formları taşınabilir, yüksek miktarda elektrik üretebilir ve rezervleri geniş ve erişilebilirdir (Öztürk, 2013). Ancak, çevresel zararları da yüksektir; sızıntı durumunda çevreye verdiği zarar önemlidir, uzun süreçte oluşan kaynakları yenilenememektedir, yanma sonucu çevreye zararlı gazlar salar ve taşıma maliyeti vardır. Enerji güvenliği sorunları, çevresel etkiler ve yüksek petrol fiyatları, fosil olmayan enerji kaynaklarına yönelimi artırmıştır (EIA, 2016).

Kömür: Kömür, milyonlarca yıl süren kimyasal değişimlerle oluşan fosil bir yakıttır, karbon ve hidrokarbonları içerir. Fosil ailesinin en bollardan biri olan kömür, enerji üretimi açısından taşıma, iletim ve depolama konularında avantajlıdır. Tarih boyunca ısınma amaçlı kullanılan kömür, endüstriyel çağın başlamasıyla birlikte çelik, çimento, alüminyum, kâğıt, otomotiv ve kimya endüstrilerinde önemli bir rol oynamıştır. Dünya genelinde elektrik üretiminin %40'ında kömür kullanılmaktadır. Kömür, güvenilir,

öngörülebilir ve 24 saat kesintisiz enerji sağlayan bir kaynaktır, ancak milyonlarca yıl süren oluşumu, yenilenebilir kaynaklara kıyasla daha yavaş bir yenilenme sürecini beraberinde getirir (World EnergyCouncil, 2016).

Kömür madenciliğinin ekonomik ve sosyal avantajları bulunsada çevre üzerindeki olumsuz etkileri göz ardı edilemez. Kömür yakılması, çevre kirliliğine, asit yağmurlarına, sera gazlarına ve ciddi sağlık sorunlarına yol açabilir. Paris Anlaşması ile birçok ülke, kömür kullanımını azaltma taahhüdünde bulunmuş, ancak gelişmekte olan ülkelerin enerji ihtiyaçları göz önüne alındığında tamamen vazgeçmek zor olabilir (BP, 2022).

Dünya genelinde kömür rezervleri bulunduğu gibi, ABD, Rusya, Avustralya, Çin ve Hindistan gibi ülkeler en büyük paya sahiptir. Çin'in sürdürülebilir büyüme politikalarına geçişi, OECD ülkelerindeki azalan kömür tüketimi bu düşüşte etkilidir. Fiyatlar, 2014'ten itibaren düşme eğiliminde olsa da Çin'in politika müdahaleleri fiyatları dengelemiştir. Bu gelişmeler, çevre kaygıları ve iklim değişikliği ile mücadele adına kömürden uzaklaşma çabalarını yansıtmaktadır (EIA, 2021).

Petrol: Petrol, tarihte bilinen en büyük enerji kaynağıdır ve modern dünya üzerine inşa edilmiş temel bir unsurdur. Kontrolü kolay, yoğun ve taşınması basit olan petrol, enerji talebini karşılama açısından hayati bir rol oynar. Petrolün fiyatları sadece yakıt istasyonlarında değil, aynı zamanda mal ve hizmetlerin genel fiyatlarını etkiler, çünkü petrol, birincil bir hammadde olarak birçok sektörde kullanılır. Bitki ve hayvan kalıntılarından binlerce yıl boyunca oluşan karbon bazlı bir yakıt olan petrol, kullanıldığında atmosfere yoğun miktarda CO₂ gazı salar. Petrol, Latince "taş yağı" anlamına gelen "petra" ve "oleum" kelimelerinin birleşiminden gelir. Petrol, farklı atom birleşimlerinden hem ham petrol hem de petrokimya adı verilen ikincil ürünleri üretir. Deniz tabanı veya yer kabuğunun altında bulunan ham petrol, sondajla çıkarıldıktan sonra rafinerilere taşınır. Rafineride işlenerek benzin, motorin, fueloil, asfalt, katran gibi çeşitli ürünler elde edilir. Petrolün özellikleri, özgül ağırlık, kükürt miktarı ve API Gravite değeri ile sınıflandırılır (İsmail, Yalçın ve Al-Mufti, 2017).

Doğalgaz: Doğalgaz, yıllar önce var olan bitki ve hayvan kalıntılarının yerkabuğunun derinliklerine gömülüp kimyasal bir dönüşüme uğramasıyla ortaya çıkar. Diğer fosil yakıtlara kıyasla çevre dostu olan doğalgaz, havaya kükürt oksitleri ve karbon parçacıkları gibi zararlı atıklar salmadan yanar, çevreye minimal etki bırakır.

Kullanımı gün geçtikçe artan doğalgaz, yüksek ısı değeri ve sanayideki kritik rolüyle dikkat çeker (Güngör, 2023). Petrol yerine kullanılabilen bir gaz olması, mevcut petrol rezervlerinin tükenmesi riskini azaltabilir; zira doğal gazın oluşumu petrolle benzer bir süreç izler. Doğal gazın çoğunluğu petrol oluşumuyla ilişkilidir, ancak magma katmanlarıyla da ilişkilidir ve bu gazlar, dünya var oldukça sürekli yeni rezervler oluşturabilir. Doğal gaz, kaynağından alınıp işlenmeden kullanılabilen bir kaynaktır ve boru hatları veya sıvılaştırılarak tankerlerle taşınarak tüketim alanlarına ulaştırılır (İnani, Akbulut ve Aslan, 2018). Doğal gaz, düşük kirlilik yüzdesi ve geniş bulunabilirliğiyle sağlıklı bir enerji kaynağıdır. Ulaştırma sektöründe petrol yerine tercih edilmesi, doğal gazın enerji arzındaki önemini gösterir. Uluslararası Enerji Ajansı ve British Petroleum'un analizlerine göre, doğal gaz, enerji tüketiminde petrol, kömür ve doğal gaz arasında önemli bir paya sahiptir. 2040'a kadar doğal gazın enerji bileşimindeki payının %25 civarına ulaşabileceği öngörülmektedir (TEPAR, 2018).

Doğalgaz, günümüzde en hızlı büyüyen fosil yakıtlar arasında yer almaktadır. Küresel doğalgaz tüketimi, yıllık ortalama %1,9 oranında artış göstermektedir. Bu artışın temel nedenleri arasında zengin doğalgaz rezervlerinin varlığı ve gelişmiş üretim tekniklerinin etkili bir şekilde uygulanması yer almaktadır. Doğalgaz, özellikle elektrik ve sanayi sektörlerinde tercih edilen bir fosil yakıt olup, diğer enerji kaynaklarına güçlü bir rakip olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, birçok hükümetin karbon emisyonlarını azaltma çabaları kapsamında, daha temiz bir alternatif olarak doğalgaza yönelme eğiliminin artacağı öngörülmektedir. Doğalgazın enerji sektöründeki payının artarak, dünya enerji tüketiminde lider konumunu alacağı belirtilmektedir (EIA, 2016). Doğalgazın küresel bir ticaret malı haline gelmesi, arz ve talep dinamiklerinde ve uluslararası piyasa organizasyonlarında önemli değişikliklere neden olmaktadır. Bu süreç, küresel doğalgaz arzı, talebi ve fiyatının modellenmesi ve öngörülmesinde çeşitli zorlukların ortaya çıkmasına neden olmaktadır (EIA, 2014: 1).

- Yenilenebilir enerji kaynakları

Fosil yakıtların tükenme riski ve sera gazı emisyonlarındaki hızlı artış, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik ilgiyi artırmıştır (Apergis ve Danuletiu, 2014; Öcal ve Aslan, 2013). Yenilenebilir enerji, temiz, güvenli ve tükenmez olmasıyla öne çıkmaktadır, bu da yaşamın sürdürülebilirliği için önemlidir. Fosil yakıtlara olan aşırı

bağımlılık, sürdürülebilirlik açısından tehdit oluştururken, yenilenebilir enerji kaynakları bu soruna çözüm sunmaktadır (Upadhyayve Sharma, 2014).

Yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaşması için devletler, politika ve teşvik önlemlerini hayata geçirmişlerdir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının artan talep görmesine paralel olarak, hükümetler vergi indirimleri, düşük faizli krediler, yenilenebilir enerji portföy standartları gibi teşvikleri uygulamaktadır. Bu politikalar hem enerji güvenliğini artırmak hem de çevresel etkileri azaltmak amacıyla yapılmaktadır (Apergis ve Payne, 2014).

Türkiye, yenilenebilir enerji alanında kayda değer ilerlemeler kaydetmiş ve 2015 yılında toplam birincil enerji arzının %12,1'ini, elektrik üretiminin ise %32,3'ünü yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlamıştır. Hidroelektrik, rüzgar ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklar, ülkenin enerji portföyünde önemli bir yer tutmaktadır (IEA, 2016). Ayrıca, yenilenebilir enerji, Türkiye'nin enerji güvenliği açısından stratejik bir öneme sahiptir.

Yenilenebilir enerji kaynakları, karbon emisyonlarını azaltma, çevre koruma, bölgesel enerji güvenliğini artırma gibi bir dizi avantaj sunmaktadır. Yenilenebilir enerji alandaki yatırımların politika yapımcılarının teşvik ve düzenlemeleriyle artması hedeflenmektedir (Apergis ve Payne, 2012).

Güneş enerjisi: Güneş enerjisi, Dünya üzerindeki tükenmez serbest enerjinin büyük bir kaynağıdır ve gün geçtikçe kullanımı artmaktadır. Güneş enerjisi, hidrojenin helyuma dönüşümüyle gerçekleşen füzyon süreciyle elde edilmektedir. Elektrik güç üretimi, binaların ısıtılması, soğutulması gibi birçok alanda güneş enerjisi kullanılabilir (Proctor ve Morse, 1977). Yenilikçi teknolojiler, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılmakta ve dünya genelinde geleneksel enerji kaynaklarına alternatif olarak benimsenmektedir (Kabir vd., 2018). Güneş enerjisinin potansiyeli büyük olmasına rağmen, maliyetler ve etkinlik konusundaki endişeler bazı bölgelerde hala devam etmektedir. Tüm ülkeler, güneş enerjisinin ekonomik, güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılma potansiyelini anlayarak bu kaynaktan elde edilecek kazançları değerlendirmeye çalışmaktadır. Ayrıca, güneş enerjisinin kullanımının iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynayabileceği düşünülmektedir (IEA, 2011).

Rüzgar enerjisi: Hava akımının kinetik enerjisinin, rüzgar türbinleri veya rüzgar gülleri aracılığıyla elektrik enerjisine veya mekanik enerjiye dönüşümü, rüzgar enerjisi olarak adlandırılır. Bu enerji kaynağı, karaya (onshore) ve denize (offshore) kurulan rüzgar santralleri aracılığıyla elektrik üretimi yanı sıra rüzgar pompaları ile drenaj ve su pompalama gibi çeşitli uygulamalarda da kullanılabilir (IEA, 2013). Rüzgar enerjisinin bazı avantajları arasında fosil yakıtlara alternatif olması, temiz bir enerji kaynağı olması, gelişmiş teknolojik donanımların mevcudiyeti, güvenliği artıran malzeme ve tasarım gelişmeleri sayılabilir (Öztürk, 2013).

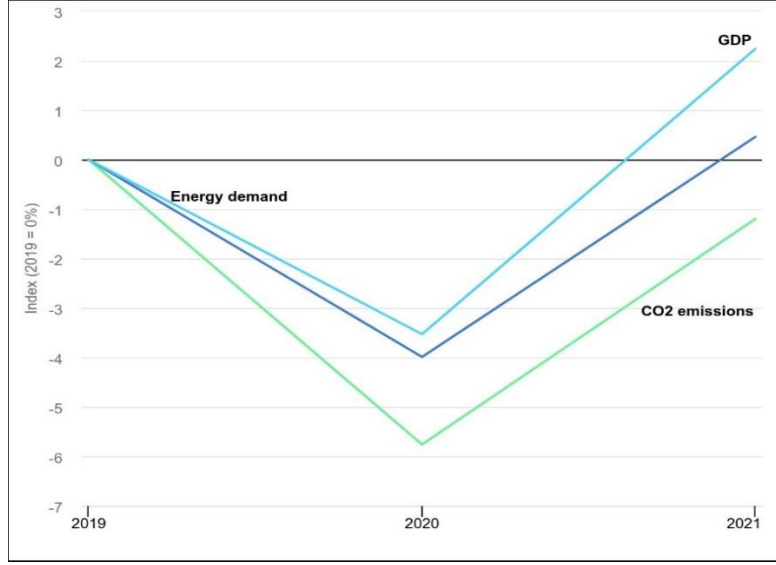
Jeotermal enerji: Jeotermal enerji, yerkabuğunun belirli derinliklerinde biriken su, buhar veya gaz formundaki sıcaklığın ve basıncın enerjiye dönüşmesiyle elde edilen bir kaynaktır. Bu enerji türü, ısıtma, soğutma, sanayi ve elektrik üretimi gibi birçok alanda kullanılabilir (Öztürk, 2013). Jeotermal endüstri, uzun proje süreleri ve kaynak riski gibi zorluklarla karşılaşmış ve 2017'de teknolojik gelişmelere odaklanarak bu riskleri azaltmaya çalışmıştır (REN21, 2018). Jeotermal enerjinin tercih edilme nedenleri arasında güvenilirliği, ekonomik büyümeyi teşvik etme kapasitesi, ulusal güvenliği artırma potansiyeli, çevre dostluğu, ekonomik kalkınmayı destekleme, çok yönlü ve ekonomik bir enerji kaynağı olma özellikleri bulunmaktadır (GEA, 2012). Türkiye'nin jeotermal enerji açısından avantajları, yerli kaynak olması, iklim değişikliğinden etkilenmemesi, düşük maliyeti, enerji fiyat dalgalanmalarından etkilenmemesi ve yerli teknolojiyle gelişebilme potansiyeli gibi faktörlerle petrole alternatif olabilir konumda olduğunu göstermektedir (Öztürk, 2013).

Hidroelektrik enerji: Hidroelektrik enerji, suyun kinetik enerjisinden faydalanarak elde edilmiş bir enerji formudur. Günümüzde türbin teknolojisinin gelişimi ve tasarım tekniklerindeki ilerlemelerle birlikte küçük ölçekli hidroelektrik santralleri yaygınlaşmıştır. Dört tür hidroelektrik üretim tesisi bulunmaktadır, bunlar akışla enerji üreten tesisler, rezervuar üzerinde enerji depolayan tesisler, pompalı depolama ve deniz ortamında hidroelektrik üretimini içeren açık deniz hidro gücüdür (Abolhosseini vd., 2014; WEC, 2013). Hidro güç, son beş yılda 19 GW'lık artışla toplam güç potansiyeline katkıda bulunmuştur. Çin, uzun süredir liderliğini sürdürürken Brezilya, Hindistan, Angola ve Türkiye gibi ülkeler de önemli katkılarda bulunmuştur (REN21, 2018).

Biyokütle enerjisi: Biyoenerji, evsel kullanımda ısıtma ve pişirme gibi uygulamalarda kullanılan katı biyokütle ile karayolu taşımacılığında tercih edilen biyodizel ve biyoetanol gibi sıvı yakıtlardan oluşmaktadır. Bu bileşenler, çevresel ve sürdürülebilir bir şekilde dünya enerji gereksinimlerine önemli bir katkı sağlama potansiyeline sahip büyük bir yenilenebilir enerji kaynağını temsil etmektedir. Biyoenerji; arazi kullanımı, gıda güvenliği, biyoçeşitlilik, çevre ve iklim değişikliği ile düşük karbon emisyonu gibi sürdürülebilirlik kavramlarıyla yakından ilişkilidir (Rosillo-Calle, 2016). Gelişmekte olan ülkelerde geleneksel biyokütle kullanımı, yemek pişirme ve ısıtma gibi alanlarda %8’lik bir oranla öne çıkarken, modern biyokütle kullanımı %5’lik bir paya sahiptir. Modern biyoenerji, binalardaki ısı talebinin %4’ünü, sanayideki enerji talebinin %6’sını, küresel elektrik üretiminin %2’sini ve ulaşım ihtiyacının %3’ünü karşılamaktadır (REN21, 2018).

Dalga enerjisi: Dalga enerjisi, dalga çeviriciler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülerek yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak değerlendirilebilmektedir (Barstow ve ark., 2007). Okyanus enerji kaynaklarının elektriğe dönüştürülmesi, küresel enerji talebinin karşılanması, iklim değişikliğiyle mücadele ve ekonomik faaliyetlerin desteklenmesi açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Ancak, dalga enerjisi teknolojilerinin henüz yeterince olgunlaşmamış olması ve yüksek maliyetler, bu kaynağın yaygın bir şekilde kullanılmasını engellemektedir (WEC, 2017).

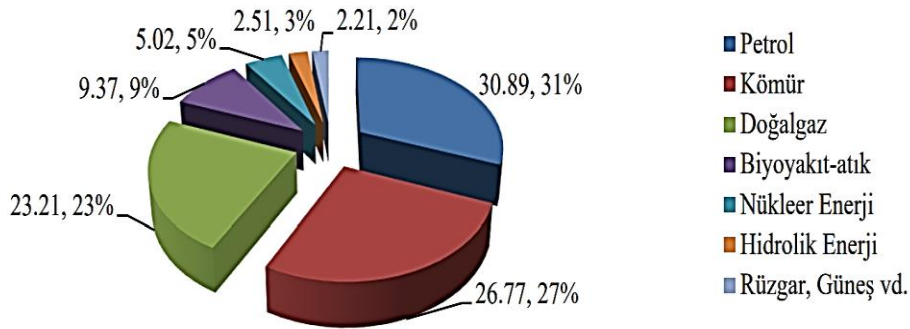
Yenilenebilir enerji kaynaklarından gelen elektrik üretimindeki artışlar, 2021’de tüm zamanların en yüksek seviyesine ulaşarak enerji karışımındaki payı yüzde 30’a çıkaracaktır. Ancak, küresel CO₂ emisyonlarının artmaya devam ettiği ve fosil yakıtlara olan talebin gelecekte önemli ölçüde artmasının beklendiği belirtilmektedir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. 2019’a Göre küresel GSYİH, toplam birincil enerji talebi ve enerji ile ilgili CO2 emisyonlarının gelişimi (IEA, 2021).

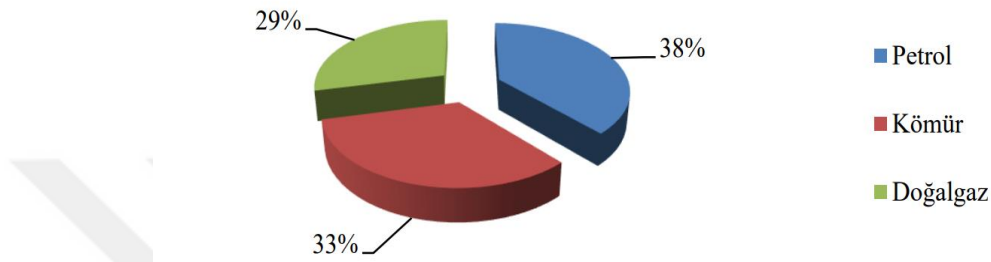
2.4. Dünyada Enerji Kaynakları Kullanımının Dağılımı

Dünya enerji görünümü, çeşitli kaynaklardan gelen enerji tüketimini ve bu kaynakların dağılımını inceleyerek küresel enerji ihtiyacını değerlendirir. Şekil 2.2’e göre, dünya enerji kullanımının %81’i fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Bu kategori içinde petrol %31’lik bir paya sahipken, kömür ve doğalgaz sırasıyla %27 ve %23 ile takip etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları ise genel enerji tüketiminin %14’ünü oluşturur. Bu kapsamda biyoyakıt-atık %9’luk oranla en çok tercih edilen yenilenebilir kaynaktır. Hidro enerji %3, rüzgâr, güneş vb. %2 ile sıralanırken, nükleer enerji %5’lik payıyla dikkat çeker. Nükleer enerjinin düşük kullanım oranının nedenleri arasında çevresel riskler, atık sorunları, kısa kullanım ömrü ve yüksek maliyet bulunmaktadır (Akyüz, 2017).



Şekil 2.2. Dünyanın genel enerji kullanımının kaynaklara göre dağılımı (IEA, 2019).

Dünya fosil yakıtlarının kullanım ve rezerv dağılımı bağlamında yapılan değerlendirmelerde öncelikle enerji kaynaklarının dağılımına odaklanılmıştır. Şekil 2.3'e göre, dünya fosil yakıt kullanımının petrol, doğalgaz ve kömür arasında yakın oranlarda dağıldığı görülmektedir. Bu kategoride en büyük payı %38 ile petrol almaktadır, onu %33 ile kömür ve %29 ile doğalgaz izlemektedir (Şekil 2.3). Ancak doğalgazın diğer fosil yakıtlara oranla daha düşük bir paya sahip olması, çevresel etkiler ve küresel ısınma bağlamında endişeleri artırmaktadır.



Şekil 2.3. Dünyanın fosil enerji kullanımının kaynaklara göre dağılımı (IEA, 2019).

2.5. Türkiye'nin Enerji İhtiyacı ve Enerji Kaynakları

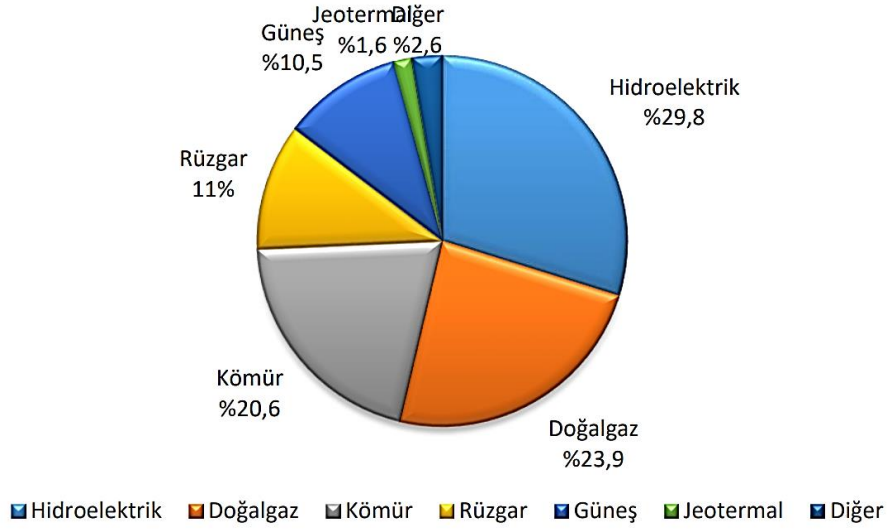
Türkiye'nin yıllık toplam ithalatının yaklaşık dörtte biri enerji ithalatından kaynaklanmaktadır. Türkiye'nin sınırlı petrol ve doğal gaz rezervlerinden kaynaklanan bu dışa bağımlılığı, yenilenebilir ve alternatif kaynakların yeterince kullanılmaması ve enerji verimliliği çalışmalarının etkili bir şekilde yürütülememesinden kaynaklanmaktadır. Bu durum, Türkiye'nin birincil enerji arzının dörtte üçünü dışarıdan temin etmesine neden olmaktadır (Yılankırkan ve Doğan, 2020). Türkiye'nin enerji ihtiyacını karşılayabilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarına öncelik verilmesi, yerli kömürün çevre dostu bir şekilde kullanılması, nükleer enerji ve hidrojen enerjisine odaklanması gerekmektedir. Mevcut enerji kaynaklarının verimliliğinin artırılması, çevresel etkilerin azaltılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin kullanımı, enerji arz güvenliğini sağlamak için atılması gereken önemli adımlardır (Augutis vd., 2014).

Türkiye'nin elektrik enerjisi üretiminde kullanılan yakıtın %85'inin ithal edilmesi, bu bağımlılığı daha da artırmaktadır. Bu durum, Türkiye'nin enerji politikalarında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına ve enerji verimliliğine daha fazla önem vermesini zorunlu kılmaktadır (Ellabban vd., 2014).

Enerji sektörü ağırlıklı olarak kamuya ait olmakla birlikte, elektrik üretimi için uzun vadeli yatırımlar gerektirmektedir. Artan enerji talebinin karşılanması ve sektörün daha etkin bir şekilde yönetilebilmesi için özel sektörün teşvik edilmesi önem arz etmektedir (Atılğan, 2000). Türkiye, linyit, taşkömürü, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların yanı sıra hidroelektrik, güneş, rüzgâr, jeotermal enerji ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına da sahiptir (Şekil 2.4).



2023 yılı Aralık ayı itibarıyla Türkiye'nin toplam kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı; %30,0 hidrolik enerji, %23,8 doğal gaz, %20,5 kömür, %11,1 rüzgâr, %10,6 güneş, %1,6 jeotermal enerji ve %2,6 diğer enerji kaynakları şeklinde sıralanmaktadır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Türkiye'nin kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024).

2023 yılında Türkiye'nin enerji politikasındaki temel hedef, dışa bağımlılığı azaltmak, maliyetleri düşürmek ve toplam elektrik üretiminin %30'unu yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlamak olarak belirlenmiştir (Yılmaz ve Öziç, 2018). Geçmiş dönemlerle kıyaslandığında, günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı artış göstermektedir. Ancak, yenilenebilir enerji projelerinin kurulum maliyetlerinin hala yüksek olması, bu alandaki projelerin sayısının artırılmasını ve maliyetlerin düşürülmesini kritik bir öncelik haline getirmektedir.

Türkiye'de yenilenebilir enerji sektörüne yönelik düzenlemelerin ve politikaların yıllar içindeki evrimine dair incelendiğinde, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nca belirtilen bazı önemli düzenlemeler göze çarpmaktadır. Bu düzenlemeler, ülkede yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmek, sektördeki büyümeyi desteklemek ve enerji arz güvenliğini sağlamak amacını taşımaktadır. Belirtilen kaynakta vurgulanan düzenlemeler arasında, yenilenebilir enerji projelerine finansal destek sağlamak üzere oluşturulan teşvik mekanizmaları, lisanslama süreçlerinde yapılan iyileştirmeler, çeşitli enerji kaynaklarına yönelik özelleştirme ve lisanslama politikaları bulunmaktadır. Bu düzenlemeler, özellikle rüzgar, güneş, hidroelektrik ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmek adına yapılmıştır.

2.5.1. Türkiye'nin hidroelektrik enerji potansiyeli ve kullanım durumu

Türkiye, yıllık 94 milyar m³ yüzey suyu potansiyeli, 18 milyar m³ yeraltı suyu potansiyeli ve toplamda 112 milyar m³ su potansiyeline sahiptir. Ancak, bu kaynakların sadece bir kısmı kullanılmakta olup, hidroelektrik enerji üretimindeki potansiyeli henüz tam anlamıyla değerlendirilememiştir (Yılmaz, 2021). Ancak, hidroelektrik enerji üretimi için nehirlerde barajların inşasıyla birlikte ortaya çıkan küçük dezavantajlar da vardır. Bu, baraj inşası sürecinin biyoçeşitliliği olumsuz etkileyebileceği ve insanların yer değiştirmesine neden olabileceği gerçeğini içerir. Bu durum, dengeli bir planlama ve çevresel etkilerin dikkate alınmasıyla ele alınmalıdır.

Türkiye, 2020 yılında %60'lık hidroelektrik enerji faaliyeti ile yılda 108,0 kWh/yıl enerji üretme kapasitesine ulaşmıştır. Bu miktarın %2,5'i, inşaatı devam eden hidroelektrik santrallere aittir ve 2023 ve sonrasında geliştirilecek potansiyel enerji %7,0 seviyesinde olup, toplamda 12,6 milyar kWh/yıl enerji üretim potansiyelini temsil etmektedir. Ülkenin teorik hidroelektrik enerji potansiyeli 433 milyar kWh olarak tahmin edilmekte olup, teknik açıdan değerlendirilebilir potansiyeli 216 milyar kWh ve ekonomik olarak kullanılabilir hidroelektrik enerji potansiyeli ise 160 milyar kWh/yıl olarak hesaplanmıştır. 2018 yılında hidroelektrik kaynaklardan 59,9 milyar kWh elektrik üretilmiş, 2019 yılı ağustos ayı itibarıyla hidroelektrik kaynaklı elektrik üretimi 68.452 GWh'ye ulaşmıştır. Türkiye'nin enerji sektöründeki atılımları ve yenilenebilir enerji konusundaki yasal düzenlemeler, 2016 yılında 597 adet hidroelektrik santralden elde edilen 26.681,00 MW'lık kurulu gücü ortaya koymaktadır. Türkiye'nin 2023 yılı hedefi, hidrolik enerji kurulu gücünü 36.000,00 MW'a çıkarmaktır (DAKA, 2018).

2.5.2. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli

Türkiye, yılda ortalama 2.737 saat güneşlenme süresi, günlük ortalama 7,5 saat güneşlenme süresi ve yıllık ortalama 1.527 kWh/m² güneş enerjisi potansiyeli ile bu kaynağı verimli bir şekilde değerlendirebilecek kapasiteye sahiptir. Özellikle Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu bölgeleri, yüksek güneş enerjisi potansiyeli ile öne çıkmaktadır (Şeker, 2016). Güneş enerjisinin elektrik ve ısı üretimine katkısıyla, Türkiye fosil yakıtlara olan bağımlılığını azaltarak sürdürülebilir bir enerji geleceği için adımlar atmaktadır. Türkiye'nin bu alandaki teknolojik gelişmelere ve yatırımlara odaklanarak güneş enerjisi kullanımını artırması, enerji talebinin karşılanmasında

önemli bir rol oynayacaktır. Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası'na göre Türkiye'de yıllık ortalama toplam güneşlenme süresi 2741.07 saat ve radyasyon değeri 1527.46 kWh/m² olarak belirlenmiştir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022a).

2.5.3. Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyeli

Türkiye'nin 3500 km kıyı şeridine ve coğrafi konumuna bağlı olarak, özellikle Marmara, Güneydoğu Anadolu ve Ege Denizi bölgeleri yüksek rüzgâr enerjisi potansiyeline sahiptir. Türkiye, rüzgâr enerjisi potansiyeli bakımından OECD ülkeleri içinde öncü bir konumda bulunmaktadır, ancak kurulu kapasite ve rüzgâr enerjisi kullanımı açısından Almanya ve İspanya gibi ülkelerin gerisinde kalmaktadır (Karagöl ve Kavaz, 2017). Türkiye'nin sahip olduğu rüzgâr enerjisi potansiyeli, çeşitli projeler ve yatırımlarla değerlendirilmekte, ancak teknolojik gelişim eksikliği ve yetersiz yatırım nedeniyle potansiyeli tam anlamıyla kullanılamamaktadır. Türkiye'de rüzgâr enerjisi, ekonomik avantajlar sağlayarak enerji sektöründeki dışa bağımlılığı azaltma, temiz enerji üretme ve ekonomiyi canlandırma potansiyeline sahiptir. Haziran 2022 itibarıyla Türkiye'nin rüzgar enerjisine dayalı elektrik kurulu gücü 10.976 MW olarak belirlenmiş olup, bu değer ülkenin toplam kurulu gücünün %10,81'ini temsil etmektedir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022b).

2.5.4. Türkiye'nin jeotermal enerji potansiyeli

Türkiye, coğrafi konumu itibarıyla dünyanın en önde gelen jeotermal enerji kaynaklarına sahip ülkelerden biridir. Ülkemizde farklı sıcaklık aralıklarına sahip yaklaşık 1000 jeotermal enerji kaynağı bulunmaktadır (MTA, 2021). Soğutulmamış magma kütesinden gelen bu enerji, yüksek ilk yatırım maliyetlerine rağmen elektrik üretiminden otelcilik sektörüne kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir (Önal ve Yarbay, 2010). Türkiye'de 2019 yılında toplam 60 jeotermal santral tescil edilmiş ve 60 santralin toplam çıktısı 1.613 MWe'yi bulmuştur. Devam eden projelerin tamamlanmasıyla ülkede 2.154 MWe çıktı hedeflenmektedir (Enerjiatlası.com, 2021). Jeotermal enerji kaynakları, sıcak, sıvı ağırlıklı, buhar ağırlıklı ve yüksek basınç altındaki kayalar olmak üzere dört ana gruba ayrılır. Haziran 2022 itibarıyla, Türkiye'nin jeotermal enerji kurulu gücü 1686 MW seviyesine ulaşmış ve toplam kurulu güç içerisindeki payı %1,66 olarak kaydedilmiştir.

2.5.5. Türkiye'nin biyokütle (Canlı Kütle) enerjisi potansiyeli

Türkiye'de biyokütle enerjisinin 1990 yılında %75 olan payı, 2018'de %15'e düşmüştür, temel neden ise geleneksel biyokütle kullanımının azalmasıdır. Ancak, asıl sorun, klasik biyokütle kullanımındaki düşüşe karşın modern biyokütle enerjisinin aynı ölçüde artmamasıdır. 2018 yılında Türkiye'deki biyokütle arzı 3,1 milyon TEP olarak kaydedilmiştir. Biyokütle Enerji Potansiyeli Atlası (BEPA) ve diğer kaynaklardan elde edilen verilere göre, mevcut biyokütle potansiyelinin %78 ila %90'ının kullanılamayacağı tahmin edilmektedir (İlleez, 2019, s. 324).

Biyokütle enerjisi, bitkilerden, hayvanlardan ve atıklardan elde edilen kaynaklarla enerji üretimini sağlamak, Türkiye'nin enerji ihtiyaçlarını karşılamak için önemli bir potansiyele sahiptir. Türkiye'nin enerji üretim oranını artırmak amacıyla biyokütle kullanımını genişletmeye yönelik çabalar devam etmektedir (Yıldırım ve Nuri, 2018). Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan Biyokütle Enerjisi Potansiyel Atlası (BEPA) verilerine göre, toplanabilir atıkların toplam ekonomik enerji eşdeğerinin yaklaşık 3,9 MTEP/yıl olduğu tespit edilmiştir. Bu değerlendirme, biyokütle enerji potansiyelinin ekonomik olarak kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır. Haziran 2022 itibarıyla biyokütle ve atık ısı enerjisine dayalı kurulu güç, 2.172 MW olarak kaydedilmiş olup, bu değer toplam kurulu gücün %2,14'üne karşılık gelmektedir.

2.5.6. Türkiye'nin enerji potansiyeliyle ilgili 2023 yılı verileri

Türkiye'nin enerji potansiyeliyle ilgili veriler, enerji alanında önemli bir çeşitliliği ortaya koymaktadır. Ülke, enerji talebinin %70'ini dışarıdan karşılar, enerji üretim kapasitesi Şubat 2023 itibarıyla 104.14 GW'ye ulaşmış durumda. Bu kapasitenin %30.3'ü hidroelektrik, %24.4'ü doğal gaz, %20.9'u kömür, %11'i rüzgar, %9.3'ü güneş, %1.6'sı jeotermal ve %2.5'i diğer enerji kaynaklarından sağlanmaktadır (Ökten, 2023).

Türkiye, Zonguldak Havzası'nda bulunan dünyanın en büyük kömür rezervlerinden birine ev sahipliği yapmaktadır. Toplam 15 milyar ton olan bu rezervin %70'i linyit, %30'u taş kömürüdür. 67 üretim santraliyle 21.4 GW kurulu güce sahip olan bölge, yıllık 11.19 TWh enerji üretmektedir. Güneydoğu Anadolu Bölgesi ise 430 milyon varile ulaşan petrol rezervleriyle dikkat çekiyor. Ayrıca, Bakü – Tiflis – Ceyhan ve Kerkük – Yumurtalık boru hatları ile Hazar Bölgesi ve Irak petrolü dünya pazarına taşınmaktadır (Enerji Piyasası Denetleme Kurulu, 2023),

Doğal gaz alanında, Türkiye'nin mevcut rezervi 4.2 milyar metreküp olup, Karadeniz'de keşfedilen Sakarya gaz sahasıyla bu rezerv 710 milyar metreküpe çıkmıştır. Rusya, Azerbaycan ve İran'dan gelen boru hatlarıyla doğal gaz ithalatı yaparken, ayrıca Katar, Nijerya ve Cezayir'den sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) ithalatı gerçekleştirmektedir (Ökten, 2021)

Türkiye'nin enerji potansiyeli aynı zamanda yenilenebilir kaynaklarda da zengindir. Jeotermal kaynaklar açısından dünyanın en büyük potansiyeline sahip olan ülke, 1.9 GW kurulu güç ve yıllık 0.83 TWh enerji üretim kapasitesine sahiptir. Hidroelektrik enerji potansiyeli yılda 216 milyar kWh, güneş enerjisi potansiyeli ise yılda 380 milyar kWh'dir. Rüzgar enerjisi, biyokütle, dalga enerjisi, gel-git enerjisi gibi diğer yenilenebilir kaynaklarda da Türkiye büyük bir potansiyele sahiptir. Ülkede yapım aşamasında olan nükleer enerji santralleri de dikkat çekmektedir. Mersin Akkuyu'da faaliyete geçmesi planlanan ilk nükleer enerji santrali, 4800 MW kurulu güç ve yıllık 33 milyar kWh enerji üretim kapasitesine sahiptir. Ayrıca, Sinop ve Kırklareli İğneada'da inşa edilecek diğer nükleer enerji santralleri için projeler geliştirilmektedir (SHURA Enerji Dönüşüm Merkezi, 2021).

Türkiye'nin enerji alanında sahip olduğu geniş potansiyel, çeşitli kaynaklardan elde edilen verilerle desteklenmektedir. Bu durum, ülkenin enerji sektöründeki çeşitliliği ve potansiyeli vurgulamaktadır.

2.6. Türkiye'nin Enerji İhtiyacı

Ülkemizin enerji potansiyeli arasında belirgin bir paya sahip olan kömür, çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır. Türkiye'deki kömür rezervlerinin büyük bir kısmı linyitten oluşmakla birlikte taş kömürünün katkısı daha sınırlıdır. Ancak, ülkemizdeki kömür potansiyeli tam olarak belirlenmiş değildir. Son yıllarda, enerji üretiminde yerli kaynakların kullanımını artırmak ve dışa bağımlılığı azaltmak amacıyla yeni kömür havzalarının keşfi ve değerlendirilmesine yönelik çalışmalar başlatılmıştır. Türkiye'nin taş kömürü açısından en önemli havzası Zonguldak bölgesinde yer almakta olup, bu bölgede kömür madenciliği faaliyetleri Osmanlı Devleti döneminden itibaren devam etmektedir. Kozluk, Armutçuk, Üzülmüş, Amasra ve Karadon gibi alanlar önemli kömür havzaları arasında yer almaktadır (Yılmaz, 2012). Taş kömürü havzalarındaki zorlu çıkarım şartları, jeolojik karmaşıklık ve artan üretim maliyeti gibi

faktörler, yerli taş kömürü üretimini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle, Türkiye'nin ihtiyacını karşılamak için taş kömürü ithalatına başvurulmaktadır. Bu ithalatın yapıldığı ülkeler arasında Rusya, Kolombiya, Güney Afrika Cumhuriyeti ve Avustralya bulunmaktadır. 1980'de, ülkenin kömür tüketiminin %80'i yerli kaynaklardan sağlanırken, 2022 itibarıyla bu oran yalnızca %5,63'e gerilemiştir. Mevcut kömür kaynakları arasında ise linyitin, enerji üretiminde belirgin bir paya sahip olduğu gözlemlenmektedir. Türkiye'deki linyitler genel olarak düşük ısı değerine sahiptir ve ısı değeri yüksek olanlar konut ısıtmasında, düşük olanlar ise termik santrallerde kullanılır. Afşin-Elbistan, Konya-Karapınar, Afyon-Dinar, Manisa-Soma, Eskişehir-Alpu ve Ankara-Çayırhan, Türkiye'nin en önemli linyit rezervlerine ev sahipliği yapmaktadır (Demirkan, 2021). 1980 öncesinde düşük seviyelerde gerçekleşen kömür ithalatı, 1990'lı yıllarda 10 milyon tonu, 2000'li yıllarda ise 20 milyon tonu aşarak artış göstermiştir. 2012 yılında kömür ithalatı, bir önceki yıla göre %23 oranında artışla 29,6 milyon tona ulaşmıştır. Ancak, 2013 yılında %8,4'lük bir düşüşle 27,2 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. 2014 yılında kömür ithalatı yeniden %11 oranında artış göstererek 30,2 milyon tonu aşmıştır. İlerleyen yıllarda, 2015 ve 2016 yıllarında ithalat sırasıyla yaklaşık 34 milyon ton ve 35 milyon ton seviyelerinde sabit kalmıştır. Bu veriler, Türkiye'nin kömür ithalatında zamanla artan bir eğilim sergilediğini ve enerji ihtiyacını karşılamak için dışa bağımlılığın sürdüğünü göstermektedir. 2020'de 38 milyon tonun üzerine çıkan ithalat, 2022'de yaklaşık 35 milyon ton seviyelerinde gerçekleşmiştir (TÜİK, 2023).

2.7. Kömürden Vazgeçilememesinin Sebepleri

Enerji, modern yaşamın önemli bir gerekliliği ve kişi başına düşen enerji kullanımı açısından gelişmişlik göstergelerinden biri olup, enerji kullanımının önemli bir parçası olarak elektriğe erişim birçok platformda temel bir insan hakkı olarak değerlendirilmekte ve tartışmalar artarak devam etmektedir (Franklin vd., 2017; Tully, 2006). Dünyada artan nüfusa bağlı olarak enerji talebinin de arttığı bilinmektedir. Ancak enerji kaynaklarının seçiminde ekonomik, sosyal ve çevresel gibi farklı bakış açılarının dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle, bu hususlar her ülke için kendi statüsü açısından bireysel olmalıdır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde enerji ihtiyacı daha hızlı artmaktadır ve bu da büyük ölçüde endüstriyel ve ekonomik gelişmelerle

ilgilidir. Türkiye, son yirmi yılda dünyanın en hızlı büyüyen enerji pazarlarından biri olarak buna çok iyi bir örnek olarak verilebilir (Bilgili vd., 2016).

Bu noktada asıl soru, çevresel etkileri, vatandaşların yaşam standartlarını ve ülkenin ekonomik ilerlemesini göz önünde bulundurarak iyi bir denge ile enerji kaynaklarına nasıl karar verileceğidir. Türkiye, Doha İklim Değişikliği Konferansı'nda CO₂ emisyonunu azaltma sözü vermiştir ancak ülkenin enerji talebi nüfus artışıyla birlikte artmakta ve çevresel etkiler de buna paralel olarak artmaktadır (Sözen vd., 2016). Öte yandan, ekonomik gelişmelerin planlanmasıyla birlikte Türkiye'nin enerji kaynaklarına dayalı enerji planlaması için alternatifleri de oldukça sınırlıdır. Türkiye birincil fosil enerji kaynaklarından yoksundur ve bu nedenle petrolde %93 ve doğal gazda %99 oranında ithalata bağımlı bir ülkedir ve Türkiye'nin enerji üretiminde toplam dışa bağımlılığı %66 civarındadır ve bu oran artmaya devam etmektedir (Bilgen, 2016; TMMOB-MMO, 2017). Ayrıca, Türkiye'nin nükleer enerji kaynakları da sınırlıdır (Eroğlu ve Şahiner, 2017). Bu nedenle, nükleer enerji santralının inşa edilmesi ülkenin dışa bağımlılığının azaltılmasına yardımcı olmayacaktır. Bununla birlikte, Türkiye başta linyit olmak üzere yeterli kömür rezervine ve yenilenebilir enerji olanakları konusunda yüksek potansiyele sahiptir. Ayrıca, Türkiye'nin enerji programı yerli kömür rezervlerinin, özellikle de linyitin kullanılmasını ve yenilenebilir enerji yatırımlarına devam edilmesini içermektedir (Melikoglu, 2017).

Kömürler, sert kömürler ve kahverengi kömürler olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Sert kömürler, koklaşabilir ve koklaşmayan olmak üzere iki alt kategoriye ayrılırken, kahverengi kömürler ise alt bitümlü kömürler ve linyit olarak iki farklı grupta incelenmektedir (Tablo 2.2).

Tablo 2.2. Farklı kömür türlerinin özellikleri (Kemal, 1991)

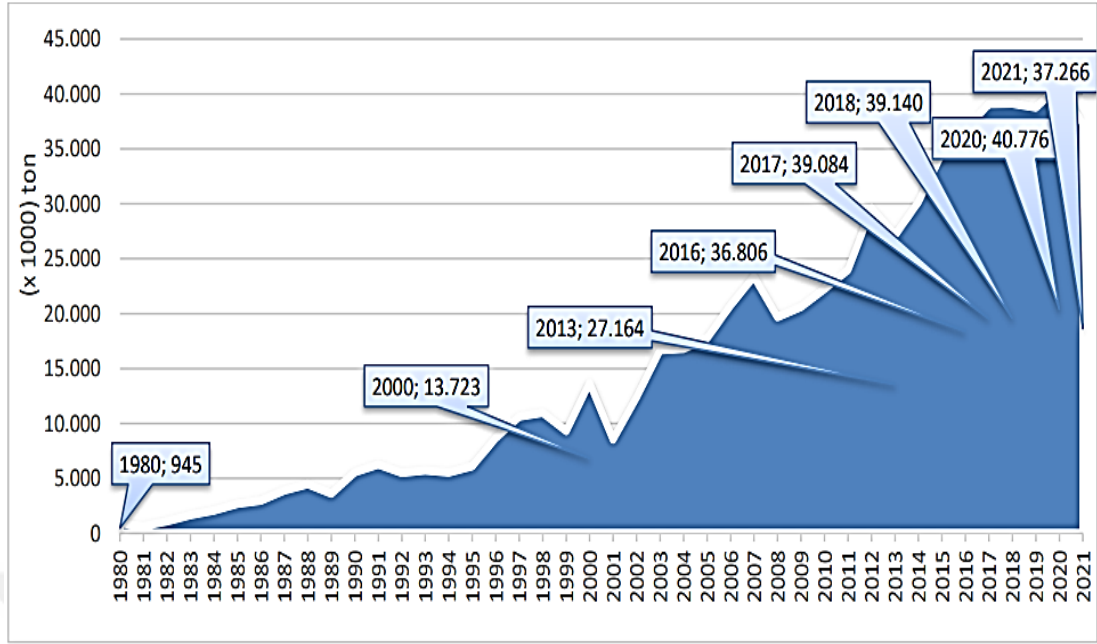
Linyit	Alt Bitümlü Kömürler	Bitümlü Kömürler	Antrasit
Kahverengi	Siyah	Koyu siyah	Parlak siyah
Kırılgan, çabuk halinde ufalanma	Oksidasyon veya kurutma sonucunda ince parçalar ve toz halinde ufalanma	Bloksu kırılma	Merceksi kırılma
Masif, odunsu veya üniform killi doku	Masif	Bantlı ve kompakt	Sert ve dayanıklı
Isıl değeri: 4610 kcal/kg'ın altında	Isıl değeri: 4610-6930 kcal/kg arasında	Isıl değeri: 5390-7700 kcal/kg arasında	Isıl değeri: 7000 kcal/kg'ın üzerinde
Uçucu madde miktarı ve nem içeriği yüksek	Uçucu madde ve nem içerikleri bitümlü kömürlerden daha yüksek	Uçucu madde miktarı ve nem içeriği düşük	Uçucu madde ve nem içerikleri düşük
Düşük sabit karbon içeriği	Sabit karbon içeriği bitümlü kömürlerden düşük	Sabit karbon içeriği yüksek	Sabit karbon içeriği yüksek

Tablo 2.2’de kömürlerin özelliklerine ilişkin verilere göre, linyit kömürler kahverengi, bitümlü kömürler ise koyu siyah renktedir. Linyit kömürlerin sabit karbon içeriği düşükken, bitümlü kömürlerin sabit karbon oranı daha yüksektir.

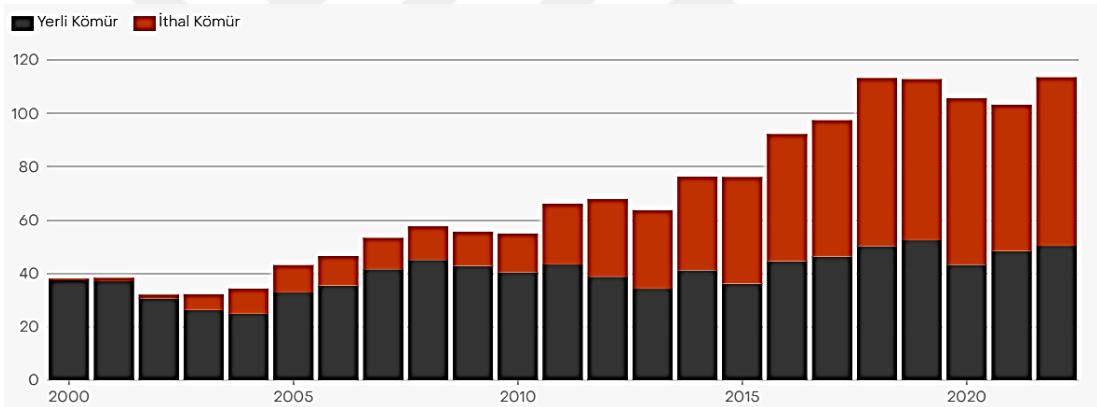
20. yüzyılda artan nüfus, teknolojik gelişmeler ve endüstriyel faaliyetlerle kömüre olan bağımlılık artmış, kömürün savaş zamanlarında stratejik önemi daha da artmıştır (Tak, 2016). Kömür, fosil yakıtlar arasında önemli bir yerde bulunmasına rağmen, son dönem araştırmalar sıfır emisyon teknolojilerine odaklanmış ve enerji fiyatlarındaki dalgalanmaların ve çevresel endişelerin etkisiyle kömürden tamamen vazgeçmenin henüz mümkün olmadığını göstermektedir (Aktan, 2021). Dünya enerji talebinin %25’i kömürle karşılanmaktadır (Bayraç, 2009).

2.8. Türkiye’de Kömürün Ekonomik Rolü

Türkiye'nin kömür ithalatındaki artış eğilimini ve toplam kurulu güç içerisinde yerli ve ithal kömürün yıllara göre dağılımlarını gösteren Şekil 2.6. ve 2.7.enerji talebinin büyüklüğünü vurgulamaktadır.

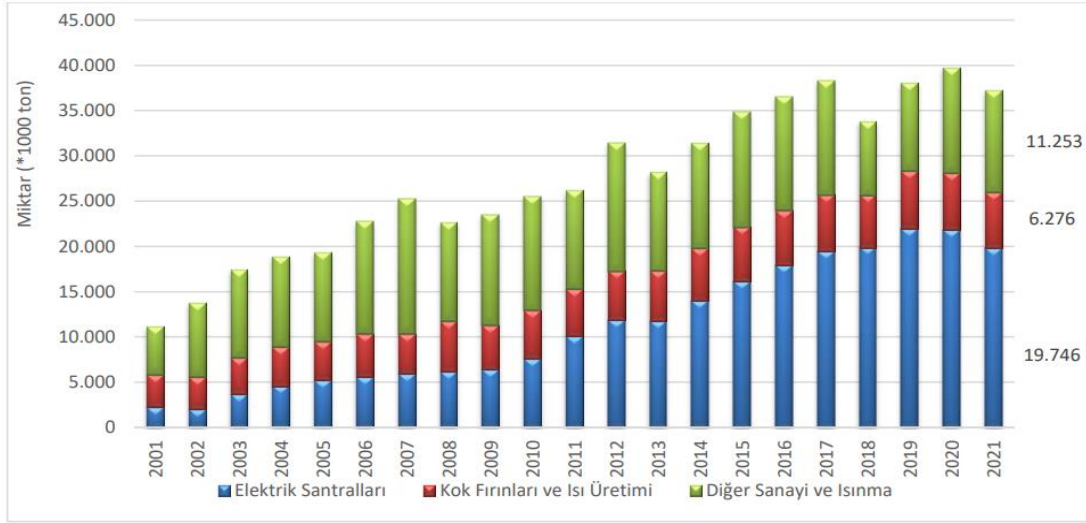


Şekil 2.6. Türkiye'nin yıllara göre kömür ithalatı (1980-2021) (TKİ, 2021).

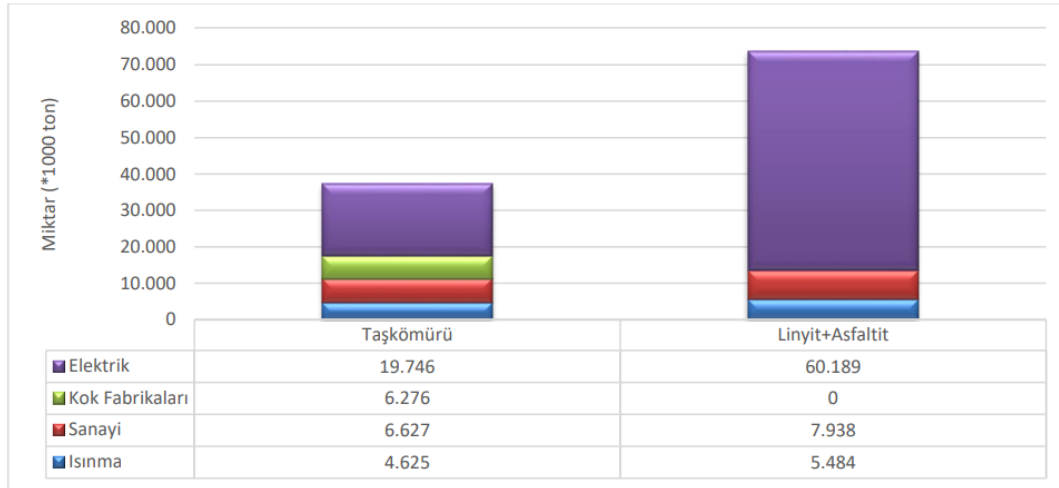


Şekil 2.7. Türkiye'nin toplam kurulu gücü içerisinde yerli ve ithal kömürün yıllara göre dağılımları (2000-2020) (%) (EMBER, 2023).

Türkiye'de 2010 yılından bu yana kömürden elektrik üretiminde ithal kömür kullanımında belirgin bir artış yaşanmıştır. 2022 itibarıyla ithal kömürle çalışan termik santrallerin yerli kömür kullanan santrallere kıyasla %25 daha fazla elektrik ürettiği tespit edilmiştir. 2010 yılında toplam elektrik üretimindeki payı %7 olan ithal kömür, 2022'de %20'ye yükselmiştir. Bu dönemde, ithal kömürden elektrik üretimi 2010 yılına göre dört kattan fazla artarak 63,2 TWh düzeyine ulaşmıştır (EMBER, 2023). Ayrıca, yerli ve ithal kömürün Türkiye'nin toplam elektrik kurulu gücü içindeki payları arasındaki farkın azaldığı, yerli kömür kullanımının azalırken ithal kömür kullanımının artış gösterdiği gözlenmiştir (Şekil 2.8ve 2.9.) (Kavaz, 2019).

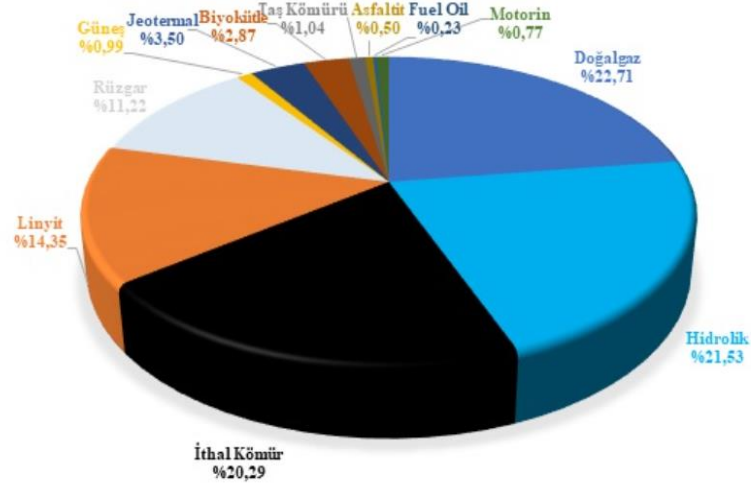


Şekil 2.8. Kullanım yerlerine göre ülkemiz yerli ve ithal taşkömürü tüketimi (TKİ, 2021).



Şekil 2.9. Kömür arzının sektörlere göre tüketim dağılımı, 2021 (TKİ, 2021).

2022 yılında Türkiye'deki kömüre dayalı elektrik üretim santralleri toplamda 112.815,81 GWs elektrik üretmiştir. Bu üretimin 49.556,15 GWs'lik kısmı yerli kömür kaynaklı (linyit, asfaltit ve taş kömürü), 63.259,66 GWs'lik kısmı ise ithal kömüre dayalıdır. Kömüre dayalı elektrik üretiminin toplam elektrik üretimi içindeki payı %36,18 olarak hesaplanmış, yerli kömürün payı ise %15,89 olarak belirlenmiştir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Elektrik üretimi içinde kaynakların payı, 2022 (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022e)

Aralık 2022 itibarıyla Türkiye'de faaliyet gösteren 67 kömüre dayalı elektrik üretim santralinden 46'sı linyit, 4'ü taş kömürü, 1'i asfaltit ve 16'sı ithal kömür kullanmaktadır. Aynı yıl, kömüre dayalı santrallerin toplam kurulu gücü, ülkenin genel toplam kurulu gücünün %21'ine denk gelmiş, yerli kömüre dayalı kurulu güç oranı ise %11 olarak kaydedilmiştir.

2.9. Türkiye'de ve Dünya'da Kömürün Önemi

Ülkeler, olası olumsuz siyasi durumların üstesinden gelebilmek için enerji ihtiyaçlarını karşılayacak politikalara ihtiyaç duymaktadır. Bu politikalar temel olarak dışa bağımlılığı azaltmaya ve enerji kaynaklarını çeşitlendirmeye odaklanmaktadır. Kömür, diğer enerji kaynaklarına göre tüm dünyaya daha homojen bir şekilde yayılan rezervleriyle bu yaklaşımı mümkün kılmaktadır. Ülkeler için kazalar, siyasi müdahaleler, terörizm veya endüstriyel anlaşmazlıklardan kaynaklanan kaza ve enerji arzında kesinti riskini azaltmak çok önemlidir. Bu kaygıların da etkisiyle Çin, Hindistan, Endonezya, Avustralya ve Güney Afrika gibi birçok ülke enerji ihtiyaçları için ağırlıklı olarak yerel kömür kaynaklarına güvenmektedir. Bu değerlendirmenin bir kanıtı olarak, üretilen taş kömürünün %83'ünün üretici ülkeler içinde kullanıldığı gösterilebilir. Linyit de uluslararası ticaret için düşük potansiyele sahip bir kaynaktır. Üretilen linyitin %90'ı üretim alanının yakınında bulunan enerji santrallerinde elektrik üretimi için kullanılmaktadır (WEC, 2016).

Türkiye'nin kömür rezervleri, kömür türleri dikkate alındığında dünyanın aksine dengeli bir tablo sergilememektedir. Türkiye antrasit ve bitümlü kömürler açısından çok düşük bir potansiyele sahiptir. Öte yandan, Türkiye önemli miktarda düşük kaliteli kömür rezervine sahiptir. Bu nedenle Türkiye, dünyada birçok ülke tarafından benimsenmiş olan ulusal kaynakların kullanımına dayalı enerji politikalarına geçme potansiyeline sahiptir. Türkiye, 2022 itibariyle tespit edilmiş toplam 19,32 rezervine sahiptir (Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu, 2023). Kömürün petrol ve doğal gazla göre birim enerji başına daha düşük fiyatlar, daha yüksek üretim oranları ve kömür kaynaklarının geniş bir alana yayılması gibi bir dizi avantajı vardır ve bu da kömürü jeopolitik olarak avantajlı kılmaktadır (Ersoy, 2010).

Dünya genelinde petrol ve doğal gaz rezervlerinin ömrü yaklaşık 50 yıl olarak tahmin edilirken, kömür rezervlerinin ömrünün 150 yıl olduğu öngörülmektedir. Türkiye için yapılan tahminlere göre, petrol rezervlerinin ömrü 19 yıl, doğal gaz rezervlerinin ise 14 yıl ile sınırlıdır. Öte yandan, 2023 yılı üretim miktarları dikkate alındığında Türkiye'deki kömürün ömrünün 156 yıldan fazla olduğu tahmin edilmektedir. Ancak kaynakların öngörülen ömürleri, yürütülen arama çalışmalarının sonuçlarına bağlı olarak artabilir veya enerji ihtiyacının artmasıyla azalabilir.

Kömür madenciliği ve kullanımının sosyoekonomik avantajları da vardır. Kömür madenciliği yapıldığı bölgede ciddi bir istihdam sağlamaktadır. Ayrıca bölgenin altyapısının gelişmesine, üretim ve ulaşım gereksinimlerine bağlı olarak birçok açıdan yatırım yapılmasına katkı sağlar. Ekonomik açıdan birkaç örnek vermek gerekirse; Almanya Neurath Ünite F ve G'nin linyitle çalışan termik santraline 2,6 milyar Euro yatırım yapmış (RWE, 2018) ve Çin sadece bir termik santralden 65 milyon \$ vergi geliri elde etmiştir (WEC, 2016). Ayrıca, Almanya, İngiltere ve Japonya gibi birkaç gelişmiş ülke oldukça gelişmiş bir madencilik ekipmanı ve makine endüstrisine sahiptir ve bu ülkelerdeki kömür madenleri, makine ve ekipman endüstrileri için dolaylı bir itici güç olmaları nedeniyle karlı olmasalar bile hala çalışmaktadır. Kolombiya, Güney Afrika ve Endonezya gibi az gelişmiş veya gelişmekte olan ülkelerin çoğunda kömür madenciliği doğrudan veya dolaylı istihdam olanakları sağlamaktadır (ETKB, 2015).

Kömür madenciliği, istihdam yaratma açısından önemli bir sosyoekonomik rol oynamaktadır. 2023 yılı Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) verilerine göre, Türkiye'de

kömür ve linyit madenciliği sektöründe yaklaşık 35 bin kişi, kömürlü termik santrallerde ise 8-10 bin kişi kayıtlı olarak istihdam edilmektedir. Ayrıca, 2021 yılında 1 milyon 874 bin 806 haneye kömür dağıtımı yapılmıştır.

Özetle; Kömür, enerji üretiminde önemli bir çeşitlilik unsuru olarak öne çıkar. Ekonomik ve sosyal gelişme için güçlü bir enerji kaynağı gereklidir. Dünya genelindeki kullanılabilir enerji kaynakları arasında kömür en bollardan biridir, 50'den fazla ülkede geniş rezervlere sahiptir. Kömür, katı ve stabil yapısıyla taşınması, depolanması ve kullanılması en güvenli fosil yakıttır. Büyük rezervleri, güvenilir ve rekabetçi bir kaynak oluşturur. Ek olarak, kömür, elektrik üretiminde maliyet etkili ve rekabetçi bir yakıttır. Kömür rezervlerinin çoğu siyasi dalgalanmalardan etkilenmeyen rekabetçi piyasalarda bulunmaktadır. Madencilik teknolojisindeki gelişmeler, üretim kapasitelerini artırmış ve enerji santrallerinin kömür üretim bölgesine kurulma zorunluluğunu azaltmıştır. Deniz yoluyla yapılan kömür nakliyesi, uluslararası ticaret açısından verimlidir ve güvenle devam edebilir. Temiz kömür teknolojileri, kömür kullanımının sürdürülebilirliğini sağlamak için gelişmiş ülkelerde desteklenmektedir (Arslan, 2009).

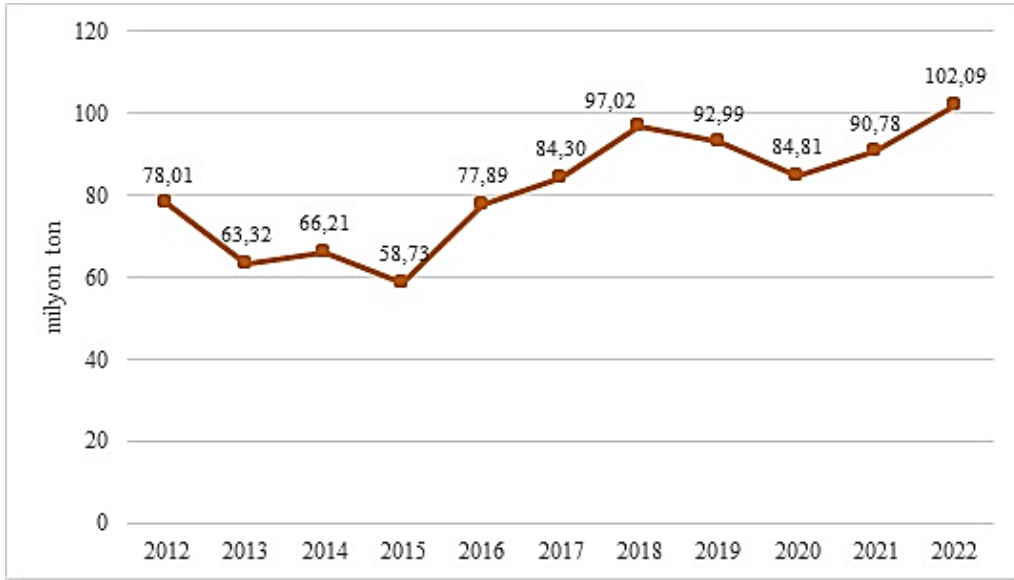
Bunun yanında yaygın bulunması ve ekonomik çıkarma, taşıma, depolama imkanları ile düşük maliyetli ve kolayca erişilebilir bir enerji kaynağı sunar. Enerji güvenliği açısından çeşitlilik sağlayarak, tek bir kaynağa bağımlılığı azaltır ve enerji güvenliğini artırır. Kömürün birim başına yüksek enerji içeriği, enerji santrallerinde yüksek verimlilikle elektrik üretilmesine olanak tanır. Mevcut kömürle çalışan enerji santrallerinin altyapısı, mevcut enerji sistemlerine entegre edilmiş durumda ve bu altyapıyı değiştirmek maliyetli ve zaman alıcıdır. Ayrıca, kömürle çalışan enerji santralleri, talebe hızlı bir şekilde yanıt verebilme yeteneğine sahiptir ve sabit bir temel yük sağlamak için kullanılabilir. Kömür endüstrisi, birçok bölgede istihdam yaratır ve ekonomik kalkınmayı destekler, böylece toplulukların ekonomik çıkarlarına katkıda bulunur.

2.10. Dünya ve Türkiye'deki Kömür Rezervleri

Türkiye'deki Kömür Rezervleri açısından ele alınacak olursa, Kömür, 2019'da Türkiye'nin enerji portföyünde önemli bir rol oynamış, toplam birincil enerji arzının %28'ini temsil ederek, petrol ve doğal gazdan sonra üçüncü sırada yer almıştır (Bilim,

2016). Son on yılda TPES içindeki kömür payı sabit kalsa da, nihai tüketimdeki azalmaya rağmen elektrik üretimindeki payı artış göstermiştir. Türkiye, büyük linyit rezervlerine sahip olup, yerli kömür üretimi toplam yerli enerji üretiminin %42'sini oluşturmuştur (Mishra, Panda ve Akcil, 2021).

Yerli kömür üretimi, 2019'da toplam kömür arzının %71'ini karşılarken, enerji açısından yerli üretim TPES'in %42'sini karşılamıştır. Hükümet, enerji ithalat bağımlılığını azaltmak için yerli kömür üretimine destek vermiş ve kömürden elektrik üretimi için teşvikler sağlamıştır. Ancak, kömürün yüksek payı, Türkiye'nin sera gazı emisyonlarının önemli bir nedeni olmuştur (Şekil 2.11.) (Emeksiz ve Fındık, 2021).



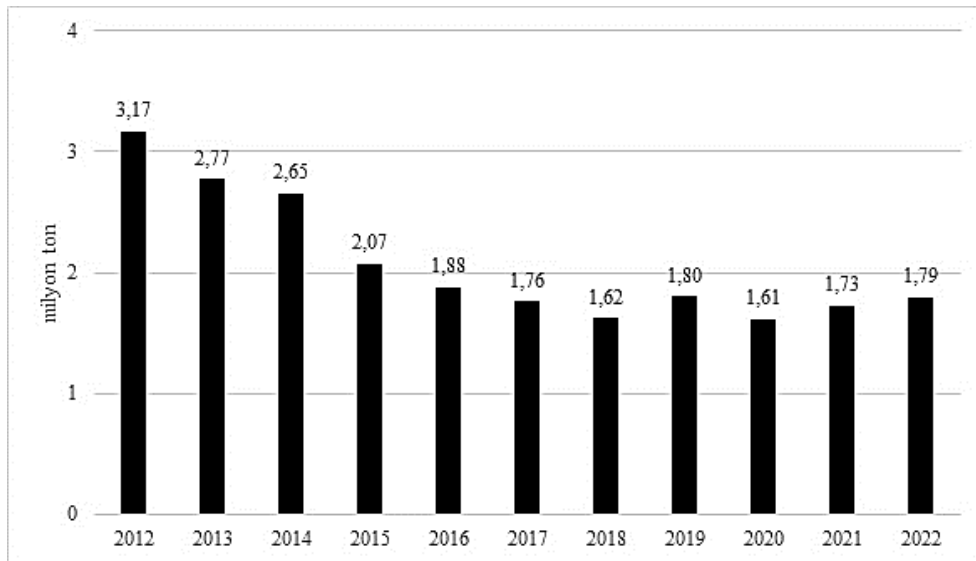
Şekil 2.11. Türkiye linyit üretimi (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023).

2018'de kömür yakma, enerjiyle ilgili CO₂ emisyonlarının %43'ünü oluşturmuş ve son on yılda kömürle ilgili emisyonlar yaklaşık %32 artmıştır. Yerli linyit üretimi ve tüketimi, kirlilik kontrollerine rağmen yerel hava kirliliğini artırmaktadır. Türkiye'de kömür talebi istikrarlı bir şekilde artmış, toplam kömür tüketimi enerji açısından on yılda %39 artarak 2018'de 40,8 Mtep'e yükselmiştir (Kayar, Niyazi ve Carlak, 2021).

Elektrik ve ısı üretiminde kömür talebi son yıllarda hızla artarak 2013-2018 arasında %71 büyümüştür. Yerli kömür üretimi, toplam kömür arzının %71'ini karşılamaktadır ve çoğunlukla düşük ısı değerli linyit kömüründen oluşmaktadır. Yerli üretim dalgalı seyrederken, ithalat istikrarlı bir şekilde artmıştır.

Türkiye, kömür ithalatını artırmış, 2019'da 38,1 Mt kömür ithal etmiştir. İthalatın büyük kısmı Kolombiya, Rusya, Avustralya ve Amerika Birleşik Devletleri'nden

yapılmıştır. Türkiye'nin kömür madenciliği ve kömür yakıtlı enerji üretimi, ekonomik ve enerji güvenliği amaçlarına dayanmaktadır. Linyit enerji üretimi öncelikli olup, taşkömürü daha çok sanayide kullanılmaktadır. Hükümet, evlerin ısınmasında doğal gaz kullanımını teşvik etmekte ve kömür kullanımını azaltmaya çalışmaktadır. Türkiye, kömür madenciliği sektörünü özelleştirmeyi teşvik ederken, 2027'ye kadar 7,5 GW yeni linyit elektrik üretim kapasitesi eklemeyi hedeflemektedir. Ancak, kömür santralleri için finansman zorlukları nedeniyle sektörde belirgin bir yavaşlama yaşanmaktadır. Hükümet, özel sektör tarafından işletilen mevcut elektrik jeneratörlerinin kapatılmasını önlemeye yönelik çabalarını sürdürmektedir. Elektrik piyasası kapasite mekanizması, kurulu ve yedek üretim kapasitesini sağlamayı amaçlamaktadır. Kapasite mekanizmasında, yerli kömür kullanan santrallere öncelik verilmekte ve 2018'de 1,4 milyar TL, 2019'da 2 milyar TL, 2020 için ise 2,2 milyar TL bütçelenmiştir (IEA, 2022). Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ), ürettiği kömürü büyüklük ve ısı değerlerine göre sınıflandırarak sanayi, termik santraller ve hanelere satmaktadır. TKİ'nin 2019 yılında uyguladığı ortalama satış fiyatları ton başına sırasıyla sanayi için 363 TL (64 USD), termik santral kullanımı için 114 TL (20 USD) ve meskenler için 503 TL (89 USD) olmuştur. Türkiye'de Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü'nün verilerine göre, 19,14 milyar ton linyit ve 1,6 milyar ton taşkömürü rezervi bulunmaktadır. Hükümet, enerji talebinin artışıyla paralel olarak yeni kömür sahaları bulma ve mevcut madenlerin gelişimini hızlandırma çabalarını sürdürmektedir (Şekil 2.12.) (IEA, 2020).



Şekil 2.12. Türkiye taş kömürü üretimi (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023).

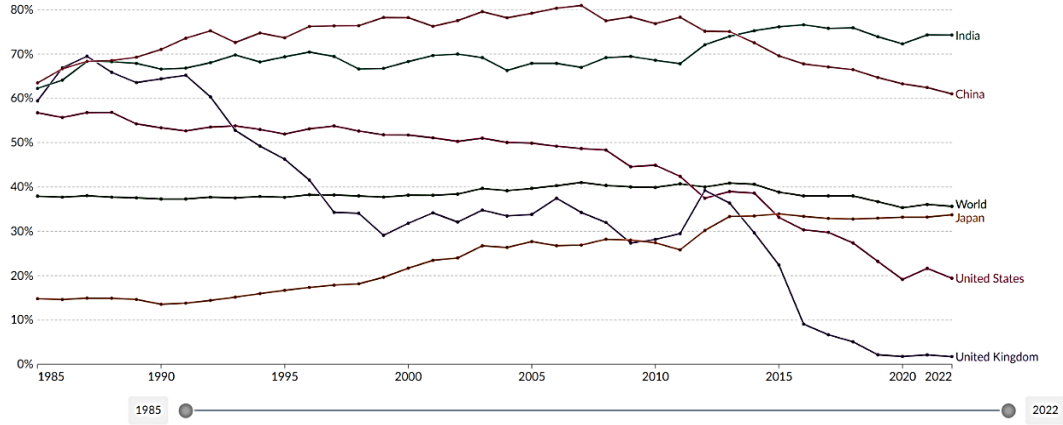
Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü, 1935'ten bu yana Türkiye'deki arama faaliyetlerine destek vererek 2019'a kadar 3,35 milyon m² arazi üzerinde çalışmıştır. 2005 ile 2019 yılları arasında gerçekleştirilen aramalar sonucunda, 5'i büyük rezervlere sahip olmak üzere toplam 18 yeni kömür sahası keşfedilmiş ve mevcut 3 sahada önemli rezerv artışları sağlanmıştır. Bu süreçte toplam linyit kaynağı %128 oranında artarak 19,14 milyar tona ulaşmıştır. Hükümet, kömür madenciliği sektöründe özelleştirme süreçlerini teşvik ederek üretimi artırmayı hedeflemektedir. Türkiye, kömür üretimini desteklemek amacıyla 2027'ye kadar 7,5 GW'lık yeni linyit elektrik üretim kapasitesi eklemeyi planlamaktadır. Ancak, kömür santralleri için finansman zorlukları nedeniyle sektörde belirgin bir yavaşlama yaşanmaktadır. Elektrik Piyasası Kapasite Mekanizması, kömür santrallerine öncelik vererek enerji güvenliğini sağlamayı amaçlamaktadır. Devlet, özel sektör tarafından işletilen mevcut jeneratörlerin kapatılmasını önlemeye çalışmaktadır. Bu kapsamda, TEİAŞ tarafından yönetilen kapasite mekanizması ile uygunluk kriterlerini karşılayan santrallere aylık kapasite ödemeleri yapılmaktadır (IEA, 2020). Kömür üretimindeki büyümeye rağmen, özellikle kömürlü termik santral projelerine karşı bölgesel ve yerel muhalefetlerle karşılaşmaktadır. Devlet, kömürle çalışan santrallerin kapatılmasını önlemek adına çaba gösterirken, kapasite mekanizması ile enerji üretim kapasitesini artırmaya yönelik stratejisini sürdürmektedir (IEA, 2022).

2.11. Kömür Yakıtlı Termik Santrallerin Dünyadaki ve Türkiye'deki Durumu

Kömürle çalışan bir elektrik santrali veya kömürlü termik santral, elektrik üretmek için kömür yakan bir termik santraldir. Dünya çapında toplam kapasitesi 2.000 gigawatt'ın üzerinde olan 2.400'den fazla kömürlü termik santral bulunmaktadır. Bu santraller dünya elektriğinin yaklaşık üçte birini üretmektedir (Birol ve Malpass, 2021) Dünyadaki tüm kömür yakıtlı elektriğin yarısından fazlası Çin'de üretilmektedir. 2020 yılında toplam santral sayısı düşmeye başlamıştır (Morton, 2020) çünkü Avrupa'da (Piven, 2020) ve Amerika'da (Robert, 2020) emekliye ayrılmalara rağmen, neredeyse tamamı Çin'de olmak üzere Asya'da inşa edilmeye devam etmektedirler. Kömür endüstrisinin sağlık ve çevresel etkileri nedeniyle diğer insanlara yüklenen maliyetler üretim maliyetine dahil edilmediğinden (Borenstein ve Bushnell, 2022) bazıları karlı olmaya devam etmektedir, ancak daha yeni santrallerin karaya oturmuş varlıklar haline gelme riski vardır. Birleşmiş Milletler Genel Sekreteri, OECD

lkelerinin 2030 yılına kadar, diğer tüm ülkelerin ise 2040 yılına kadar kömürle elektrik üretimini sonlandırması gerektiğini ifade etmiştir. Vietnam, 2040'lara kadar veya daha sonra mümkün olan en kısa sürede kömürden elektrik üretimini tamamen durdurma taahhüdünde bulunan, kömüre bağımlı hızlı gelişmekte olan birkaç ülke arasındadır (Do ve Burke, 2023).

2022'de küresel kömür santrali filosu, işletmedeki gte 19,5 GW artarak genişlemiştir. Bu artışın yarısı, toplamın %59'u ile Çin'den gelmiştir. Diğer G7 lkeleri, 323 GW'lık küresel kömür kapasitesinin %15'ine sahip olmasına rağmen, çoğu henüz kömürden çıkışa yönelik somut adımlar atmamıştır. ABD, 13,5 GW'lık kömür kapasitesini emekli ederek ne çıkmış, ancak ulusal hedeflere ulaşmak için daha hızlı bir kömürden çıkışa ihtiyaç duyulmaktadır. Gelişmiş finansman paketleri Güney Afrika, Endonezya ve Vietnam'a odaklanırken, kömür finansmanı hala devam etmektedir. Uluslararası camia, geçiş için 45.2 milyar USD taahhüt etmiştir; ancak, kömürle ilgili tüm finansman kaynaklarının kapanması gereklidir. 2022'de, 99 finans kurumu yeni kömür politikalarını hayata geçirdi, ancak bunlar genellikle yetersiz ve sınırlıdır. Çin dışında, kömür projeleri kapasitesi büyük ölçüde sabit kalmış veya azalmıştır. Hindistan, gelecekteki kömür kullanımına ilişkin karışık sinyaller verirken, küresel kömür santrali kapasitesi 2021'de düşüş yaşadıktan sonra 2022'de hafif bir artış göstermiş, ancak bu artışın büyük kısmı Çin'den kaynaklanmıştır. Çin dışındaki toplam yapım öncesi kömür kapasitesi 100 GW'ın altına düşmüş, ancak Çin'in kömürlü termik santral finansmanındaki azalma sınırlı olmuştur. İşletmedeki kömür santrallerinin 2040'a kadar kademeli olarak kapatılması için yılda ortalama 117 GW'lık bir emeklilik gereklidir; bu, özellikle OECD lkeleri için kömürden çıkışın hızlanması gerektiği anlamına gelir. OECD lkelerinin 2030 yılına kadar her yıl ortalama 60 GW, OECD dışındaki ülkelerin ise 2040 yılına kadar her yıl 91 GW kömür santralini devre dışı bırakması gerektiği belirtilmektedir. Buna ek olarak, şu anda inşaatı devam eden ve değerlendirme aşamasında olan kömürlü termik santrallerin toplam kapasitesinin 537,1 GW olduğu göz önüne alındığında, gerekli kesinti miktarlarının daha da yüksek olacağı öngörülmektedir (şekil 2.13) (Global Energy Monitor, 2024).



Şekil 2.13. Kömürden elektrik üretiminin payı, 2022 (Ember, 2023).

Türkiye'deki kömür yakıtlı elektrik santralleri, ülkede 2020'den bu yana faaliyet gösteren ve toplamda 20 GW kurulu güce sahip olan tesisleri içermektedir. (Şekil 2.14). 2018 yılında Türkiye'nin elektrik üretiminde kömürün önemi göz önüne alındığında, bu enerji kaynağından elde edilen 113 TW elektrik, ülkenin toplam elektrik üretiminin %37'sini oluşturmuştur. Bu oranın %21'i yerli linyit ve taş kömüründen, %16'sı ise ithal kömürden elde edilmiştir (EÜAŞ, 2018; Topal vd., 2022).

Taş kömürüyle üretilen elektrik enerjisinin 1126 g CO₂-eşdeğeri/kWsa, linyitin yakılmasıyla elde edilen elektrik enerjisinin ise 1062 g CO₂-eşdeğeri/kWsa emisyonuna neden olduğu tahmin edilmektedir (Atılğan ve Azapagic, 2016)



Şekil 2.14. 50MW'tan fazla kömür yakan termik santraller (Wikipedia, 2024).

Türkiye'deki kömür ve linyit yakıtlı termik santrallerine dair Tablo 2.3'e göre, ülkede toplam 53 kayıtlı santral bulunmaktadır. Bu santrallerin faaliyetleri çerçevesinde elde

edilen toplam kurulu güç 20.443 MWe'dir. Ayrıca, bu santrallerin üretimi tüketime oranla %35,90'dır. Bu veriler, Türkiye'nin enerji üretim portföyünde kömür ve linyit kaynaklı termik santrallerin önemli bir paya sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 2.3. Türkiye’de kömür ve linyit yakıtlı termik santraller (Arı ve Yılmaz, 2023).

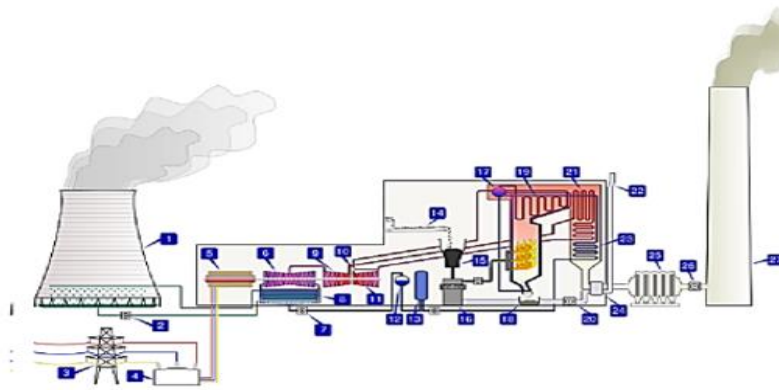
Parametre	Değer
Kayıtlı Santral Sayısı	53
KTS Kurulu Güç	20.443 Mwe Kayıtlı: 20.215 MWe
Kurulu Güce Oranı	%20,31
Yıllık Elektrik Üretimi	~107.695 GWh
Üretimin Tüketime Oranı	%35,90



3. TERMİK SANTRALLER

Termik santraller, yakıtlardaki kimyasal enerjiyi ısı enerjisine çevirip ardından mekanik ve elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Fosil yakıtlı enerji santralleri, katı (kömür), sıvı (fueloil) ve gaz (doğalgaz) yakıtlara dayanarak çalışır. Elektrik enerjisinin büyük bir kısmı dünya genelinde ve ülkemizde termik santrallerden elde edilir (Coşkun, 2013). Bu santraller, rankine çevrimine göre işleyen temel sistemlerdir. Ham enerji kaynaklarından elde edilen buhar, türbin grupları aracılığıyla mekanik enerjiye dönüştürülerek elektrik enerjisi üretilir. Termik santraller genellikle katı yakıtlar, sıvı yakıtlar, gaz yakıtlar ve nükleer enerji gibi çeşitli yakıtlar kullanır (Kocaman, 2003).

3.1. Katı Yakıtlı (Kömür-Linyit) Termik Santraller



- | | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| 1. Soğutma kulesi | 10. Buhar kontrol valfi | 19. Süperfırın |
| 2. Soğutma suyu pompası | 11. Yüksek basınçlı buhar türbini | 20. Enerjili akım fanı |
| 3. 3-fazlı Enerji nakil hattı | 12. Gazdan arındırıcı | 21. Tekrar ısıtıcı |
| 4. Yükseltici trafo (3-fazlı) | 13. Besleme suyu ısıtıcısı | 22. Yanma hava girişi |
| 5. Elektrik üretici (3-faz) | 14. Kömür taşıyıcı | 23. Ekonomizör |
| 6. Düşük basınç buhar türbini | 15. Kömür besleme hunisi | 24. Hava ön ısıtıcı |
| 7. Yoğuşturucu pompası | 16. Kömür öğütücü | 25. Elektrostatik filtre |
| 8. Yüzey yoğunlaştırıcı | 17. Buhar fişisi | 26. Endüklenmiş akım fanı |
| 9. Orta basınç buhar türbini | 18. Kül hunisi | 27. Baca |

Şekil 3.1. Kömürlü termik santralin blok diyagramı (Yıldız, Özgüler ve Aydın Kandemir, 2021).

Şekil 3.1’de kömür yakıtlı bir termik santralin blok diyagramı görülmektedir. Bu santraller, enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla kömür veya linyit gibi katı yakıtları kullanarak çalışan tesislerdir. Bu tür santraller, kömür ve linyitin yanmasıyla ortaya çıkan ısı enerjisini kullanarak suyu buharlaştırır. Buharın oluşumuyla birlikte türbin kanatları döner ve jeneratörü harekete geçirir, bu da elektrik üretimini sağlar. Kömür ve linyit, bu santrallerin temel yakıtları olarak seçilmiştir çünkü bu katı yakıtların yüksek enerji içeriği, ekonomik erişilebilirliği ve geniş rezervleri vardır. Yakıtın yanması, santralin kazanında gerçekleşir ve bu sırada ortaya çıkan yüksek sıcaklık, suyun buharlaşmasını tetikler. Oluşan buhar, türbinin kanatlarını çevirerek mekanik enerji üretir ve jeneratörü çalıştırır. Bu termik santraller, enerji taleplerini karşılamak için güvenilir bir kaynak olarak önemli bir rol oynar. Ancak, yanma işlemi sırasında ortaya çıkan emisyonlar ve çevresel etkiler nedeniyle, modern teknolojilerle birlikte çevreye daha az zarar veren ve enerji verimliliği daha yüksek olan sistemlere geçiş çabaları da devam etmektedir. Katı yakıtlı termik santrallerin sürdürülebilirlik ve çevresel etkiler açısından gelişmiş teknolojilere adapte edilmesi, enerji sektöründe daha sürdürülebilir bir geleceğin inşası için önemli bir adım olabilir (Deveci, 2019).

Kömürlü santraller, çeşitli teknolojik özelliklere sahip bir dizi farklı tipte olabilir. Ancak, genel olarak, kazan teknolojilerine göre yapılan sınıflandırmada iki ana tip öne çıkmaktadır: Püskürtme toz (pulverize) kömürlü kazanlar ve akışkan yataklı kazanlar (ÇSB, 2022):

Püskürtme Toz (Pulverize) Kömürlü Kazanlar: Bu tip kazanlarda, kömür önceden ince toza dönüştürülür ve yanma odasına püskürtülerek hızlı yanma sağlanır. Bu teknoloji, yüksek sıcaklıkta ve basınçta çalışabilen sistemleri içerir. Püskürtme toz kömürlü kazanlar, kömürün etkili bir şekilde yanmasını ve enerji üretimini sağlamak amacıyla geliştirilmiştir (Akgül ve Yoncacı, 2021).

Akışkan Yataklı Kazanlar: Akışkan yataklı kazanlar, kömürü veya linyiti özel bir akışkan yatağında yanmaya uygun hale getiren bir teknolojiyi temsil eder. Bu sistemde, akışkan yataklı kazanlar, yüksek sıcaklıkta çalışan bir yatak malzemesi içinde yanma işlemini gerçekleştirir. Bu teknoloji, daha esnek yakıt kullanımına izin verir ve düşük emisyon seviyeleri ile çevre dostu bir seçenek sunar. Akışkan yataklı termik santraller, 1970’li yıllardan itibaren enerji sektöründe önemli bir tercih haline gelmiştir ve günümüzde de bu teknoloji, yapılan iyileştirmelerle

birlikte kullanılmaya devam etmektedir. Bu sistem, bir dizi avantajı bünyesinde barındırarak çeşitli enerji üretim ihtiyaçlarına etkin çözümler sunmaktadır. Akışkan yataklı termik santrallerin en belirgin özelliği, yakıt esnekliği ve düşük emisyon salınımı sağlamalarıdır. Bu özellik, farklı türdeki yakıtların kullanılmasına izin verirken aynı zamanda çevresel etkileri minimize etmeyi hedefler. Bu da enerji üretim sürecinde daha sürdürülebilir bir yaklaşımı temsil eder. Akışkan yataklı kazanlar, akışkanlaştırma koşullarına bağlı olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır: kabarcıklı ve dolaşımli akışkan yataklı kazanlar. Bu ayrım, sistemlerin tasarım ve işleyişindeki farklılıkları vurgular. Kabarcıklı akışkan yataklı kazanlar, akışkanın küçük kabarcıklar oluşturacak şekilde tasarlanmışken, dolaşımli akışkan yataklı kazanlar, akışkanın devir daimi bir hareketle sürekli olarak dolaştığı bir sistem içerir (Topal vd., 2018).

3.2. Sıvı Yakıtlı (Fuel-Oil) Termik Santraller

Sıvı yakıt yakma sistemleri, geleneksel buhar kazanlarındaki kömür yakma sistemlerine benzerlik gösterir. Bu sistemlerde kullanılan sıvı yakıtlar arasında fueloil, nafta, motorin ve sıvı doğal gaz (LNG) gibi çeşitli petrol türevleri bulunmaktadır. Bu yakıtlar, homojen bir yanma sağlamak amacıyla kazana püskürtülmeden önce basınç artışına uğrattılır. Yakıtın basınca maruz bırakılması, püskürtme işlemi sırasında daha homojen ve etkili bir yanma elde etmeye yardımcı olur. Bu süreçte, yakıt püskürtme düzenekleri kullanılarak kazan içine enjekte edilir. Yüksek basınç altında püskürtülen sıvı yakıt, yanma odasında enerji üretimi için gerekli olan yüksek sıcaklığı elde etmek üzere ateşlenir. Sıvı yakıt yakma sistemleri, endüstriyel tesislerden enerji üretimine kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılır. Bu sistemler, çeşitli sıvı yakıtları etkili bir şekilde kullanarak enerji verimliliğini artırabilirler (Avrupa Komisyonu, 2006; ÇSB, 2016).

3.3. Gaz yakıtlı (Doğalgaz) termik santralleri

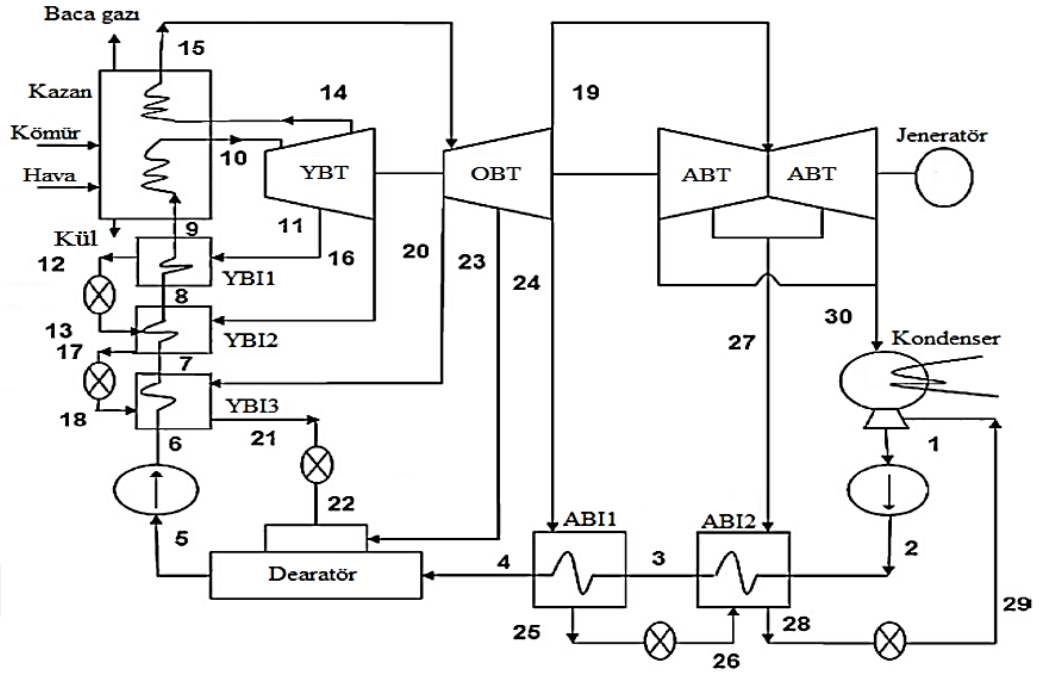
Bazen gaz yakıtlı elektrik santrali, doğal gaz santrali veya metan gazı santrali olarak da adlandırılan gaz yakıtlı elektrik santrali, elektrik üretmek için doğal gaz yakan bir termik santraldir (Gordon, 2008). Doğal gaz, yer altında oluşan bir fosil enerji kaynağıdır ve metan (CH_4) gibi birçok bileşeni içerir. Ülkemizde üretilen elektriğin yüksek bir bölümünü oluşturarak enerji sektörümüzün önemli bir parçasını teşkil etmektedir. Genellikle binalarda veya endüstriyel süreçlerde ısı ve elektrik üretimi için

tercih edilir. Ülkemizdeki doğal gazın sadece küçük bir yüzdesi, otobüs filolarında yakıt olarak kullanılmaktadır. Doğal gaz, kömür ve petrolden daha temiz yanarak neredeyse sıfır kükürt dioksit emisyonu ve düşük azot oksit ile partikül emisyonlarına sahiptir (Chen vd., 2019). Petrolden yüzde 30, kömürden ise yüzde 43 daha az CO₂ salınımına neden olur (Johnson vd., 2017).

3.4. Termik Santralin Çalışma Prensibi ve Bölümleri

Termik santraller, temel olarak buharlı güç çevrimini, yani Rankine çevrimini esas alarak enerji üretir. Örnek bir termik santral akış şeması, çevrimin kondenserden çıkan suyla başladığını göstermektedir (Şekil 3.2). Kondenserden çıkan doymuş sıvı halindeki su, düşük basınçlı bir pompaya yönlendirilerek sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemiyle basıncı artırılan su, alçak basınç ısıtıcılarına gönderilir. Alçak basınç ısıtıcıları, türbinlerden alınan ara buharın enerjisini kullanarak çevrimdeki suyu ısıtan ısı değiştiricileridir ve düşük basınçta çalıştıkları için bu şekilde adlandırılırlar. Isıtılan su, daha sonra deaeratore iletilir. Deaerator, suyun içindeki gazları arındırarak suyu besleme suyu pompasına doymuş sıvı olarak gönderir.

Besleme suyu pompası, suyu yüksek basınca sıkıştırır ve yüksek basınç ısıtıcılarına yönlendirir. Yüksek basınç ısıtıcıları, alçak basınç ısıtıcılarına benzer şekilde türbinlerden alınan buharı kullanarak çevrimdeki suyu ısıtır ve enerji verimliliğini artırır. Yüksek basınç ısıtıcılarından çıkan su, yüksek basınç altında kazana girer. Kazan, yanma odası ve boru demetlerinden oluşan bir yapıdır. Kömür, kazan içine püskürtülerek yakılır ve yanma sonucunda oluşan kül alt kısımdan uzaklaştırılır. Yakma işlemi sırasında, kömürden elde edilen enerji, boru demetlerinden geçen yüksek basınçlı suyu ısıtarak kazandan kızgın buhar çıkışını sağlar. Bu kızgın buhar, enerji üretim sürecini devam ettirmek üzere yüksek basınç türbinine yönlendirilir (Şekil 3.2) (Kaushik vd., 2010).



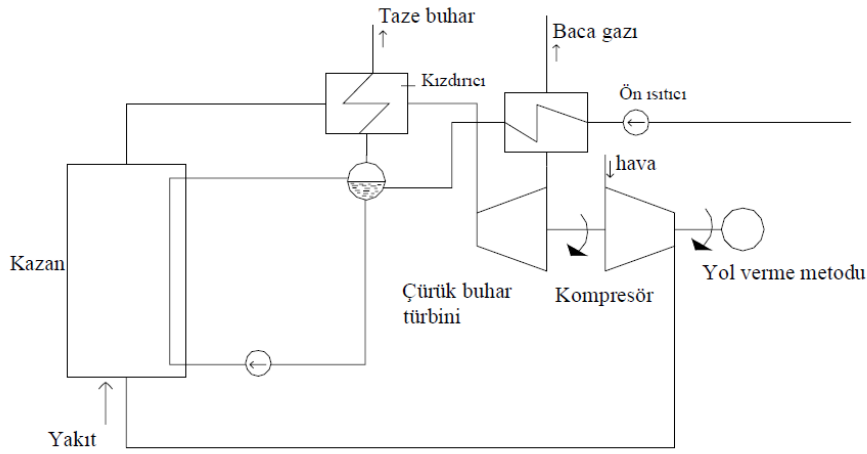
Şekil 3.2. Bir termik santral akış şeması (Kaushik vd. 2010).

Yüksek basınç türbininden çıkan buhar, yeniden kazana gönderilerek ısıtılır ve ardından orta basınç türbinine iletilir. Orta basınç türbininden çıkan buhar, alçak basınç türbininden geçtikten sonra kondensere yönlendirilir. Kondenserde, soğutma suyu kullanılarak buhar soğutulur, doymuş sıvı haline getirilir ve pompaya aktarılır. Bu süreç, buharlı güç çevrimini tamamlar. Türbinler ve alternatörler aynı mil üzerinde yer alır. Türbinden geçen buhar, türbin kanatlarına çarparak milin dönmesini sağlar. Alternatör, elde edilen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür ve bu enerji, şalt sahasına iletilmek üzere santral alanındaki şalt sahasına aktarılır. Kullanılan kömür, genellikle yakındaki maden sahasından konveyör bant sistemiyle taşınır. Kazandan çıkan yanma sonrası baca gazları, filtreleme sistemlerinden geçirilerek doğal sirkülasyon veya soğutma suyu yardımıyla arındırılır ve soğutulduktan sonra çevreye bırakılır. Günümüzdeki santraller, bir veya birden fazla üniteden oluşan benzer sistem yapılarına sahiptir.

- Santral ekipmanları:

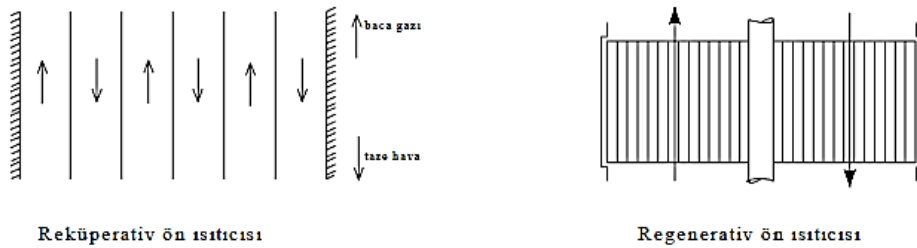
Besleme Suyu Ön Isıtıcıları: Besleme suyu ön ısıtıcıları, baca gazları, buhar ya da ara buhar kullanarak çalışabilir. Baca gazları ile ısıtılan ön ısıtıcılar, ekonomizör olarak adlandırılır ve genellikle kazanın kızdırıcılarından kaynaklanan baca gazları ile besleme suyunu ısıtır. Ara buhar ile ısıtılan ön ısıtıcılar ise besleme suyu devresi

öncesine konumlandırılır. Alçak basınç ön ısıtıcılar, besleme suyu pompasından önce yer alırken, yüksek basınç ön ısıtıcılar, pompadan sonra gelir. Bu ön ısıtıcı türleri genellikle yüzeyli veya karışmalı tiplerdedir. Yüzeyli ön ısıtıcılar borular ve bir gövde içerir, karışmalı tiplerde ise ara buhar ile besleme suyu karışır ve kondensasyon ısısı transfer edilir (Şekil 3.3) (Heper, 2001).



Şekil 3.3. Kazan ve ön ısıtıcıların akış şeması (Heper, 2001).

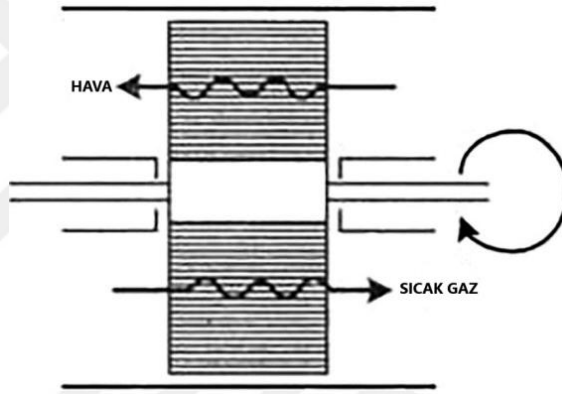
Hava ön ısıtıcıları, besleme suyu ön ısıtıcılarından çıkan sıcak baca gazlarının enerjisinden faydalanmak amacıyla kullanılabilir. Bu sistemler, iki ana tipe ayrılır: "reküperatif" ve "rejeneratif" hava ön ısıtıcıları (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Reküperatif ve regeneratif tip hava ön ısıtıcıları (Heper, 2001).

Rejeneratif hava ön ısıtıcıları, atık ısıyı depolayarak sıcak gaz akışından soğuk gaz akışına aktaran sistemlerdir. Bu sistem, ısı enerjisini biriktirip soğuk tarafa iletebilen bir oda içermektedir. Örneğin, rejeneratif fırınlar, sıcak ve soğuk havanın ısıtıldığı tuğla ile kaplanmış iki odadan oluşur. Baca gazları, sıcaklık depolanan odadan geçerken enerji emilir, biriktirilir ve ardından soğuk hava akımına aktarılır. Rejeneratif ön ısıtıcılarda iki temel tip bulunur: reküperatif ve döner rejeneratörler.

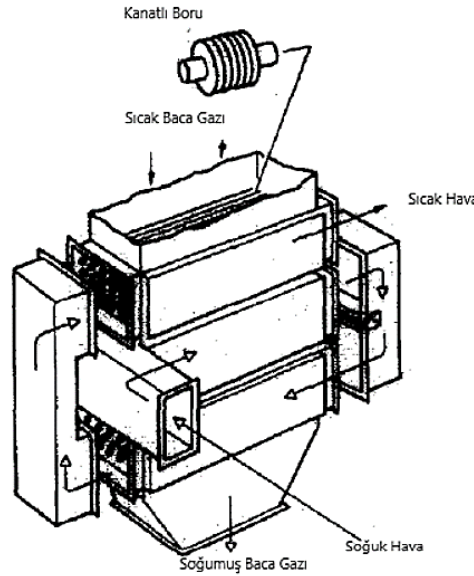
Rekuperatif ön ısıtıcılarda, ısı transferi sıcak ve soğuk kanallar arasında gerçekleşir. Döner rejeneratörlerde ise termal tekerlek aracılığıyla ısı aktarılır. Ljungstrom tekerleği olarak bilinen döner rejeneratif ön ısıtıcılar, metalik elemanlardan oluşan döner bir disk içerir. Bu disk, baca gazları tarafından ısınır ve dönerken soğuk hava tarafından soğutulur. Bu sistemde sızdırmazlık önemlidir ve esnek contalar sızıntıyı en aza indirmek için kullanılır. Rejeneratif ön ısıtıcılar, metalurjik uygulamalardan ateşlemeli proses ısıtma uygulamalarına kadar geniş bir yelpazede kullanılır. Statik rejeneratörler, daha basit bir yapıya sahiptir ve dayanıklıdır. Ancak, döngü sırasında ısıtma sıcaklığının değişmesi, atık gazların eşit dağılmaması ve ısı geri kazanımının verimliliğinin azalması gibi dezavantajlara sahiptir. Daha spesifik uygulamalar için, çakıllı hava ısıtıcıları ve akışkan yataklı rejeneratif sistemler de geliştirilmiştir (Şekil 3.5) (Jouhara vd., 2018).



Şekil 3.5. Döner rejeneratör (Jouhara vd., 2018).

Rekuperatif hava ön ısıtıcıları, genellikle ısı değiştiricisi olarak kullanılan birimlerdir ve metalik veya seramik malzemelerden yapılmış olup, atık egzoz gazlarının orta ve yüksek sıcaklıklarını geri kazanmak için kullanılır. Bu teknolojiye, sıcak egzoz gazları metal tüpler veya kanallar aracılığıyla geçirilerek giriş havasının ısınması sağlanır. Kazanlar ve proses ısıtıcı rekuperatörleri, genellikle içten ve dıştan lamelli dökme demir veya çelik olmak üzere iki ana tipte sınıflandırılır. Dökme demir borulu rekuperatörlerde, asit çığlenme noktası kaynaklı korozyonu önlemek amacıyla borosilikat camdan yapılmış borular kullanılır. Çelik kanatlı tüp rekuperatörler ise çığ noktası problemlerini engellemek için düzenlenmiş çapraz geçişli boru tasarımlarından oluşmaktadır (Şekil 3.6). Modüler lehimli çekirdek rekuperatörleri, egzoz gazının plakalar arasında yatay veya dikey geçiş yaparak hava tarafından ısıtılmasını sağlar. Işınımlırekuperatörler, yüksek sıcaklık uygulamaları için

kullanılırken, konveksiyon rekuperatörleri genellikle 1000°C'ye kadar olan sıcaklıklar için uygundur. Çift cidarlı yapısı sayesinde genleşme sorunlarını önleyen ışınlı rekuperatör, refrakter kaplamalı silindirik bir gövde içinde yer alan, dikey çelik borularla birbirine bağlanmış üst ve alt dairesel hava başlıklarından oluşmaktadır. Duman borulu geri kazanım cihazları, kirli gazların geri kazanımında kullanılır ve çelik boruların içinden geçen baca gazı ile dışarıdaki hava arasında ısı transferi sağlar. BSC tarafından geliştirilen seramik boru ısı değiştirici, egzoz ısı kayıplarını azaltarak yüksek hava ön ısıtma sıcaklıkları sağlar (Nicholson, 1983, Jouharavd., 2018).



Şekil 3.6. Çelik kanatlı tüp rekuperatörü (Nicholson, 1983).

Besleme suyu pompaları: Her bir ısıtıcı için bir besleme suyu pompası kullanılması gereklidir (Çengel, 2000). Farklı ülkelerdeki yetkili kurumlar, kazanlara kesintisiz ve yeterli miktarda besleme suyu sağlanmasını güvence altına almak amacıyla çeşitli düzenlemeler getirmiştir. Bu düzenlemeler uyarınca, her kazanda en az iki adet besleme suyu pompasının bulunması ve bu pompaların farklı enerji kaynaklarıyla çalıştırılması zorunludur. Bu düzenlemenin amacı, herhangi bir pompa veya enerji kaynağı arızasının kazanın çalışmasını aksatmamasını sağlamaktır. Besleme suyu pompalarının enerji kaynağı olarak genellikle buhar ve elektrik tercih edilmektedir. Bununla birlikte, iki pompa da bağımsız iki elektrik enerjisi kaynağı mevcutsa veya çapraz beslemeli santrallerde buhar enerjisinin kesintiye uğramadığı durumlarda buhar enerjisiyle çalıştırılabilir.

DIN normlarına göre standart kazan basınçları ve buhar üretim kapasitesine ilişkin belirlenmiş değerler bulunmaktadır. Kazanın kapasitesi açısından gerekli minimum besleme suyu miktarı, kazanın maksimum sürekli gücüne eşittir ve bu değer kazanın nominal gücünün 1,25 katı olarak hesaplanır. Besleme suyu pompalarının seçiminde ve kullanımında aşağıdaki kurallara uyulması önerilmektedir (Heper, 2001):

- Her buhar santralında, en az iki adet besleme suyu sistemi bulunması zorunludur.
- Sadece iki adet besleme suyu donanımı mevcutsa, her birinin belirlenen koşulları karşılaması gereklidir.
- İki besleme suyu pompasından daha fazlası kullanıldığında, aynı anda devre dışı kalabilecek pompaların toplam kapasitesi, kazanların maksimum sürekli buhar üretim güçlerinin en az 1,25 katı olmalıdır.
- Besleme suyu pompaları, belirlenmiş basınç değerinin %10 üzerinde bir basınçla suyu sirküle edebilme kapasitesine sahip olmalıdır.
- Besleme suyu pompalarının çalıştırılabilmesi için birbirinden tamamen bağımsız en az iki farklı enerji kaynağının sağlanması gerekmektedir.

Besleme suyu pompalarının seçiminde spesifik bir norm veya kural olmamakla birlikte, genellikle santrifüj pompalar ve deplasman pompaları kullanılmaktadır. Deplasman pompaları, daha küçük kapasiteler ve yüksek basınç gereksinimleri için uygun bir seçenek olarak öne çıkarken, santrifüj pompalar ise yüksek kapasiteli uygulamalar için daha ekonomik ve kullanışlı bir çözüm sunmaktadır.

Buhar türbini: Genellikle yatay bir eksen etrafında dönen bir rotora bağlı sabit kanat taşıyıcıları ve hareketli kanatlar içeren bir yapıdan oluşur. Rotor, her iki uçtan radyal yataklarla desteklenirken, ekseni boyunca konumunu sabitlemek için bir eksenel yatakla donatılmıştır. Buhar türbinlerinde, buharın türbinden kaçmasını önlemek için labirentler bulunur. Buhar, kazandan ani kapama ventilinden geçerek çeşitli basınç basamaklarından geçer ve türbinin içinde iş yapar. Türbinin çıkışında kondensere dökülen çürük buhar, kullanılacak yere yönlendirilmek üzere ayrılır. Ön yatak gövdesindeki ana yağ pompası, rotoru bağlı olan yatakları yağlar ve türbin reglajında gerekli basınçlı yağı sağlar. Hız güven mekanizması ve hız regülatörü, rotoru ve hareketli kanatları aşırı hızdan korur ve sabit bir hız ve güç sağlamak için kullanılır. Türbin çıkışındaki jeneratörün indüktörü, türbin rotoruyla bağlantılıdır. Ayrıca,

türbinlerde genellikle devre dışı durumda rotoru düşük hızda döndüren bir döndürme dişlisi (virör düzeni) bulunabilir. Buhar türbini, buharın entalpisi üzerinden kinetik enerjiye ve ardından mekanik işe dönüşen bir akım makinesidir. Türbin girişindeki buharın entalpisi, genişleyerek basınç enerjisini kinetik enerjiye çevirir ve bu enerji, rotor üzerindeki hareketli kanat diskinde mekanik işe dönüşür. Bu işlem, sıralı sabit ve hareketli kanat disklerinde tekrarlanarak buharın türbin giriş ve çıkış entalpisi arasındaki farkı mekanik işe dönüştürür (Heper, 2001).

Kondenser: Kondenser, enerji santrallerinde önemli bir rol oynayan bir ekipmandır. Kombine çevrimin atık ısını yönetmek amacıyla kullanılan kondenserler, buhar türbininden çıkan çürük buharın yoğunlaştırıldığı ve kazana geri basıldığı kritik bir noktayı oluşturur. Bu süreç, enerji döngüsünün sürekli ve verimli bir şekilde çalışabilmesi için önemlidir. Kapalı su buhar çevriminde, iş akışkanı olan su, çeşitli nedenlerle eksilebilir. Kondenserde yoğunlaştırulan buharın tekrar su formuna dönüştürülmesi sırasında eksilen su, make-up sistemi ile sağlanan su ile tamamlanır. Kondenserlerde buharın yoğunlaşması esnasında açığa çıkan ısı, genellikle deniz, göl veya akarsu gibi geniş su kaynakları kullanılarak çevreden uzaklaştırılır. Ancak, uygun bir su kaynağına yakın olmama durumunda, enerji santralleri hava soğutmalı kondenserlerle donatılabilir. Bu tip santrallerde, kondenserdeki ısı, suyun yerine hava kullanılarak dağıtılır. Bu durumda, hava soğutmalı kondenserlerin işleyişi için ilave tesisler bulunmaktadır. Sonuç olarak, kondenserler, enerji santrallerinde sürdürülebilir bir enerji döngüsü sağlamak adına önemli bir rol oynar. Su kaynaklarına bağlı olarak ya da hava soğutmalı sistemlerle çalışarak, bu ekipman, atık ısının etkili bir şekilde yönetilmesini ve enerji santrallerinin verimli bir şekilde çalışmasını sağlar (Başaran, 2017).

Jeneratörler: elektrik enerjisini mekanik enerjiye veya mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme yeteneğine sahip cihazlar olarak tanımlanır ve genel olarak elektrik makineleri kategorisine girer. Elektrik makineleri, temel olarak dinamik makineler ve statik makineler olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılır. Dinamik makineler arasında jeneratörler ve motorlar bulunurken, statik makineler arasında ise transformatörler yer alır. Jeneratörler, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirme işlevini gerçekleştiren dinamik elektrik makineleridir. Motorlar, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren cihazlardır. Transformatörler ise elektrik enerjisini farklı

bir büyüklükteki elektrik enerjisine dönüştüren statik elektrik makineleri olarak tanımlanır. Jeneratörler ise iki ana kategoriye ayrılır: alternatif akım jeneratörleri ve doğru akım jeneratörleri. Alternatif akım jeneratörleri genellikle senkron jeneratörler olarak adlandırılır ve buhar santrallerinde yaygın olarak kullanılan jeneratörler, yuvarlak kutuplu senkron jeneratörlerdir. Jeneratörler, stator ve rotor olmak üzere iki ana bileşenden oluşur (Heper, 2001; CSB, 2017; Başaran, 2017).

Transformatörler: belirli bir büyüklükteki elektrik enerjisini farklı bir büyüklüğe dönüştürmek için kullanılan statik elektrik makineleridir. Buhar santrallerinde, jeneratör çıkış gerilimini yüksek gerilim seviyelerine yükseltmek veya santralin iç ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla jeneratör ve şebeke gerilimlerini düşürmek için yaygın olarak kullanılırlar. Örneğin, jeneratör çıkış gerilimi 150 kV veya 380 kV gibi yüksek gerilimlere çevrilebilir. Aynı şekilde, transformatörler, santralin içinde kullanılacak gerilim değerlerine uygun olarak jeneratör ve şebeke gerilimlerini 600 V, 500 V, 380 V gibi değerlere düşürme işlevini gerçekleştirirler. Transformatörlerin temel yapısı, alaşımlı demirden yapılmış saç paket bir çekirdek ve bu çekirdek üzerine sarılmış iki sargıdan oluşur. Birincil sargı, elektrik enerjisi ile beslenir ve üzerinden geçen alternatif akımın etkisiyle demir çekirdeği manyetize eder. Oluşan manyetik alan, ikincil sargıda (çıkış sargısında) bir alternatif gerilimin indüklenmesine yol açar. Çıkış sargısı kapalı bir devreye bağlanırsa, bu devreden alternatif akım elde edilebilir. Transformatörlerin verimi genellikle oldukça yüksektir. İdeal bir durumda, bu verim 1 olarak kabul edilir ve bu durumda giriş sargısı ile çıkış sargısı güçleri eşit olur (Heper, 2001).

Kömür Alma, Kül Atma Sistemi: Kömür alımı, kül atma sistemi, termik santrallerin kritik bileşenlerinden biridir. Ham kömür, madenden taşıma gemileri, mavnalar, demiryolu vagonları, kamyonlar ve konveyörler aracılığıyla santrale taşınır. Türkiye'deki kömür santralleri genellikle linyite dayalıdır ve genellikle madenin yanında kurulmuştur. Ham kömür, madenden çıkarıldıktan sonra kırıcılarda işleminden geçirilir ve santralin 20-30 günlük ihtiyacını karşılayacak miktarda kömür, stok sahasına taşınır. Bu stok sahasındaki kömür, park makineleriyle alınarak ünite bunkerlerine sevk edilir. Kömürün yanması sonucunda cüruf oluşur. Cüruf ve elektrofiltrelerde tutulan kül, ayrı bir konveyör bandına dökülerek maden sahasına

veya özel olarak inşa edilen kül barajlarına taşınır. Bazı sistemlerde hidrolik sistemlerle kül ve cürufun suyla taşındığı görülür.

Kazan ve yardımcı ekipmanlar: püskürtme toz kömür kullanılan santrallerde hayati bir öneme sahiptir. Bunkerlerde depolanan kömür, nakil bantları aracılığıyla değirmenlere iletilir. Bu değirmenlerde toz haline getirilen kömür, sıcak hava yardımıyla yanma odasına püskürtülerek yakılır. Yanma sonucu oluşan sıcak gazlar, kazan borularında dolaşan suyu ısıtarak buhar üretimine katkı sağlar.

Soğutma Kulesi: Soğutma kulesi, santralin konumuna bağlı olarak deniz, göl veya büyük debili bir nehir yoksa kullanılır. Türbinden gelen buhar, soğutma kulesindeki su yardımıyla soğutulmuş olarak yoğunlaştırılır. Soğutma kuleleri genellikle cebri sirkülasyonlu (fanlı), doğal sirkülasyonlu (hiperbolik) ıslak tip ve kuru tip soğutma kuleleri olarak üç ana tipte gelir.

Şalt Sahası: Şalt sahası, jeneratörde üretilen elektriğin iletim sistemine bağlanmasını sağlar. Şalt sahasında ana bara, transfer bara, kesiciler, ayırıcılar ve parafadurlar bulunur. Şalt sahasındaki transformatörler, enerjiyi daha düşük gerilimlere çevirerek iletim sistemine gönderir.

Baca Gazı Kükürt Arıtma Sistemleri: kömür ve petrol türevi yakıtların kullanıldığı santrallerde baca gazı içerisindeki kükürt dioksitini ayrıştırılmasını sağlayan teknolojilerdir. Bu sistemler, Baca Gazı Kükürt Arıtma Tesisleri (BGKAT) ya da Baca Gazı Desülfürizasyon (BGD) olarak adlandırılmaktadır. BGD teknolojileri, uygulama yöntemine bağlı olarak kuru ve ıslak sistemler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır.

Otomasyon Sistemleri: Otomasyon sistemleri, santrallerdeki parametreleri sürekli olarak izler ve belirlenen limit değerleri aşmamak için sürekli olarak ayarlamalar yapar. Otomasyon sistemi, tesisdeki durumu izler, bilgileri değerlendirir ve gerektiğinde müdahale eder. Bu süreç, tesisin o anki durumunu sinyal vericilerle saptama, bilgileri emirlere dönüştürme ve ayar organlarını harekete geçirme aşamalarını içerir.

3.5. Termik Santrallerin Avantaj ve Dezavantajları

Kömür ve linyit yakıtlı termik santraller, ekonomik avantajları nedeniyle tercih edilmektedir. Türkiye'de kömür, fuel-oil ve kalitesiz linyit gibi ucuz yakıtların kullanılabilmesi, bu santrallerin ekonomik olmalarına olanak tanımaktadır. Ayrıca, kömür santrallerinin her yere kolayca kurulabilmesi, taşınabilirlik açısından da avantaj sağlamaktadır. Türkiye'de kömürün diğer yakıtlara göre daha düşük maliyetli olduğu düşünülmektedir (Erik, 2022). Ancak, ithal kömür fiyatlarında yaşanan artışlar, enerji maliyetlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Petrol fiyatlarındaki dalgalanmalar, Türkiye'de hükümet müdahalesi ile şekillenmekte ve akaryakıt fiyatları üzerinden alınan vergiler enerji maliyetlerini belirlemektedir (Türkiye kömür işletmeleri kurumu, 2009).

3.6. Termik Santrallerin Çevre Üzerine Etkileri

Elektrik üretimi için kullanılan kömür, çevresel ve sağlık sorunlarını beraberinde getirir. Termik santraller, içerdikleri ağır metallerle yeraltı sularını, nehirleri ve göletleri kirletir, su ekosistemini olumsuz etkiler. Uçucu kül ve atıklar ise tarım alanlarını kirleterek ciddi zararlara yol açar. Kömür yanması sırasında atmosfere salınan emisyonlar, özellikle SO_x ve NO_x gibi zararlı maddelerin geniş alanlara yayılmasıyla insan sağlığına büyük tehdit oluşturur. Bu emisyonlar, hava kalitesini düşürerek solunum yolu hastalıkları gibi sağlık sorunlarına neden olabilir, ekosistemleri olumsuz etkileyerek biyoçeşitliliği azaltabilir (Guttikunda ve Jawahar 2014).

3.6.1. Termik santrallerin hava kalitesi üzerindeki etkileri

Dış ortam hava kirliliği, yaşam boyunca herkesin maruz kaldığı kaçınılmaz bir çevresel faktördür. Hava kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerine dair pek çok bilimsel kanıt bulunmaktadır. Ulaşım, konut ısınması, tarım ve enerji üretimi gibi çeşitli kaynakların hava kirliliğine ve buna bağlı hastalıklara katkıları hakkında bilgiler giderek artmaktadır. Hem Türkiye'de hem de Avrupa'da hava kirliliği, halk sağlığı açısından en önemli çevresel risk faktörlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Küresel Hastalık Yüğü çalışmaları, Avrupa'da hava kirliliğinin kronik hastalıklar açısından başlıca risk faktörlerinden biri olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle PM_{2,5} ve ozon seviyelerinin, Avrupa'daki kentsel nüfusun büyük bir kısmı için Dünya Sağlık

Örgütü'nün önerdiği sınırların üzerinde olduğu belirtilmektedir (WHO, 2013; EEA, 2014a; Lim vd., 2012; Brunekreef vd., 2012). Bu bulgular, sağlığa zararlı düzeylerde hava kirliliğinin neredeyse tüm bireyler tarafından solunduğunu göstermektedir. Türkiye'de de kentsel nüfusun büyük bir bölümü, çapı 10 mikronun altında olan partikül maddeler (PM10) açısından sağlıklı konsantrasyonlara maruz kalmaktadır. Hava kirliliğine uzun süreli maruziyetin, kalp-damar ve solunum hastalıkları gibi kronik sağlık sorunları riskini artırdığı bilinmektedir. Avrupa'da, kalp-damar hastalıkları önde gelen ölüm nedenleri arasında yer almakta ve yılda yaklaşık 2 milyon kişinin hayatını kaybetmesine neden olmaktadır.

AB için bu hastalıkların halk sağlığı maliyetinin yılda 196 milyar avro olduğu tahmin edilmektedir. Türkiye'de de kalp-damar hastalıkları ölüm nedenleri arasında ilk sıradadır. Kronik solunum hastalıkları, astım ve KOAH gibi, Türkiye'de önemli bir sağlık riski oluşturmaktadır.

Türkiye'de enerji sektöründen kaynaklanan hava kirliliğinin önemli bir kısmı, kömürle çalışan termik santrallerin emisyonlarından kaynaklanmaktadır. Bu santrallerde kullanılan yakıt türüne bağlı olarak değişen miktarlarda karbon dioksit (CO₂), karbonmonoksit (CO), kükürt dioksit (SO₂), azot oksitler (NO_x), ozon (O₃), hidrokarbonlar, partikül madde (PM) ve kül emisyonları oluşmaktadır. Özellikle düşük kaliteli linyit kullanan termik santraller, daha yüksek düzeyde kirletici salınımlara neden olmaktadır. Bacadan çıkan gaz emisyonları, rüzgârın hızı ve yönüne bağlı olarak yerel hava kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu kirleticiler, Şekil 3.7'de gösterilen etki alanlarına yayılabilir. İklim değişimi günümüzde ciddi bir çevre sorunudur ve bu değişimde önemli bir rol oynayan ana faktörlerden biri CO₂'dir. Gelişmiş ülkelerde, enerji sektörü CO₂ emisyonlarının büyük bir kısmından sorumludur. Dünya genelinde elektrik ve ısı üretimine bağlı CO₂ emisyonları kömür yakımının etkisiyle artmaktadır (Jeon vd., 2009; Goto vd., 2013).

Yerel (10 Km)	Sınırlararası	Global
• İri Parçacıklı Maddeler (PM10) • Azot Oksitler • Kükürtdioksit • Asit Gazları • Kalıcı organik kirleticiler • Ağır metaller • Dioksinler	• Kükürtdioksit • Azot oksitler • Uçucu organik bileşikler • Ağır metaller • Dioksinler • İnce parçacıklı maddeler (PM2,5)	• İnce parçacıklı maddeler (PM2,5) • Cıva • Dioksinler

Şekil 3.7. Bacagazı emisyonlarının etki alanları (Gümüsel ve Stauffer, 2015).

Dünya genelinde toplam CO₂ emisyonlarının yaklaşık %45'i Çin ve ABD kaynaklı olup, Avrupa Birliği, Hindistan ve Japonya ile birlikte bu ülkeler toplam emisyonun %65'ini oluşturmaktadır. Bu emisyonlar arasında fosil yakıtların, özellikle kömürün, en büyük paya sahip olduğu belirtilmektedir (Tamzok, 2012). Fosil yakıtların yanması sırasında karbonun büyük bir kısmı CO₂ olarak salınmakta, daha küçük bir kısmı ise karbonmonoksit, metan ve non-metan uçucu organik bileşikler şeklinde atmosfere yayılmaktadır. CO₂ emisyon miktarı, genellikle kullanılan yakıtın karbon içeriğine bağlı olarak hesaplanmaktadır (Jeon vd., 2009).

CO, SO₂, NO_x gibi sera gazları ve CO₂ emisyon oranları; kömür karışımının kalitesine, yakıtın türüne, ünite üretimi başına kullanılan yakıt miktarına, santralin yaşı ve bakım durumu ile kazana beslenen fazla hava miktarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Chakraborty vd., 2008). Fosil yakıtlardaki kükürdün yaklaşık %90'ı yanma sırasında SO₂ formunda gaz haline gelir ve atmosfere yayılması ciddi sağlık ve çevre sorunlarına yol açabilir. SO₂ ve NO_x emisyonları, asit yağmurlarının oluşumunda önemli bir rol oynayarak bölgesel hava kirliliği ve ekosistemlerin asitleşmesine neden olmaktadır. Bacalardan salınan kükürt ve azot oksitler, hâkim rüzgarlar aracılığıyla atmosferde taşınarak yalnızca yerel değil, daha geniş bir bölgeyi etkileyebilmektedir (Gümüsel ve Stauffer, 2015).

Toz emisyonları, içerik ve fiziksel özellikleri nedeniyle çevreye zarar verebilir. Özellikle 2,5 µm ve 10µm çapındaki partiküller, akciğerlere ulaşma potansiyeli nedeniyle önemlidir. Termik santrallerde üretilen uçucu küllerin büyük bir kısmı depolama alanlarında düzenlenir, ancak küresel düzeyde bu kül miktarının etkili bir

şekilde değerlendirilmediği belirtilmektedir (Blissett ve Rowson, 2012; Izquierdo ve Querol, 2012; Türkmenoğlu vd., 2014).

Linyitin yanması sürecinde, eser miktarda salınan organik bileşikler, kazanın yanma verimine bağlı olarak değişir (Vardar ve Yumurtacı, 2009). Bu organik bileşiklerin oranları, yakma süresi, sıcaklık ve türbülans gibi faktörlere bağlı olarak artabilir. Polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar), kömürde zenginken uçucu kül ve dip külünde düşüktür; iz elementler ise tam tersi durumda bulunur (Verma vd., 2015; Gür ve Yaprak, 2010).

Kömürün yanma sürecinde, mineral maddelerin fiziksel ve kimyasal değişimlere uğraması sonucu dip külü, uçucu kül ve yanma gazlarında majör, minör ve iz elementler yoğunlaşabilir. Kömürde bulunan iz elementler, yanma sürecinde farklı davranış biçimlerine göre üç grupta toplanır. Aynı zamanda, kömür yanarken organik kısımların reaksiyonları, PAH'ların oluşumuna neden olur (Arditsoglou vd., 2003).

PAH'lar, lineer, açılı veya kümeli yapıda olan 2 ila 7 aromatik halkanın birleşiminden oluşan organik bileşiklerdir (Wang vd., 2015). PAH'lar genellikle endişe kaynağıdır çünkü bazıları mutojen ve/veya kanserojen özelliklere sahiptir. İz elementler, PAH formasyonunu olumlu veya olumsuz bir şekilde etkileyebilir (Arditsoglou vd., 2003). Kömür yanma parametrelerine ve kazan tipine bağlı olarak, uçucu kül, dip külü ve çürük gazda PAH oluşumunu etkileyen faktörler değişir (Vardar ve Yumurtacı, 2009). Bu süreç aynı zamanda arsenik, kobalt, krom, mangan ve nikel salınımına da neden olabilir.

Günümüzde dünya genelinde cıva salınımının büyük bir kısmı kömür yakıtlı enerji santrallerinden kaynaklanmaktadır. Antropojenik cıva salınımı, ciddi çevresel sorunlara yol açabilir. Cıva, nörotoksik özelliklere sahiptir ve atmosferde uzun mesafelere taşınabilir. Farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip atmosferik cıvanın farklı formları, taşınma, çökme ve toksisite üzerinde etkili olabilir (Gao vd., 2016; Tang vd., 2016).

Kömürlü termik santrallerin salımlarını değerlendirirken, dış ortam hava kirliliğine katkıda bulunan diğer sektörlerin, örneğin ulaşım, konut ısıtması ve tarım gibi faaliyetlerin de dikkate alınması önemlidir. Bu sektörlerin neden olduğu kirletici emisyonlar arasındaki karmaşık dinamikler ve etkileşimler göz önünde bulundurulmalıdır. Kömürle çalışan termik santrallerin bacalarından atmosfere salınan

kirleticiler, halk sağlığı açısından suya ve toprağa bıraktıkları atıklardan daha büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Bu emisyonlar, hem akut hem de kronik sağlık problemlerine yol açabilir.

Santrallere yakın bölgelerde yaşıyan bireyler, atmosferdeki kirleticilere nüfusun geri kalanına kıyasla daha fazla maruz kalabilir. Ayrıca, santrallerden salınan hava kirleticilerinin bir kısmı atmosferik hareketlerle uzak mesafelere taşınarak dış ortam hava kirliliği seviyelerini artırabilir ve geniş bir nüfusu etkileyebilir. Her ne kadar kömürlü termik santraller dış ortam hava kirliliğinin yalnızca bir kısmından sorumlu olsa da, her bir santral yılda büyük miktarda zararlı kirletici madde salmakta ve bu faaliyetlerini genellikle 40 yıl veya daha uzun süre boyunca sürdürmektedir. Bu nedenle, yeni kömürlü termik santrallerin inşasına izin verilmesi, bu zararlı emisyonların uzun yıllar boyunca devam etmesine neden olacaktır (Gümüşel ve Stauffer, 2015).

Türkiye'nin enerji tüketimi ve arzı, azot oksit salımlarının %47'sinden, metan-dışı uçucu organik bileşik salımlarının %26'sından ve sülfür dioksit salımlarının %99'undan sorumlu tutulmaktadır. Kömürle çalışan termik santrallerden kaynaklanan PM salımları hakkında resmi veriler yetersiz olsa da, PM ve ozonun sağlık üzerinde ciddi olumsuz etkiler yarattığı bilinmektedir. Bununla birlikte, Türkiye'nin hava kalitesi standartlarının Dünya Sağlık Örgütü'nün önerdiği değerlere kıyasla daha yüksek olduğu ve bazı kirleticiler için Avrupa Birliği standartlarına göre daha gevşek düzenlemeler içerdii ifade edilmektedir (EEA, 2014; WHO, 2013).

Termik santrallerden kaynaklanan zararlı baca gazlarından biri olan kükürt, "Baca Gazı Desülfürizasyon" tesisleri aracılığıyla bacalardan çıkan kükürt ve küçük kül parçacıklarını %99'a kadar tutabilmektedir. Ancak bu tesisler, azot oksitleri, karbon monoksit, CO₂ ve kömürdeki radyoaktif maddeleri filtreleme kapasitesine sahip değildir. Bu nedenle bu maddelerin yoğunluklarını azaltmak için yanma işleminde önce yıkama veya harmanlama gibi önlemler alınmalıdır (Durmaz, 1998).

Linyit kömürlerinin düşük kül ergime sıcaklıkları, kömürün düşük sıcaklıklarda yanmasına olanak tanıyarak azot oksitlerinin oluşumunu engeller. Ancak doğal gazla çalışan termik santrallerde uygun yanma koşulları sağlanmadığında yüksek sıcaklık nedeniyle azot oksitleri oluşabilir. Bu maddeler, özellikle yeryüzüne yakın seviyelerde oluşan ozonun artmasına neden olarak insan sağlığını olumsuz etkiler.

Baca gazlarından çıkan partiküller, solunum yolu hastalıklarına ve çeşitli sağlık sorunlarına neden olabilir. Karavuş vd. (2001) tarafından Seyitömer Termik Santrali'nin çevresinde yapılan bir çalışma, baca gazlarının akut ve kronik akciğer hastalıklarının yayılmasına katkıda bulunduğunu göstermiştir.

Büke (2003) tarafından yapılan başka bir araştırmada, baca gazlarıyla atmosfere salınan partiküllerin alfa-radyoaktivitesi ölçülmüş ve bu veriler doğrultusunda rüzgâr yönlerine göre bacalardan çıkan küllerin etkili olduğu alanlar belirlenmeye çalışılmıştır. Araştırmada vurgulanan önemli bir nokta, radyasyon tehlikesine maruz kalan bölgelerde halkın korunması için alınması gereken tedbirlerdir.

Termik santrallerin bacalarında tutulan uçucu külün değerlendirilmesi üzerine yapılan çalışmalarda, Sarı ve Bayat (2002) tarafından yürütülen bir çalışmada uçucu külün yüksek pıhtılaştırma ve emme özellikleri olduğu tespit edilmiştir. Bu küller, evsel atıkların arıtılmasında kullanılabilir. Yapılan karşılaştırmalara göre birim maliyetinin düşük olduğu ve daha etkili bir arıtma sağladığı belirlenmiştir. Ancak, küllerin ağır metal ve radyoaktif maddelerle kirlenmiş olabileceği göz önünde bulundurularak dikkatli bir değerlendirme yapılmalıdır.

3.6.2. Termik santrallerin su kalitesi üzerindeki etkileri

Kömürle çalışan enerji santrallerinden kaynaklanan atık ürünler, arsenik (As), kadmiyum (Cd), baryum (Ba), kurşun (Pb), krom (Cr), selenyum (Se), çinko (Zn) ve cıva (Hg) gibi toksik iz elementleri içermeleri nedeniyle çevresel kirliliğe yol açmaktadır. Bu iz elementler, yağmur sularıyla yıkanarak su kaynaklarına ve yeraltı sularına karışabilir. Termik santrallerden kaynaklanan katı atıkların %99,4'ü mineral atıklardan oluşur ve bu atıkların içindeki toksik iz elementler, toprak, yüzey suları ve yeraltı sularında çeşitli çevresel sorunlara yol açabilir (Topal vd., 2011).

Kül depolama alanlarına sevkiyat sırasında uçucu küllerin dağılmaması için nemlendirilmesi, büyük hacimli atık su barajlarının oluşmasına sebep olur. Atık sulardaki pH seviyesi genellikle baziktir (pH 9-11,5), bu da ağır metallerin çökmesine neden olarak toksik iz elementlerin suya geçişini etkiler. Örneğin, Yatağan Termik Santrali'nden sızan suların pH seviyeleri, iz elementlerin suya geçişine uygun değildir, ancak atmosferdeki asidik ortamların (pH <5) oluşumu, SO₂, NO_x emisyonları ve bunların atmosferdeki nemle reaksiyonu sonucunda pH'ın düşmesine neden olabilir ve toksik iz elementlerin yeraltı sularına karışmasına yol

açabilir (Baba, 2001). Termik santraller, buhar üretimi, soğutma ve temizlik işlemleri için yüksek miktarda su kullanmaktadır. Ancak bu süreçte suyun kimyasal işlemlerden geçirilmesi, atık suların demir (II) sülfat açısından zenginleşmesine yol açabilmektedir (Keskin ve Mert, 2002).

Termik santrallerde ortaya çıkan atık suların sıcaklığı da bir diğer çevresel etkidir. Yanma işlemi sonucunda üretilen buharın yüksek sıcaklığı, çevreye bırakılan su ile dış ortama aktarılan ısıda %15'in baca gazları içinde, %85'in ise suyla gerçekleştiği belirtilmiştir (DPT, 2001). Atık suların sıcaklığı genellikle çevre sıcaklığının üzerindedir, bu da su kaynaklarında olumsuz etkilere yol açabilir.

Sıcak suyun doğrudan su kaynaklarına verilmesi, kaynağın sıcaklığını artırarak suyun yoğunluğunu, viskozitesini, yüzey gerilimini ve oksijen çözebilme kapasitesini azaltır. Bu durum, su kaynaklarında bulunan canlıları olumsuz etkiler. Jeotermal kaynakların termik santrallerde kullanımı sonrasında ortaya çıkan atık suların da benzer olumsuz etkiler yarattığı belirtilmiştir (Mertoğlu ve ark., 2001).

Termik santrallerin çevresel etkileri arasında, yakma işlemi veya baca gazı arıtma tesislerinden kaynaklanan küllerin su kaynaklarını kirletmesi önemli bir yer tutmaktadır. Deniz kıyısına inşa edilen santrallerin bacalarından çıkan küller, rüzgar yönüne bağlı olarak denizde birikerek kirliliğe yol açabilir. Örneğin, Çatalağzı termik santralinde bu durum gözlemlenmiştir (Avcı, 2004). Bunun yanı sıra, bu santrallerde baca gazındaki partikül maddelerle birlikte atık su deşarjında bulunan kül de deniz yüzeyinde kirlilik yaratmaktadır.

Örneğin, Topal ve ark. (2011) tarafından yapılan çalışma, termik santrallerden kaynaklanan uçucu kül, cüruf ve atıksu arıtma çamurlarındaki ağır metallerin liçlenebilme potansiyelini incelemiştir. Toksisite Özelliklerini Sızdırma Prosedürü (TCLP) ve Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu (ASTM) yöntemleriyle gerçekleştirilen analizler, atıkların liçlenmesi sonucunda çözeltiye geçen ağır metal konsantrasyonlarının yönetmeliklerde belirtilen sınır değerleri aştığını göstermiştir. Bu bulgular, atıkların çevresel açıdan önemli bir kirliliğe neden olabileceğini vurgulamıştır. Türkmenoğlu ve çalışma arkadaşlarının (2014) araştırması, Türkiye'deki termik santrallerde oluşan atıkların yalnızca %65'inin kül barajlarında depolandığını ve geri kalan atıkların çevre ile insan sağlığı açısından ciddi bir risk oluşturduğunu vurgulamaktadır. Ege Bölgesi'ndeki dört termik santralden elde edilen

uçucu küllerin mineralojik, morfolojik ve kimyasal özellikleri analiz edilerek liç karakteristikleri incelenmiştir. Araştırmada, uçucu küllerin içerdiği ağır metallerin (Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn, Co ve Mn) miktarları ve bu metallerin suya geçiş oranları değerlendirilmiştir. Bulgular, Cd metalinin yer kabuğu st bölgesi ortalamasına göre en az 10 kat zenginleştiğini göstermiştir. Çinko için en düşük liç verimi (%0,2-0,6) kaydedilirken, kadmiyumda en yüksek liç veriminin (%3,08-16,50) gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, özellikle ağır metallerin çevresel geçiş potansiyelinin dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Termik santrallerin su kaynaklarına yakın yerleşim yerlerine kurulması, tek geçişli soğutma sistemlerinin kullanılması ve atık su deşarjının uygun bir şekilde yönetilmemesi durumunda termal kirlilik ortaya çıkabilir. Bu durum, sucul ekosistemlere zarar verebilir. Rosen vd. (2015), Romanya'daki üç termik santralin Jiu Nehri zerindeki etkilerini incelediklerinde, deşarjların sınır değerlere yakın olduğunu, ancak üç santralin aynı anda devreye alınması durumunda problemlere neden olabileceğini belirtmiştir.

3.6.3. Termik santrallerin toprak kalitesi üzerindeki etkileri

Kömürle alışan enerji santrallerinden kaynaklanan iz elementler, atmosferik emisyonlar, yakma atıklarının taşınması ve depolanması süreçlerinin yanı sıra toprak yüzeyine çökelme ve lileme yoluyla çevreye yayılmaktadır. Bu iz elementlerin emisyon seviyeleri, kömürün başlangıçtaki konsantrasyonu, kömür külünün kimyasal özellikleri, uzaklaştırılan kül miktarı, yakma koşulları ve hava kirliliği kontrol ekipmanlarının etkinliği gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Dragovic, 2013).

Ağır metaller, atomik ağırlığı 4 g/cm³'ten büyük olan metal ve metaloidler olarak tanımlanır. Kömür kullanımındaki artış, atmosfere yayılan ve toprak ile yüzey sularında biriken ağır metallerin emisyon seviyelerinde önemli bir artışa yol açmıştır (Zhu, 2015). Düşük seviyelerde ağır metallerle kirlenmiş topraklar ve sulama suları, toksik kirleticilerin tarım bitkilerinde birikmesine ve dolayısıyla insan besin zincirine girmesine neden olabilir (Noli ve Tsamos, 2016).

Kömürün yanma süreci sırasında ortaya çıkan eser elementlerin yaklaşık %70'i uçucu kllere geçmektedir. Özellikle cıva, %52'lik emisyon oranıyla kömür yakan termik

santrallerin neden olduğu en önemli kirlilik unsurlarından biri olarak öne çıkmaktadır (Uslu ve Gökmeşe, 2009).

Termik santrallerde kömürün yanması ile oluşan uçucu küller, cıvayı hızla çökelmeye uğratar. Martin ve Nanos (2016) çalışması kömürlü termik santrallerin çevresindeki topraklardaki cıva oranının %70'inin kömür yakımından kaynaklandığını göstermiştir.

Radyoaktif elementler de kömürün yanması ile atmosfere karışır ve bu elementler, kömür yakmalı sistemlerde üretilen külde birikir. Kaçan küldeki radyoaktif maddelerin konsantrasyonları, ²³⁸U, ²²⁶Ra, ²¹⁰Pb, ²¹⁰Po, ²³²Th, ²²⁸Th, ²²⁸Ra ve ⁴⁰K gibi radyoaktif izotopların belirli değerlerin üzerinde olduğunu gösterir (Gür ve Yaprak, 2010). Bu durum, kömür depolama ve işleme çalışmalarının artan bir endişe kaynağı haline gelmesine neden olmuştur. Çiçek ve Koparal'ın (2004) çalışması, Türkiye'deki linyit kullanan enerji santrallerinin çevresel etkisinin topraktaki kükürt ve iz elementlerin yaşayan türlere zarar verebilecek seviyelerde olduğunu göstermiştir. Termik santrallerin toprak kalitesine olan etkilerinde, biyobirikim özelliğine sahip cıva kirliliği yine önemli bir rol oynamaktadır.

Yapılan araştırmalar, özellikle Yatağan çevresindeki köyler ve kül depolama alanlarında yüksek radyasyon oranlarının bulunduğunu göstermiştir. Keskin ve Mert (2002) tarafından ifade edildiği gibi, külün ıslatılması yöntemi radyasyon oranlarını azaltabilmekle birlikte, kullanılan suyun toprak ve yeraltı suyuna sızarak radyasyon seviyelerini artırdığı gözlemlenmiştir.

3.6.4. Termik santrallerin fauna üzerindeki etkileri

Kömürü yakıt olarak kullanan termik santrallerin emisyonları, asit yağmuruna neden olarak binaların, tarihi eserlerin ve doğal ekosistemlerin erozyonunu artırır. Asit yağmurları, özellikle su ekosistemlerinde yaşayan türler üzerinde olumsuz etkilere yol açarak nehirler, göller ve orman ekosistemlerini etkiler. Ötrofikasyonun artması, su kalitesini düşürürken biyolojik çeşitliliği azaltabilir. Özellikle asitleşmeye duyarlı olan sucul ekosistemlerde, kuşlar, amfibiler, böcekler ve memeliler gibi birçok türü etkiler (Baleta vd., 2016; Glick, 2001).

Toprak sıcaklığının çevreye kıyasla 1,5-1,7 °C daha yüksek, nem oranının ise %5-7 daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Santral bacalarından kaynaklanan emisyonların, bitki yapraklarında yanıklara ve kurumalara yol açtığı belirtilmiştir. Arazi üzerinde beş

farklı takıma ait toplam dokuz zararlı böcek türü tespit edilmiş olmasına rağmen, popülasyon düzeyinin düşük olduğu ve fidan gelişimine ciddi bir etki yapmadığı değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, fidanların kurumasının temel nedenlerinin toprak kimyasındaki olumsuzluklar, hava kirliliği ve düşük nem oranı olduğu belirtilmiştir.

Asit yağmurlarının sucul ekosistemlere etkisi, civa yağmuru aracılığıyla göller, nehirler ve kıyı sularına zarar verebilir. Civa, sucul organizmalar üzerinde yıkıcı etkilere neden olabilir ve besin zincirinde birikme eğilimindedir. Bu durum, sucul türlerle ilişkili memelileri olumsuz yönde etkileyebilir (Glick, 2001).

3.6.5. Termik santrallerin flora üzerine etkisi

Termik santrallerde sıcak suyun soğutma, buhar üretimi ve temizlik gibi süreçlerde kullanılması, yüksek sıcaklıklı suyun toprak, yeraltı suları, nehirler ve denizlere deşarj edilmesine yol açmaktadır. Bu yüksek sıcaklıktaki su, çevredeki canlı organizmalar üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Ayrıca, asit yağmurları yaprakların stomalarından girerek sitoplazmanın asitlenmesine neden olmakta, bu durum yaprakların su kaybı ve hızlı ölümüyle sonuçlanmaktadır. Ağaçların hastalık direnci azalmakta, böcek istilalarına açık hale gelmekte ve ölüm süreçleri hızlanmaktadır. Bunun yanında, asit yağmurları topraktaki minerallerin kaybına yol açarak ağaçların büyüme ve yenilenme yeteneklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Toprak pH'nın düşmesi, ağır metal konsantrasyonlarının artmasına neden olmakta ve bu durum bitkiler için toksik etkiler oluşturabilmektedir. Ayrıca, termik santrallerin kükürt emisyonları ve kükürt giderme tesislerinde oluşan küllerin veya kirli suların çevreye verdiği zarar, doğal ekosistemleri tehdit etmektedir. Kükürt giderme tesisine sahip olmayan veya çalışmayan santrallerde, büyük miktarlarda SO₂ emisyonu gerçekleşmekte ve bu emisyonlar bitkiler üzerinde olumsuz etkiler oluşturarak büyümeyi engellemekte ve odun üretiminde verim kayıplarına yol açmaktadır (Gürbüz ve Özdemir, 2016).

3.6.6. Termik santrallerin arazi kullanımı üzerindeki etkileri

Termik santrallerde soğutma suyu göletlerinin oluşturulması ve atıkların depolanması için ayrılan alanlar arazi kullanımında değişikliklere yol açmaktadır. Kömürle çalışan termik santraller, kömürün üretimi ve depolanması için geniş alanlara ihtiyaç duyar. Linyit kullanan termik santraller ise genellikle düşük kaliteli linyit rezervlerini

değerlendirmeyi hedefler. Ancak, açık linyit işletmelerinin çevresel etkileri uzun süredir bilinmektedir (Kahrıman, 2002; Karadağ, 2003a; Karadağ, 2003b; Karadağ, 2005).

Fuel-oil ve motorinle çalışan termik santrallerde, yakıtın güvenli bir şekilde depolanması kritik öneme sahiptir. Yakıt sızıntılarının toprak ve su kaynaklarına zarar verme potansiyeli nedeniyle, bu santraller küçük alanlara ihtiyaç duysalar bile depolama sahalarının dikkatle seçilmesi ve sızdırmazlık özellikleri ile donatılması gerekmektedir. Termik santrallerde üretilen büyük miktardaki külün bertaraf edilmesi de önemli bir sorundur. Bu küllerin yalnızca örtülerek depolanması yerine, farklı yöntemlerle değerlendirilmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Ancak, günlük yüksek kül miktarları nedeniyle geniş depolama alanlarına olan ihtiyaç kaçınılmazdır. Ayrıca, küllerin ağır metaller ve radyoaktif elementlerle kirlenme riski bulunmaktadır. Bu durum, kül depolama alanlarının seçimi ve toprak ile su kaynaklarının korunması için ek önlemlerin alınmasını zorunlu kılmaktadır (Sevim vd., 1998; Oruç, 1999).

Termik santrallerin su tüketimi, bazılarında yeraltı suyu soğutma için kullanılırken, diğerlerinde ise depolama amaçlı göletler yapılarak karşılanır. Bu göletler, hidroelektrik santral barajları gibi arazi kullanımında değişikliklere neden olur; yerleşimler taşınabilir ve tarım alanları sular altında kalabilir. Çatalağzı Termik Santrali, tatlı su ihtiyacını karşılamak üzere oluşturulan gölet nedeniyle yerleşim değişikliğine örnek teşkil eder (Avcı, 2004). Yanma sonucu oluşan kül, ekonomik açıdan önemli bir sorun olup, akışkan yatak teknolojisinin tercih edildiği tesislerde atmosfere atılan kükürt dioksit ve partikül miktarının azalması, büyük miktarda kül oluşumunu beraberinde getirir (Durmaz, 1998).

3.6.7. Termik santrallerin çevre ve insan sağlığına olumsuz etkilerinin azaltılması için alınabilecek teknik önlemler

Kömürle çalışan enerji santrallerinde, karbon dioksitin atmosfere salınmasını önlemek, sera gazı emisyonlarını azaltmak ve çevre düzenlemelerini karşılamak amacıyla CO₂'nin temizlenmesi hayati bir teknolojidir. Bu teknolojinin başlıca alternatiflerinden biri, alkanolamin veya karışımları gibi sulu çözücülerle CO₂'nin emilmesi ve ayrılmasıdır (Ziaivd., 2009). Bu yöntem, 1930'larda patenti alınan temel bir süreçten türemiştir ve 2030'a kadar termik santrallerde CO₂ yakalama için öncü bir teknoloji olması öngörülmektedir (Rochelle, 2009). Son yıllarda, temiz kömür

teknolojileri üzerindeki araştırmalar, süperkritik ve ultra-süperkritik teknolojilere odaklanarak CO₂ tutma ve depolama (CCS) sistemlerinin verimliliğini artırmıştır. Bu sistemler, CO₂ emisyonlarını ilk aşamada 1/3 oranında azaltmayı, daha gelişmiş aşamalarda verimliliği artırmayı ve nihayetinde CCS sistemlerini devreye almayı hedeflemektedir (Tamzok, 2012).

SO₂ emisyonları, düşük kaliteli linyit kömürünün kullanımıyla ortaya çıkan çevresel sorunların başında gelmektedir. Bu emisyonları azaltmak için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında düşük kükürt içerikli yakıtların kullanımı, kükürt içermeyen yakıtların tercih edilmesi, yanma sırasında veya sonrasında SO₂'nin giderilmesine yönelik teknolojiler yer almaktadır. Islak, yarı kuru ve kuru baca gazı arıtma teknolojileri bu süreçlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Baca gazı kükürt giderme (BGA veya FGD) sistemleri, genellikle ıslak yıkama kuleleri aracılığıyla SO₂ emisyonlarını azaltan bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. BGA sistemleri, baca gazını yıkayıcı kulelerde arıtarak yüksek kükürt içeren çamur üretmekte ve bu sayede SO₂'yi etkin bir şekilde gidermektedir. Yüksek kükürt giderme verimliliği ve düşük işletme maliyetleri, özellikle ıslak kireçtaşı yönteminin tercih edilmesinde önemli rol oynamaktadır (Cordoba, 2014).

Artan enerji talebi, hava kirliliğinin yanı sıra düşük kaliteli hava koşullarını da artırmış, bu durum çevresel sorunlara karşı önlemlerin önemini daha da artırmıştır. Kömürle çalışan enerji santralleri, başta SO₂, NO_x ve PM olmak üzere çeşitli zararlı emisyonların azaltılmasına yönelik teknolojiler geliştirmiştir. NO_x emisyonları, özellikle çevresel etkileri nedeniyle uluslararası düzeyde önemli bir endişe kaynağı olarak görülmektedir. NO_x kontrolünde birincil yöntemler arasında yanmamış karbon miktarını düzenleme ve düşük sıcaklıkta yanma gibi stratejiler yer alırken, ikincil yöntemler arasında seçici katalitik olmayan indirgeme (SNCR) ve seçici katalitik indirgeme (SKI) yöntemleri öne çıkmaktadır (Baletav vd., 2016).

3.7. Termik Santral Karbon Ayak İzi

Termik santraller, fosil yakıtların yanma sürecinde ortaya çıkan "yanma ısısından" faydalanmaktadır (Sarkar, 2017). Bu santrallerden kaynaklanan karbondioksit (CO₂) emisyonları, dünya genelinde enerji kaynaklı CO₂ emisyonlarının yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır. CO₂ emisyonlarına ilişkin iki temel veri seti bulunmaktadır: biri yakıt

tüketimi verilerinden hesaplanan emisyon tahminlerini içerirken, diğeri enerji santrallerinin egzoz bacalarındaki gaz konsantrasyonları ve akış hızlarının doğrudan ölçümleriyle elde edilen verilere dayanmaktadır (Ohyama vd., 2021). Kömürle çalışan termik santrallerin CO₂ emisyonlarını kontrol etmek ise önemli bir zorluk teşkil etmektedir. CO₂ emisyonlarının %60'ı sanayi ve enerji sektörlerinden kaynaklanmaktadır (Kumari ve Bera, 2022). Kömürle çalışan termik santrallerden kaynaklanan bu emisyonları azaltmaya yönelik çeşitli yöntemler önerilmekle birlikte, sıfır karbon emisyonlu enerji santralleri oluşturmak ve CO₂ salınımını en aza indirmek geleceğin en büyük zorluklarından biri olarak kabul edilmektedir (Sterkhov vd., 2021).

3.8. Termik Santral ve Termal Kirlenme

Termik santraller, genellikle su kaynaklarına yakın konumlandırılarak deniz, akarsu, göl, baraj veya nehir gibi su kaynaklarından soğutma suyu temin etmektedir. Bu santrallerde yaygın olarak kullanılan açık devre, kapalı devre ve susuz/kuru soğutma sistemleri arasında tercih yapılmaktadır. Susuz/kuru soğutma sistemi, maliyet açısından dezavantajlı olmasına rağmen çevresel etkileri daha az olan bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Termik santrallerin su kullanımı, üretilen her kilovatsaat elektrik için 4.000 kilojül enerjinin soğutma suyuna harcandığını göstermektedir. Bu durum, özellikle büyük kapasiteli santrallerin saniyede 22 m³ su çekimine ihtiyaç duyduğunu ortaya koymaktadır. Kapalı devre sistemlerde suyun bir kısmı buharlaşarak kaybolmakta, geri kalan kısım ise santral içindeki kondensere geri gönderilmektedir. Ancak, bu sistemler daha az su çekmesine rağmen ıslak döngüsel soğutma sistemleri daha fazla su tüketmektedir (Deneysan, 2022). Açık devre sistemlerde su çekimi yapıldıktan sonra kondenser sistemlerinde sirküle edilen su, daha fazla su çekimine neden olurken buharlaşma/tüketim daha düşüktür. Açık devre soğutma sistemiyle çalışan kömürle çalışan termik santraller, her üç dakikada bir olimpik yüzme havuzunu dolduracak miktarda su çekmektedir. Buna karşılık, kuru soğutma sistemleri buharın yoğunlaşma sürecinde ısıyı dışarı atmak için su yerine hava kullanmaktadır (Cheng ve Lammi, 2016).

TÜİK verilerine göre, 2018 yılında termik santraller tarafından toplamda 7,9 milyar metreküp su çekilmiş olup, bu miktarın %98,2'si denizden sağlanmıştır. Çekilen suyun %93,4'ü soğutma suyu olarak kullanılmış, atık suların %96,6'sı ise denize deşarj edilmiştir (Yıldız, 2021).

2022 yılında ise Türkiye genelinde termik santrallerin de dâhil olduğu işletmeler tarafından toplamda 16,4 milyar metreküp atık su alıcı ortamlara doğrudan deşarj edilmiştir. Bu atık suların %76,5'i denizlere, %19,5'i akarsulara, %1'i barajlara, %0,8'i foseptiklere, %0,7'si göl ve göletlere, %0,2'si araziye, %1,4'ü ise diğer alıcı ortamlara yönlendirilmiştir. Denize deşarj edilen atık suların %80,2'si soğutma suyundan oluşmakta olup, bu durum termik santrallerin denize deşarj ettiği soğutma suyunun önemini göstermektedir. Toplam atık suyun %52,4'ü termik santrallerden alıcı ortamlara doğrudan deşarj edilmiştir (TÜİK, 2023).

Termal kirlilik, elektrik santrallerinden kaynaklanan atık suların deşarjı sonucu çevresel sıcaklık artışıyla ortaya çıkan bir fenomendir. Bu durum, atık suların sıcaklığının doğal su kaynaklarına karışmasıyla yerel ekosistemler üzerinde olumsuz etkiler doğurur. Termal kirlilik, özellikle nehirler, göller ve denizler gibi su kaynaklarını etkileyerek sucul ekosistemlere zarar verebilir. Sıcak su deşarjı, suyun oksijen taşıma kapasitesini azaltabilir, bu da sucul canlıların yaşamını tehdit edebilir. Ayrıca, suyun ısınması bitki ve hayvanların üreme döngülerini, beslenme alışkanlıklarını ve göç davranışlarını olumsuz yönde etkileyebilir (TMMOB, 2018).

Termal kirlilik, özellikle yaz aylarında su sıcaklıklarının zaten yüksek olduğu bölgelerde daha belirgin hale gelir. Bu durum, sıcak suyun çevre üzerindeki etkilerini artırarak ekosistem dengesini bozabilir. Ayrıca, termal kirlilik nedeniyle su kaynaklarındaki biyolojik çeşitlilik azalabilir ve ekosistemlerde kalıcı hasarlara yol açabilir. Bu nedenle, termik kirlilikle mücadele etmek ve etkilerini en aza indirmek için termik santrallerin atık su deşarjlarının sıcaklıklarının düzenlenmesi, soğutma sistemlerinin iyileştirilmesi ve su kaynaklarıyla uyumlu sürdürülebilir çözümlerin benimsenmesi önemlidir. Sürdürülebilir enerji üretim yöntemlerine geçiş ve çevre dostu teknolojilerin benimsenmesi, termik kirlilik probleminin azaltılmasına yönelik etkili adımlar olarak öne çıkmaktadır (Bayazıt, 2021).

Akgül'ün (2021) Zonguldak İl Çevre Durum Raporu analizi, bölgedeki termik santraller ve demir-çelik fabrikalarının soğutma suyu kullanımının deniz kaynaklarından yapıldığını ve kullanılan suyun Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'ne uygun sıcaklık değerlerine sahip olmadan denize deşarj edildiğini göstermektedir. MODIS Aqua tarafından sağlanan uydu görüntüleri, Ereğli-Demir Çelik Fabrikası ve Çatalağzı Termik Santrali'nin bulunduğu kıyılarda deniz suyu sıcaklıklarının belirli

noktalarda yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Çatalağzı Belediye Başkanı Akgün'ün 2017 röportajında belirttiği gibi, santrallerin soğutmak için çekilen deniz suyunun yüksek miktarlarda olduğu ve soğutma amaçlı kullanıldıktan sonra tekrar denize deşarj edildiği ifade edilmiştir. Kutoğlu liderliğindeki BEÜ tarafından yürütülen "Uzaktan Algılama Verileri ile Bölgesel Çevre Etkilerinin Belirlenmesi: Zonguldak Örneği" adlı tez çalışması, Çatalağzı'nda termik santrallerin neden olduğu bölgesel ısı artışlarını ve deniz suyu sıcaklıklarındaki artışı vurgulayarak çevresel etkileri değerlendirmiştir. Zonguldak İli Kıyı Su Kütlelerinin Ekolojik Kalite Değerlendirmesi, 2017, 2018 ve 2019'da deniz suyunun zayıf kalitede olduğunu ortaya koymuştur (Şekertekin, Kutoğlu ve Kaya, 2013).

3.9. Termik Santral Soğutma Suyu Kullanımı

Termik santrallerde su kullanımı, iki ana başlık altında ele alınmaktadır: "Su-Buhar Çevrimi Suyu" ve "Soğutma Suyu." Su-buhar çevriminde kullanılan su, genellikle yüksek basınçlı santrallerde tercih edilen, çeşitli işlemlerden geçirilmiş yüksek saflıkta sudur. Bu su, doğal su kaynaklarının işlenmesiyle elde edilmekte olup genellikle "ham su" olarak adlandırılmaktadır. Ham su, belirli arıtma süreçlerinden geçtikten sonra su-buhar çevrimine dâhil edilerek "katma suyu" olarak isimlendirilmektedir. Su-buhar çevrimindeki farklı aşamalarda, suyun kullanım yerine ve durumuna göre çeşitli isimler verilmektedir. Kondenserde yoğuşan su "kondenser suyu," yakıt alıcından sonraki su "besleme suyu," kazana giren su "kazan suyu," kazanda buharlaşarak oluşan yaş buhar "doymuş buhar" ve kızdırıcılarda ısıtılarak türbine yönlendirilen su ise "kızgın buhar" olarak adlandırılmaktadır (Ünver ve Kılıç, 2005). Soğutma suyu ise santralin çeşitli bölümlerinde kullanılan suyu içerir. Kondenserde kullanılan "kondenser besleme suyu" ve santralin çeşitli donanımlarında kullanılan "donanım soğutma suyu" olmak üzere iki ana kısımda incelenir. Sistem genellikle kapalıdır ve suyun kalitesinin izlenmesi, santral işletmeciliği için önemli bir faktördür (Lee vd., 2006).

Kazan suyunun hazırlanması, termik santrallerde istenmeyen yabancı maddelerin içermemesini sağlamak amacıyla önemlidir. Suların içinde bulunan kalsiyum, magnezyum, silisyum gibi maddeler kazan ve borularda taşlaşmaya neden olarak verim kaybına yol açabilir. Bu durumu önlemek için sertlik derecesini azaltma veya sıfıra düşürme yöntemleri kullanılır. Sodyum-Zeolit, Hidrojen-Zeolit, Kireç-Soda,

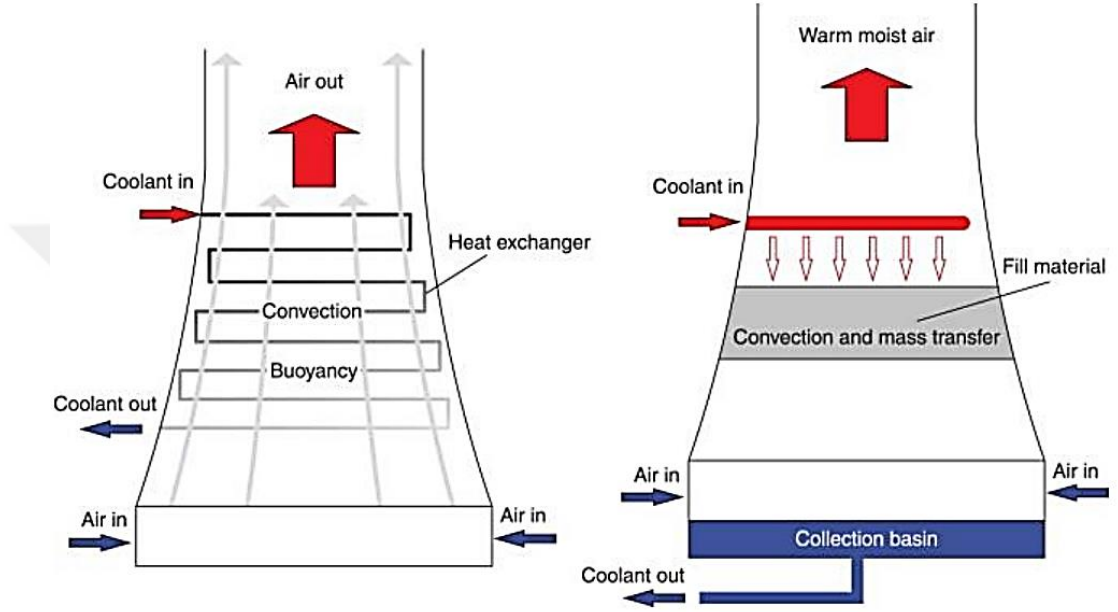
Sıcak metot ve Demineralizasyon gibi yöntemler, kazan yüzeyini etkileyen bileşikleri etkisiz hale getirir. Arıtılan su, gaz alıcıdan geçirilerek içindeki zararlı gazlardan arındırılır. Ayrıca, korozyona neden olan kimyasal maddelerin etkisiz hale getirilmesi ve iç kristalleşme düşünülerek su arıtma işlemi düzenlenmelidir.

Sistemin işleyişi şu şekilde gerçekleşmektedir: Pompa aracılığıyla alınan ham su, ilk olarak sertlik giderme ünitesinde yumuşatılır. Ardından valf, kollektör ve hava ayırıcıdan geçerek kazan besleme suyu deposuna aktarılır. Depoda toplanan su, pompalar aracılığıyla ön ısıtıcıya yönlendirilir. Ön ısıtıcıda ısınan su kazana iletilir ve burada yüksek sıcaklık ve basınca ulaşan buhar, su ayırıcıdan geçerek buhar makinesine yönlendirilir. Buhar makinesi, jeneratörü döndürerek elektrik enerjisi üretir. Buhar makinesinden çıkan çürük buhar ise kondensere yönlendirilir, burada sıvılaştırılarak yeniden kazan besleme devresine dahil edilir (Sengupta vd., 2007).

Termik santrallerin verimli çalışmasında soğutma suyu yönetimi kritik bir role sahiptir. Kondenserde buharın yoğunlaştırılması için büyük miktarda soğutma suyuna ihtiyaç duyulur. Genellikle nehir, göl veya deniz gibi açık su kaynaklarından temin edilen bu su, "açık devre soğutma" sisteminde kullanılır. Soğutma suyu, mekanik taraklar ve süzgeçlerle temizlendikten sonra kondensere yönlendirilir. Burada buharı yoğunşturan soğutma suyu, ısınarak tekrar alındığı kaynağa deşarj edilir. Kullanılan soğutma suyu miktarı, yoğunşturulan buharın yaklaşık 50 ila 70 katı arasındadır (Flynn, 2003).

Su kaynakları sınırlı olduğunda, kondenserde ısınan suyun soğutulması için soğutma kuleleri kullanılır. Soğutma kuleleri, atık ısıyı atmosfere transfer etmek amacıyla suyun soğutulması için kullanılır, özellikle kömüre dayalı elektrik santrallerinde kritik bir role sahiptir. Çeşitli metodlarla soğuk tutulan suyun performansı üzerine birçok çalışma mevcuttur (Afshari ve Dehghanpour, 2019). Kömür santrallerinde dolaşan suyun soğutma kabiliyetini korumak için fazla ısısı alınmalıdır. Doğal çekişli, cebri çekişli veya indüklenmiş çekmeli soğutma kuleleri kullanılarak su buharlaştırılarak fazla ısı atmosfere atılır. 500 MW'lık bir kömür santralindeki soğutma suyu dolaşım debisi tam yükte yaklaşık 14.2 m³/s'tir (Maulbetsch ve Zammit, 2003). Yoğunlaştırıcıda kullanılan su sadece sıcaklığı artmış olarak kaynağına geri döner. Hava soğutmalı yoğunlaştırıcılar (Şekil 3.8), türbinden gelen ısıyı fanlar aracılığıyla hava dolaştırarak transfer eder. Bu sistemler daha yüksek sıcaklıklarda çalışsa da, su

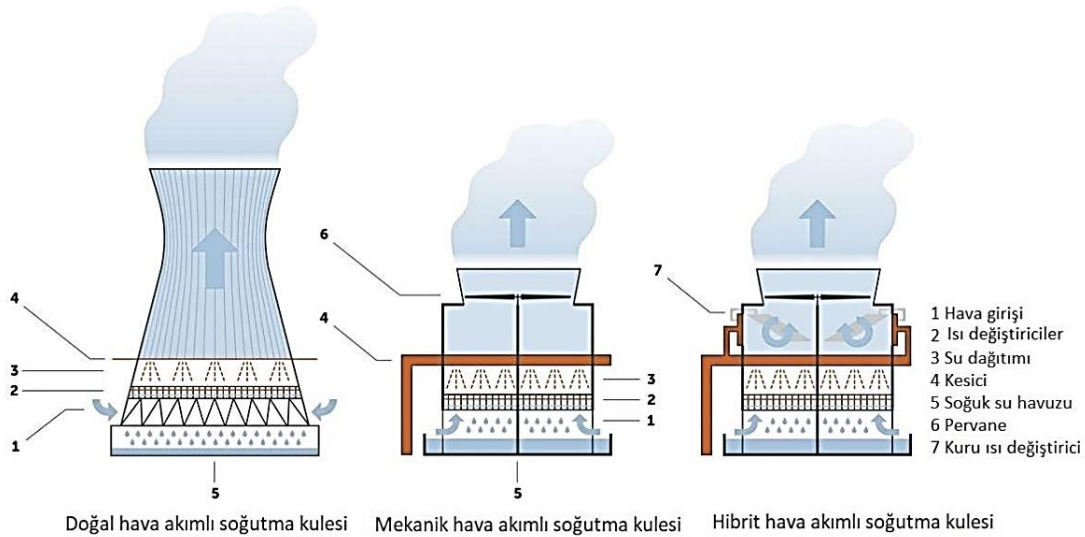
tasarrufu sağlar ancak çevrimin verimliliği düşüktür, her bir megawattsaat elektrik üretimi için daha fazla CO₂ emisyonu anlamına gelir. Kömür santrallerinde hava akımı oluşturmak ve ısı transferi için farklı teknikler kullanılır, bu teknikler doğal çekim ve mekanik çekim olmak üzere iki ana çeşittir (Şekil 3.9). Isı transferi metodları ise kuru soğutma kuleleri, sulu veya buharlı soğutma kuleleri ve ıslakkuru soğutma kuleleri olarak sınıflandırılır (Şekil 3.10) (Gündoğan, Yaraç ve Bagatır, 2018).



Şekil 3.8. Doğal hava akımlı kuru tip soğutma kuleleri (Kapalı Sistem- Açık sistem)
(Yıldız, Özgüler ve Kandemir, 2021).



Şekil 3.9. Soğutma kulelerinde hava akımı oluşturma teknikleri (Gündoğan, Yaraç ve Bagatır, 2018)



Şekil 3.10. Doğal akımlı mekanik akımlı ve hibrit kuru soğutma kuleleri (Yıldız, Özgüler ve Kandemir, 2021).

Enerji üretimi, yakıt çıkarma, yakıt işleme ve elektrik üretimi için suyun kullanıldığı su yoğun bir süreçtir. Su arıtma, tuzdan arındırma, su taşıma, pompalama gibi süreçler su hizmetleri sağlamak için enerji gerektirir. Enerji ve suyla ilgili süreçler birbiriyle yakından etkileşim halindedir, dolayısıyla bu etkileşim su-enerji bağı olarak adlandırılmaktadır. Küresel elektrik talebinin artışı ve dolayısıyla elektrik üretimindeki büyüme, bu süreçlerde kullanılan su miktarının da sürekli olarak artmasına yol açmaktadır. Elektrik üretiminde tüketilen su miktarı, kullanılan teknolojiye bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Küresel elektrik üretiminin büyük bir kısmı, özellikle soğutma sistemlerinde yüksek miktarda su kullanan termoelektrik santraller tarafından gerçekleştirilir. Termoelektrik santrallerde en yaygın kullanılan soğutma sistemleri arasında ıslak kapalı döngü ve kuru soğutma sistemleri bulunmaktadır (Torcellini vd., 2003).

Once-through adı verilen soğutma sistemi, genellikle okyanus, nehir, göl, gölet veya kanal gibi yakınındaki su kütlelerinden büyük miktarlarda su çeker. Bu su, kondansatörden geçirildikten sonra alındığı su kütesine geri bırakılır. Bu tip soğutma sistemlerinin sermaye ve işletme maliyetleri düşük olmakla birlikte, yüksek sıcaklıklarda dolaylı olarak tüketilen su miktarı nispeten azdır (Torcellini vd., 2003; Badr vd., 2012; Mielke vd., 2010).

Islak soğutma kulelerinde ise buhar yoğunlaştırıldıktan sonra soğutma suyunun tekrar kuleye pompalanması sağlanır. Bu sistemler, büyük miktarlarda su çekmezken, soğutma kulesindeki buharlaşma işlemi nedeniyle once-through sistemine kıyasla daha fazla su tüketimine neden olur (Torcellini vd., 2003; Mielke vd., 2010).

Termoelektrik santrallerde kullanılan bir diğer yöntem de kuru soğutma sistemidir; bu sistemde hava, tüp dizilerindeki buharın üzerinden akarak onu yoğunlaştırır (Havey, 2008).

Bazı durumlarda su eksikliği, su kaynaklarının yetersiz olduğu bölgelerde elektrik üretimini sınırlayan önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, üretilen elektrik birimi başına kullanılan toplam su miktarının belirlenmesi ve enerji santrallerinde elektrik üretimi sırasında gerçekleşen çeşitli süreçlerdeki su tüketiminin detaylı bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Özellikle enerji santrallerinde en büyük su tüketimi, soğutma sistemlerinde gerçekleştiği için, farklı soğutma sistemlerinin su tüketim özelliklerinin değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Açık literatürde, enerji santrallerinde elektrik üretimi başına su tüketim oranlarını (L/MWh) belirlemeye yönelik çeşitli çalışmalar bulunmaktadır.

Macknick vd. (2011), ABD'deki farklı enerji santrallerindeki su tüketimini analiz ederek, yalnızca işletme aşamasında gerçekleşen su tüketimine odaklanmıştır. Çalışmalarının sonuçları, ıslak soğutma kule sistemlerine sahip termik santrallerin, üretilen elektrik birimi başına bir kez soğutma sistemlerine kıyasla daha yüksek miktarda su tükettiğini göstermiştir. Ayrıca, kömür ve linyit santralleri, tüm santral türleri arasında en fazla su tüketimine sahip santraller olarak belirlenmiştir.

El-Khozondar vd. (2017), enerji santrallerinin su tüketim verilerini analiz etmenin yanı sıra, çeşitli termik santraller için üretilen elektrik başına su tüketimini belirlemek amacıyla basit bir model geliştirmiştir. Bu model, enerji santrallerindeki su ve ısı akışlarının detaylı bir şekilde analiz edilmesine dayanmaktadır (ElKhozondar ve Koksall, 2017).

Dale vd. (2015) ise, iklim değişikliğinin bölgesel su ve enerji sistemleri üzerindeki etkilerini tanımlamak için iki popüler simülasyon aracı (LEAP ve WEAP) kullanarak bir model geliştirmiştir. Çalışmalarında, Kaliforniya'daki bazı enerji santrallerinden elde edilen veriler, enerji ve su planlama sistemlerinin kırılganlıklarını değerlendirmek için kullanılmıştır. ABD'deki elektrik üretim santrallerinde alternatif soğutma sistemlerinin su tüketim miktarını karşılaştırmaya yönelik çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu sistemler, maliyet, su tüketimi ve çevresel etkiler gibi birçok açıdan değerlendirilmiştir. Araştırmalar, ıslak soğutma sistemlerinin kuru soğutma sistemleri ile değiştirildiğinde su tüketiminin yaklaşık %95 oranında azaldığını göstermektedir. Ancak kuru soğutma sistemlerinin, su ve havanın ısı kapasitelerindeki fark nedeniyle daha düşük verimliliğe sahip olduğu ve ıslak soğutma sistemlerine kıyasla daha yüksek sermaye maliyetine ihtiyaç duyduğu tespit edilmiştir (Davis vd., 2003).

Deniz suyu kullanılarak yapılan açık veya kapalı devre soğutma sistemleri için detaylı mühendislik çalışmaları gereklidir. Bu çalışmalar, bölgenin deniz özelliklerini belirleyen batimetrik ve oşinografik çalışmaları içerir. Deniz suyunun alındığı ve deşarj edildiği noktaların belirlenmesi, sıcaklık dağılımı sayısal modelleri oluşturularak değerlendirilir. Sürekli buharlaşma sonucu artan tuzluluk oranını kontrol etmek için blöf suyu eklenir ve bu su, denize deşarj edilir. Bu kompleks sistemde, tuzluluk oranı artmış soğutma suyu sürekli olarak takviye edilir ve denize geri deşarj

edilir. Bu süreç, denizden alınan suyun atmosfere tuz salınımına neden olabilecek mekanik ıslak tip soğutma sistemleri tarafından kullanılmasını içerir (Teichert vd., 2003,

Soğutma suyu deşarj hattının etkili tasarımı, homojen bir debi dağılımı ve tuzlu su girişini önlemek adına büyük önem taşır. Rawn ve Brooks tarafından geliştirilen yöntem, debi değişimlerine rağmen eşit debi çıkışları sağlayarak yük kayıplarını en aza indirir. Bu tasarım, difüzör boru çapında ve delik çaplarında uygun değişiklikler yaparak gerçekleştirilir. Deniz suyunun boru içine girmesini önlemek için DensimetrikFroude sayısının $Fd \geq 1$ olması esastır. Sıcak suyun etkili soğuması için deşarjın geniş bir alana ve mümkünse derinlere yönlendirilmesi önemlidir. Hidromekanik nümerik modelleme, yüzey hidrolik modelleri ve taşınım modelleri olmak üzere iki ana grupta incelenir. Süreklilik ilkesi ve momentum ilkesi denklemleri, kütle korunumu ve momentum dengesini belirler. Akıntı ve sıcaklık dağılımı modeli, bir ağ sistemi oluşturularak iterasyonlarla hesaplamalar gerçekleştirir. Ağ sisteminin inceleme bölgesini kapsamaması ve noktaların düzgün dağıtılması önemlidir. Hesap açısından gereksiz detay içermeyen bölgelerde geniş aralıklar kullanılabilir, ancak incelik gerektiren yerlerde daha kısa aralıklar tercih edilmelidir. Bu kompleks tasarım, hidrolik açıdan en uygun deşarjı elde etmek için bilgisayar programları ve matematiksel modelleme araçları kullanır (Liu vd., 2010).

Termik santrallerdeki su ihtiyacı, kullanılacak ham su kalitesi, soğutma sistemi tipi, kömür kalitesi, uçucu kül miktarı, uzaklaştırma yöntemi ve diğer faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterir. Genel olarak, mevcut kömüre dayalı termik santrallerde MW başına 7 m³/saat su tüketimi öngörülmüştür. Ancak, son dönemde inşa edilen santrallerde bu miktarın MW başına 3,5-4 m³/saat olarak düşünüldüğü rapor edilmiştir (El-Khozondar ve Koksall, 2017). Bu santrallerde suyun yaklaşık %85'i soğutma amaçlı kullanılır. Örneğin kömür esaslı termik santrallerin yoğun olduğu Hindistan'da, Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından yayınlanan genelge, tek yönlü soğutma sistemine sahip santrallerin soğutma kuleleri kurmalarını ve su tüketimini belirli bir oranda azaltmalarını öngörmektedir. Bu genelgeye göre, 2017'den sonra inşa edilecek tesislerde su tüketimi maksimum 2,5 m³/MWh olmalıdır (Bhattacharya, 2018).

3.10. Termik Santral Atık Isısının Konutların Isıtılmasında Kullanılması

Termik santrallerde üretilen enerjinin sadece %33'ü elektrik enerjisi olarak elde edilebilmektedir. Geriye kalan enerji, kazan bacasından (%8) ve yoğuşturucudan (%59) çevreye ısı enerjisi olarak atılır. Termik santrallerde ortaya çıkan atık ısı, genellikle yoğuşturucularda oluşmaktadır. Bu atık ısı, çeşitli alanlarda (konut ısıtma, soğutma, sera ısıtma vb.) değerlendirilerek ekonomik ve çevresel avantajlar sağlayabilir. Bunun yanında termik santrallerde oluşan atık ısının, soğutma kulelerinden su buharı ile birlikte atmosfere atılması yerine, çevrede yararlı işlerde kullanılması büyük önem taşımaktadır. Bu kullanım örnekleri arasında bölge ısıtması, sera ısıtması, sıcak su ön ısıtması, tarımsal kurutma gibi uygulamalar yer almaktadır. Eğer bu uygulamalar mümkün değilse, benzer yan sektörlerin oluşturulması ve teşvik edilmesi de önemlidir. Bu yaklaşımlar sayesinde soğutma kulelerinin kullanımının azaltılmasıyla su buharının sera etkisi de minimize edilebilir (Hansen, 2008).

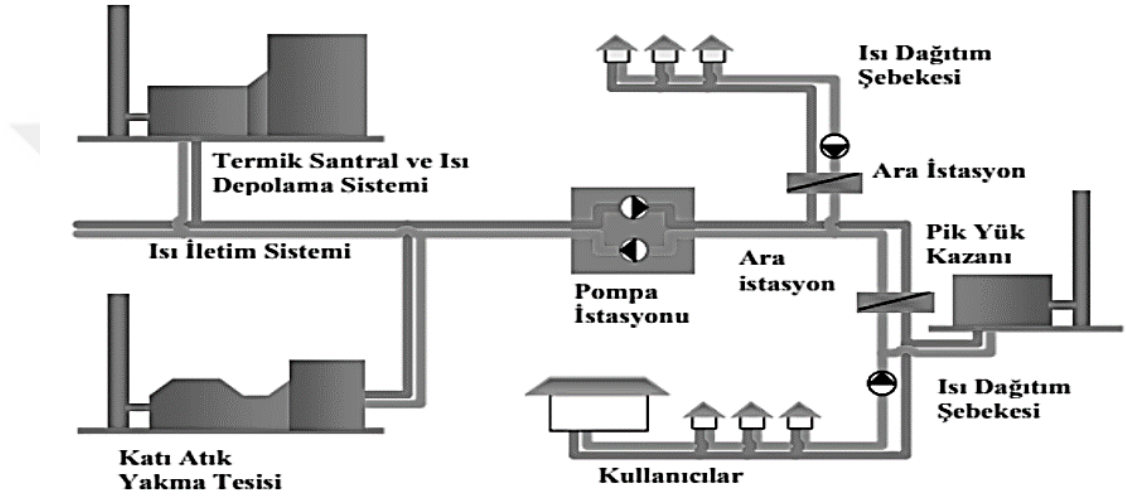
Yoğuşturucudan atılan ısının düşük sıcaklıkta olması nedeniyle konvansiyonel ısıtma sistemleri için uygunsuz olabilir, ancak türbin kademeleri arasından düşük basınçta buhar alınarak yoğuşturucudan atılan ısının büyük bir kısmı değerlendirilebilir (Kahraman, 2022).

Bazı santraller sadece ısı üretirken, diğerleri hem ısı hem de elektrik üretir. Sadece ısı üreten santraller su ve buhar üreten kazanlardan oluşurken, elektrik ve ısı birlikte üretilen santrallerde buhar türbini, gaz türbini veya gaz motoru kullanılmaktadır. Bu uygulamalar, bileşik ısı-güç üretimi veya kojenerasyon olarak adlandırılır (MMO, 2009).

Atık ısılardan elde edilen ısı, merkezi ısı değiştiriciler aracılığıyla iletim hatlarına aktararak binaların ısıtma sistemlerine ve endüstriyel alanlara dağıtılır. Ancak, bu dağıtım sürecinde enerji kayıpları yaşanır. İletim hatlarındaki yerel ve sürtünme kayıplarını azaltmak için uygun yerlerde pompa istasyonları kurulabilir. Bölgesel ısıtma sistemlerinde, iletim ve dağıtım hatlarının belirli basınç ve sıcaklık değerleri vardır. Bu sistemlerde kullanılan pompalar, sıcak suya enerji kazandırarak kayıpları minimize eder. Atık ısıdan elde edilen sıcak suyu ulaştırmak için kullanılan borular genellikle ön izolasyonlu borulardan oluşur (Malzeme Enstitüsü, 2007).

Dağıtım hattındaki sıcak su, üç farklı şekilde kullanıcılara ulaştırılabilir: doğrudan bina tesisatına, karışık dolaşım sistemi veya bina alt istasyon sistemleri aracılığıyla. Bu

sistemlerde sirkülasyon pompaları ve genişleme tankları kullanılarak yerel ve sürtünme kayıpları azaltılır. Ayrıca, sıcaklık kontrol elemanları, oluşabilecek ısı dengesizliklerini önlemek için kullanılır. Termik santrallerdeki atık ısının çeşitli alanlarda kullanılması mümkündür, bunlar arasında bölgesel ısıtma, sıcak kullanım suyu üretimi, sera ısınması ve bölge soğutma sistemleri bulunmaktadır (Şekil 3.11). Bu uygulamalar, enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasına ve çevresel etkilerin azaltılmasına katkıda bulunabilir (Malzeme Enstitüsü, 2007).



Şekil 3.11. Tipik bölgesel ısıtma sistemi (MMO, 2009).

Türkiye'deki termik santrallerin toplam atık ısılarıyla, yaklaşık 620 bin konutun ısı ihtiyacının karşılanabileceği hesaplanmıştır (Kahraman, 2022).

“Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ), Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), Yıldız Teknik Üniversitesi (YTÜ) ve Elektrik İşleri Etüd İdaresi (EİEİ)” tarafından ortaklaşa yürütülen “Enerji Verimliliğini Arttırmak Üzere Termik Santral Atık Isılarının Faydaya Dönüştürülme Yöntemlerinin Araştırılması, Geliştirilmesi ve Binalarda Isıtma Uygulaması (TSAD)” projesi, EÜAŞ'a bağlı 14 termik santralin inceleme ve analizlerini içermektedir. Yatağan Termik Santrali'nde gerçekleştirilen ilk uygulama ile Muğla'da 10200 ve Yatağan'da 6300 konutun ısıtılması planlanmış, projenin Muğla Valiliği koordinasyonuyla devam ettiği ve işbirliği içinde ilerlediği belirtilmiştir. Proje, termik santrallerin bulundukları bölgedeki ısıtma ve soğutma taleplerini karşılamak için potansiyele sahip olduğunu vurgulamaktadır (MMO, 2009).

Dünya genelinde termik santrallerin atık ısılarını değerlendiren birçok uygulama bulunmaktadır. Örneğin, Almanya'daki Sandreuth Termik Santrali, 135 MWe elektrik üretiminin yanında 440 MWt ısı üretim kapasitesine sahip, 250.000 kişinin ısı ihtiyacını karşılamaktadır. Helsinki, dünyanın en kuzeydeki başkentlerinden biri olup, 60 derece kuzey enlemindedir. Şehirde yaklaşık 600.000 konut, enerji tasarruflu bölgesel ısıtma sistemleri ile ısınmaktadır. Helsinki'nin ısı güç üretim kapasitesi 300 MW'dir ve şebeke uzunluğu 7.500 km'dir.

Özetle, termik santrallerdeki atık ısı enerjisinin yararlı enerjiye dönüştürülmesi, santralin toplam verimini artırarak enerji kaynaklarının daha etkili bir şekilde kullanılmasını sağlar. Bu dönüşüm, santraldeki atık ısının değerlendirilmesi ve yakıtın santral kazanında daha merkezi ve verimli bir şekilde yakılmasıyla gerçekleşir. Bu süreç sonucunda çevreye salınan emisyonlarda azalma meydana gelir. Ayrıca, santraldeki soğutma suyu ihtiyacında azalma yaşanır, bu da önemli bir su tasarrufunu beraberinde getirir. Bu sürdürülebilir uygulama, enerji sektöründe çevresel etkileri azaltarak ve kaynakları daha etkili kullanarak sürdürülebilir bir enerji üretimine katkıda bulunur.

3.11. Termik Santrallerin Türkiye Ekonomisi İçin Önemi

Ekonomik kalkınma ile elektrik enerjisi kullanımı arasında güçlü bir bağlantı bulunmaktadır. Elektrik enerjisinin ekonomide ara mal olarak taşıdığı önem, enerji sektörünün ekonomik yapının her sektörüne girdi sağlayan ancak aynı zamanda bütün sektörlerden girdi almayan bir sektör olmasıyla ortaya çıkmaktadır. Bu durum, elektrik sektöründeki darboğazların tüm sektörleri etkilediği anlamına gelmektedir (Eti Menkul Kıymetler AŞ, 2010).

Elektrik üretiminin büyük bir kısmı termik santraller aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Kullanılan yakıt türüne bağlı olarak üretilen elektriğin maliyetinde dalgalanmalar meydana gelmektedir. Termik santrallerden elde edilen elektrik, özellikle sanayi sektöründe kritik bir girdi olarak rol oynamaktadır. Enerji fiyatlarındaki artışlar, girdi maliyetlerini yükselterek ekonominin rekabet gücünü önemli ölçüde azaltmaktadır. Enerji fiyatlarının istikrarsızlığı, enflasyonu etkileyerek toplam talebi düşürebilir ve ekonomik durgunluk baskısını artırabilir (Özdemir ve Yüksel, 2006).

Elektrik üretiminde kullanılan enerjinin doğalgaz ve petrol kaynaklarına dayandırılması, enerji arz güvenliğinde riskleri artırmanın yanı sıra, bu kaynakları ithal eden ülkelerin fiyat dalgalanmalarına maruz kalmasına neden olmaktadır (Dartan, 1997).

Türkiye ekonomisinde, kömürle çalışan termik santraller yerine giderek artan şekilde doğalgazın tercih edilmesi, dış ticaret dengesi, üretim, istihdam ve yatırımlar üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir. Doğalgazın büyük ölçüde ithal edilmesi, bu kaynağın fiyatlarındaki artışların doğrudan elektrik maliyetlerini artırmasına neden olur. Bu artış, ihraç edilen malların rekabet gücünde azalmaya ve dolayısıyla reel milli gelirde düşüşe yol açabilir (Dokuzuncu Beş Yıllık Kalkınma Planı, 2010).

Elektrik maliyetlerinin yükselmemesi adına, ithal doğalgaz kullanan santraller yerine, kömürle çalışan termik santrallerin daha yaygın bir şekilde değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Elektrik üretiminde doğalgaz santrallerine ağırlık verilmesi, doğalgaz ithalatının artmasına yol açabilir ve bu ithalatta yaşanabilecek olası aksaklıklar elektrik üretimini doğrudan olumsuz etkileyebilir. Türkiye'nin elektrik sektörü, diğer ekonomik sektörlerle güçlü bir etkileşim içinde olup, ekonomik büyüme üzerinde pozitif bir etki yaratmaktadır. Elektrik enerjisi, günümüzde ekonominin çeşitli sektörleri için kritik bir girdi konumunda olup, bu sektörlerin gelişimini desteklemektedir. Bununla birlikte, ekonomik büyümeye paralel olarak elektrik arzının yeterli seviyede artırılamaması durumunda, elektrik enerjisi talebinin karşılanmasında sorunlar ortaya çıkabilir. Bu durum, ekonomik büyümeyi olumsuz etkileyebileceği gibi, enerji arzının ekonomi üzerindeki teşvik edici etkisini de zayıflatabilir (Özdemir ve Yüksel, 2006).

Bu kapsamda, termik santraller, Türkiye ekonomisi içinde enerji üretiminde kritik bir rol oynayan tesislerdir. Elektrik enerjisi üretiminde önemli bir paya sahip olan termik santraller, Türkiye'nin enerji ihtiyacını karşılamada etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Türkiye'de doğalgaz kaynaklarının sınırlı olması, elektrik üretiminde dışa bağımlılığa yol açmaktadır. Özellikle elektrik üretiminde doğalgazın önemli bir paya sahip olması, enerji arz güvenliği açısından zorluklar yaratmaktadır. Bu durumu düzeltmek ve enerji üretiminde kaynak çeşitliliğini artırmak için çeşitli önlemler alınmalıdır.

Türkiye'nin enerji politikalarında yerli enerji kaynaklarına odaklanma ve bu kaynakların kullanımını artırma çabaları önemlidir. Özellikle yerli linyit santrallerinin

daha fazla kullanılması, enerji üretiminde yerli kaynaklara dayalı çözümler sunabilir. Bu santraller, Türkiye'nin linyit rezervlerini değerlendirmesine ve enerji üretiminde dışa bağımlılığı azaltmasına olanak tanır.

Ayrıca, ülkedeki birincil enerji kaynaklarının aranması ve geliştirilmesi için yapılan faaliyetlerin artırılması da önemlidir. Yerli enerji kaynaklarının keşfi ve etkin bir şekilde kullanılması, enerji arzını çeşitlendirebilir ve dışa bağımlılığı azaltabilir.

3.12. Termik Santral Emisyonları

Termik santraller, fosil yakıtların yanması sonucu atmosfere önemli miktarda sera gazı ve hava kirletici madde salmaktadır. Bu emisyonlar, iklim değişikliği, hava kirliliği ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır.

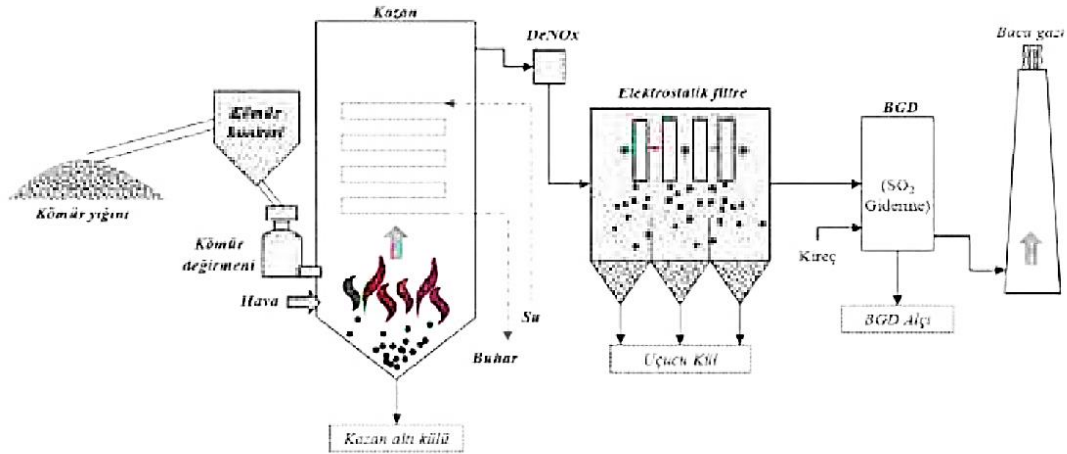
Başlıca emisyonlar arasında karbondioksit (CO_2), metan (CH_4), diazot monoksit (N_2O), kükürt dioksit (SO_2), azot oksitler (NO_x), partikül maddeler (PM10 ve PM2.5) ile civa (Hg) ve diğer ağır metaller bulunmaktadır. CO_2 , fosil yakıtların yanmasıyla açığa çıkan en yaygın sera gazıdır ve küresel ısınmanın başlıca nedenlerinden biridir (IPCC, 2021). CH_4 , yanma sürecinde düşük miktarda salınmasına rağmen, sera etkisi açısından CO_2 'den daha güçlüdür (IPCC, 2021). N_2O , yakma sürecinde azot içeren bileşiklerin oksitlenmesi sonucu oluşur ve CO_2 'den yaklaşık 300 kat daha güçlü bir sera gazıdır (EPA, 2022). SO_2 , kömür ve fuel-oil gibi kükürt içeren yakıtların yanmasıyla oluşur; asit yağmurlarına ve solunum yolu hastalıklarına neden olur (WHO, 2020). NO_x , yüksek sıcaklıkta yakma işlemi sırasında meydana gelir ve fotokimyasal duman (smog) oluşumuna katkıda bulunarak hava kalitesini olumsuz etkiler (EPA, 2022). Partikül maddeler, yanma sürecinde atmosfere karışan ince ve ultra ince partiküller olup, insan sağlığına ciddi zararlar verebilir; astım, bronşit ve akciğer hastalıkları riskini artırır (WHO, 2020). Civa ve diğer ağır metaller, özellikle kömür yakıtlı termik santrallerden salınır ve su kaynaklarını kirlitebilir; biyolojik birikim yoluyla besin zincirine girerek insan sağlığı için toksik etkilere yol açar (UNEP, 2019).

Linyit kömürü, termik santrallerde yaygın olarak kullanılan bir kömür çeşididir. Kahverengi görünümü ve yüksek kül ve nem içeriği ile bilinen linyit kömürü, toprak altından 90-100 metre derinlikte çıkarılmaktadır (Kantarcı, 1988). Türkiye İstatistik Kurumu verilerine göre, 2022 Ağustos ayında linyit kömürü üretimi bir önceki

temmuz ayına göre %0.8 artarak 6.417.863 ton olmuştur (TUİK, 2022). Linyit kömürü, termik santrallerde 1200°C'de yakıldığında ince tane boyutlarına ayrılarak endüstriyel atıklar olan termik santral uçucu kül (FA) ve cüruf oluşturur (Görhan vd., 2009; Shakeel vd., 2021). Bu süreçte, linyit kömürünün yaklaşık %20 ila %50'si uçucu kül olarak ortaya çıkar ve gelişmekte olan ülkelerde bu uçucu kül partikülleri hava kirliliğine neden olabilir (Lichtfouse, 2011).

Uçucu kül, termik santrallerde yan ürün olarak üretildiğinde hızlı bir şekilde soğur ve elektro filtreler yardımıyla tutularak atmosfere salınımı büyük ölçüde engellenir (Morrison vd., 1970; Demir vd., 2022). Ancak, bu toz halindeki külün ıslak veya kuru depolanması, yer israfına ve çevresel kirliliğe yol açabilecek sürdürülebilir olmayan bir yöntemdir (Khan ve Khan., 1994; Adewunmivd., 2017).

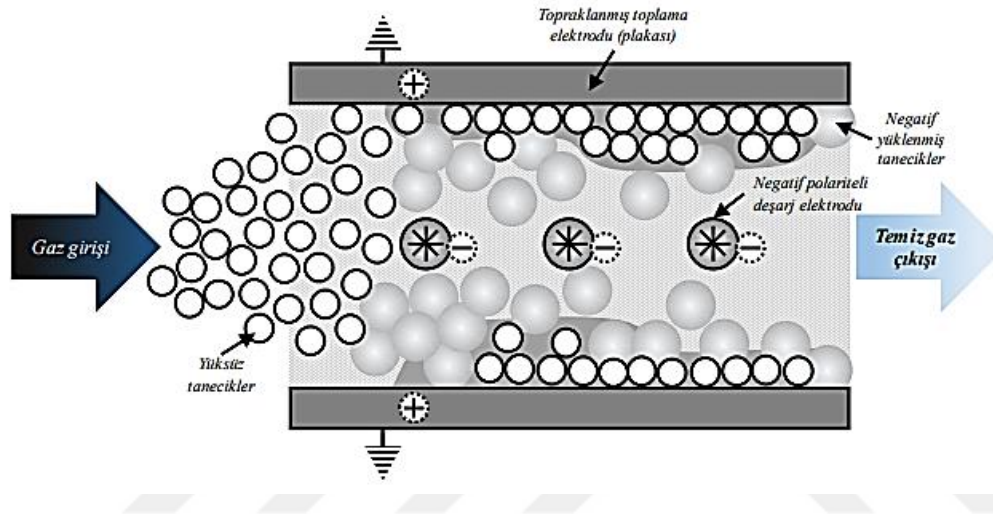
Pulverize kömür teknolojisi tercih edilen bir yöntem olup, uzun süre kullanılmasının yanı sıra yanma verimliliği ve emisyon kontrolü konusunda gelişmeler kaydedilmiştir. Bu teknolojiyle çalışan termik santrallerde taban külü ve uçucu kül oluşum süreci Şekil 3.12'de özetlenmiştir.



Şekil 3.12. Pulverize kömür yakma teknolojisinden yararlanılan termik santralde uçucu külün meydana gelmesi (Akgül ve Yoncacı, 2021).

Baca gazlarında taşınan ince mineral maddeler, gazların daha düşük sıcaklık bölgelerine hareketiyle soğutulur. Bu soğuma sonucunda, parçacıklar yüksek amorf içeriğe sahip kül taneciklerine dönüşür. Daha iri ve ağır parçacıklar siklon veya mekanik filtrelerde tutulurken, hafif ve ince tanecikler, yaklaşık 130°C'ye kadar soğuyan baca gazıyla birlikte taşınarak elektrostatik filtrelerde uçucu kül olarak

ayrıştırılır (Ramachandran, 1996; Tangüler vd., 2014; Sear, 2001). Elektrostatik filtrelerde gerçekleştirilen uçucu kül tutma işlemi, negatif yüklü parçacıkların elektrik alanı yardımıyla toplama elektrotlarında biriktirilmesi prensibine dayanır (Şekil 3.13). Daha sonra bu kül, kül silosuna taşınmak üzere elektrotlardan toplanır (Biege vd., 1997). Toplanan uçucu külün özellikleri ise yakma derecesi, kömür türü, partikül inceliği ve kazanda kalma süresi gibi birçok faktöre bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Balgün, 2009).



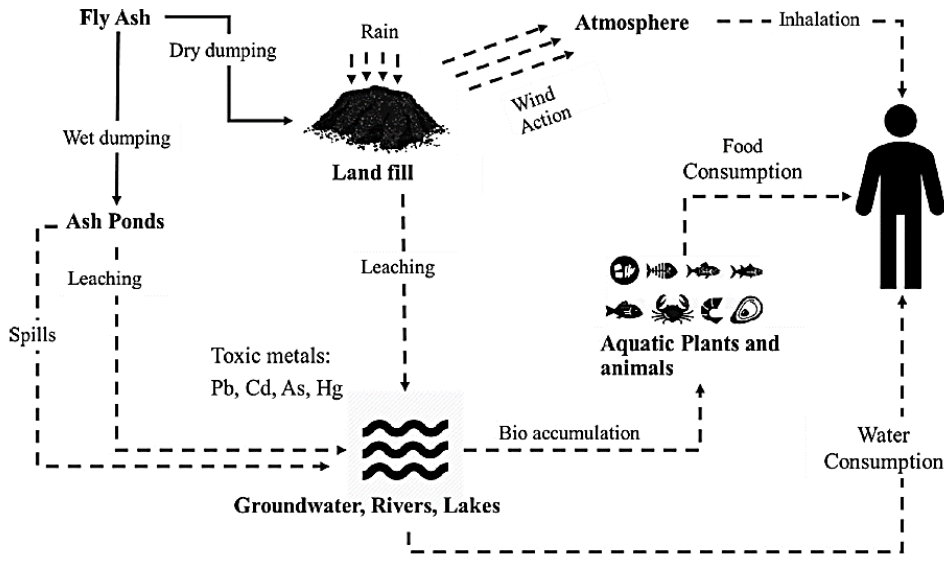
Şekil 3.13. Elektrostatik filtrenin çalışma ilkesi (Biege vd., 1997).

Elektrostatik filtrelerin kömürle çalışan termik santrallerdeki tek alternatifi torba filtrelerdir. Torba filtreler, genellikle teflon, fiberglas, polyester, cam elyafı veya özel uygulamalara uygun diğer malzemelerden üretilmiş binlerce silindirik hücreden meydana gelir. Uygun tasarım ve düzenli bakım ile torba filtreler, toz tutma verimliliğinde %99,9'un üzerine çıkabilir. Bazı termik santrallerde, NO_x giderim sistemleri ve baca gazı desülfürizasyon (BGD) üniteleri gibi geleneksel arıtma yöntemleri bulunmaktadır. BGD üniteleri, elektrostatik filtrelerden çıkan gazın baca çıkışına gitmeden önce arıtıldığı sistemler olup ıslak ve kuru gaz yıkayıcı olmak üzere iki temel türe ayrılır. Dünya genelinde ve Türkiye'de en yaygın kullanılan sistem, kireç(taşı)-alçıtaşı yöntemiyle çalışan ve %95'in üzerinde SO₂ tutma verimi sağlayan ıslak gaz yıkayıcılardır (Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 2012). Kuru gaz yıkayıcılar ise yüksek sülfür içerikli kömürlerde SO₂ tutma verimliliği açısından yetersiz oldukları için daha az tercih edilmektedir.

Son yıllarda, pulverize kömür yakan termik santrallere kıyasla daha esnek bir yanma mekanizması sunan dolaşımli akışkan yataklı termik santraller giderek önem kazanmaktadır. Akışkan yataklı sistemler, düşük kalitedeki kömürlerin yanı sıra yüksek kaliteli kömürlerin de yakılablmesine olanak tanır. Bu sistemlerde, ince öğütölmüş kömür partikülleri, akışkanlaştırılmış kum, kül ve genellikle tutucu malzeme olarak kullanılan kireçtaşı veya dolomit ile oluşturulan bir yatak içinde yakılmaktadır. Bu teknoloji, kömürün yanma sıcaklıklarında daha uzun süre kalmasını sağlayarak yanma sürecinin verimliliğini artırır. Ek olarak, kullanılan kireçtaşı veya dolomit, SO₂'nin çökmesine katkı sağlayarak SO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azaltır. Düşük yanma sıcaklıkları sayesinde NO_x emisyonları da düşmektedir. Akışkan yataklı sistemler genellikle yüksek kül içeriğine sahip kömürlerin kullanımına uygun olup, bu sistemlerde taban külü ve uçucu kül oluşum süreçleri belirgin bir şekilde yönetilmektedir.

Uçucu kül, kömür yakıtlı elektrik santrallerinin yan ürünü olarak ortaya çıkan yanma kalıntılarının büyük bir kısmını oluşturur ve genellikle toplam yanma kalıntılarının %60-88'ini temsil eder. Küresel olarak yılda 0,75-1 milyar ton civarında üretilmektedir ve özellikle gelişmekte olan ölkelerde ucuz enerji talebinin artmasıyla bu miktarın gelecek yıllarda artması beklenmektedir (Yao vd., 2015). Üretilen uçucu külün bir kısmı faydalı alanlarda, örneğin tuğla imalatında veya yol ve baraj yapımında dolgu malzemesi olarak kullanılmakta; ancak, önemli bir kısmı halen çevresel tehditlere neden olabilecek şekilde toprak dolgularına veya kül havuzlarına atılmaktadır (Zhang vd., 2015; Prasad ve Mondal, 2009).

Uçucu külün bertaraf edilmesi, çevresel tehditleri beraberinde getirmektedir. Partiküllerin havada yayılması ve toksik bileşenlerin toprak veya su kütlelerine sızması gibi nedenlerle ortaya çıkan bu tehditler, çeşitli araştırmalarda belgelenmiştir (Ahmaruzzaman, 2012). Bu çevresel tehditler, Şekil 3.14'te özetlendiği gibi, uçucu külün bertaraf edilmesinden kaynaklanan potansiyel riskleri vurgulamaktadır.



Şekil 3.14. Uçucu kül kontaminasyon yolları (Dindi vd., 2019).

Kullanımı yıllar içinde istikrarlı bir şekilde artmış olsa da, ortalama küresel kullanım oranı %30'un altında kalmaktadır (Blissett ve Rowson, 2012). Bu senaryo, ekonomik ve çevresel faydalarla birlikte kullanım için fırsatlar sunmaktadır. Örneğin, enerji şirketleri uçucu külü farklı ürünler için hammadde olarak kullanan alıcılara satarak gelir elde edebilir ve aynı zamanda bertaraf maliyetlerini ortadan kaldırabilir (Hui, ve Chao, 2006). Uçucu kül kullanımı ayrıca ilave depolama alanı ihtiyacını azaltacak ve doğal kaynakları koruyacaktır. Kullanılan her bir ton kömür uçucu külü için 1 ton işlenmemiş kaynak (örneğin kireçtaşı, alçıtaşı, kum ve toprak) tasarruf edilebilir (US EPA, 2005).

Uçucu külün çok sayıda endüstride uygulamaları olmasına rağmen, en öne çıkanı tamamlayıcı çimento malzemesi olarak kullanıldığı inşaat sektörüdür (Ravina ve Mehta, 1986; Giaccio ve Malhotra, 1988). Diğer uygulamalar ise toprak ıslahı (Mittra vd., 2005; Kikuchi vd., 1999), gaz ve atık su arıtımı için adsorban olarak çevresel iyileştirme (Querol vd., 2002; Apiratikul ve Pavasant, 2008; Hui vd., 2005), deterjan yapıcı olarak tüketim malları (Hui ve Chao, 2006) ve katalizör olarak endüstriyel prosesler (Wang, 2008) alanlarındadır. Bununla birlikte, özellikle Çin ve Hindistan gibi büyük kömür rezervlerine ve kalkınma gereksinimlerine sahip ülkelerde ucuz enerji talebi arttıkça, uygun şekilde yönetilmediği takdirde ciddi çevresel ve halk sağlığı sonuçlarına yol açabilecek daha fazla uçucu kül üretilecektir (Lior, 2009). Bu nedenle, uçucu kül kullanım seçeneklerini genişletmek için araştırma ve geliştirmeye

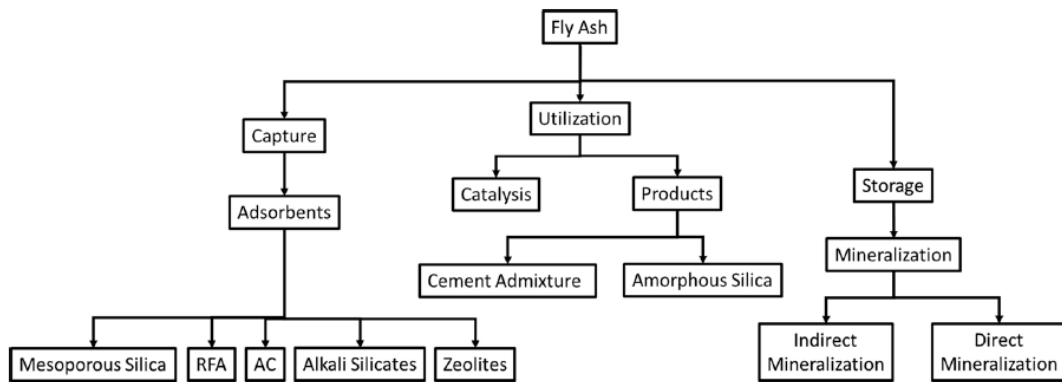
ihtiyaç vardır, çünkü bu daha yüksek kullanım oranlarıyla sonuçlanacak ve bertarafının zararlı çevresel etkilerini iyileştirecektir.

Uçucu kül, genellikle atık olarak değerlendirilir. Ancak, bu malzeme, CCUS değer zincirinin çeşitli aşamalarında kullanılabilir.

Özellikle, uçucu külün kimyasal özellikleri, CO₂'nin mineral karbonatlaşması süreçlerinde reaktif bir madde olarak kullanılmasına olanak tanır. Bu süreçte, CO₂, uçucu kül ile reaksiyona girerek stabil ve çevresel olarak güvenli karbonat mineralleri oluşturur. Bu yöntem, hem CO₂ emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlar hem de uçucu külün atık olarak depolanmasıyla ilgili çevresel sorunları minimize eder.

Ayrıca, karbonatlaşmış uçucu kül, inşaat sektöründe çimento ve beton üretiminde katkı maddesi olarak değerlendirilebilir. Bu uygulama, doğal kaynakların kullanımını azaltırken, inşaat malzemelerinin performansını da iyileştirebilir. Dolayısıyla, uçucu külün CCUS süreçlerinde kullanımı, ekonomik ve çevresel açıdan önemli avantajlar sunmaktadır.

Uçucu külün farklı uygulamalarda kullanımına yönelik çeşitli incelemeler yapılmış olsa da (Ahmaruzzaman, 2010; Blissett ve Rowson, 2012; Iyer ve Scott, 2001; Yao vd., 2015), bildiğimiz kadarıyla CCUS için kullanımına yönelik beş yıl önce yayınlanmış sadece bir inceleme mevcuttur (Yao vd., 2015). Uçucu külün CCUS'de uygulanmasına yönelik yolların bir şeması Şekil 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.15. CCUS'de uçucu kül uygulaması için yollar (Dindi vd., 2019).

Özetle, Uçucu kül, yapı sektöründe çimento ve beton üretiminde yaygın olarak kullanılan, puzolanik özelliklere sahip bir malzemedir. Doğru oranlarda ve uygulandığında, betonun özelliklerini olumlu yönde etkiler ve özellikle kimyasal

etkilere karşı dayanıklılığı artırır (Tankut, 2003). Uçucu kül, dünya genelinde baraj duvarları, köprü ayakları, maden dolgu enjeksiyonları, tarım alanlarında çatı bahçeleri, ağaçlandırma çalışmaları, otoyol, köprü, yol ve biriket yapımında, asfalt içinde dolgu maddesi, yol drenaj kanallarında çeşitli inşaat projelerinde kullanılmaktadır (Dunxi, 2003). Türkiye'de uçucu küllerin genel yapısı ve özellikleri üzerine yapılan çalışmalar, malzemenin çeşitli alanlarda kullanılabilecek kaliteli bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ancak, pratikte bu malzemenin tanınması ve kullanım alanlarına uygun şekilde değerlendirilmesi gerektiği konusunda yeterli farkındalık bulunmamaktadır. Bu nedenle, Türkiye'de uçucu küllerin teknik ve ekonomik yararlarına daha fazla önem verilmesi ve kullanımının artırılması önemlidir (Türkmenoğlu, 2010).

3.13. Karbondioksit yakalama, kullanma ve depolama teknolojileri (carbon capture, utilisation and storage–CCUS)

Küresel sıcaklık artışlarını, geri döndürülemez iklim değişikliğini önleme eşiği olan 2 °C'den fazla olmayacak şekilde sınırlandırmak için, 2010 emisyonları baz alınarak 2050 yılına kadar karbon emisyonlarında yüzde 40 ila 70 oranında küresel bir azalma gerekecektir (Global CCS Institute, 2015). Karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS), bu iddialı emisyon azaltma hedeflerine ulaşmak için küresel olarak düşünülen çözümler demetine önemli bir katkı olarak ortaya çıkmıştır (EnergyTechnologyPerspectives, 2014). CCUS, fosil yakıt bazlı enerji üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının azaltılmasında kilit bir rol oynayacaktır ve diğer endüstriyel noktasal kaynaklardan kaynaklanan doğrudan emisyonları önemli ölçüde azaltmak için mevcut tek seçenektir (Global CCS Institute, 2015). CCUS olmadan, CO₂ emisyonlarını bu yüzyılın sonuna kadar güvenli eşikte sınırlamanın maliyeti yaklaşık %138 oranında daha yüksek olacaktır (IPCC, 2014).

Bu arada, CCUS'un büyümesi, çoğunlukla yüksek maliyetleri ve birçok ülkedeki destekleyici olmayan politika ve düzenleyici çerçevelerin bir sonucu olarak çok yavaş bir hızda ilerlemeye devam etmektedir. Şu anda çeşitli geliştirme aşamalarındaki CCUS projelerinin toplam sayısı yaklaşık 45'tir ve bunların toplam kapasitesi yaklaşık 80 mtpa CO₂ yakalamak ve depolamaktır, bu arada iklim hedeflerini karşılamak için 2040 yılına kadar yılda yaklaşık 4000 mtpa CO₂'nin yakalanması ve depolanması gerekmektedir (Global CCS Institute, 2015). CCUS; Yakalama, Taşıma, Kullanım ve Depolama olmak üzere 4 unsurdan oluşmaktadır. Yakalama en pahalı kısımdır ve

CCUS'un toplam maliyetinin yaklaşık %75'ini oluşturmaktadır. Bu nedenle yakalama kısmı, maliyetin azaltılması için en büyük vaadi taşımaktadır ve çoğu araştırma çabasının odak noktasıdır, ancak geri kalan taşıma ve depolama kısımlarını gerçekleştirmenin daha ucuz yolları da incelenmektedir (Olajire, 2010).

Günümüzün en olgun yakalama teknolojisi olan geleneksel amin bazlı proses, yüksek enerji gereksinimleri nedeniyle büyük ölçekli CCUS'de doğrudan uygulama için pahalıdır. Yakalanan CO₂'nin taşınması, CO₂'nin depolanacağı yerin niteliğine bağlı olarak boru hatları veya kamyonlar aracılığıyla gerçekleştirilecektir. CCUS'un üçüncü bileşeni, yakalanan CO₂'den yakıt veya kimyasal madde üretimini içeren kullanımdır. Bunun temel faydası, CO₂ ürünlerinin satışından elde edilecek potansiyel gelir akışında yatmaktadır. Bu gelir, CCUS'un büyümesini engelleyen yüksek maliyetleri hafifletebilir. Gerçekten de, faaliyete geçen büyük ölçekli CCUS projelerinin çoğu, EOR ve üre üretimi gibi bir çeşit CO₂ kullanımına bağlıdır (Global CCS Institute, 2015). Bu gerçek, düşük enerjili yakalama teknolojilerinin geliştirilmesinin yanı sıra CCUS uygulamasının maliyetlerini azaltmanın bir yolu olarak potansiyel CO₂ kullanım yollarını keşfetme ihtiyacının temelini oluşturmaktadır. EOR gibi bazı kullanım seçenekleri CO₂'nin kalıcı olarak depolanmasına yol açsa da, CO₂ kullanımına yönelik küresel kapasite, 2 °C senaryosundaki iklim hedeflerine ulaşmak için depolanması gereken miktardan çok daha azdır (Aresta, 2013; Aresta, 2010). Bu nedenle jeolojik depolama, önümüzdeki yıllarda büyük miktarlarda yakalanan CO₂'nin kalıcı olarak tutulması için hala en uygun yoldur.

CO₂ yakalama maliyetini düşürme çabaları, katı adsorpsiyon gibi daha yeni, daha az enerji yoğun yakalama teknolojilerinin geliştirilmesini içermektedir. Bu, yakın vadede yakalama maliyetlerini yaklaşık %20-30 oranında azaltması beklenen ikinci nesil CO₂ yakalama teknolojilerinden biridir (Magneschi, 2015; Samanta vd., 2012; Wang vd., 2014; Nelson vd., 2014). Geleneksel sulu amin prosesine göre çeşitli avantajları vardır ve bunlardan en önemlisi daha düşük enerji gereksinimidir (Quang vd., 2013, Quang vd., 2015; Bahamon vd., 2018). Bunun nedeni, amin sistemlerinin aksine, rejenerasyon sırasında yoğun enerji gerektiren yığın sıvı çözücünün olmaması ve katı sorbent sistemlerinin korozyondan etkilenmemesi ve baca gazı kirleticilerine karşı sulu sistemlerden daha yüksek direnç göstermesidir (Wang vd., 2014; Dutcher vd., 2015; Goto vd., 2013). Geçtiğimiz yıllarda, CO₂ yakalama uygulamaları için çok sayıda

adsorban geliştirilmiştir. Bunlar arasında aktif karbonlar, zeolitler, ZIF, MOF'lar, amin içeren mezogözenekli malzemeler, metal oksit karbonatlar, perovskitler, hidrotalsitler ve klatrat hidratlar gibi gözenekli malzemeler bulunmaktadır. (Samanta vd., 2012, Wang vd., 2014; Choi vd., 2017). Bu sorbentler, fiziksel veya kimyasal adsorpsiyon modlarına göre veya adsorpsiyon sıcaklık aralığına göre sınıflandırılabilir. Fiziksel adsorbanlar CO₂'yi zayıf moleküller arası çekim yoluyla yakalar ve genellikle düşük sıcaklıklarda çalıştırılır. En önde gelen fiziksel sorbentler arasında aktif karbonlar, zeolitler ve MOF'lar bulunur. Yüksek yüzey alanına sahip fiziksel adsorbanlar genellikle basınç salınlı adsorpsiyon veya vakum salınlı adsorpsiyon için daha uygundur. Kimyasal adsorbanlar CO₂'yi güçlü kovalent bağlarla bağlayarak yüksek adsorpsiyon ısısına neden olur. Genellikle baca gazı gibi düşük basınçlı ve seyreltik CO₂ akışları için uygundur ve sıcaklık salınlı adsorpsiyon proseslerinde kullanılırlar. Bu sorbentlerin performansları çeşitli kapsamlı incelemelerde özetlenmiştir (Samanta vd., 2012, Wang vd., 2014; Olajire, 2017). CO₂ yakalama sorbentleri için temel özellikler şunlardır: yüksek CO₂ adsorpsiyon kapasitesi, hızlı kinetik, yüksek CO₂ seçiciliği, rejenerasyon için hafif koşullar, kapsamlı adsorpsiyon-desorpsiyon döngüsü sırasında stabilite, beslemedeki nem ve diğer safsızlıkların varlığına tolerans, kullanılabilirlik ve düşük maliyet (Sayari, 2011).

Cazip enerji tasarrufu potansiyellerine rağmen, çeşitli dezavantajlar CO₂ yakalama için katı sorbentlerin büyük ölçekte benimsenmesini engellemektedir. Bunlar fiziksel sorbentler için düşük CO₂ kapasitesi, zeolitler için su veya diğer kirleticiler tarafından kolay bozulma, aktif karbon için zayıf seçicilik ve MOF'lar, MCM-41 ve SBA-15 silika gibi gelişmiş sorbent malzemeleri için yüksek hazırlama maliyetinden oluşmaktadır (Wang vd., 2011). CCUS teknolojisinin kullanılacağı büyük ölçek nedeniyle, ideal CO₂ yakalama sorbenti ucuz, yenilenebilir ve yaygın olarak bulunabilir olmalıdır. Patel ve arkadaşları, böyle bir sorbentin geleneksel amin solvent sistemleriyle rekabet edebilmesi için en fazla 10 \$/kg'a mal olması gerektiğini tahmin etmektedir (Patel vd., 2016).

Son derece seçici ve verimli malzemeler aramanın yanı sıra, sorbent maliyetlerini düşürmeye yönelik araştırma faaliyetlerinin çoğu atık malzemelerden sentezlemeye odaklanmıştır. Halihazırda üretilen büyük miktarda katı atık ve düzenli depolamanın neden olduğu çevre kirliliği sorunları göz önüne alındığında, adsorbanların sentezi için

katı atıkların kullanılması olumsuz çevresel etkilerini iyileştirebilir (Choi vd., 2009; Jaffe, 2015). Bu malzemeler doğrudan CO₂ yakalama için uygulanabilir veya aktif karbon, mezogözenekli silika, zeolitler vb. gibi geleneksel sorbentler için öncü olarak kullanılabilir. Potansiyel CO₂ yakalama adsorbanları olarak önerilen atık malzemeler arasında tarımsal atıklar, uçucu kül, plastikler ve yumurta kabukları bulunmaktadır. (Olivares-Marin ve Maroto-Valer, 2012; Kaithwas vd., 2012). Bunlar arasında uçucu kül, göreceli bolluğu ve uygulama yerinde üretildiği için minimum lojistik gereksinimleri nedeniyle en cazip olanıdır. Ayrıca, uçucu külün CO₂ yakalama veya depolama için kullanılması nedeniyle arıtma ve bertaraf maliyetlerinin azaltılması açısından tesis işletmecisine doğrudan fayda sağlamaktadır (Wee, 2013).

3.13.1. CO₂'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri

CO₂, kimyasal formülü CO₂ olan bir bileşiktir ve her biri iki oksijen atomuna kovalent olarak bağlı bir karbon atomundan oluşan molekülleri içerir. Atmosferdeki karbon döngüsünde önemli bir rol oynayan CO₂, yaşam için temel bir karbon kaynağıdır. Gaz fazında renksiz olan CO₂, kızılötesi radyasyonu emerek sera gazı etkisi yapar. CO₂, suda çözünerek karbonat ve bikarbonat gibi bileşiklere dönüşür, bu da okyanus asidifikasyonuna katkıda bulunabilir (National Academies, 2010).

Moleküler yapısı doğrusal ve sentrosimetrik olan CO₂, simetrisinden dolayı elektrik dipol momentine sahip değildir. Karbon-oksijen bağının uzunluğu 116,3 pm'dir ve diğer C-O çoklu bağlı gruplardan daha kısadır (Greenwood ve Earnshaw, 1997). Gaz fazında CO₂ molekülleri, titreşimsel hareketlere maruz kalarak sabit bir yapı göstermez. Gazın Coulomb patlama görüntüleme deneyi ve teorik hesaplamalara dayanan sonuçlar, gaz fazındaki moleküllerin tamamen doğrusal olmadığını ortaya koymaktadır (Siegmann vd., 2002; Jensen, Spanner ve Bunker, 2020).

CO₂, düşük konsantrasyonlarda kokusuzdur, ancak yüksek konsantrasyonlarda keskin, asidik bir koku yayabilir. Standart sıcaklık ve basınçta yoğunluğu 1,98 kg/m³ olan CO₂, gaz halinde atmosferik havadan daha ağırdır (EngineeringToolbox, 2006).

Gaz fazında CO₂'nin sıvı hali belirli basınçlarda oluşur; 0,51795(10) MPa üzerindeki basınçlarda sıvı hale gelir. CO₂'nin üçlü noktası 0,51795(10) MPa basınç ve 216,592(3) K sıcaklıkta bulunur. Ayrıca, CO₂'nin yüksek basınç altında amorf bir cam formu olan karbonyumun keşfi, element ailesinin diğer üyeleri gibi cam hallerde var olabileceğini göstermiştir (Santoro vd., 2006). Bu cam, normal basınçta kararlı

değildir ve serbest bırakıldığında gaz haline dönüşür. Bu özellikleri ile CO₂, süperkritik koşullarda süperkritik bir sıvı gibi davranabilir (Span ve Wagner, 1996).

Fosil yakıtların yanması sonucunda atmosfere salınan CO₂, küresel ısınmanın ana nedenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır (Thurston, 2017). Atmosferdeki CO₂ miktarının sürekli artışı, doğal sera gazı etkileşimini bozmakta ve gezegenimizin iklimini olumsuz yönde etkilemektedir (Liu et al., 2020). 2015'te Paris Anlaşması ile küresel sıcaklık artışını 2°C'nin altında tutma hedefi belirlenmiş ve CO₂ emisyonlarının azaltılması önemle vurgulanmıştır (IPCC, 2014; Seneviratne et al., 2016).

Ancak, küresel ekonomik büyüme ve enerji talebindeki artış, fosil yakıtların önemini sürdüreceğini göstermektedir. Alternatif enerji kaynaklarındaki ilerlemelere rağmen, biyokütle, güneş ve rüzgâr gibi seçenekler henüz tam anlamıyla fosil yakıtların yerini alamamıştır. Bu durum, kömür ve diğer fosil kaynaklara olan bağımlılığın devam edeceğini göstermektedir (Lackner, 2003; Song, 2006; Keith, 2009; Lackner et al., 2012; IPCC, 2014; Sanz-Pérez et al., 2016).

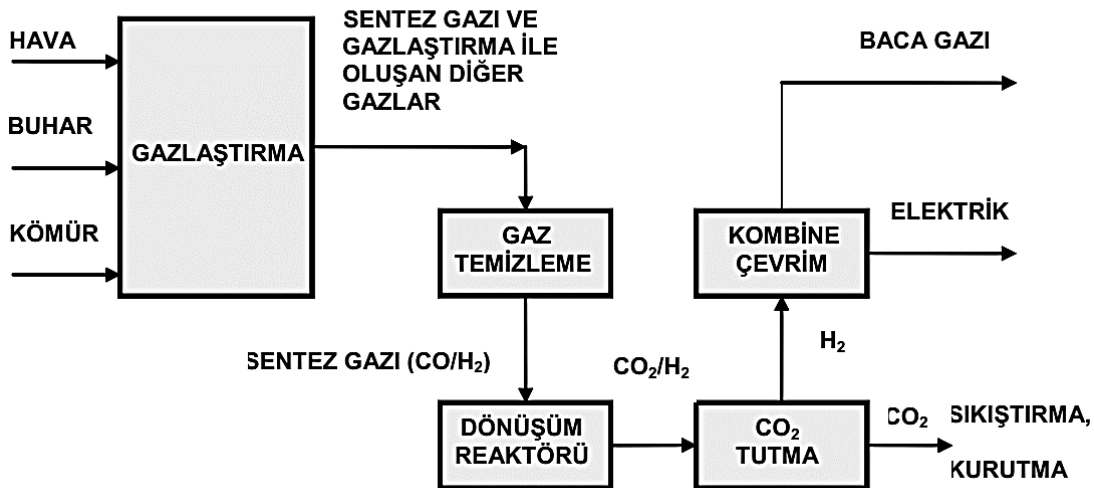
Bu nedenle, CO₂ emisyonlarını azaltmak için stratejiler geliştirme ve uygulama konusundaki çabalar artmaktadır. Yüksek CO₂ emisyonlarına sahip sabit kaynaklardan (örneğin, kömürle çalışan enerji santralleri ve imalat sanayileri) gelen emisyonları kontrol etmek için teknolojik çözümlere odaklanmak, çevresel sorunları hafifletmek adına önemli bir adım olabilir (Lee et al., 2014). Bu bağlamda, CO₂ yakalama ve depolama (CCS) teknolojileri, gelecekte atmosferik CO₂ miktarını azaltma potansiyeline sahip önemli araştırma alanları olarak dikkat çekmektedir.

3.13.2. CO₂ yakalama teknolojileri

Kömürlü termik santrallerde, kirli gazdan CO₂'nin uzaklaştırılması, sera gazı emisyonlarını azaltma ve çevre kanunlarındaki limitlere uyum sağlama açısından kritik bir teknolojidir. CO₂'nin yakalanması için alkanolamin veya karışımları gibi sulu solventlerle absorpsiyon/ayırma yöntemi, önemli bir alternatiftir (Ziaei vd., 2009).

Bu temel prosesin patenti 1930'da alınmış olup, termik santrallerde CO₂ tutma konusunda hakim teknoloji olması 2030'a kadar beklenmektedir (Rochelle, 2009). Temiz kömür teknolojileri, verim artışı ve CO₂ tutma-depolama (CCS) sistemlerine odaklanarak gelişmiştir. Özellikle süperkritik ve ultra-süperkritik teknolojilere sahip

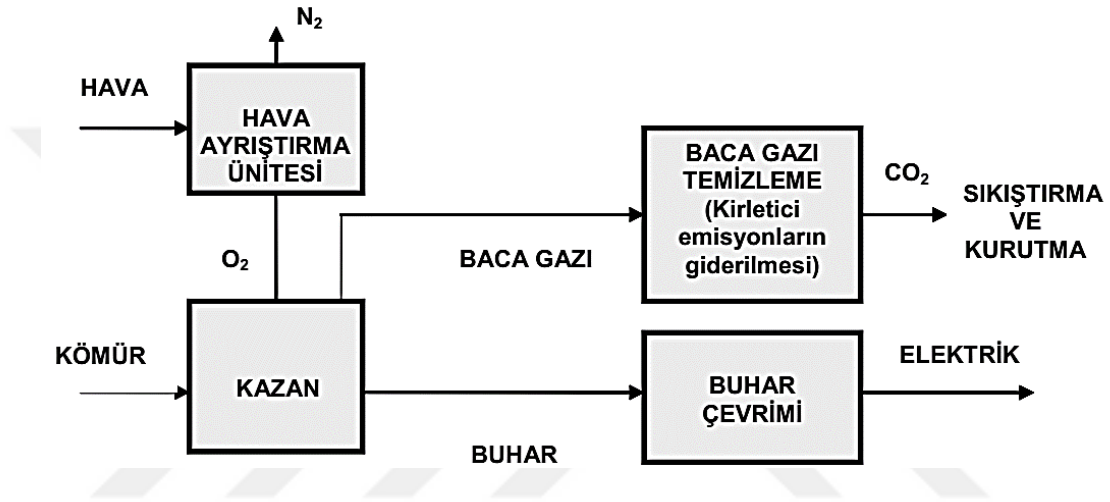
- Yakma sonrası yakalama süreçleri, tozlaştırılmış kömürlü termik santrallerden doğal gaz yakıtlı kazanlara kadar çeşitli uygulama alanlarında kullanılabilir (Rubin vd., 2012). Bu süreçte, baca gazındaki CO_2 , amin çözeltisiyle tutulur ve ardından rejeneratöre gönderilerek serbest hale getirilir (Şekil 3.16). Ancak, yakma sonrası tutum süreçlerinin büyük ölçekte uygulanabilirliği henüz tam olarak kanıtlanmamıştır. Yüksek sermaye ve enerji talepleri, ayrıca çözücü bozunumu gibi zorluklar hala çözülmeyi bekleyen konulardır. Gelecekte yakalama teknolojilerine olan talep ve toplumsal baskının artmasıyla bu alanda teknolojik gelişmelerin yaşanması muhtemeldir (Adams ve Davison 2007).
- Yakma öncesi yakalama, gaz türbin kombine çevrimlerinde kullanılan bir teknolojidir (Şekil 3.17). Bu yöntemde, yakıt hava veya oksijen ile reaksiyona sokularak CO ve hidrojen içeren bir karışım elde edilir. Selexol gibi ticari çözücüler kullanılarak CO_2 ayrıştırılır, bu da CO_2 tutumunu mümkün kılar. Hidrojen ise gaz türbin kombine çevrimde yakıt olarak kullanılır. Doğal gaz veya kömür yakıtlı santrallerde uygulanabilen bu teknoloji, gazlaştırma üniteli kombine çevrimde önemli bir rol oynar. Gazlaştırma, fosil yakıtların gaz formuna dönüştüğü bir süreçtir ve CO_2 ayrımı için uygun bir seçenek sunar. Ancak, yakma öncesi yakalama teknolojisi, büyük sermaye ve enerji yatırımı gerektirir (Rubin vd., 2012; Adams ve Davison 2007).



Şekil 3.17. Yanma öncesi karbon tutma teknolojisi (DEK-TMK, 2010).

- Oksijenli yakma sistemleri, hava yerine saf oksijen kullanarak sera gazı salınımını büyük ölçüde azaltma potansiyeli sunar (Şekil 3.18). Ancak, henüz

ticari olarak yaygın bir kullanım alanına sahip olmayan bu teknoloji, yüksek oksijen üretim maliyetleri nedeniyle zayıflıklarını ortaya koymaktadır (Rubin vd., 2012; Adams ve Davison 2007). Oksijenli yakma, hava yerine oksijen kullanılması dışında konvansiyonel yanma sistemlerine benzer ve baca gazı genellikle su buharı ve CO₂ içerir. Su buharı kolayca uzaklaştırılabilir, böylece neredeyse saf CO₂ tutulabilir. Oksijenli yakmada, yakalama için özel cihazlara gerek olmamakla birlikte, yüksek saflıkta oksijen üretmek için hava ayırma ünitesine ihtiyaç duyulmaktadır (Rubin, 2008).



Şekil 3.18. Oksi-yakıt yakma teknolojisi (DEK-TMK, 2010).

3.13.3. CO₂ depolama yöntemleri

CO₂'nin depolanması için çeşitli yöntemler araştırılmıştır. Bazalt oluşumları içine CO₂ enjeksiyonu, jeotermal enerji santrallerinin çıkardığı CO₂'nin atmosfere salınmadan kullanılması ve karbon mineralizasyonu gibi yöntemler üzerinde çalışılmıştır (Matter et al., 2009). Ayrıca, yüksek basınç ve sıcaklık altında kayalar üzerinde yapılan çalışmalar, CO₂'nin yeraltında depolanması için yeni veriler sağlamıştır (Jessen et al., 2005; Whiteside et al., 2007; Schaef et al., 2009).

Fosil yakıtlı güç santrallerinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının yakalanarak yeraltındaki kayalara depolanması, küresel ısınmayı önleme potansiyeli taşır. Ancak, bu teknolojilerin maliyetleri ve enerji harcaması konusundaki sorunlar dikkate alınmalıdır (Kent et al., 2008). Karbon yakalama ve depolama tekniklerinin yanı sıra, denizlerde oluşturulan küçük kabarcıklı ortamlar ve jeotermal enerji santralleriyle üretilen metanol gibi alternatif yaklaşımlar da incelenmektedir (Rochelle et al., 2004; Oelkers et al., 2008).

Ancak, CO₂ emisyonlarının atmosfere salındıktan sonra temizlenmesinin maliyetiyüksek olabilir ve enerji harcaması gerekebilir. Bu konuda yapılan araştırmalar, karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin, fosil yakıtlı tesislerden çevreye salınan CO₂'yi azaltma potansiyeline sahip olduğunu göstermekle birlikte, enerji maliyetlerinin ve ekonomik zorlukların göz önünde bulundurulması gerektiğini vurgulamaktadır (Assayag et al., 2009; House et al., 2011).

3.13.4. CO₂'nin yeniden kullanım alanları

CCS (CarbonCaptureand Storage) ile elde edilen ve konsantre hale getirilen karbon dioksitin verimli bir şekilde kullanılmasıyla öne çıkan CCUS (CarbonCapture, Utilization, and Storage) kavramı, çeşitli sektörlerde finansal, çevresel ve sosyal avantajlar sunmaktadır. CCUS teknolojisinin uygulanması, yakalanan karbon dioksitin arttırılmış petrol geri kazanımı (EOR), petrol ve doğal gaz endüstrisi, gıda işleme, çelik imalatı, kimya endüstrisi, yangın söndürme sistemleri gibi geniş bir yelpazede kullanılmasına olanak tanır. Bu çok yönlü kullanım alanları, sadece çevresel sürdürülebilirliği değil, aynı zamanda ekonomik ve toplumsal kazanımları da beraberinde getirir (Zhang vd., 2020).

3.14. CCUS Konusunda Yapılmış Yurt İçi ve Yurt Dışı Çalışmalar

Middleton ve Bielicki (2009), CCS altyapı modelini karma tamsayılı doğrusal program (MILP) kullanarak geliştirerek, nerede ve ne kadar CO₂'nin yakalanıp depolanacağını ve boru hatlarının farklı boyutlarda nereye kurulacağını belirlemişlerdir.

Markewitz vd. (2012), CCS altyapı modelini MILP ile oluşturarak CO₂'nin yakalanıp depolanacağı yerleri ve boru hatlarının optimal konumlarını belirlemiştir.

Han vd. (2012), enerji altyapısı için ekonomik ve çevresel zorlukları ele almak üzere iki aşamalı bir tasarım stratejisi önermiş ve CCS tesislerinin kurulumu ile yenilenebilir enerji sistemlerinin hızlandırılması arasındaki dengeyi ele almıştır.

Huang vd. (2013), karbon yakalama ve depolamanın teknik ve ekonomik analizine odaklanarak matematiksel programlama modelleri kullanmış ve CCS'nin üç ana bileşeni olan yakalama, taşıma ve depolama konularını ele almıştır.

Lee vd. (2014), enerji santrallerini güçlendirmek için karmaşık tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirerek CO₂ yakalama ve depolama planlamasını ele almışlardır.

Lee vd. (2017), iki aşamalı stokastik bir karar verme algoritması kullanarak CCS ağının tasarımını ve işletilmesini ele almış ve çok amaçlı karma tamsayılı programlama modelini kullanarak en uygun planı ve değerlendirme yöntemini sağlamışlardır.

Zhang vd. (2018), Çin'deki CCUS ağını optimize etmek için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli önermiş ve CO₂'nin yeniden kullanım alanlarından elde edilen geliri de hesaba katmışlardır.

Kim vd. (2018), optimal bir CCS boru hattının geliştirilmesi için belirsiz depolama kapasitesi ve politika koşullarını içeren karma tamsayılı doğrusal olmayan bir model geliştirmişlerdir.

d'Amore ve ekibi (2018), karbon yakalama, taşıma ve jeolojik depolama için Avrupa'da ekonomik optimizasyonu amaçlayan bir karma tamsayılı doğrusal programlama (MILP) modeli önermişlerdir. Bu çalışma, toplumsal risk analizini de içeren ilk çalışma olup, Avrupa'nın karbon tedarik zincirini optimize etmeyi hedeflemiştir.

Jarvis ve Samsatli (2018), karbon yakalama ve depolamaya ek olarak, CO₂'nin iklim değişikliğini hafifletme ve kaynak verimliliğini artırma stratejilerine odaklanmışlardır. Çeşitli CO₂ dönüştürme teknolojileri ve temel kaynakların taşınması ve depolanması için gerekli teknolojileri karşılaştırarak, CO₂'den değerli ürünlerin üretimi için güçlü bir değer zinciri oluşturulmasının önemini vurgulamışlardır.

Pieri ve ark. (2018), teknik ve ekonomik olarak uygulanabilir CCU değer zincirlerini optimize etmek için bütünsel bir yaklaşımın ele alınmadığına dikkat çekmişlerdir. CCU değer zincirlerini simülasyon veya optimizasyona odaklanan mevcut yöntemleri eleştirel bir şekilde incelemişlerdir.

Ağralı ve ekibi (2018), Türkiye'deki kömürlü termik santrallerin karbon yakalama birimlerinin optimal kapasite ve konumlarını belirlemek için bir MILP modeli geliştirmişlerdir. Model, karbon yakalama ünitesinin kurulumu, işletilmesi, karbonun taşınması ve depolanması ile ilgili maliyetleri en aza indirmeyi amaçlamaktadır.

Zhang ve ark. (2019), karbon vergisi belirsizliğini göz önünde bulundurarak CO₂ azaltımının toplam maliyetini en aza indirmek için iki aşamalı stokastik bir MILP modeli önermişlerdir.

Leonzio ve ekibi (2019), Almanya'daki on ana CO₂ emisyon kaynağı için bir karma tamsayılı doğrusal program modeli geliştirmişlerdir, bu model CO₂'nin metanol üretimi için depolanabilir ve/veya kullanılabilir olduğu bir tedarik zincirini içermektedir.

Ayrıca, İtalya'nın bölgeleri için CCUS tedarik zincirleri için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştiren Leonzio ve Zondervan (2020a), depolama alanları ve CO₂'nin metan üretimi alanlarını da içermiştir.

Leonzio ve ekibi (2020b), İtalya, Almanya ve Birleşik Krallık'taki CCUS tedarik zincirlerini optimize etmek için iki aşamalı bir stokastik MILP modeli geliştirmişlerdir.

Huang ve ark. (2019), Çin kömür kimyası endüstrisinde CO₂ emisyonlarını azaltmak ve ekonomik büyümeyi sürdürmek için karbon emisyonunu azaltan teknolojilerin değerlendirmesi için doğrusal olmayan programlama önermişlerdir.

Quarton ve Samsatli (2020), CCUS ve hidrojen teknolojilerinin enerji sistemi içindeki rolünü değerlendirmek için entegre değer zincirlerini modellemek ve optimize etmek amacıyla bir çerçeve geliştirmişlerdir.

Zhang ve ekibi (2020), CCUS tedarik zincirinin ekonomik ve çevresel faktörlerini ele alan bir çerçeve geliştirmiş ve CCUS'un yerleştirilmesinde daha sürdürülebilir alternatiflere rehberlik etmeyi amaçlamışlardır.

d'Amore ve ekibi (2021a), Avrupa genelinde karbon yakalama, taşıma, kullanım ve depolama tedarik zincirlerinin minimum maliyetle en iyi tasarımını belirlemek için karma tamsayılı doğrusal programlama kullanmışlardır.

d'Amore ve ark. (2021b), Avrupa bağlamında CCUS tedarik zincirlerinin tasarımı için bir optimizasyon çerçevesi önermiş ve kapsamlı CCUS sistemlerinin coğrafi ölçekte optimum tasarımına yönelik öngörüler sağlamayı amaçlamışlardır.

Niazvand ve ekibi (2021), elektrik fiyatı ve rüzgar türbini çıkış gücü gibi belirsiz parametreleri içeren bir model geliştirerek, karbon yakalama kullanımı ve depolama

(CCUS) teknolojisinin senaryo tabanlı bir değerlendirme stratejisi sunmuşlardır. Model, CCUS teknolojisinin kullanılmasıyla planlama ufukları boyunca maliyet ve kirliliğin etkili bir şekilde azaltılabileceğini göstermiştir.

Balaji ve Rabiei (2022), ABD'nin Kuzey-Orta bölgesindeki potansiyel CO₂ kaynak ve depoları arasındaki boru hattı rotalarını haritalamak ve optimize etmek için karma tamsayılı bir model önermiştir.

Bjerketvedt ve ekibi (2022), Norveç endüstrilerinden kaynaklanan karbonun yakalanması ve depolanması için bir nakliye altyapısının zaman içindeki dağıtımını araştırmıştır. Çalışmalarında taşıma zincirinin tasarımı ve genişletilmesine odaklanarak çok dönemli bir karma tamsayılı model geliştirmişlerdir.

Becattini ve ark. (2022), karbon yakalama, taşıma ve depolama tedarik zincirlerinin optimal tasarımını ele alarak, 25 yıllık bir zaman ufku boyunca emisyon azaltma yollarına uyum sağlayan ekonomik ve çevresel düzenlemeleri içeren çok amaçlı bir karma tamsayılı doğrusal program modeli sunmuşlardır.



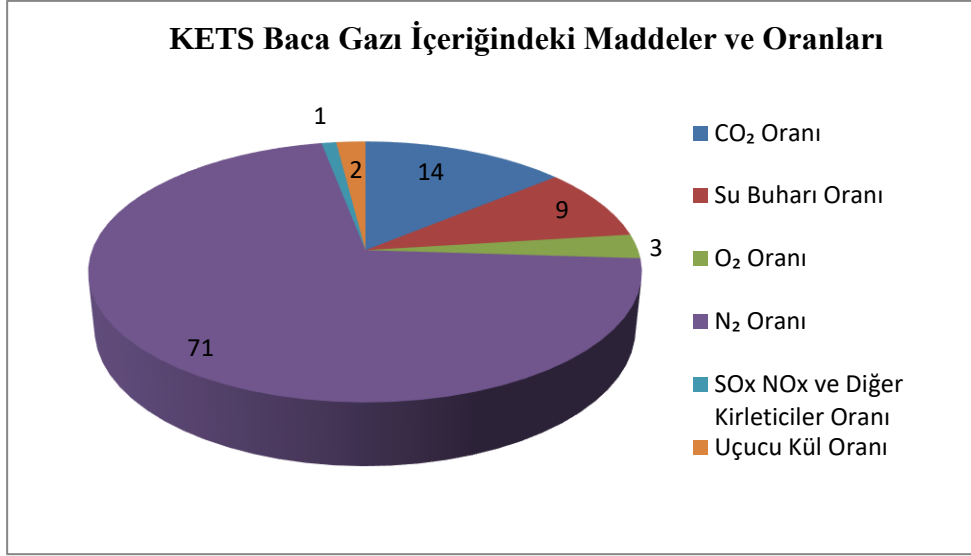
4. MATERYAL METOD

Çalışma konusu olan tesis, her biri 150 MW kurulu güce sahip iki üniteden oluşan, toplam 300 MW kurulu güç kapasitesine ve 2000 GW yıllık üretim potansiyeline sahip bir termik santraldir. Çalışmanın bundan sonraki bölümlerinde, söz konusu tesis için 'KETS' (Kabul Edilen Termik Santral) kısaltması kullanılacaktır. KETS'in teknik parametreleri, bu kapasitedeki termik santraller için kabul gören sektörel ortalama değerler baz alınarak belirlenmiştir. Bu santrale ait hesaplamalarda kullanılan veriler Tablo 4.1'de gösterilmektedir.

Tablo 4.1. KETS'e ait özellikler.

Kurulu Güç	300 MW
Yıllık Üretim Kapasitesi	2000 GW
Kızgın buhar sıcaklığı	540 °C
Besleme suyu kütleli debisi ($\dot{m}_{\text{besleme suyu}}$)	313 kg/s
Baca Gazı Sıcaklığı	95 °C
Baca Gazı Hızı	95 m/s
Baca gazı debisi	400 m ³ /s
Baca Gazı CO ₂ oranı (%)	14
Baca Gazı O ₂ oranı (%)	3
Baca Gazı SO _x , NO _x ve diğer kirleticiler oranı (%)	1
N ₂ oranı (%)	71
Baca Gazı Su Buharı oranı (%)	9
Baca Gazı Uçucu Kül oranı (%)	2

Tablo 4.1'deki KETS baca gazı içeriğindeki maddelerin oranları ve Şekil 4.1'de görülen grafik, taş kömürü kullanan termik santrallerin baca gazı içeriklerine dayanılarak oluşturulmuş ve ortalama değerler dikkate alınarak hazırlanmıştır. Bu oranlar, fosil yakıtların yanması sonucu oluşan gaz karışımının temel bileşenlerini ortaya koymaktadır.



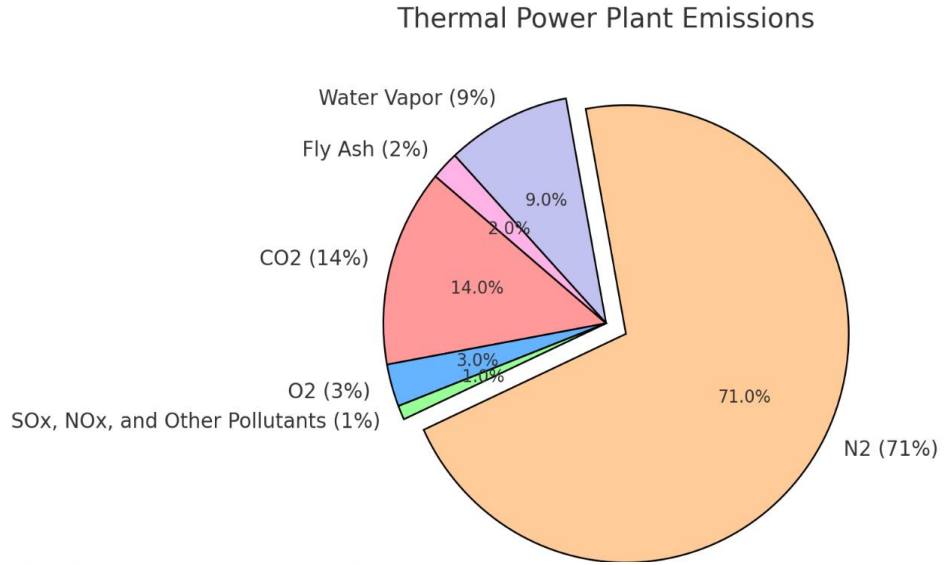
Şekil 4.1. KETS baca gazı içeriğindeki maddeler ve oranları.

KETS baca gazının toplam hacimsel debisi 400 m³/s olarak kabul edilmiştir (Tablo 4.1). Bu baca gazı içerisinde bulunan her bir bileşenin oranlarına dayalı olarak, ayrı ayrı hacimsel debileri belirlenmiş ve yıllık bazda atmosfere salınan hacimleri detaylı olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, KETS'ten çıkan emisyonların bileşimini ve miktarlarını analiz etmek için temel bir referans sağlamaktadır (Tablo 4.2).

Tablo 4.2. KETS bacasından atmosfere salınan maddelerin hacimsel debilerine göre yıllık miktarları(m³/yıl).

Madde	Hacimsel Debi (m ³ /yıl)
N ₂	8.956.224.000
CO ₂	1.766.016.000
O ₂	378.432.000
Su Buharı	1.135.296.000
Uçucu Kül	252.288.000
SOx, Nox, Uçucu Organik Bileşikler vb.	126.144.000
TOPLAM	12.614.400.000

Tablo 4.2'de sayısal değerleri verilen analiz sonuçlarına göre, KETS'ten kaynaklanan baca gazı emisyonlarının bütünleşik dağılımı Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. KETS bacasından atmosfere salınan maddelerin hacimsel debilerine göre oranları

Şekil 4.2'deki grafik incelendiğinde emisyon kompozisyonunda hakim bileşen olarak N₂'nin, toplam hacimsel konsantrasyonun %71'ini teşkil ettiği görülmektedir. Bu yüksek N₂ konsantrasyonu, atmosferik havanın majör bileşeni olan moleküler N₂ yanma prosesine dahil olmasından kaynaklanmaktadır. Spesifik olarak, yanma reaksiyonlarında oksidan olarak kullanılan atmosferik hava, içerdiği yüksek N₂ oranı sebebiyle, yanma ürünlerinin kompozisyonunda da benzer şekilde yüksek N₂ konsantrasyonuna yol açmaktadır. Moleküler N₂, kimyasal olarak inert karakterde olmasına rağmen, yanma prosesi esnasında oluşabilecek NO_x'ler gibi reaktif türevleri, çevresel etki değerlendirmesi açısından kritik önem arz etmektedir

CO₂ emisyonları, toplam emisyonların %14'ünü oluşturarak ikinci sırada yer almaktadır. Bu, fosil yakıtların yanması sonucu atmosfere salınan başlıca sera gazıdır ve iklim değişikliği üzerindeki etkisi nedeniyle büyük çevresel sorunlar yaratmaktadır. Termik santrallerde karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojilerinin uygulanması, bu oranın azaltılması için önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Emisyonların %9'luk kısmını teşkil eden su buharı (H₂O), yanma prosesinde meydana gelen nem içeriğinin buharlaşması ve hidrojen bileşenlerinin oksidasyonu neticesinde oluşmaktadır. Su buharı emisyonu, termik santral operasyonlarındaki yanma proseslerinin kaçınılmaz bir sekonder ürünü olarak ortaya çıkmaktadır. Her ne kadar konvansiyonel olarak pasif bir bileşen şeklinde değerlendirilse de, atmosferik dinamikler üzerindeki potansiyel etkileri analiz gerektiren bir parametre olarak önem

arz etmektedir. Su buharının atmosferde kalma süresinin kısa olmasına rağmen, önemli bir radyatif zorlama potansiyeline sahip olması, sera gazı etkisi bakımından dikkat çekicidir. Yüksek konsantrasyonlarda atmosfere deşarj edildiğinde, bölgesel termal dengeleri değiştirerek lokal sıcaklıklarda artışa sebebiyet verebilmektedir. Buna ilaveten, su buharının bulut oluşumunu tetikleme, planetar albedo ve yağış rejimlerinde değişimlere yol açabilmektedir. Bu sebeple, su buharı emisyonlarının çevresel etkileri ihmal edilmemeli ve bilhassa yoğun emisyon kaynaklarının bulunduğu lokasyonlarda sistematik olarak takip edilmelidir.

Toplam emisyonların %2'sini oluşturan uçucu kül (fly ash), katı yakıtların termokimyasal dönüşümü sonucu ortaya çıkan ve baca gazı arıtma sistemleri vasıtasıyla tutulması elzem olan partiküler bir bileşendir. Söz konusu kül fraksiyonu, uygun yönetim protokolleri uygulanmadığı takdirde, atmosferik kirliliğe ve halk sağlığı üzerinde zararlı etkilere neden olmaktadır.

Son olarak, toplam emisyonların %1'ini oluşturan SO_x, NO_x ve uçucu organik bileşikler gibi kirleticiler, çevresel ve sağlık açısından en zararlı bileşenler arasında yer almaktadır. Özellikle, sülfür oksitler (SO_x) ve NO_x'ler, asit yağmurlarına ve hava kalitesinde önemli bozulmaya neden olmaktadır. Bu tür bileşenlerin kontrol altına alınması için baca gazı arıtma teknolojileri büyük önem taşımaktadır.

Bu analiz, termik santrallerden kaynaklanan baca gazı emisyonlarının hem miktar hem de çevresel etkileri açısından ele alınması gerektiğini göstermektedir. Emisyon oranlarının azaltılması ve yönetimi, sürdürülebilir enerji üretimi ve çevre koruma hedeflerine ulaşmak için kritik öneme sahiptir.

4.1. Hesaplamalarda Kullanılan Denklemler

Arıtılmış baca gazı (ABG) ve bunun içerisinde yer alan CO₂, N₂ ve su buharı gibi bileşenlerin kütleli debileri, Denklem 1 ile hesaplanmıştır. Denklem, ABG'nin toplam hacimsel debisi ve bileşenlerin yoğunluklarına dayalı olarak kütleli debilerin belirlenmesini sağlamaktadır. Bu hesaplamalar, sistemde yer alan her bir bileşenin enerji ve kütle dengesi analizinde doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için temel teşkil etmektedir. Bu yöntem, hem sistemin tasarımında hem de süreçlerin simülasyonunda kritik bir veri seti oluşturarak, analitik doğruluğun artırılmasına olanak tanımaktadır.

$$\dot{m} = \dot{v}\rho \quad (\text{Denklem 1})$$

ABG içerisinde gaz fazında bulunan CO₂ hacmi, “İdeal Gaz Yasası” denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. İdeal Gaz Yasası, ABG içerisindeki gazların termodinamik özelliklerinin analizi ve sistem tasarım süreçlerinde temel bir hesaplama aracı olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem, CO₂’nin belirli bir sıcaklık ve basınç altında sahip olduğu hacmin doğru bir şekilde belirlenmesine olanak tanımaktadır. Denklem, gazın fiziksel özellikleri arasındaki ilişkiyi tanımlamak için kullanılmakta olup şu şekilde ifade edilmektedir:

$$PV = mRT \quad (\text{Denklem 2})$$

ABG’nin 368 K sıcaklık ve 331,43 kg/s kütleli debi koşullarında, CO₂’in kritik sıcaklık değeri olan 304 K (31°C)’e soğutulabilmesi için gerekli olan sıvı-gaz faz değişimi yapan CO₂’in kütleli debisi, Termodinamiğin Birinci Yasası (Enerjinin Korunumu İlkesi) kullanılarak hesaplanmıştır (Denklem 3). Söz konusu faz değişimi yapan CO₂’in sıcaklığı 216,6 K (-56,4°C) olarak belirlenmiştir.

Bu denklem, baca gazından CO₂’ye aktarılan enerjiyi hesaplayarak, baca gazının hedef sıcaklığa soğutulabilmesi için gereken CO₂ miktarını belirlemektedir. Hesaplama, enerji dengesinin korunmasına dayanarak, iki akışkan arasındaki ısı transferini modellemektedir. Bu yöntem, termodinamik analizler ve enerji yönetimi süreçleri için kritik bir yaklaşım sunmaktadır.

$$\dot{m}_{ABG} \times C_{pABG} \times (T_g - T_{\check{c}}) = \dot{m}_{CO_2} \times C_{pCO_2} \times (T_{\check{c}} - T_g) \quad (\text{Denklem 3})$$

Tasarlanan sistemde, çürük buharın yoğunlaştırılması için gerekli CO₂ kütleli debisi, Termodinamiğin Birinci Kanunu olan Enerjinin Korunumu Kanunu temel alınarak hesaplanmıştır. Bu denklemler, çürük buharın yoğunlaşması sırasında açığa çıkan ısının, soğutma akışkanı olan CO₂ tarafından taşınmasını ve bu süreçle ilişkin enerji dengesinin korunmasını esas almaktadır.

Mevcut sistemlerde soğutucu akışkan olarak kullanılan deniz suyu kullanılmaktadır. Deniz suyu veya alternatif bir soğutucu akışkanın enerji taşıma kapasitesi, bu enerji denklemi kullanılarak değerlendirilmiş ve yoğunlaştırma işlemi için gerekli kütleli debi miktarı belirlenmiştir. Bunun kütleli debisinin hesaplanmasında da Denklem 4 uygulanmıştır. Bu yaklaşım, enerji dengesini sağlamak için hem çürük buharın enerjisinin hem de soğutucu akışkanın taşıyabileceği enerjinin analiz edilmesine

olarak tanır. Çalışmada kullanılan bu yöntem, sistemin termal verimliliğinin optimize edilmesi ve enerji yönetiminin etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi için temel bir hesaplama aracıdır (Denklem 4).

$$\dot{Q}_{\text{buhar}} = \dot{Q}_{\text{CO}_2} \quad \dot{m}_{\text{buhar}}(h_1 - h_2) = \dot{m}_{\text{CO}_2} \cdot C_p \cdot (T_4 - T_3) \quad (\text{Denklem 4})$$

ABG'nin özgül ısı kapasitesini (C_p) hesaplamak amacıyla, karışımlar için kullanılan özgül ısı hesaplama denklemi uygulanmıştır (Denklem 5). Bu hesaplama, ABG'nin bileşenlerini oluşturan N_2 , CO_2 ve su buharının kütleli debileri ile bu bileşenlerin spesifik termodinamik tablolarından alınan özgül ısı kapasiteleri temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu denklem, karışımdaki her bir bileşenin kütle oranına dayalı olarak özgül ısı hesaplanmasını sağlamaktadır. ABG'nin termodinamik özelliklerini doğru bir şekilde belirlemek için bu yöntem, enerji ve kütle dengesi analizlerinde temel bir araç olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, özgül ısı hesaplamaları, sistem tasarımında ısı transferi ve enerji optimizasyonu süreçlerinin doğru bir şekilde modellenmesine olanak tanımaktadır.

$$C_{pABG} = y_{N_2} C_{pN_2} + y_{H_2O} C_{pH_2O} + y_{CO_2} C_{pCO_2} \quad (\text{Denklem 5})$$

CO_2 'nin kompresörde sıkıştırılması sonrasında meydana gelen sıcaklık artışı, Termodinamiğin Birinci Yasası temel alınarak türetilen adyabatik denklem ile hesaplanmıştır (Denklem 6). Bu denklem, sıkıştırma işlemi sırasında sistemde herhangi bir ısı transferi olmaksızın gerçekleşen enerji değişimini ifade etmektedir. Denklem, gazın basınç ve sıcaklık değişimleri arasındaki ilişkiyi tanımlamakta ve sıkıştırma işleminin termodinamik analizinde temel bir hesaplama aracı olarak kullanılmaktadır. CO_2 'nin sıcaklığındaki artışın doğru bir şekilde belirlenmesi, sıkıştırma sürecinin enerji gereksinimlerinin ve sonrasında ortaya çıkabilecek termal etkilerin değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu hesaplama, kompresör tasarımı, enerji yönetimi ve termal sistem optimizasyonunda önemli bir referans oluşturmaktadır.

CO_2 'nin adyabatik sıkıştırma sürecindeki sıcaklık değişimi, aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\gamma-1/\gamma} \quad (\text{Denklem 6})$$

73,97 bar basınç altında sıkıştırılan ve sıcaklığı 545°C'ye yükselen CO₂'nin pasif soğuma yöntemiyle sıcaklığının düşürülmesi için enerji ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu enerji miktarı Termodinamiğin Birinci Yasası (Enerjinin Korunumu Kanunu) esas alınarak hesaplanmıştır. Bu denklem, CO₂'nin sıkıştırma sonrası yüksek sıcaklık değerinden hedeflenen düşük sıcaklığa pasif soğuma yöntemiyle düşürülmesi için gerekli enerji miktarını belirlemektedir. Hesaplama, soğutma sürecinde ortaya çıkan termal enerjinin doğru bir şekilde analiz edilmesini sağlar ve bu enerji miktarının yönetimi, soğutma sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonunda önemli bir referans noktası oluşturur. Bu hesaplama, kütsel bir akışın taşıdığı ısı enerjisini ifade eden aşağıdaki denkleme dayanmaktadır:

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (\text{Denklem 7})$$

CO₂'nin -56,4 °C'de yoğuşma süreci sırasında kaybettiği toplam enerji, yoğuşma entalpisi ($\Delta H_{\text{yoğuşma}}$) esas alınarak hesaplanmıştır (Denklem 8). Bu hesaplama, yoğuşma sürecinde CO₂'nin gaz fazından sıvı faza geçişi sırasında açığa çıkan enerjiyi belirlemek için kullanılmaktadır. Yoğuşma entalpisi, CO₂'nin termodinamik özelliklerine bağlı olarak belirlenir ve bu süreçteki enerji değişimi, sistem tasarımı ve enerji yönetimi açısından kritik bir parametredir. Bu analiz, yoğuşma sürecinin termal verimliliğinin değerlendirilmesinde ve ilgili sistemlerin optimize edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu enerji kaybı, aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir:

$$Q_{\text{yoğuşma}} = \dot{m} \cdot \Delta H_{\text{yoğuşma}} \quad (\text{Denklem 8})$$

CO₂'nin soğuma ve yoğuşma sürecinde ortaya çıkan 805.016 kW ısı enerjisinin ortama aktarılması için gerekli bekletme süresi, Enerji Korunumu Prensibi temel alınarak hesaplanmıştır. Bu denklem (Denklem 9), soğuma ve yoğuşma işlemleri sırasında CO₂'nin hedeflenen sıcaklık ve faz değişimine ulaşması için gereken süreyi belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Hesaplama, termal enerji transferinin zamana bağlı analizini yaparak, soğutma sürecinin planlanması ve enerji optimizasyonu açısından kritik bir veri sağlamaktadır. Bu yöntem, sistem performansını artırmak ve enerji yönetimini optimize etmek için önemli bir araçtır. Bu prensip, ısı enerjinin (Q) güç (P) ile süre (t) arasındaki ilişkiyi tanımlayan aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir:

$$t = \frac{Q}{P} \quad (\text{Denklem 9})$$

Soğutma tankı, termik santral baca gazından yakalanan CO₂'nin düşük sıcaklıkta sıvılaştırılması ve depolanması amacıyla kullanılmaktadır. Doğal soğutmalı, oluklu ve kanatlı pasif soğutma tanklarının soğutma kapasitesini (P) belirlemek amacıyla, aşağıdaki ısı transferine dayalı denklem kullanılmıştır (Denklem 10). Bu denklem, tank yüzeyinden çevreye aktarılan ısı miktarını hesaplayarak, doğal soğutma sürecinin etkinliğini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Isı transfer katsayısı (h), tankın tasarımına ve malzeme özelliklerine bağlı olarak belirlenir. Ayrıca, yüzey alanının artırılması ve sıcaklık farkının optimize edilmesi, soğutma kapasitesinin iyileştirilmesinde kritik rol oynamaktadır. Bu hesaplama, doğal soğutma sistemlerinin performans analizi ve tasarım süreçlerinde temel bir yaklaşım sunmaktadır. Bu denklem, sistemin yüzey alanı, ısı transfer katsayısı ve sıcaklık farkı gibi temel parametrelerini dikkate alarak, soğutma kapasitesini hesaplamak için uygulanmıştır.

$$P = h \cdot A \cdot |\Delta T| \quad (\text{Denklem 10})$$

Sistemden elde edilen yıllık CO₂ kütlesi, gazın hacmi ve yoğunluğu temel alınarak aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır (Denklem 11). Bu denklem, belirli bir hacimdeki CO₂'nin kütlelerinin hesaplanmasını sağlayarak, sistemin performans analizi ve karbon yönetimi süreçlerinde temel bir veri sağlamaktadır. Hacim (V) ve yoğunluk (ρ) değerleri, sistemin basınç ve sıcaklık gibi çalışma koşulları dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu hesaplama, CO₂'nin yıllık üretim miktarını değerlendirmek ve ilgili çevresel etki analizlerini yapmak için kritik bir rol oynamaktadır.

$$m = V \cdot \rho \quad (\text{Denklem 11})$$

CO₂'nin kompresörle sıkıştırılması için gerekli güç, Enerji Korunumu Yasası esas alınarak türetilen izotermal sıkıştırma denklemi kullanılarak hesaplanmıştır (Denklem 12). Bu hesaplama, izotermal koşullarda çalışan bir kompresörde CO₂'nin sıkıştırılması sırasında harcanan enerjiyi belirlemek için kullanılmaktadır. İzotermal sıkıştırma, gazın sıcaklığının sabit tutulduğu varsayımına dayanır ve bu nedenle, sıkıştırma sırasında ortaya çıkan ısının sistemden uzaklaştırılması gerekmektedir. Denklem, gazın termodinamik özelliklerini ve süreçteki basınç değişimini dikkate alarak, enerji gereksiniminin analitik bir şekilde değerlendirilmesini sağlar. Bu yöntem, kompresör tasarımı ve enerji yönetimi süreçlerinde kritik bir araçtır. Bu denklem, sıkıştırma süreci sırasında gazın basınç değişimi ve enerji transferi arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır:

$$W_{izotermal} = \dot{m} \cdot R \cdot T \cdot \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (\text{Denklem 12})$$

Kompresörün ihtiyaç duyduğu gerçek güç, izotermal sıkıştırma sırasında hesaplanan teorik güç değerinin ($W_{izotermal}$) kompresörün verimliliği (μ) ile düzeltilmesiyle elde edilmiştir. Bu denklem, kompresörün idealden sapmalarını ve enerji kayıplarını dikkate alarak, gerçek enerji gereksinimini doğru bir şekilde hesaplamak için kullanılır (Denklem 13). Verimlilik faktörü (μ), kompresör tasarımında kullanılan malzemeler, mekanik sistemler ve termodinamik süreçlerden kaynaklanan enerji kayıplarını temsil etmektedir. Bu yöntem, enerji tüketiminin optimize edilmesi ve sistemin performans analizi için temel bir araç sunmaktadır. Bu hesaplama, kompresörün gerçek çalışma koşullarındaki enerji gereksinimini belirlemek amacıyla aşağıdaki denklem kullanılarak yapılmıştır:

$$W_{gerçek} = \frac{W_{izotermal}}{\mu} \quad (\text{Denklem 13})$$

Feng Chen ve Tatiana Morosuk sisteminde kullanılan soğutma sisteminin enerji tüketimi, sıkıştırma işlemi sonrası gazın sıcaklığını düşürmek amacıyla kullanılan coolerlerin elektrik enerji ihtiyacını ifade eder. Bu denkleme göre, coolerlerin enerji tüketimi, kompresörün harcadığı toplam enerji miktarının %25'i olarak kabul edilmiştir. Bu oran, literatürde yer alan DOE/NETL (2007) raporundan alınmış olup, karbon yakalama ve sıvılaştırma süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Coolerlerin enerji tüketimi, soğutma sisteminin tasarımı, çevresel koşullar ve kullanılan soğutucunun termodinamik özelliklerine bağlı olarak değişebilir. Bu hesaplama, Feng Chen ve Tatiana Morosuk sisteminde kullanılan soğutucuların enerji gereksinimini tahmin etmek için temel bir yaklaşım sunmaktadır. Bu enerji miktarı, sıkıştırma işlemi için harcanan toplam enerjiye oranla belirlenmekte ve aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır (Denklem 14)

$$W_{cooler} = 0.25 \cdot W_{kompresör} \quad (\text{Denklem 14})$$

Kompresöre giren ABG karışımındaki N_2 ve CO_2 için toplam gaz sabiti (R) kütleli oranlara göre aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır (Denklem 15). Bu hesaplama, karışımların termodinamik özelliklerinin hesaplanmasına ilişkin termodinamik prensiplere dayanır. Gazların karışımı için gaz sabiti, bileşenlerin kütleli oranlarına göre ağırlıklı bir ortalama alınarak belirlenir. Karışımın özgül gaz sabiti (R), kompresörün enerji tüketimini belirlemek için kullanılan izotermal

sıkıştırma ve adyabatik sıkıştırma denklemlerinde önemli bir parametredir. N_2 'nin yüksek gaz sabiti (R_{N_2}) karışımdaki toplam gaz sabitini artırarak sıkıştırma için gerekli enerjiyi artırabilir. Bu nedenle, karışımdaki gaz oranları ve gaz sabitleri, enerji tüketimini optimize etmek için kritik öneme sahiptir.

$$R = \frac{(\dot{m}_{N_2} \cdot R_{N_2}) + (\dot{m}_{CO_2} \cdot R_{CO_2})}{\text{toplam } \dot{m}} \quad (\text{Denklem 15})$$

Çalışmanın materyal metot kısmı iki ana bölüme ayrılmıştır: sıkıştırma sistemi ve buhar yoğunlaştırma sistemi. Birinci bölümde, baca gazındaki CO_2 'nin sıkıştırılarak sıvılaştırılması sürecine yönelik detaylı analizler sunulmuş; ikinci bölümde ise, çürük buharın yoğunlaştırulması için CO_2 kullanımı üzerine yapılan çalışmalar ele alınmıştır. Bu iki bölüm, sistem tasarımında enerji verimliliğini artırmak ve çevresel etkileri minimize etmek amacıyla birlikte değerlendirilmiştir.

4.2. Sıkıştırma Sistemi ve CO_2 Sıvılaştırma Süreci

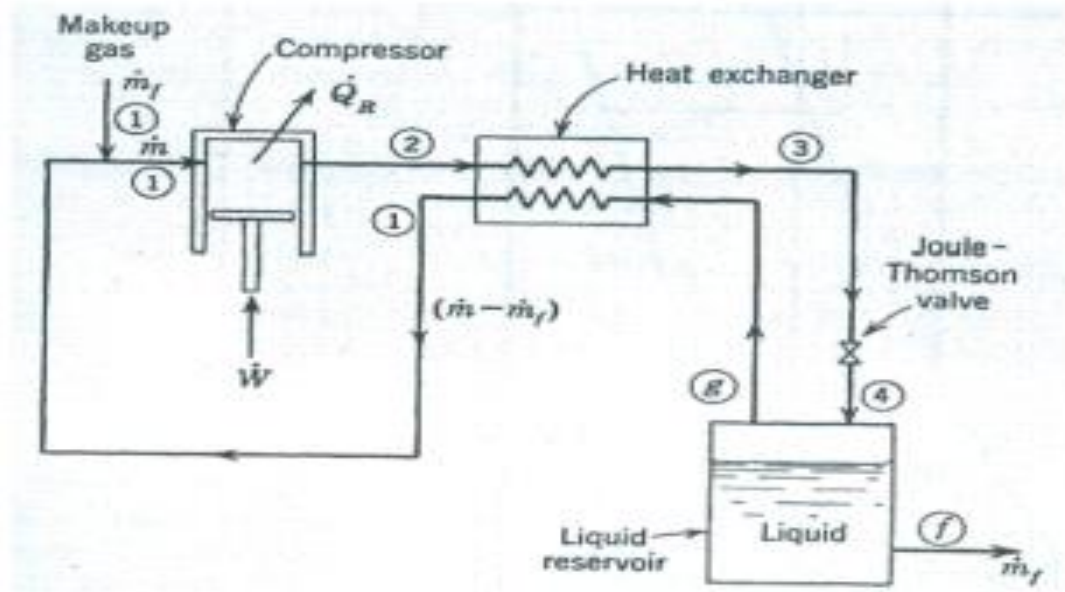
Bu bölümde, sıkıştırma sistemi ve CO_2 sıvılaştırma sürecine ilişkin hesaplamalar yapılmış ve sistemin enerji verimliliği ile operasyonel gereklilikleri analiz edilmiştir. Sürecin tasarımına yönelik temel parametreler belirlenmiştir.

Çalışmanın birinci aşamasında, mevcut CO_2 yakalama sistemlerinde soğuk ortamda basınç altında sıkıştırma prensibine dayalı süreçler temel alınarak yenilikçi bir sistem tasarlanmıştır. Bu tasarım, enerji ihtiyacını azaltmak, geleneksel soğutucu akışkanların kullanımını ve bu süreçlerin yol açtığı çevresel etkileri ortadan kaldırmak amacıyla geliştirilmiştir. Ayrıca, bu sıkıştırma ve sıvılaştırma sistemlerinin termik santral baca gazından CO_2 yakalamak üzere entegre edilmesi, endüstriyel uygulamalar açısından önemli bir yenilik olarak öne çıkmaktadır. Bu sayede, karbon emisyonlarının etkin bir şekilde kontrol altına alınması ve enerji verimliliği sağlanarak ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflenmektedir.

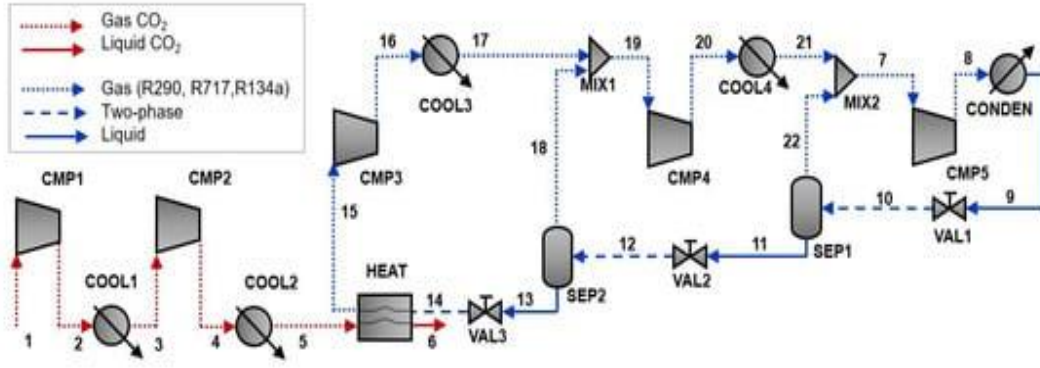
Bu bağlamda, CO_2 gazının sıvılaştırılmasına yönelik mevcut yöntemler ile alternatif pasif soğuma yaklaşımları karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Geleneksel Linde-Hampson sistemi (Şekil 4.3) ve Chen ile Morosuk'un geliştirdiği (Şekil 4.4) CO_2 sıvılaştırma prosesleri bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır (Chen & Morosuk, 2021). Linde-Hampson sistemi, CO_2 'nin sıvılaştırılması için yüksek basınçlı sıkıştırma ve karşı akımlı ısı değiştiriciler kullanılarak uygulanan bir yöntemdir. Chen ve

Morosuk'un geliştirdiği sistem ise, Linde-Hampson sistemini enerji verimliliği açısından optimize etmeyi hedeflemiş ve çok aşamalı sıkıştırma, enerji geri kazanımı ile aktif soğutma birimlerini (cooler) içeren bir yaklaşım sunmuştur. Bu iki sistemin temel ortak noktası, CO₂ gazının sıvılaştırılmasına yönelik çözüm sunmalarıdır. Chen Morosuk sisteminde sıkıştırma aşamalarının sayısı, operasyonel ihtiyaa göre artırılabilir ya da azaltılabilir. Örneğin, Chen ve Morosuk'un 2021 tarihli çalışmalarında, CO₂ sıvılaştırma sürecinde üç aşamalı sıkıştırma sistemi kullanılmıştır. Bu süreçte N₂ ve türevleri gibi soğutucu akışkanlar tercih edilmekte olup, gazın kompresöre gelmeden önce $\leq 31^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa kadar soğutulması gerekmektedir. Bu soğutma işlemi de yine cooler ile sağlanmaktadır.

Alternatif olarak geliştirilen sistemde ise enerji verimliliği ve maliyet optimizasyonu sağlamak amacıyla doğal konveksiyon ve pasif soğutma prensipleri esas alınmıştır. Bu sistemde, geçici depolama tankları tasarlanmış olup, söz konusu tanklar CO₂'nin optimum soğutma verimliliğini sağlamak için yüksek basıncı dayanımlı, oluklu ve kanatçıklı geometrik yapıya sahip olacak şekilde dizayn edilmiştir. Bu yenilikçi yaklaşım sayesinde enerji tüketimi minimize edilmekte, operasyonel maliyetler optimize edilmekte ve çevresel etkiler en aza indirilmektedir.



şekil 4.3. Linde-Hampson CO₂ sıvılaştırma sistemi



Şekil 4.4. Feng Chen ve Tatiana Morosuk tarafından geliştirilen CO₂ sıvılaştırma sistemi.

Karbon yakalama ve sıvılaştırma sistemleri, enerji verimliliğini artırmak ve çevresel etkileri azaltmak amacıyla sürekli olarak geliştirilmektedir. Tasarlanan sistem, mevcut uygulamalar olan Linde-Hampson sistemi ve Feng Chen ile Tatiana Morosuk tarafından geliştirilen CO₂ sıvılaştırma sistemleri ile karşılaştırıldığında yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Aşağıda bu sistemlerin temel özellikleri, işleyiş prensipleri ve tasarlanan sistemin diğerlerine olan fark ve üstünlükleri ayrıntılı bir şekilde ele alınmaktadır.

4.3. Linde-Hampson Sistemi

Linde-Hampson sistemi, gazların sıvılaştırılması için termodinamik prensiplere dayanan yaygın bir teknolojidir. Bu sistemde, gaz önce kompresör yardımıyla yüksek basınçlara sıkıştırılır ve ardından karşı akımlı ısı değiştiriciler kullanılarak sıcaklığı düşürülür. Faz değişimi, gazın sıcaklığının kritik sıcaklığın altına indirilmesi ve genleşme valfi ile düşük basınçta genişletilmesi ile sağlanır. Linde-Hampson sistemi, enerji tüketiminin yüksek olması ve genleşme sırasında oluşan entropi artışı nedeniyle termodinamik verimlilik açısından sınırlamalara sahiptir. Sistem, basit bir yapı sunsa da enerji tüketimi ve termodinamik kayıplar, daha verimli alternatiflerin geliştirilmesini teşvik etmiştir (Smith et al., 2021).

4.4. Feng Chen ve Tatiana Morosuk sistemi

Feng Chen ve Tatiana Morosuk sistemi, Linde-Hampson sisteminin temel prensiplerini kullanarak daha yüksek enerji verimliliği sağlamayı hedefleyen bir teknolojik yaklaşımdır. Bu sistemde, enerji geri kazanım üniteleri ve gelişmiş soğutma

teknolojileri entegre edilerek, sıvılaştırma sürecinde enerji kayıpları en aza indirilmeye çalışılmıştır (Morosuk & Tsatsaronis, 2009). Her sıkıştırma aşamasında oluşan sıcaklık artışını dengelemek ve enerji tüketimini azaltmak için yenilikçi soğutma elemanları ve enerji dönüşüm mekanizmaları kullanılmaktadır.

Feng Chen ve Tatiana Morosuk sisteminin en belirgin farkı, enerji geri kazanım ünitelerinin sisteme eklenmesidir. Bu üniteler, sıkıştırma sırasında açığa çıkan ısı enerjisinin bir kısmını geri kazanarak toplam enerji tüketimini düşürmeyi hedefler. Ayrıca, gelişmiş soğutucu akışkanlar ve optimize edilmiş ısı transfer elemanları sayesinde, soğutma sürecinin verimliliği artırılmıştır (Luo et al., 2020). Bununla birlikte, bu sistemlerin yüksek teknoloji gereksinimleri ve karmaşık yapıları, kurulum ve bakım maliyetlerini artırmaktadır.

Özet olarak; Linde-Hampson sistemi, gazların sıvılaştırılması için köklü bir yöntem sunarken, Feng Chen ve Tatiana Morosuk sistemi bu süreci optimize ederek enerji verimliliğini artırmayı hedefleyen bir yaklaşımdır. Feng Chen ve Tatiana Morosuk sistemi, enerji geri kazanım mekanizmaları ve yenilikçi soğutma teknolojileri ile öne çıkmakla birlikte, karmaşık yapısı ve yüksek maliyetleri nedeniyle sınırlı bir uygulama alanına sahiptir. Bu sistemler, karbon yakalama ve depolama süreçlerinde verimlilik artışı sağlamak için önemli birer teknolojik adımdır.

4.5. Tasarlanan Sistem ve İşleyişi

Tasarlanan sistem, bir adet kompresör, zamanlayıcı, iki farklı basınç seviyesine duyarlı basınç şalteri ve altı adet kanatlı, doğal soğutmalı, yüksek basınca dayanıklı CO₂ tankından oluşmaktadır (Şekil 4.5). Sistem, sürekli bir proses olarak tasarlanmış olup, sıkıştırma, sıvılaştırma ve aktarım işlemleri kesintisiz şekilde yürütülecek şekilde yapılandırılmıştır.

Tasarlanan sistemde, baca gazının soğutulması için soğutucu akışkan olarak doğrudan CO₂ kullanılmaktadır. -56,4°C sıcaklığa sahip CO₂, akıştaki ABG'ye karıştırılarak hem baca gazının $\leq 31^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar soğutulması hem de içerdiği su buharının yoğunlaştırılması sağlanmaktadır. Bu işlem sırasında, CO₂ ile karşılaşan su buharı gaz fazından sıvı faza geçmekte, sıvı hale gelen su ise ABG ve CO₂ karışımının sonrasında yerleştirilen bir su haznesinde toplanmaktadır. Toplanan su, tahliye borusu aracılığıyla su deposuna aktarılmakta ve sonrasında uçucu küllerin ıslatılması için

kullanılmaktadır. Su buharının tutulması ve ABG'den ayrıştırılması, sıkıştırma ve sıvılaştırma sisteminde meydana gelebilecek tıkanıklık, korozyon gibi teknik sorunların önlenmesi açısından kritik bir adımdır.



Şekil 4.5. Tasarlanan CO₂ sıkıştırma, sıvılaştırma ve depolama sistemi.

Sistemin işleyişi şu şekilde tanımlanabilir:

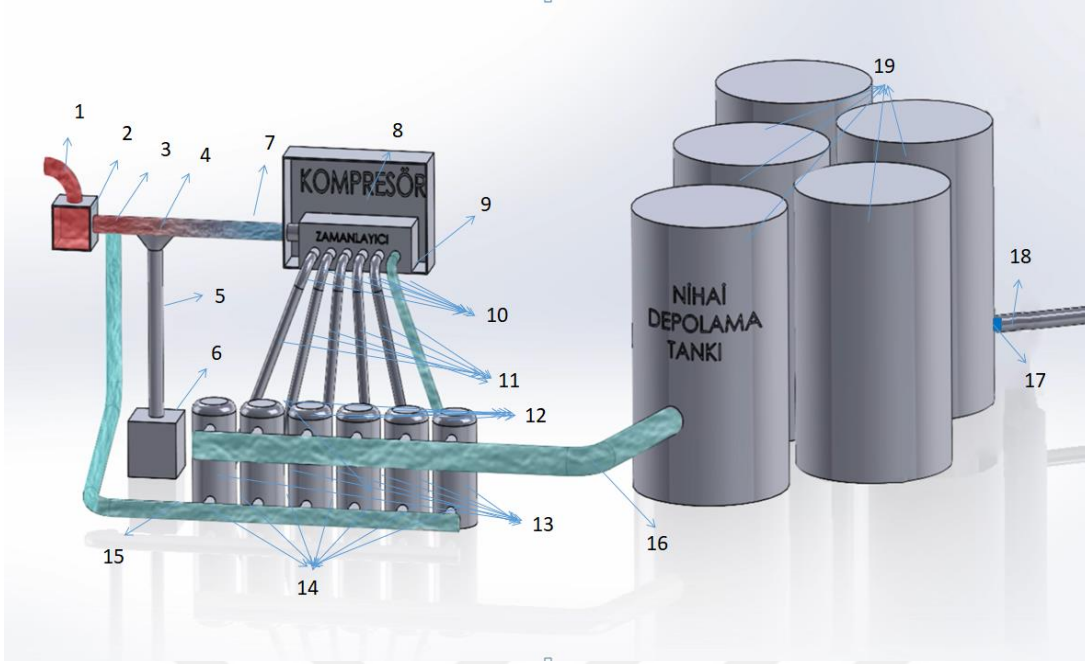
- **Kompresör Ünitesi:** ABG, kompresör aracılığıyla sıkıştırılarak 73 atm. (73,97bar) basınca kadar ulaştırılmaktadır. Bu basınç seviyesinde, CO₂ sıvı faza geçmektedir.
- **Zamanlayıcı Mekanizması:** Sıvılaştırılmış CO₂, kompresör çıkışında yer alan bir zamanlayıcı sayesinde tanklara sırasıyla yönlendirilir. Zamanlayıcı, sıvılaştırılmış CO₂'nin her bir tankta belirli süreler boyunca beklemesini sağlar.
- **Basınç Şalterleri:** Sisteme entegre edilen iki farklı basınca duyarlı basınç şalteri, her bir tankta sabit basıncın korunmasını sağlar ve sıkıştırma işlemini güvenli bir şekilde düzenler.
- **Pasif Soğutmalı Tanklar:** Yüksek basınca dayanıklı, kanatlı ve doğal soğutmalı tanklar, sıkıştırılmış CO₂'nin sıcaklığının düşürülmesine olanak tanır. Sıvı CO₂, sırasıyla altı farklı tanka aktarılırken, ilk tanka yönlendirilen CO₂'nin sıcaklığı, aktarım süresi boyunca doğal soğutma etkisiyle düşmektedir.

Tasarlanan sistem, CO₂'nin altı ayrı tankta doğal soğutma yoluyla sıcaklığının düşürülmesini ve sıvı fazda kalmasını sağlayarak enerji tüketimini minimuma indirmeyi hedeflemektedir. Sistemin bu yapılandırması, sıkıştırma ve sıvılaştırma süreçlerinin kesintisiz olarak devam etmesine olanak tanırken, doğal soğuma için gerekli süreyi de sağlamaktadır.

Altı tanktan oluşan bu sistem, CO₂'nin sıkıştırma işlemi sırasında artan sıcaklığını, tankların doğal soğutma kapasitesi sayesinde çevreye aktararak düşürmektedir. Bu süreç, hem sıkıştırma sonrası CO₂'nin faz değişimini korumasına hem de enerji verimliliğinin artırılmasına katkıda bulunmaktadır. Tankların sayısı ve yerleşimi, ortam sıcaklığı, iklim şartları, saatlik CO₂ üretim miktarı, sıkıştırma sonrası CO₂ sıcaklığı ve gerekli soğuma süresi gibi parametreler göz önünde bulundurularak optimize edilmiştir. Örneğin, tasarımın yapıldığı bölge için yıllık ortalama ortam sıcaklığı 13 °C olarak kabul edilmiştir.

Sistemin işleyişi, sıkıştırılan CO₂'nin birinci tanktan başlayarak sırasıyla diğer tanklara aktarılması prensibine dayanmaktadır. İlk tanka gönderilen CO₂'nin, son tanka ulaşana kadar geçen sürede, sıkıştırma sırasında artan sıcaklığının düşmesi sağlanmaktadır. Bu şekilde, tanklar arasında bir döngüsel akış oluşturularak hem doğal soğuma süreci optimize edilmiş hem de sistemin kesintisiz çalışması sağlanmıştır.

Tasarlanan sistem, enerji verimliliği ve süreç optimizasyonu açısından teknik ve ekonomik sürdürülebilirlik sunmaktadır. Tanklarda doğal soğuma ile sıcaklığı -56,6 °C'ye düşürülen sıvılaştırılmış CO₂, baca gazı soğutma işlemi için doğrudan kullanılabilir hale gelmektedir. Bu yenilikçi yaklaşım, mevcut baca gazı işleme teknolojilerine alternatif bir çözüm sunmakta ve karbon yönetimi ile enerji dönüşümü süreçlerine önemli bir katkı sağlamaktadır.



Şekil 4.6. ABG soğutma; su buharı yoğunlaştırma, ayrıştırma; CO₂ sıkıştırma, sıvılaştırma ve depolama sistemi genel görünümü.

Sistemin Bölümleri (Şekil 4.6)

- 1-ABG Girişi (Sıcaklık 95 °C)
- 2-ABG Toplama Haznesi (ABG içeriği N, CO₂ ve su buharı)
- 3-Soğuk CO₂ girişi (CO₂ sıcaklığı -78 °C)
- 4-Yoğuşturulmuş su toplama haznesi
- 5-Su tahliye borusu
- 6-Su deposu
- 7-Kompresöre giden ABG (içerik N ve CO₂)
- 8-Kompresör
- 9-Zamanlayıcı
- 10-Tek yönlü valfler
- 11-Sıvılaştırılmış CO₂'yi tanklara aktarım boruları
- 12-Tek yönlü valfler
- 13-Oluklu, kanatlı, doğal soğutmalı, basınca dayanıklı tanklar

14-Zamanlayıcılar, basınç şalterleri ve tek yönlü valfler

15-ABG soğutma için sisteme gönderilen likit CO₂ taşıma borusu (CO₂ sıcaklığı -78 °C)

16-ABG soğutma kullanımından arta kalan likit CO₂'nin nihai depolama tanklarına aktaran boru

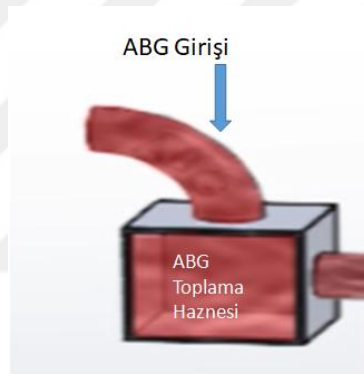
17- Tek yönlü valf

18- Çürük buhar yoğunlaştırma sistemine likit CO₂ taşıma borusu

19- Nihai CO₂ depolama tankları

4.5.1. Sistemin detayları

1) ABG Toplama Haznesi



Şekil 4.7. ABG girişi ve ABG toplama haznesi

Uçucu kül ve is gibi partikül maddeler ile SO_x ve NO_x gibi gaz bileşenlerinin baca gazından ayrıştırılması amacıyla farklı filtreleme ve arıtma sistemleri kullanılmaktadır. İlk olarak, baca gazı elektrostatik çöktürücüler veya torba filtrelerden geçirilerek uçucu kül ve ince partiküllerden arındırılır. Ardından, elektrostatik filtreleme sistemleri kullanılarak is partikülleri tutulur. Son aşamada, baca gazı SO_x ve NO_x arıtma sistemlerinden geçirilerek SO_x ve NO_x bileşenlerinden temizlenir. Bu aşamalardan geçmiş gazın içeriğinde sadece CO₂, N₂ ve su buharı bulunmaktadır ve “ABG” (Arıtılmış Baca Gazı) olarak adlandırılmıştır. Söz konusu gaz karışımı için “ABG” kısaltması kullanılacaktır. ABG, sistemin ilk adımı olarak ABG toplama haznesinde biriktirilir (Şekil 4.7). ABG’nin kirleticilerden arındırılması, sistemdeki sonraki işlemlerin verimliliğini artırmak ve ekipmanların zarar görmesini önlemek amacıyla kritik bir adımı temsil etmektedir.

Toplama haznesinde biriktirilen ABG'nin başlangıç sıcaklığı 95 °C olarak ölçülmektedir. Bu sıcaklık, gazın kaynağı olan termik santralin yanma sürecinden kaynaklanmaktadır. ABG'nin bu sıcaklık değerine sahip olması, gazın sonraki sıkıştırma ve sıvılaştırma işlemleri öncesinde belirli bir soğutma ve hazırlık sürecinden geçmesi gerektiğini göstermektedir. Sıcaklığın kontrollü bir şekilde düşürülmesi, hem sıkıştırma işleminin enerji tüketimini optimize etmekte hem de sıvılaştırma sürecinde kullanılan ekipmanların verimliliğini artırmaktadır.

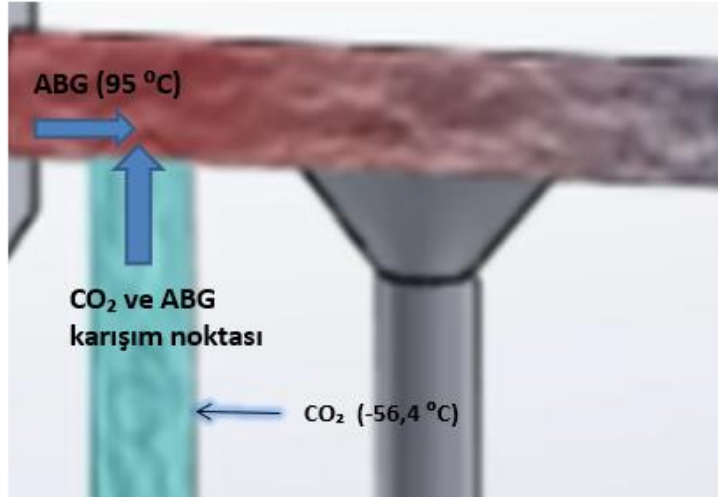
Bu noktada, ABG toplama haznesi, sistemin sürekliliğini ve istikrarını sağlamak için stratejik bir role sahiptir. Hazne, ABG'nin sıkıştırma işlemine geçmeden önce eşit dağılımını ve belirli bir sıcaklıkta sabitlenmesini sağlayarak, sistemin genel performansını optimize etmektedir. Bu süreç, tasarlanan sistemin enerji verimliliğini artırarak çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliğe katkıda bulunmasını mümkün kılmaktadır.

2) ABG+CO₂ Karışım Noktası

Su buharının, sistemde gaz akışını sağlayan boru ve valflerde tıkanıklık, korozyon vb. istenmeyen durumlara sebep olmaması için ABG içeriğinden ayrılması gerekmektedir. Zira su buharı, -56,4 °C sıcaklıktaki CO₂ ile karşılaştığında, donma riski olduğu için boru ve valf cidarlarında daralmalara, tıkanmalara ve CO₂ ile birlikte asidik özellik göstereceği için zaman içinde korozyona sebebiyet vermektedir.

Günümüzde kullanılan mevcut sistemlerde su buharı yoğunlaştırma ve ABG'nin soğutulması için iki ayrı sisteme ihtiyaç duyulmaktadır. Su buharı yoğunlaştırma prosesinde N₂ başta olmak üzere birçok farklı soğutucu akışkan kullanılmaktadır. Sistemin bu hali hem karbon ayak izinin hem de maliyetlerin artmasına sebep olmaktadır. Tasarlanan sistemde ise buhar yoğunlaştırma ve ABG soğutma için iki farklı sisteme gerek kalmayacaktır. Tasarlanan sistemde soğuk CO₂ direkt olarak akıştaki ABG'nin içine verildiğinde hem ABG soğutulmuş hem de su buharı yoğunlaştırularak ABG içinden ayrıştırılmış olacaktır. Yani tek adımda hem ABG içindeki su buharının yoğunlaşarak su haline gelmesi hem de ABG'nin sıvılaştırma için gerekli sıcaklığa gelmesi sağlanmış olacaktır. ABG içerisindeki su buharını yoğunlaştırmak amacıyla kullanılan CO₂, ABG'de doğal olarak bulunan CO₂ ile birlikte sıkıştırılarak ön depolama tanklarına transfer edilmektedir.

Tasarlanan sistemde; su toplama haznesi ve kompresör arasında bulunan, ABG iletim borusuna $-56,4^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta CO_2 verilecektir (Şekil 4.8). Bu karıştırma sonrası 95°C sıcaklığa sahip ABG $\leq 31^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa düşürülmüş olacaktır. Sistem için gerekli CO_2 , termik santralin baca gazından yakalanacağı için satın alma maliyetine sebep olmayacaktır. Sıkıştırma sisteminde, ABG+ CO_2 karışımından CO_2 sıvılaştırılarak ayrılacaktır. Böylece CO_2 yakalanacak ve tekrar kullanıma hazır halde sıvı fazda depolanacaktır. Bu şekilde CO_2 'nin tamamının atmosfere verilmesi engellenmiş olacaktır. Elde edilen CO_2 %100 saflıkta olacaktır. Çünkü soğuk ortamda basınç altında sıkıştırma sisteminde CO_2 'nin sıvılaştırılması için gerekli sıcaklık ve basınç ortamı sağlanmaktadır. Dolayısıyla diğer maddeler karışmaksızın saf CO_2 elde edilebilmektedir. Adsorban kullanımı ile CO_2 yakalama sistemlerinde CO_2 'nin yüksek saflıkta ve %100 verimle yakalanabilmesi mümkün değildir. Bununla birlikte adsorban üzerinden CO_2 'yi ayırmak için ek işlemler gerekmektedir.

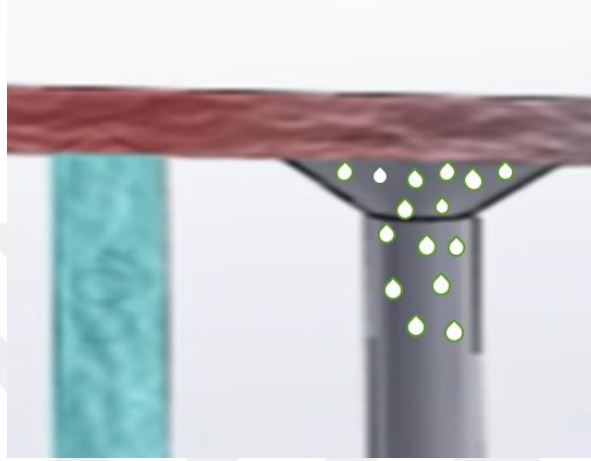


Şekil 4.8. ABG'nin soğuk CO_2 ile karışım noktası.

3)Yoğuşmuş Su Buharı Toplama Haznesi

ABG içerisinde yer alan su buharı, tasarlanan sistemin bir parçası olarak ABG ile CO_2 'nin karışım noktası geçişi sırasında sıcaklığının düşmesiyle yoğuşacaktır. Su buharının sıvı hale geçişi, gaz karışımının sıcaklık düşüşüne bağlı olarak termodinamik süreçlerin doğal bir sonucudur. Yoğuşma sırasında ortaya çıkan suyun sistemden ayrıştırılması hem gaz karışımının saflığını sağlamak hem de sıkıştırma ve sıvılaştırma süreçlerinde olası ekipman sorunlarını önlemek açısından kritik bir öneme sahiptir.

Bu amaçla, yoğuşan suyun yer çekimi etkisiyle kolaylıkla toplanabilmesi için bir su toplama haznesi sistemi entegre edilmiştir (Şekil 4.9). Su toplama haznesi, ABG ve CO₂ karışımının iletildiği borunun altına stratejik olarak yerleştirilecektir. Bu yerleşim, yoğuşan suyun sistemde birikmesini önlemek ve etkin bir şekilde dışarı atılmasını sağlamak için önemlidir. Su toplama haznesi, gaz akışının kesintisiz devam etmesini destekleyen bir bileşen olarak tasarımda kilit bir role sahiptir.

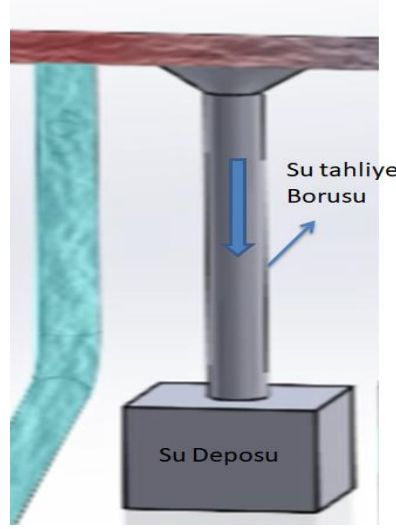


Şekil 4.9. Yoğuşmuş su buharını toplama haznesi

Yoğuşma işleminin tamamlanmasının ardından, ABG'nin içerdiği su buharı tamamen sıvı hale geçerek ayrıştırılacaktır. Böylece su toplama haznesini geçen ABG'nin bileşimi yalnızca CO₂ ve N₂'den oluşacaktır. Bu saflaştırma adımı, sonraki sıkıştırma ve sıvılaştırma işlemlerinin verimliliğini artıracak ve sistemdeki süreçlerin etkinliğini destekleyecektir. Böylece su toplama haznesi, tasarlanan sistemin işleyişinde hem operasyonel verimliliği artıran hem de ekipmanların uzun vadeli performansını koruyan önemli bir bileşen olarak konumlandırılmış olmaktadır. Bu tasarım yaklaşımı, hem enerji verimliliği hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından modern baca gazı yönetimi uygulamalarına yenilikçi bir çözüm sunmaktadır.

4)Yoğuşmuş Suyu Toplama, Tahliye ve Depolama Sistemi

Tasarlanan sistemde, su toplama haznesine dökülen su damlaları, tahliye borusu aracılığıyla su deposuna iletilecektir (Şekil 4.10). ABG'den elde edilen ve su deposunda toplanan bu su, uçucu külün ıslatılması amacıyla kullanılacaktır.



Şekil 4.10. ABG içeriğindeki su buharının suya dönüşümü sonrası su toplama, tahliye ve depolama sistemi

Uçucu kül, kömürün yanması sonucu oluşan bir yan ürün olup, çimento üretiminde çeşitli avantajlar sağlayan önemli bir malzemedir. Bu küller, çimentonun hidratasyon ürünü olan kalsiyum hidroksit ile sulu ortamda birleşerek hidrolik bağlayıcılık kazanır. Bu nedenle, hem portland-puzolan tipi çimento üretiminde hem de beton katkı maddesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Beton karışımlarında kullanılan uçucu kül miktarı, çimento ağırlığının %15 ile %50 arasında değişebilir. Uçucu külün çimento üretiminde kullanımı, klinker ihtiyacını azaltarak doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunur. Klinker, yüksek sıcaklıkta pişirilen hammaddelerden elde edilen ve çimentonun ana bileşenlerinden biridir. Daha az klinker kullanımı, hem enerji tasarrufu sağlayacak hem de karbon ayak izinin azalmasına yardımcı olacaktır.

Uçucu külün çimento üretiminde kullanılması, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına da katkıda bulunur. Termik santral baca gazından yakalanarak elde edilen uçucu kül, doğaya salınan partikül madde miktarını azaltarak atmosferdeki kirliliğin önüne geçer. Bunun yanı sıra, uçucu külün yeniden değerlendirilmesi, atık malzemenin bertaraf edilmesi için harcanacak enerji ve kaynak ihtiyacını ortadan kaldırır. Bu durum, daha sürdürülebilir bir çimento üretim süreci için önemli bir avantajdır.

Uçucu külün çevresel zararlarını önlemek ve kullanımını kolaylaştırmak amacıyla uygulanan ıslatma işlemi, partiküllerin aglomere edilmesini, yani daha büyük ve ağır parçalar haline gelerek tozun kontrol altına alınmasını sağlar. Bu işlem, hem çevreyi hem de çalışanların sağlığını koruma açısından kritik bir adımdır. Islak uçucu kül, toz

yayılımını engellediği için çimento üretim süreci için tercih edilen bir formdadır. Eğer kuru olarak transfer edilmişse, çimento üretimi öncesinde mutlaka ıslatılarak kullanıma hazırlanır. Islatma işlemi genellikle su ile yapılır ve bu sayede hem çevresel hem de operasyonel fayda sağlanır.

Tasarlanan sistemde, uçucu külün ıslatılması için baca gazından elde edilen su kullanılacaktır. Bu yenilikçi yaklaşım, doğal su kaynaklarının korunmasına önemli bir katkı sağlar. Elde edilen suyun bu şekilde değerlendirilmesi, su tüketimini azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe destek olur. Uçucu külün bu şekilde yönetilmesi, hava kalitesinin korunmasına ve çimento üretimi süreçlerinde çevreye verilen zararların minimum seviyeye indirilmesine yardımcı olur. Bu süreç, daha sürdürülebilir bir çimento endüstrisinin ve karbon yönetimi stratejilerinin önemli bir parçasıdır.

Sistemden elde edilecek uçucu kül miktarını Denklem 1’le hesaplayabiliriz.

$$\dot{m} = \dot{v}\rho \quad (\text{Denklem 1})$$

Burada;

$$\dot{v}_{\text{uçucu kül}} (\text{uçucu külün hacimsel debisi}) = 8 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\rho (\text{gevşek uçucu külün yoğunluğu (Loose Density)}) = 1,2 \text{ kg/m}^3$$

Burada ortalama değer olan 1,2 kg/m³ kabul edilmiştir. (IPCC, 2006)

$$\dot{m} (\text{uçucu külün kütleli debisi}): (\text{kg/s})$$

$$\dot{m}_{\text{uçucu kül}} = 8 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_{\text{uçucu kül}} = 9,6 \text{ kg/s} = 34.560 \text{ kg/h} = 302.745.600 \text{ kg/yıl} = 302.745,600 \text{ ton/yıl}$$

Sonuçta baca gazından yakalanan yıllık uçucu kül miktarı 302.745,600 ton olarak bulunmaktadır.

ABG içinden yoğuşturularak sıvı faza getirilen su buharından elde edilecek su miktarı Denklem 1’le hesaplandığında;

$$\rho_{\text{buhar}} = 0.4303 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Su buharının kütleli debisi: } 15.49 \text{ kg/s}$$

$$\text{Yoğuşma sonrası sıvı suyun kütleli debisi: } 15.49 \text{ kg/s (kütle korunur)}$$

$$\text{Yoğuşma sonrası sıvı suyun hacimsel debisi: } 0.0156 \text{ m}^3/\text{s}$$

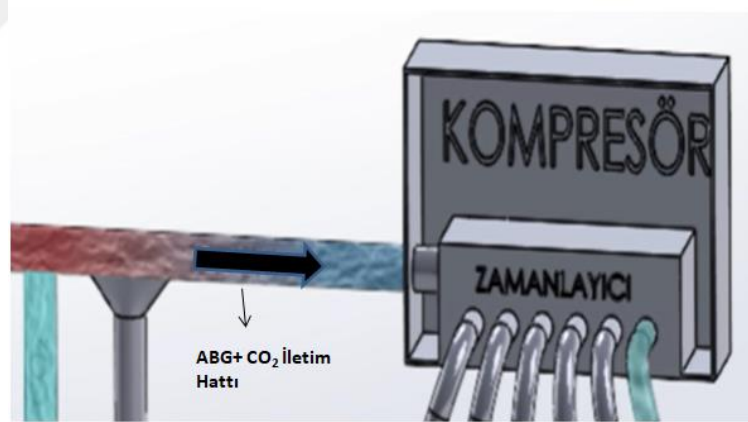
Bu hesaplamalar doğrultusunda, 95°C’de 36 m³/s hacimsel debiye sahip su buharı, yoğunlaştığında 31°C’de 15.49 kg/s su oluşturacaktır.

$$\dot{m}_{su}=15.49 \text{ kg/s}=55.764 \text{ kg/h} = 488.492.640 \text{ kg/yıl}=488.492,640 \text{ ton/yıl}$$

Sonuç olarak ABG içinden yakalanan yıllık su miktarı 488.492,640 ton olarak bulunmaktadır.

5) Sıkıştırma ve Depolama Süreci

Yoğuşurma işlemi sonucunda, su buharından arındırılmış ve yalnızca N₂ ile CO₂ içeren ABG, CO₂’nin soğutma amacıyla kullanılan kısmı ile birleşerek bir karışım oluşturacaktır (Şekil 4.11). Bu karışım, sıkıştırılmak üzere kompresöre iletilecektir. Bu süreçte, hem baca gazında bulunan CO₂ hem de baca gazının soğutulmasında kullanılan CO₂’nin geri kazanımı sağlanacaktır. Karışımın sıcaklığı, CO₂’nin sıvı faza geçişine olanak tanıyacak şekilde kritik sıcaklık olan ≤31°C’ın altında tutulacaktır. Sistemde, CO₂’yi 73,97 bar basınç altında sıvılaştırabilecek kapasitede bir kompresör bulunmaktadır.



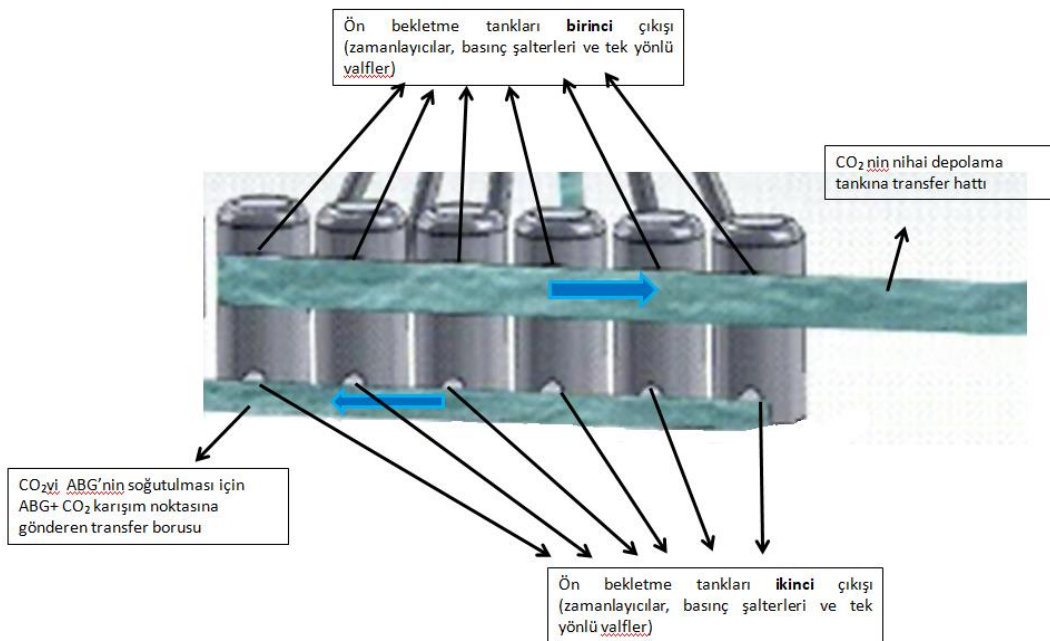
Şekil 4.11. Su buharından arındırılmış ABG’nin kompresöre iletim hattı, kompresör ve zamanlayıcı.

Sıkıştırma işlemi sonrası elde edilen sıvı CO₂, sırasıyla ön depolama tanklarına yönlendirilecektir. Bu süreçte, zamanlayıcılar sıvı CO₂’nin hangi tanklara aktarılacağını kontrol etmek üzere kullanılacaktır. Zamanlayıcılar, baca gazı debisi, kompresörün sıkıştırma kapasitesi ve sıvı CO₂’nin sisteme verilme sürelerine göre ayarlanacaktır. Bu süreç, sistemin kesintisiz çalışmasını sağlamak üzere optimize edilmiştir (Şekil 4.11).

Her bir tank, sıvı CO₂'nin belirli bir süre içinde doğal soğutma yoluyla soğumasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Tanklardan sıvı CO₂'nin sisteme yönlendirilmesi sırasında, her akış borusunun başlangıcında yer alan tek yönlü valfler, sıvı CO₂'nin yalnızca önceden belirlenmiş yönde akışına izin verir. Bu valfler, sıvı CO₂'nin kompresör yönünde geri akışını engelleyerek sistem güvenliğini artırır.

Sistemin sürekli bir akış ile çalışması, hem enerji verimliliğini artırır hem de sistemin kesintisiz işleyişini sağlar. Tanklarda sıvı CO₂'nin sırasıyla aktarımı, optimal bir sıcaklık kontrolü ve basınç yönetimiyle gerçekleştirilir. Bu süreç, hem CO₂ geri kazanımının hem de sıkıştırma ve depolama süreçlerinin güvenilirliğini artırır. Bu yenilikçi tasarım, karbon yönetimi ve baca gazı işleme teknolojileri için çevresel ve ekonomik olarak sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır.

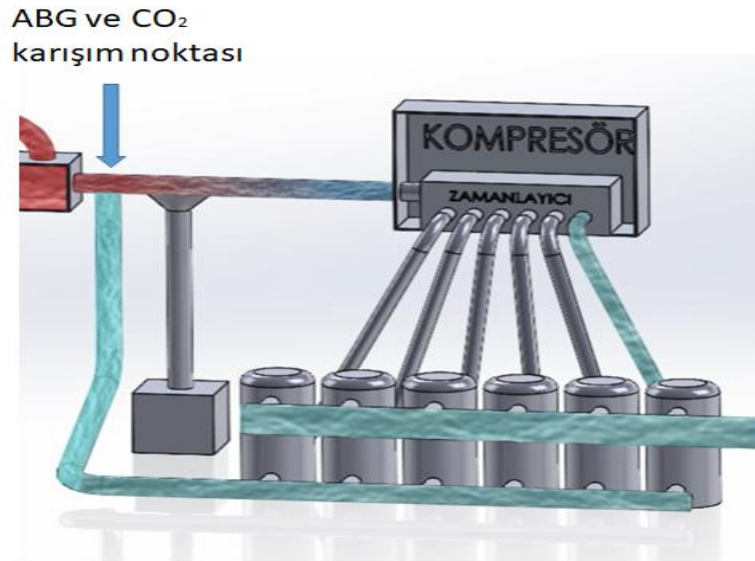
Ön bekletme tanklarının iki adet çıkışı vardır. Bu çıkışlarda; basınç şalterleri, zamanlayıcı ve tek yönlü valfler bulunacaktır (Şekil 4.12). Birinci çıkış, elde edilen sıvı CO₂'nin, tahliye boruları ile nihai depolama tanklarına transferi için kullanılacaktır. Ön bekletme tankı tamamen dolmadan transfer gerçekleştirilecektir. Zamanlayıcının görevi, ön bekletme tanklarının ve nihai depolama tanklarının doluluk oranlarına göre valflerin açılışını ve gaz akışının hangi tanka gönderileceğini kontrol etmektir.



Şekil 4.12. Ön bekletme tankları.

İkinci çıkıştan çıkan CO₂, ABG soğutma için kullanılacaktır. Buradaki zamanlayıcının görevi; ön bekletme tankından, ABG soğutma için gerekli CO₂'nin, ABG+CO₂ karışım noktasına (istenilen miktarda) geçişine izin vermektir. Burada bulunan tek yönlü valfler, ön bekletme tankı içindeki CO₂'nin ABG+CO₂ karışım noktasına doğru geçişine izin verirken geri dönüşü engelleyecek şekilde yerleştirilecektir. ABG debisine bağlı olarak, ABG soğutma için ihtiyaç duyulan CO₂ miktarı değişiklik gösterecektir.

Sistemin sürekliliğin sağlanabilmesi için 6 adet tanka ihtiyaç duyulmaktadır. İklim tipine göre ortalama sıcaklığın 13°C olduğu kabulüne göre tank sayısı 6 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.13). Bu tankların her biri 1000 m³ kapasiteli olacaktır. Daha sıcak iklimlerde tank sayısı artırılırken daha soğuk bölgelerde azaltılabilir. Tank sayısı, tankta bulunan CO₂'nin sıkıştırılması sırasında oluşan iç enerjisinin konveksiyonla dışarıya taşınması için gereken süre göz önüne alınarak belirlenmiştir.



Şekil 4.13. Kompresör ve ön bekletme tankları.

ABG; kompresörde, 73 atm (73,97 bar) basınçla sıkıştırılarak sıvı hale getirilecektir. Sistem ilk işletmeye alındığında, ABG soğutma için kullanılmak üzere, sıvı CO₂'ye ihtiyaç duyulacaktır. CO₂ yakalama sisteminin ilk kez devreye alınmasında, henüz yakalanmış CO₂ bulunmadığından, ABG soğutma sürecinde kullanılacak sıvı CO₂'nin bir kereliğine dışarıdan temin edilmesi gerekmektedir. Alınan CO₂, bir numaralı ön bekletme tankına aktarılacaktır. Bir numaralı tankta bulunan bu soğuk CO₂'yle ABG soğutulurken, sıcaklığının ≤ 31 °C'ye düşmesi sağlanacaktır. Soğutulmuş ABG

kompresörle 73 atm basınçla sıkıştırılıp, sıvılaştırılacaktır. Kompresör çıkışına zamanlayıcı yerleştirilecektir. Bu zamanlayıcı, sıvı CO₂'nin ön bekletme tanklarına transferi sırasında tek yönlü valflerin açılmasını sağlayacaktır. Zamanlayıcının süresi tesisteki baca gazı çıkış debisine, elde edilecek CO₂ miktarına, soğutma için kullanılacak CO₂ debisine göre belirlenecektir.

Satın alınan CO₂ birinci, ikinci ve üçüncü tanklarda bulunacaktır. Bu tanklar dolu olduğu için sistemin çalıştırılmaya başlamasıyla, ilk sıkıştırma ile elde edilen CO₂ dört numaralı tanka gönderilecektir. Daha sonra her sıvılaştırma ile elde edilen CO₂, sırasıyla beş ve altı numaralı tanklara gönderilecektir. İlk üç tanktaki soğutma için kullanılan CO₂ tüketildiğinde tüm tanklar CO₂ bekletmek için kullanılmaya devam edecektir.

Sıkıştırarak sıvılaştırma işlemi esnasında sıcaklığı artan CO₂'nin, bu tanklarda bekletilerek, -56,4 °C ye kadar soğuması sağlanacaktır. İstenen bekleme süresinin sağlanabilmesi için bugünkü mevcut sistemlerde kullanılan ve elektrik kullanarak soğutma yapan coolerların yerine CO₂'nin pasif soğumasını sağlayacak, her biri 1000 m³ olan altı adet tank yerleştirilecektir. Bu tanklar; oluklu, kanatlı, doğal soğutmalı, basınca dayanıklı tanklardır.

4.6. Doğal Soğutmalı Kanatlı ve Oluklu Tanklar

Aşağıdaki şekilde basınca dayanıklı, doğal soğutmalı, kanatlı ve oluklu bir tank örneği görülmektedir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. Doğal soğutmalı, kanatlı ve oluklu tank görünümü.

Doğal soğutmalı tanklar, enerji verimliliği sağlamak ve maliyetleri düşürmek amacıyla ilk kez 20. yüzyılın ortalarında tasarlanmıştır. Özellikle pasif soğutma sistemleri, enerji kullanımını minimize etmek için geliştirilmiştir. Kanatlı ve oluklu tasarımlar ise ısı transfer alanını artırmak ve soğutma performansını iyileştirmek amacıyla daha sonra bu sistemlere entegre edilmiştir.

Doğal soğutmalı, kanatlı ve oluklu tankların üretiminde kullanılan malzemeler, dayanıklılık, ısı transfer verimliliği ve korozyon direnci gibi kriterlere göre seçilmektedir. Yaygın olarak kullanılan malzemeler şunlardır:

- **Paslanmaz Çelik:** Korozyon direnci yüksek ve dayanıklı bir malzemedir. Gıda ve kimya endüstrisinde sıklıkla kullanılır.
- **Karbon Çelik:** Daha ekonomik bir alternatiftir ve genellikle az korozyon riski bulunan uygulamalarda tercih edilir.
- **Alüminyum:** Hafif ve yüksek ısı iletkenliğine sahip bir malzeme olarak kanatlı yapıların üretiminde kullanılır.
- **Bakır:** Özellikle yüksek ısı iletkenliği gerektiren kanat yapılarında kullanılır.
- **Kompozit Malzemeler:** Daha özel uygulamalar için hafif ve dayanıklı kompozit malzemeler tercih edilmektedir.

Tankların yapısal özellikleri, ısı transfer verimliliğini artırmak amacıyla tasarlanmıştır:

- **Kanatlar:** Tank yüzeyine eklenen kanatlar, yüzey alanını artırarak ısı transferini hızlandırır. Genellikle kanat aralıkları optimize edilerek maksimum verim sağlanır.
- **Oluklar:** Tank yüzeyindeki oluklar, soğutma sıvısının ya da havanın akışını yönlendirerek daha etkili bir soğutma sağlar. Oluklu yapı, tankın genel mekanik dayanımını artırır.
- **Doğal Soğutma Mekanizması:** Pasif soğutma prensipleriyle çalışır. Dış ortam sıcaklığından yararlanarak enerji tüketimini en aza indirir. Aktif soğutma sistemlerinden farklı olarak mekanik bir enerji kaynağı gerektirmez.

Tank Maliyeti:

Bu tankların maliyeti, malzeme türü, üretim teknolojisi, kapasitesi ve kullanım amacına bağlı olarak değişir:

- **Malzeme Bazlı Maliyet:** Paslanmaz çelik ve bakır gibi malzemeler, yüksek maliyetlidir. Ancak dayanıklılık ve uzun ömürlülük gibi avantajlar sağlar.
- **Üretim ve Kurulum Maliyetleri:** Kanat ve oluk tasarımı daha karmaşık üretim süreçleri gerektirdiği için standart tanklara kıyasla daha pahalıdır. Ancak, bu ek maliyetler enerji tasarrufu ile dengelenebilir.
- **Bakım Maliyetleri:** Pasif soğutma sistemlerinde mekanik hareketli parçalar bulunmadığı için bakım maliyetleri düşüktür.

Bu sistemin avantajları arasında enerji tüketiminin azaltılması ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlaması, düşük işletme ve bakım maliyetlerine sahip olması ve çok çeşitli endüstriyel uygulamalara uygun şekilde özelleştirilebilmesi yer almaktadır. Ancak, sistemin dezavantajları arasında yüksek ilk yatırım maliyeti ve dış ortam sıcaklıklarına bağlı çalışma prensibi nedeniyle aşırı sıcak bölgelerde soğutma performansının sınırlı kalabilmesi bulunmaktadır. Bununla birlikte, tankın dış yüzeyine uygulanabilecek ek bir soğutma sistemi ile çevresel sıcaklıkların olumsuz etkileri ortadan kaldırılarak sistemin verimliliği artırılabilir. Sonuç olarak, doğal soğutmalı, kanatlı ve oluklu tanklar, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından avantaj sağlayan önemli bir mühendislik çözümüdür. Geniş uygulama alanları ve düşük işletme maliyetleriyle modern endüstriyel sistemlerin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir.

Mevcut soğuk ortamda sıkıştırma sistemlerinde (Feng Chen ve Tatiana Morosuk), CO₂'nin sıvılaştırılması için beş aşamalı bir sıkıştırma prosesi kullanılmaktadır. Bu sistemin her bir aşamasında, sıkıştırma sebebiyle oluşan CO₂ sıcaklık artışını düşürmek amacıyla dört adet soğutma sistemi (cooler) kullanılır. Tasarımımızda ise tek bir kompresörün kullanılması ve cooler'ların elimine edilmesi, karbon ayak izini azaltarak daha çevreci bir yaklaşım sunacaktır. Ayrıca dört adet kompresör ve beş adet cooler maliyetleri de ortadan kaldırılmış olacaktır. Böylece bu sistemlerin hem ilk kurulum maliyetleri hem de işletme ve bakım onarım maliyetleri de ortadan kalkmaktadır.

Bekleme sonrası soğuması (-56,4 °C) sağlanan CO₂, ABG soğutma için kullanılacaktır. Bunun için çıkış kısmına zamanlayıcı ve tek yönlü valf yerleştirilmiş olan bekleme tanklarından, sırasıyla, ABG+CO₂ karışım noktasına sıvı CO₂ geçişi sağlanacaktır (Şekil 4.13). Tek yönlü valfin açılmasıyla basıncı atmosfer basıncına

düşecek olan sıvı CO₂ gaz fazına geçmiş olacaktır. Yani ABG+CO₂ karışım noktasına ulaştığında CO₂ gaz fazında olacaktır. Basıncın ortadan kalkması sebebiyle pompa vb. bir itici güce gerek kalmadan CO₂'nin ABG ile karışması sağlanmış olacaktır.

Yakalanan, sıvılaştırılan ve tanklarda doğal soğuması sağlanarak -56,4 °C sıcaklığa ulaşmış likit CO₂'nin bir kısmı ABG soğutmada kullanılacak, geri kalan kısmı da nihai depolama tanklarına transfer edilecektir.

ABG soğutma için gerekli CO₂ haricindeki yakalanmış ve sıvılaştırılmış olan CO₂, tank çiftliğinde bulunan nihai depolama tanklarına transfer edilecektir (Şekil 4.15). Nihai depolama için de doğal soğutmalı tanklar tercih edilecektir. Çünkü bu tanklarda bulunan likit CO₂, termik santral türbinini terk eden çürük buharın yoğunlaştırılması için kullanılacaktır. Çürük buhar yoğunlaştırmada kullanılacak sistem izobarik bir sistemdir. Yani yoğunlaştırma için kullanılacak CO₂'nin basıncı sabit kalırken sıcaklığı artacak, bu sıcaklığın düşürülmesi için ön bekletme tanklarında olduğu gibi pasif soğutmadan yararlanılacaktır.



Şekil 4.15. Nihai depolama tankları.

Sistemde kullanılacak nihai depolama tankları, piyasada bulunan yüksek kapasiteye sahip basınç dayanıklı tanklardan seçilebilir. Zira sistemden elde edilecek CO₂ miktarı çok yüksek olduğundan tank kapasitelerinin de yüksek hacimlere sahip olması gerekmektedir. Elde edilen CO₂'nin satış ve pazarlama süreleri içinde bu tanklarda bekletilmesi gerekecektir. Örneğin amonyak vb. maddelerin depolanmasında

kullanılan 5.000-60.000 m³ hacme sahip çoğunlukla 10-20 bar aralığında basınca dayanıklı tanklar mevcuttur.

Ayrıca bu tanklarda bulunan sıvı CO₂ buhar yoğunlaştırma sisteminde de kullanılmaya devam edilecektir. Buhar yoğunlaştırma için kullanılan ve işini tamamlayan CO₂, bu tankların bir kısmına geri döndürülecek ve yeniden kullanılmak üzere depolanacaktır. Dolayısıyla buhar yoğunlaştırma için kullanılacak CO₂'nin depolandığı tankların da basınca dayanıklı, doğal soğutmalı, oluklu ve kanatlı olması gerekmektedir.

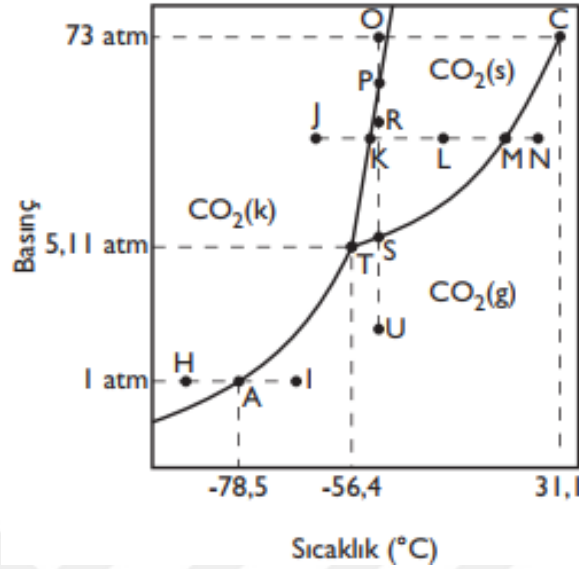
Nihai depolama tankları tasarlanırken; yüksek basınca dayanıklılık, soğutma ve izolasyon gereklilikleri, güvenlik standartları, maliyetler göz önünde bulundurulmaktadır.

Çürük buharın yoğunlaştırılması için kullanılacak CO₂'nin depolandığı tanklar, maliyet etkinliği sağlamak amacıyla doğal soğutmalı, oluklu ve kanatlı tasarıma sahip olarak seçilmiştir. Bu tanklar, pasif soğutma prensibiyle çalışarak enerji tüketimini minimuma indirmeyi hedeflemektedir. Öte yandan, sıvılaştırılmış CO₂'nin depolanması ve satış sürecinde bekletilmesi amacıyla, piyasada yaygın olarak kullanılan, 10-20 bar basınca dayanıklı ve 60.000 m³ hacimli standart depolama tankları tercih edilebilir. Bu tanklar, yüksek basınç ve büyük hacim kapasiteleriyle operasyonel verimlilik sunmaktadır.

73,96 bar basınç altında sıvılaştırılarak sıcaklığı -56,4 °C ye düşürülmüş CO₂ bu sıcaklık korunduğu ve basıncı 5,18 bar üzerinde tutulduğu sürece sıvı fazda kalmaya devam edecektir.

Nihai depolama tank çıkışındaki tek yönlü valfler; enerji üretimi için kullanılan türbini döndürerek işini tamamlayan ve çürük buhar olarak adlandırılan buharın yoğunlaştırılması için tasarlanmış soğutma sistemine likit CO₂'nin gönderilmesini sağlayacak ve geri dönüşünü engelleyecek olan valflerdir. Sistem sabit basınç altında soğutma ve yoğunlaştırma sağlamaktadır. Yani CO₂ basıncı değişmezken sıcaklığı artacaktır. Çürük buharı yoğunlaştırarak işini tamamlayan ve sıcaklığı yükselen likit CO₂'nin başka bir boru ile bu tanklara dönüşü sağlanacaktır. Dönüş borusunun tanka giriş noktasına da tanka girişe izin veren tek yönlü valf yerleştirilecektir. Böylece besleme suyu yoğunlaştırma sisteminden işini tamamlayarak tanka gelen CO₂'nin de doğal soğutmalı, oluklu ve kanatlı tanklar içinde yeniden soğuması sağlanacaktır.

4.7. Sıkıştırma Öncesi Arıtılmış Baca Gazının Soğutulması için Gerekli CO₂ Miktarının Hesaplanması



Şekil 4.16. CO₂'nin faz diyagramı (Hür, D. 2009).

Faz diyagramları, maddenin farklı basınç ve sıcaklık koşullarında hangi fazda bulunduğunu gösteren önemli termodinamik araçlardır. Bu diyagramlarda, sıvı ve buhar fazları arasındaki sınırın tamamen kaybolduğu noktaya kritik nokta adı verilir. Kritik nokta, belirli bir basınç ve sıcaklık değerinde gerçekleşir ve bu değerlerin üzerinde madde, ne tamamen sıvı ne de tamamen gaz fazında tanımlanabilir. Bu koşullarda madde, hem sıvı hem de gaz özelliklerini bir arada sergileyen süperkritik akışkan haline geçer.

Kritik noktada, maddenin yoğunluk, viskozite ve termal iletkenlik gibi fiziksel özellikleri, sıvı ve gaz fazları arasındaki ayrımın kaybolmasına neden olur. Basınç ve sıcaklık kritik değerlerin üzerine çıktığında, madde artık klasik anlamda sıvı veya gaz olarak tanımlanamaz. Bunun yerine, süperkritik akışkan olarak adlandırılan bu faz, geniş endüstriyel ve bilimsel uygulamalarda benzersiz özellikler sunar.

CO₂'nin faz diyagramı incelendiğinde (Şekil 4.16), kritik noktasının 73 atm (73,97 bar) basınç ve 31,1 °C sıcaklık değerlerinde olduğu görülmektedir. Bu değerler, CO₂'nin gaz fazından sıvı faza geçebilmesi için aşılmaması gereken sınır değerleri ifade eder. Dolayısıyla, ABG içerisindeki CO₂'yi sıvılaştırarak ayırabilmek için sistemdeki sıcaklığın $\leq 31,1$ °C ve basıncın ≥ 73 atm olması gerekmektedir. Bu koşullar altında CO₂ sıvı faza geçer ve arıtılmış baca gazından ayrılabilir.

Kritik nokta basıncı ve sıcaklığının altındaki koşullarda CO₂'nin sıvılaştırılması, faz ayrıştırma süreçlerinin temelini oluşturur. Bu prensipler, termik santral baca gazlarından karbon yakalama ve sıvılaştırma sistemlerinin tasarımında kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle, süperkritik akışkan faz özellikleri ve kritik nokta bilgisi, karbon yönetimi ve depolama sistemlerinin optimizasyonunda kilit bir rol oynamaktadır.

4.8. ABG İçinde Bulunan N₂, CO₂ ve Su Buharının Kütlesel Debi Hesaplamaları

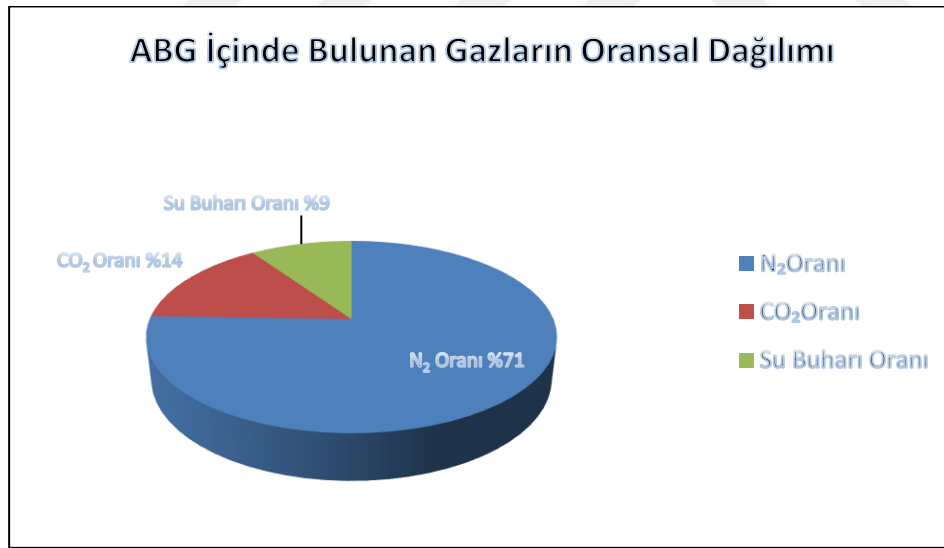
Termik santral baca gazının toplam hacimsel debisi ($\dot{v}_{BG}$) : 400 m³/s

Baca gazı içinde bulunan N₂ oranı: %71

Baca gazı içinde bulunan CO₂ oranı: %14

Baca gazı içinde bulunan su buharı oranı: %9

ABG içindeki gazların hacimsel oranlarının dağılımı grafikte gösterilmiştir (Şekil 4.17)



Şekil 4.17. Arıtılmış baca gazı içinde bulunan gazların oranlarına göre dağılımı.

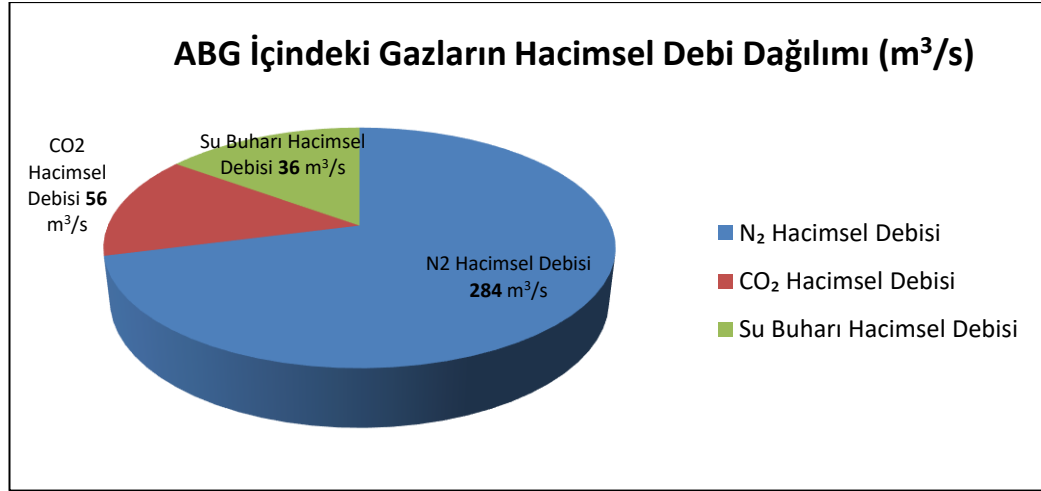
Sisteme girecek arındırılmış ABG içindeki gazların hacimsel debileri:

$$N_2 (\dot{v}_{N_2}) = 284 \text{ m}^3/\text{s} = 1.022.400 \text{ m}^3/\text{h} = 24.537.600 \text{ m}^3/\text{gün} = 8.956.224.000 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$CO_2 (\dot{v}_{CO_2}) = 56 \text{ m}^3/\text{s} = 201.600 \text{ m}^3/\text{h} = 4.838.400 \text{ m}^3/\text{gün} = 1.766.016.000 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$\text{Su Buharı} (\dot{v}_{\text{su buharı}}) = 36 \text{ m}^3/\text{s} = 129.600 \text{ m}^3/\text{h} = 3.110.400 \text{ m}^3/\text{gün} = 1.135.296.000 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

ABG içindeki gazların hacimsel debileri grafikte gösterilmiştir (Şekil 4.18)



Şekil 4.18. Arıtılmış baca gazı içinde bulunan gazların hacimsel debilerine göre dağılımı.

ABG'nin hacimsel debisi:

$$\dot{v}_{ABG} = 284 \text{ m}^3/\text{s} + 56 \text{ m}^3/\text{s} + 36 \text{ m}^3/\text{s} = 376 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$95^\circ\text{C deki CO}_2\text{'nin yoğunluğu } (\rho_{\text{CO}_2}) = 0,980 \text{ kg/ m}^3$$

$$95^\circ\text{C deki N}_2\text{'un yoğunluğu } (\rho_{\text{N}_2}) = 0,927 \text{ kg/ m}^3$$

$$95^\circ\text{C deki su buharının yoğunluğu } (\rho_{\text{su buharı}}) = 0,369 \text{ kg/ m}^3$$

Bu yoğunluk değerleri, Çengel ve Boles'in *Termodinamik (Mühendislik Yaklaşımıyla)* adlı eserinde yer alan Tablo A'dan alınmıştır (Çengel & Boles, 2020).

Bu durumda;

$$\text{Kütlesel debi} = \text{Hacimsel debi} \times \text{yoğunluk}$$

$$\dot{m} = \dot{v} \rho \quad (\text{Denklem 1})$$

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = 56 \text{ m}^3/\text{s} \times 0,980 \text{ kg/ m}^3$$

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = 54,88 \text{ kg/s} = 197.568 \text{ kg/h} = 4.741.632 \text{ kg/gün} = 1.730.695.680 \text{ kg/yıl} = 1.730.695,68 \text{ ton/yıl}$$

$$\dot{m}_{\text{N}_2} = 284 \text{ m}^3/\text{s} \times 0,927 \text{ kg/ m}^3$$

$$\dot{m}_{\text{N}_2} = 263,27 \text{ kg/s} = 947.772 \text{ kg/h} = 22.746.528 \text{ kg/gün} = 8.302.482.720 \text{ kg/yıl} = 8.302.482,720 \text{ ton/yıl}$$

$$\dot{m}_{\text{Su Buharı}} = 36 \text{ m}^3/\text{s} \times 0,369 \text{ kg/ m}^3$$

$$\dot{m}_{\text{Su Buharı}} = 13,28 \text{ kg/s} = 47.808 \text{ kg/h} = 1.147.392 \text{ kg/gün} = 418.798.080 \text{ kg/yıl} = 418.798,080 \text{ ton/yıl}$$

ABG'nin; CO₂ ile karıştırılarak soğutulduğu A noktasından önceki kütleli debisi N₂, CO₂ ve su buharının kütleli debileri toplamı kadar olacaktır.

$$\dot{m}_{\text{ABG}} = \dot{m}_{\text{N}_2} + \dot{m}_{\text{CO}_2} + \dot{m}_{\text{Su Buharı}}$$

$$\dot{m}_{\text{ABG}} = 263,27 \text{ kg/s} + 54,88 \text{ kg/s} + 13,28 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{\text{ABG}} = 331,43 \text{ kg/s}$$

331,43 kg/s kütleli debiye ve 95 °C sıcaklığa sahip ABG'nin soğutulması için ihtiyaç duyulan CO₂ miktarı aşağıda hesaplanmıştır.

ABG;

95 °C'deki N₂, su buharı ve CO₂ karışımının Cp değeri, her bir bileşenin Cp değerine ve karışımdaki mol veya kütle oranlarına bağlıdır.

Karışımın Cp değerini bulmak için aşağıdaki ağırlıklı ortalama denklemi kullanılır:

$$C_{p\text{ABG}} = y_{\text{N}_2} \cdot C_{p\text{N}_2} + y_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{p\text{H}_2\text{O}} + y_{\text{CO}_2} \cdot C_{p\text{CO}_2} \quad (\text{Denklem 5})$$

Burada;

y: Bileşenlerin ABG içindeki kütleli oranıdır.

95 °C sıcaklıktaki ABG içindeki gazlara ait Cp değerleri spesifik termodinamik tablolarına göre aşağıdaki gibidir:

$$\text{N}_2: 1.039 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$\text{Su buharı (H}_2\text{O)}: 2.080 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$\text{CO}_2: 0.844 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$C_{p\text{ABG}} = (263,27/331,43) \times 1.039 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} + (13,28/331,43) \times 2,080 + (54,88/331,43) \times 0,844$$

$$C_{p\text{ABG}} = 1,049 \text{ olarak bulunur.}$$

$$T = 95 \text{ °C} = 368 \text{ K}$$

$$C_{p\text{ABG}} = 1,049 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

Soğutma için kullanılacak CO₂;

$$T = -56,4 \text{ }^{\circ}\text{C} = 216,6 \text{ K}$$

$$C_{p\text{CO}_2} = 0,844 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

368 K sıcaklıkta ve $\dot{m}_{\text{ABG}} = 331,43 \text{ kg/s}$ kütleli debiye sahip baca gazının; CO_2 'nin kritik sıcaklığı olan $\leq 31,1^{\circ}\text{C} = 304 \text{ K}$ 'e düşürülebilmesi için ihtiyaç duyulan $-56,4^{\circ}\text{C} = 216,6 \text{ K}$ sıcaklığa sahip CO_2 'nin kütleli debisi aşağıda hesaplanmıştır:

$$\dot{m}_{\text{ABG}} \times C_{p\text{ABG}} \times (T_g - T_{\text{ç}}) = \dot{m}_{\text{CO}_2} \times C_{p\text{CO}_2} \times (T_{\text{ç}} - T_g) \quad (\text{Denklem 3})$$

$$331,43 \times 1,049 \times (368 - 216,6) = \dot{m}_{\text{CO}_2} \times 0,844 \times (304 - 216,6)$$

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = 713,5 \text{ kg/s}$$

Soğutma için A noktasından verilmesi gereken CO_2 'nin kütleli ve hacimsel debileri;

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = 713,5 \text{ kg/s} = 728 \text{ m}^3/\text{s}$$

Bir saat ABG soğutma için gerekli olan $\text{CO}_2 = 2.568,6 \text{ ton/h}$ 'tir.

Sistemle $54,88 \text{ kg/s}$ debiyle CO_2 yakalanacaktır. Bunun yanında, 95°C sıcaklığındaki baca gazının $\leq 31,1^{\circ}\text{C}$ 'ye düşürülmesi için gerekli CO_2 kütleli debisi (sıcaklık= $-56,4^{\circ}\text{C}$) $713,5 \text{ kg/s}$ olarak hesaplanmıştır.

Kompresörden ön bekletme tanklarına gönderilecek CO_2 miktarı=ABG'den elde edilen CO_2 +ABG soğutma için kullanılan CO_2

$$54,88 \text{ kg/s} + 713,5 \text{ kg/s} = 768,38 \text{ kg/s} = 2.766.168 \text{ kg/h} = 2.766,168 \text{ ton/h}$$

CO_2 kompresöre yönlendirilmiş olacaktır.

Gaz fazında iken kütleli debisi $54,88 \text{ kg/s}$ olan CO_2 , $73,97 \text{ bar} = 7.397 \text{ KPa} = 7.397.000 \text{ Pa}$ basınç altında sıkıştırılarak likit faza dönüştürülecek ve likit fazda sıcaklığı $-56,4^{\circ}\text{C} = 216,6 \text{ K}$ olacaktır.

4.9. CO_2 Hacmine Soğutma ve Sıkıştırma İşlemlerinin Etkileri

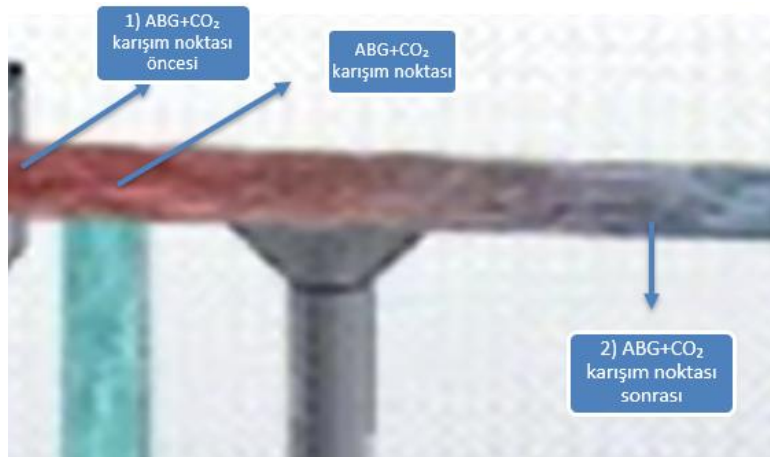
Soğutma ve sıkıştırma işlemleri, CO_2 hacminde önemli değişikliklere neden olmaktadır. Bu değişiklikler, gazların davranışını tanımlayan temel fiziksel prensiplerden biri olan İdeal Gaz Yasası temel alınarak hesaplanabilir. İdeal Gaz Yasası, bir gazın basıncı, hacmi ve sıcaklığı arasındaki ilişkiyi ifade eder.

Soğutma işlemi sırasında sıcaklığın düşürülmesi, gaz moleküllerinin kinetik enerjisini azaltır ve bu durum hacimde bir azalmaya neden olur. Benzer şekilde, sıkıştırma işlemi

basıncın artırılmasını gerektirir ve bu da gazın hacminin ters orantılı olarak küçülmesine yol açar. Bu süreçler, CO₂'nin gaz fazından sıvı faza geçişini sağlamak için kritik öneme sahiptir. Örneğin, bir termik santralin baca gazından yakalanan CO₂'nin başlangıçta düşük basınç ve yüksek sıcaklık koşullarında geniş bir hacme sahip olduğu düşünülürse, soğutma ve sıkıştırma işlemleri ile bu hacim önemli ölçüde küçültülebilir. İdeal Gaz Yasası, bu hacim küçülmesinin hesaplanmasında temel bir araç olarak kullanılmaktadır.

Elde edilen CO₂'nin sıvılaştırılabilmesi için sıcaklığının kritik sıcaklık olan 31,1 °C'nin (304 K) altına düşürülmesi ve basıncının kritik basınç olan 73,97 bar üzerine çıkarılması gereklidir. Bu işlemler sonucunda, CO₂'nin hacmi başlangıçtaki gaz fazındaki hacmine kıyasla büyük ölçüde azalır ve sıvı fazda depolanabilir hale gelir.

Bu hesaplamalar, karbon yakalama ve sıvılaştırma sistemlerinin tasarımında ve optimize edilmesinde önemli bir rol oynar. Soğutma ve sıkıştırma işlemlerinin CO₂ hacmi üzerindeki etkilerinin doğru bir şekilde analiz edilmesi, enerji tüketimi, sistem verimliliği ve depolama kapasitesi gibi kritik faktörlerin değerlendirilmesini sağlar. Sürekli akış halindeki ABG'nin, sistem içindeki şekil 4.19, 4.20 ve 4.21'de gösterilen kritik noktalar için sıcaklık ve basınç değişimlerine bağlı olarak hacimsel değişimi analiz edilmiştir. İlgili noktalar, sistemdeki akış parametrelerinin değerlendirilmesi açısından önemli olup, hesaplama detayları bu şekillerde belirtilen konumlara göre yapılmıştır. Aşağıda, bu noktalar temel alınarak gerçekleştirilen hacimsel değişim hesaplamalarına yer verilmiştir.



Şekil 4.19. ABG+ CO₂ karışım noktası, öncesi ve sonrası.

- 1) ABG+CO₂ karışım noktası öncesi (Şekil 4.19-1 noktası), 95 °C sıcaklığa ve 54,88 kg/s kütleli debiye sahip CO₂'nin hacmi, İdeal Gaz Yasasına göre hesaplandığında;

$$PV = mRT \quad (\text{Denklem 2})$$

$$P (\text{Basınç}) = 101,325 \text{ KPa} (P_{\text{atm}}) = 101325 \text{ Pa}$$

$$m (\text{Kütle}) = 54,88 \text{ kg}$$

$$R (\text{Universal Gaz Sabiti}) = 188.91 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$T (\text{Sıcaklık}) = 368 \text{ K}$$

$$V (\text{Hacim(m}^3\text{)})$$

$$101325 \text{ Pa} \times V_{\text{CO}_2 \text{ gaz}} = 54,88 \text{ kg} \times 188,91 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)} \times 368 \text{ K}$$

$$V_{\text{CO}_2 \text{ gaz}} = 37,65 \text{ m}^3 \text{ olarak bulunur (Tablo 4.3-1)}$$

- 2-a) ABG+CO₂ karışım noktasından geçerek sıcaklığın $\leq 31^\circ\text{C}$ 'ye düşmesi sonrası (Şekil 4.19-2 noktası) 54,88 kg/s kütleli debiye sahip CO₂'nin hacmi hesaplandığında (Denklem 2);

$$P (\text{Basınç}) = 101,325 \text{ KPa} (P_{\text{atm}}) = 101325 \text{ Pa}$$

$$m (\text{Kütle}) = 54,88 \text{ kg}$$

$$R (\text{Universal Gaz Sabiti}) = 188.91 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$T (\text{Sıcaklık}) = 304 \text{ K}$$

$$V (\text{Hacim(m}^3\text{)})$$

$$101325 \times V_{\text{CO}_2 \text{ gaz}} = 54,88 \times 188.91 \times 304$$

$$V_{\text{CO}_2 \text{ gaz}} = 31,10 \text{ m}^3 \text{ bulunur (Tablo 4.3-2).}$$

Buradaki 31,10 m³/s lik debi KETS'in bacasından çıkan ve yakalanan CO₂'nin gaz fazındaki hacmini temsil etmektedir.

- 2-b) Ancak 95 °C ABG'nin $\leq 31^\circ\text{C}$ ye soğutulabilmesi için ABG+ CO₂ karışım noktasına 713,5 kg/s kütleli debiyle CO₂ verilmektedir. Karışım noktası sonrasında kompresöre giren $\leq 31^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki CO₂ kütleli debisi= 713,5 kg/s+54,88 Kg/s=768,38 Kg/s olacaktır.

Bu durumdaki kompresöre giren toplam CO₂ hacmi hesaplandığında (Denklem 2);

$$P \text{ (Basınç)} = 101,325 \text{ KPa} (P_{\text{atm}}) = 101325 \text{ Pa}$$

$$m \text{ (Kütle)} = 768,38 \text{ Kg}$$

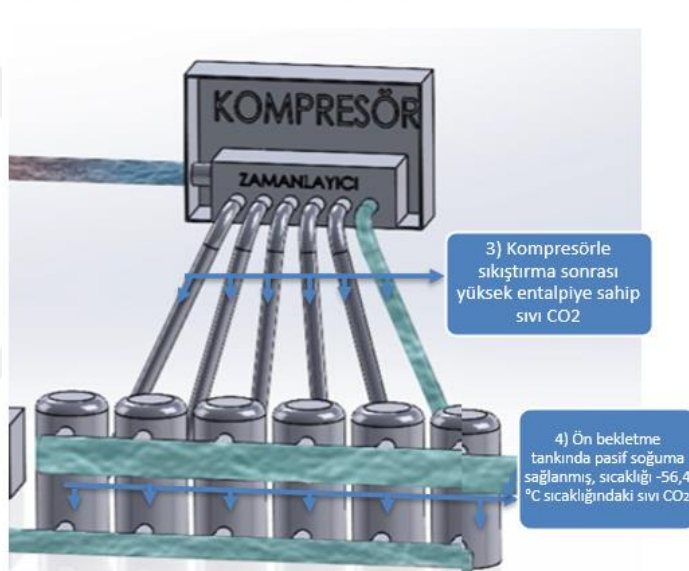
$$R \text{ (Universal Gaz Sabiti)} = 188.91 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

$$T \text{ (Sıcaklık)} = 304 \text{ K}$$

$$V \text{ (Hacim)} (\text{m}^3)$$

$$101325 \times V_{\text{CO}_2 \text{ gaz}} = 768,38 \times 188.91 \times 304$$

$$V_{\text{CO}_2 \text{ gaz}} = 435,49 \text{ m}^3 \text{ olarak bulunur (Tablo 4.3-2-b).}$$



Şekil 4.20. Kompresör (3) ve pasif soğutma sonrası (4) CO₂.

3-a) Sıcaklığı $\leq 31^\circ\text{C}$ 'ye düşürülmüş 54,88 kg/s kütleli debiye sahip CO₂'nin, kompresörle 73 atm basınç altında sıkıştırılması sonrasındaki (Şekil 4.20-3 noktası) hacmi hesaplandığında (Denklem 2);

$$P \text{ (Basınç)} = 73,97 \text{ bar} = 7397 \text{ KPa} = 7.397.000 \text{ Pa}$$

$$m \text{ (Kütle)} = 54,88 \text{ kg}$$

$$R \text{ (Universal Gaz Sabiti)} = 188.91 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

$$T \text{ (Sıcaklık)} = 304 \text{ K}$$

$$V \text{ (Hacim)} (\text{m}^3)$$

$$7.397.000 \text{ Pa} \times V_{\text{CO}_2} = 54,88 \text{ Kg} \times 188,91 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \times 304 \text{ K}$$

$V_{CO_2} = 0,43 \text{ m}^3/\text{s} = 1.548 \text{ m}^3/\text{h}$ bulunur (Tablo 7.3-3-a).

Burada CO_2 fazı, sıvı+gaz karışımı süper akışkan formundadır. Çünkü basınca bağlı olarak sıcaklığı artmıştır. Sıvılaştırma için gerekli basınç sağlanmış olsa da kritik nokta üzeri bir sıcaklığa sahip olduğu için sıvılaştırma istenen miktarda gerçekleşmemiştir. CO_2 'nin tamamen sıvılaştırabilmesi için karışımın ya dışarıdan bir soğutucu akışkanla soğutulması ya da doğal konveksiyon yoluyla ısı transferiyle gerçekleşecek pasif bir soğutma sürecine tabi tutulması gerekir.

3-b) Buradaki $0,43 \text{ m}^3/\text{s}$ lik debi KETS'in bacasından çıkan ve yakalanan CO_2 'yi temsil etmektedir. ABG+ CO_2 karışım noktası sonrasında kompresöre giren $\leq 31 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki CO_2 kütleli debisine ($768,38 \text{ Kg/s}$) göre hacmi hesaplandığında (Denklemler 2);

$$P \text{ (Basınç)} = 73,97 \text{ bar} = 7397 \text{ KPa} = 7.397.000 \text{ Pa}$$

$$m \text{ (Kütle)} = 768,38 \text{ Kg}$$

$$R \text{ (Universal Gaz Sabiti)} = 188,91 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$T \text{ (Sıcaklık)} = 304 \text{ K}$$

$$V \text{ (Hacim)} (\text{m}^3)$$

$$7.397.000 \text{ Pa} \times V_{CO_2} = 768,38 \text{ Kg} \times 188,91 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)} \times 304 \text{ K}$$

$$V_{CO_2} = 5,96 \text{ m}^3 \text{ olarak bulunur (Tablo 4.3-3-b).}$$

4-a) Bu aşamada $0,43 \text{ m}^3/\text{s}$ debiyle ön bekletme tankına gelen $54,88 \text{ kg/s}$ kütleli debiye sahip CO_2 'nin sıcaklığının $-56,4 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye düşmesi beklendiğinden, sıcaklığın düşmesine bağlı olarak hacim azalacaktır (Tablo 4.3-4-a).

4-b) Kompresörde sıkıştırılarak hacmi azaltılan CO_2 'nin, ön bekletme tanklarında bekletilerek soğumasının sağlanması ve sıcaklığın $-56,4 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye düşmesi sonrası (Şekil 4.20-4 noktası) hacmi hesaplandığında (Denklemler 2);

$$P \text{ (Basınç)} = 73,97 \text{ bar} = 7397 \text{ KPa} = 7.397.000 \text{ Pa}$$

$$m \text{ (Kütle)} = 54,88 \text{ kg}$$

$$R \text{ (Universal Gaz Sabiti)} = 188,91 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$T \text{ (Sıcaklık)} = 216,6 \text{ K}$$

V (Hacim)(m³)

$$7.397.000 \text{ Pa} \times V_{CO_2} = 54,88 \text{ Kg} \times 188,91 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \times 216,6 \text{ K}$$

$V_{CO_2} = 0,30 \text{ m}^3$ bulunur (Tablo 4.3- 4-b). Bu aşamada CO₂ sıvı fazdadır.

Burada elde edilen 0,30 m³ değeri sadece ABG'den elde edilen CO₂'yi temsil etmektedir.

4-c) ABG+CO₂ toplam hacmi hesaplandığında (Denklem 2);

$$P \text{ (Basınç)} = 73,97 \text{ bar} = 7397 \text{ KPa} = 7.397.000 \text{ Pa}$$

$$m \text{ (Kütle)} = 768,38 \text{ Kg}$$

$$R \text{ (Universal Gaz Sabiti)} = 188.91 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

$$T \text{ (Sıcaklık)} = 216,6 \text{ K}$$

V (Hacim)(m³)

$$7.397.000 \text{ Pa} \times V_{CO_2} = 768,38 \text{ Kg} \times 188,91 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \times 216,6 \text{ K}$$

$V_{CO_2} = 4,3 \text{ m}^3$ olarak bulunur (Tablo 4.3-4-c).

Ön bekletme tanklarında soğutma ve yoğuşma işlemi tamamlanarak sıcaklığı -56,4 °C'ye düşürülen ABG'den elde edilen ve soğutma için kullanılan CO₂'nin toplam hacmi 4,3 m³ olarak hesaplanmıştır. Bu değer, ön bekletme tankı içerisinde pasif soğuma işlemi tamamlanmış CO₂'nin toplam hacmini ifade etmektedir.

5-a) Ön bekletme tankında yoğuşması sağlanmış sıcaklığı -56,4 °C olan ve ABG soğutma için karışım noktasına gönderilen CO₂'nin hacmi hesaplandığında (Denklem 2);

$$P \text{ (Basınç)} = 7.397 \text{ KPa} (P_{\text{atm}}) = 7.397.000 \text{ Pa}$$

$$m \text{ (Kütle)} = 713,5 \text{ kg}$$

$$R \text{ (Universal Gaz Sabiti)} = 188.91 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

$$T \text{ (Sıcaklık)} = 216,6 \text{ K}$$

V (Hacim)(m³)

$$7.397.000 \text{ Pa} \times V_{CO_2} = 713,5 \text{ Kg} \times 188,91 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \times 216,6 \text{ K}$$

$V_{CO_2} = 3,95 \text{ m}^3$ tür (Tablo 4.3-5-a). CO₂ bu şartlarda sıvı fazdadır.

73,97 bar basınç ve -56,4 °C sıcaklığa sahip, ABG soğutma için ihtiyaç duyulan CO₂'nin sıvı fazdaki hacmi 3,95 m³/s'dir.

5-b) ABG soğutmak için kullanılacak olan CO₂ bir boru aracılığıyla ABG+CO₂ karşılaşma noktasına verilecektir. 73,97 bar basınçlı ön bekletme tankından zamanlayıcı ve tek yönlü valften geçerek boruya verilecek olan CO₂'nin basıncı atmosfer basıncına düşecek ve gaz fazına geçecektir. Ön bekletme tankından çıkış sıcaklığı -56,4 °C'dir. CO₂'nin bu aşamadaki hacmi hesaplandığında (Denklem 2);

$$P \text{ (Basınç)} = 101,325 \text{ KPa (P}_{\text{atm}}) = 101325 \text{ Pa}$$

$$m \text{ (Kütle)} = 713,5 \text{ kg}$$

$$R \text{ (Universal Gaz Sabiti)} = 188,91 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$T \text{ (Sıcaklık)} = 216,6 \text{ K}$$

$$V \text{ (Hacim)}(\text{m}^3)$$

$$101325 \text{ Pa} \times V_{\text{CO}_2} = 713,5 \text{ Kg} \times 188,91 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)} \times 216,6 \text{ K}$$

$V_{\text{CO}_2} = 288 \text{ m}^3$ bulunur (Tablo 4.3-5-b). Bu aşamada CO₂ basıncın 73,97 bar basınçtan atmosfer basıncına düşürülmesi sebebiyle sıvı fazdan gaz fazına geçmiştir.

6-) Ön bekletme tankından zamanlayıcı ve tek yönlü valflerden geçen CO₂, transfer borusuyla nihai depolama tanklarına yönlendirilecektir (Şekil 4.21-6 noktası). Bu noktada gaz basıncı, nihai depolama tankları için uygun olan 10 bar basınca düşürülecektir. Basıncın düşürülmesinin sebebi, nihai depolama tanklarının dayanma basıncı olan 10 bar basınç için uygun hale getirmektir. CO₂ faz diyagramından (Şekil 4.16) da görüleceği gibi sıcaklığı -56,4 °C olan sıvı CO₂ bu basınçta da fazını koruyarak sıvı halde depolanabilecektir. Basıncı 10 bara düşürülen CO₂'nin, transfer borusunda ve nihai depolama tanklarındaki hacmi hesaplandığında (Denklem 2);

$$P \text{ (Basınç)} = 1.000 \text{ KPa (P}_{\text{atm}}) = 1.000.000 \text{ Pa}$$

$$m \text{ (Kütle)} = 54,88 \text{ kg}$$

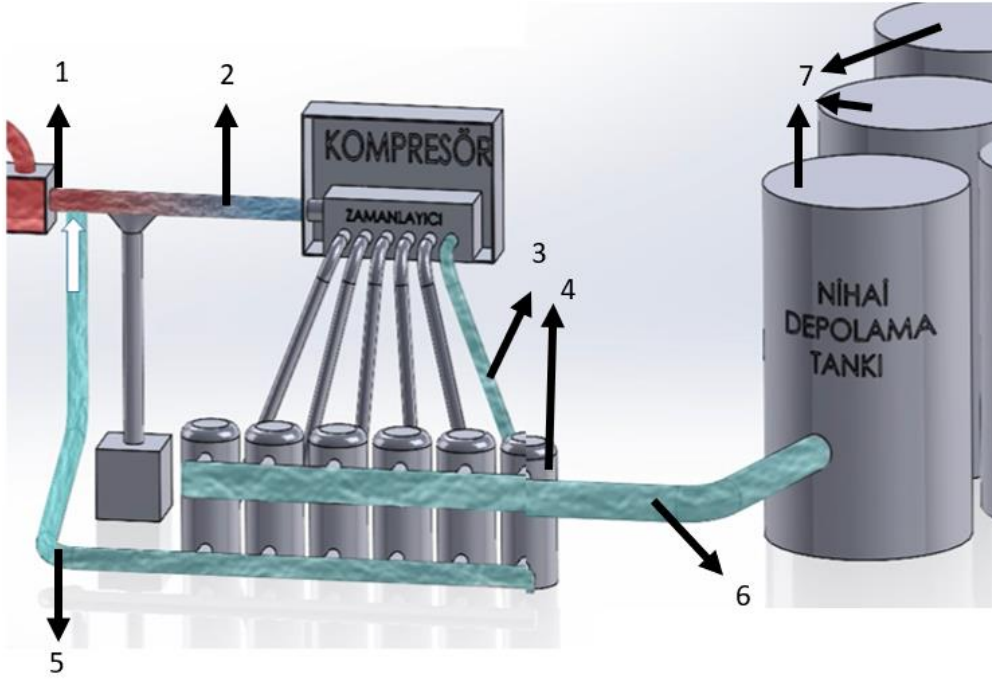
$$R \text{ (Universal Gaz Sabiti)} = 188,91 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$T \text{ (Sıcaklık)} = 216,6 \text{ K}$$

$$V \text{ (Hacim)}(\text{m}^3)$$

$$1.000.000 \text{ Pa} \times V_{\text{CO}_2} = 54,88 \text{ Kg} \times 188,91 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)} \times 216,6 \text{ K}$$

$V_{CO_2} = 2,25 \text{ m}^3$ olarak bulunur (Tablo 4.3- 6)



Şekil 4.21. Gaz basıncı ve sıcaklık değerleri için hesaplama yapılan noktaların gösterimi.

Şekil 4.21’de gösterilen noktalar için yapılan hesaplama sonuçları, basıncı, sıcaklık, hacim ve faz değişiklikleri Tablo 4.3’te gösterilmiştir.

Tablo 4.3. Sıkıştırma, soğutma, yoğunlaştırma ve sıvılaştırma aşamalarında CO_2 ’nin hacmi ve fazında meydana gelen değişiklikler.

Hesaplama Yapılan Nokta	Gaz/Gaz Karışımı	Sıcaklık (°C)	Basıncı (Pa)	Hacim (m ³)	Faz
1	Sadece ABG içinden elde edilen CO_2 için	95	101.325	37,65	Gaz
2	Sadece ABG içinden elde edilen CO_2 için	31	101.325	31,10	Gaz
2-b	ABG + CO_2 için	31	101.325	435,49	Gaz
3-a	Sadece ABG içinden elde edilen CO_2 için	545	7.397.000	0,43	Süper Akışkan
3-b	ABG + CO_2 için	545	7.397.000	5,96	Süper Akışkan
4-a	Sadece ABG içinden elde edilen CO_2 için	545 → -56,4	7.397.000	0,43 → 0,30	Süper Akışkan → Sıvı

Tablo 4.3.(Devamı) Sıkıştırma, soğutma, yoğuşturma ve sıvılaştırma aşamalarında CO₂'nin hacmi ve fazında meydana gelen değişiklikler.

4-b	Sadece ABG içinden elde edilen CO ₂ 'nin bekleyerek soğuması sonrası hacmi	-56,4	7.397.000	0,30	Sıvı
4-c	ABG + CO ₂ için	-56,4	7.397.000	4,3	Sıvı
5-a	Soğutma için kullanılan CO ₂ için	-56,4	7.397.000	3,95	Sıvı
5-b	Soğutma için kullanılan CO ₂ için	-56,4	101.325	288	Gaz
6	Sadece ABG içinden elde edilen CO ₂ için	-56,4	1.000.000	2,25	Sıvı
7	Sadece ABG içinden elde edilen CO ₂ için	-56,4	1.000.000	2,25	Sıvı

Tablo 4.3 incelendiğinde Şekil 4.21'de 2,3 ve 4 numaralarla gösterilen noktalar için hesaplamanın iki defa yapıldığı görülecektir. Bunun sebebi Tablo 4.3'te ilk sıralarda bulunan 2,3 ve 4. noktalarda yapılan hesaplamaların, ABG içinden elde edilen CO₂ miktarının tespitine yönelik olmasıdır. Yani termik santral bacasından salınan CO₂ debisine bağlı olarak elde edilen CO₂ hacmi hesaplanmıştır.

Tablo 4.3'ün alt sıralarındaki 2-b,3-b ve 4-c numaralar için yapılan hesaplamalarda ise soğutma için kullanılan CO₂'nin kütsel debisinin de hesaplama dahil edildiği görülecektir. Çünkü kompresöre ve ön bekletme tankına gelecek olan CO₂ debisi, ABG'den elde edilen CO₂ ve soğutma için kullanılan CO₂'nin toplam debisine eşit olacaktır.

5-a numaralı noktada yapılan hesaplama, ABG soğutma için kullanılan CO₂'nin, 73,97 bar basınç ve -56,4 °C sıcaklık şartlarındaki hacminin hesaplaması; 5-b numaralı noktada yapılan hesaplama ise ABG+CO₂ karışım noktasına gönderilen ve sıcaklığı değişmemiş olan ama basıncı atmosfer basıncına düşen CO₂'nin hesaplamasıdır.

Yine Tablo 4.3 incelendiğinde; 95 °C sıcaklık ve 1 atmosfer basınç altındaki hacmi 37,65 m³ olan gaz fazındaki CO₂'nin; 73,97 bar basınç altında sıkıştırılarak, pasif soğuma ile sıcaklığının -56,4 °C'ye düşürülmesi ve sıvı faza dönüştürülmesi sağlandığında; hacminin 0,3 m³'e düştüğü görülmektedir.

Yıllık yakalanan gaz fazındaki CO₂ hacmi (atmosfer basıncında) = **1.187.330.400 m³/yıl**

Yıllık yakalanan sıvı fazdaki CO₂ hacmi (73,97 bar basınç altında) = **9.460.800 m³/yıl** 'dır.

9.460.800 m³/yıl hacme sahip CO₂ kütlesini-56.4 °C ve 73.97 bar koşullarında sıvı CO₂'nin yoğunluğunu kullanarak bulabiliriz. Kütle denklemi:

$$m = V \cdot \rho \quad (\text{Denklem 11})$$

Bu denklemde: NIST'e göre-56.4 °C ve 73.97 bar koşullarında sıvı CO₂'nin yoğunluğu yaklaşık olarak 1120 kg/m³'tür (NIST, 2023).

V: Hacim (m³):9.460.800 m³

ρ: Yoğunluk (kg/m³):1120 kg/m³

m: Kütle (kg).

$$m = 9.460.800 \cdot 1120$$

$$m=10.596.096.000 \text{ kg} = \mathbf{10.596.096 \text{ ton}}$$
 olarak bulunur.

KETS bacasından bir yılda elde edilerek tank çiftliğine aktarılacak olan, -56.4°C ve 73.97 bar koşullarındaki 9.460.800 m³ sıvı CO₂'nin kütlesi **10.596.096 ton**'dur.

4.10. KETS Bacasından Yakalanan CO₂'nin Ağaç ve Orman Alanı İhtiyacı

Yetişkin bir ağaç yılda ortalama 22 kg CO₂ yakalama kapasitesine sahiptir (IPCC, 2019; Ekolojist, 2021). Bu çalışma kapsamında, KETS bacasından yıllık olarak yakalanan 10.596.096 ton sıvı CO₂'nin tamamının ağaçlar tarafından yakalanabilmesi için gerekli olan ağaç sayısı ve orman alanı hesaplanmıştır. Hesaplama yöntemi, bir ağacın yıllık CO₂ yakalama kapasitesi ve ormanlık alanların hektar başına karbon yakalama potansiyeli gibi ekolojik parametrelere dayandırılmıştır.

Bu analiz, yakalanan karbonun doğa tarafından absorbe edilebilmesi için gereken kaynakların büyüklüğünü ortaya koyarak, doğal karbon yakalama süreçlerinin sınırlılıklarını ve ölçeklenebilirliğini değerlendirmek açısından kritik bir perspektif sunmaktadır. Aşağıda bu hesaplamalara ilişkin yöntem ve sonuçlar detaylandırılmaktadır:

$$\text{Ağaç Sayısı} = \frac{\text{Toplam CO}_2 \text{ Miktarı}}{\text{Bir Ağacın CO}_2 \text{ Yakalama Kapasitesi}}$$

$$\text{Ağaç Sayısı} = \frac{10.596.096.000 \text{ KgCO}_2}{22 \text{ Kg CO}_2/\text{Ağaç}}$$

$$\text{Ağaç Sayısı} \approx 481.640.727 \text{ ağaç.}$$

Hektar Başına Ormanların Yıllık CO₂ Yakalama Kapasitesi: Ağaç türü, yoğunluk ve iklime bağlı olarak değişiklik göstermekle birlikte; ormanlık alanlar hektar başına yıllık yaklaşık 10 ton CO₂ yakalayabilir (IPCC, 2019 ; FAO, 2020)

$$\text{Orman Alanı} = \frac{\text{Toplam CO}_2 \text{ Miktarı}}{\text{Hektar Başına CO}_2 \text{ Yakalama Kapasitesi}}$$

$$\text{Orman Alanı} = \frac{10.596.096 \text{ ton}}{10 \text{ ton/ha}}$$

$$\text{Orman Alanı} = 1.059.610 \text{ hektar}$$

Sonuç olarak; 10.596.096 ton CO₂'nin ağaçlar tarafından yakalanması için

Gerekli Ağaç Sayısı: Yaklaşık 481 milyon ağaç,

Gerekli Orman Alanı: Yaklaşık 1.059.610 hektar ormandır.

4.11. Ön Bekletme Tank Sayısının Hesaplanması

Ön bekletme tank sayısının belirlenmesi; sistemde ABG soğutma için kullanılacak CO₂ miktarına, ABG içinden yakalanan CO₂ miktarına, sıkıştırma işleminin CO₂'nin sıcaklığında meydana getireceği yükselmeye, artan sıcaklığın pasif olarak düşürülmesi için gerekli sürenin belirlenmesine, pasif soğumanın sağlanabilmesi için tank ısı transfer kapasitesinin (P) belirlenmesine bağlıdır.

Sistemde kullanılacak tankların ısı transfer kapasitesini etkileyen faktörlerden biri de yüzey alanıdır. Yüzey alanı arttıkça tankın ısı transfer kapasitesi de artmaktadır.

Tablo 4.3'te, 3 numaralı noktadan geçen CO₂ hacmi 5,96 m³tür. Yani ön bekletme tanklarına, 5,96 m³/s debiyle sürekli bir akış söz konusudur. Sistemin devreye alınarak çalışmaya başlaması için satın alınması gereken sıvı CO₂ miktarı 2.568,6 ton olarak bulunmuştu. Bu kütledeki CO₂'nin hacmini Denklem 11'i kullanarak hesapladığımızda:

$$m = V \cdot \rho \quad (\text{Denklem 11})$$

$$\text{Kütle (m)} = 2,568.6 \text{ ton} = 2,568,600 \text{ kg}$$

Yoğunluk (ρ) = 1120 kg/m³.

$$2.568.600 = V \cdot 1120$$

$V = 2.292,85 \text{ m}^3$ olarak bulunur

Baca gazını soğutma için gerekli 2.292,85 m³/h hacimsel debiye sahip olan CO₂, sistemde döngü içinde sürekli olarak kullanılacaktır. Baca gazı içindeki 54,88 kg/s kütleli debiye sahip CO₂ ise önce kompresörde 73,97 bar basınç altında sıkıştırılarak ön bekletme tanklarında likit formda geçici olarak depolanacak; bu tanktan tek yönlü bir valf ve boru aracılığıyla depolanmak üzere nihai depolama tanklarına (tank çiftliğine) transfer edilecektir.

4.12. Sıkıştırma İşleminin CO₂ Sıcaklığında Meydana Getireceği Artışın Hesaplanması

Kompresörle uygulanan sıkıştırma işlemi, adyabatik (ısı geçişi olmayan) sıkıştırmadır. Adyabatik sıkıştırmada gazın iç enerjisi ve sıcaklığı yükselir. Bu durumda entalpi de artacaktır.

Sıcaklık değişimini hesaplamak için kullanılan adyabatik denklem şu şekildedir:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\gamma-1/\gamma} \quad (\text{Denklem 6})$$

Burada;

T_1 : Başlangıç sıcaklığı (31+273=304 K)

T_2 : Son sıcaklık (K)

P_1 : Başlangıç basıncı (1 atm = 1.01325 bar)

P_2 : Son basınç (73.97 bar)

γ : Isı kapasitesi oranı (CO₂ için 1,3)

$$\frac{T_2}{304 \text{ K}} = \left(\frac{73,97 \text{ bar}}{1,01325 \text{ bar}}\right)^{1,3-1/1,3}$$

$$T_2 = 818,33 \text{ K} = 545,3 \approx 545 \text{ }^\circ\text{C}$$

Sıcaklığı 31°C iken 73,97 bar basınçla sıkıştırılan CO₂'nin sıcaklığı 545°C'ye yükselecektir. Bu sıcaklığın pasif soğuma ile düşürülmesi için doğal soğutmalı, kanatlı ve oluklu ön bekleme tankları kullanılacaktır.

Kompresörden 768,38 Kg/s kütleli debi, 73,97 bar basınç ve 545°C sıcaklıkla çıkan CO₂'nin pasif soğuması için basınç sabit tutulurken sıcaklığının düşürülmesi için gazın ısı enerjisinin uzaklaştırılması gereklidir. Bu işleme ait hesaplamalar iki aşamada gerçekleştirilmiştir:

- Gazın Yoğuşma Sıcaklığına Soğutulması
- Yoğuşma Süreci ve Gizli Isı

4.13. Gazın Yoğuşma Sıcaklığına Soğutulması

Öncelikle, 545 °C'de (818 K) bulunan CO₂'nin, -56,4 °C'de (216,6 K) yoğuşabileceği sıcaklığa kadar soğutulması işlemi sırasında sıcaklık düşerken gaz fazındaki CO₂ enerjisini kaybeder. Bu enerji kaybı (gazın sıcaklığını düşürmek için gereken enerji miktarı), CO₂'nin özgül ısı kapasitesi kullanılarak şu şekilde hesaplanır:

$$Q_{soğutma} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (\text{Denklem 7})$$

Burada:

Q: Isı kaybı (J/s veya W),

$\dot{m}$: Kütleli debi (768,38 kg/s),

C_p : CO₂'nin sabit basınçtaki özgül ısı kapasitesi (yaklaşık 1.2 kJ/kg·K=1,2x10³ J/kg·K),

ΔT : Sıcaklık değişimi ($T_{\text{başlangıç}} - T_{\text{hedef}} = 818 - 216 = 601,4 \text{ K}$)

$$Q_{soğutma} = 768,38 \cdot 1200 \cdot 601,4$$

$$Q_{soğutma} = 554.524 \text{ kW}$$

CO₂'nin, 545 °C'den -56,4 °C'ye soğutulması için gereken enerji kaybı 554,524 kW'dır. Bu değer, gazın ortam sıcaklığına soğutulması için ortamdan uzaklaştırılması gereken ısı miktarını temsil eder.

4.14. Yoğuşma Süreci ve Gizli Isı Hesaplamaları

CO₂'nin -56,4 °C'ye kadar soğutulmasının ardından, basınç sabit tutulurken gazdan sıvı faza geçmesi için faz değişimi gerekir. Bu geçiş sırasında CO₂, gizli ısı olarak adlandırılan belirli bir enerji miktarını ortamdan uzaklaştırmalıdır.

Yoğuşma Gizli Isısı Hesaplama:

CO₂'nin yoğuşma gizli ısısı ($\Delta H_{\text{yoğuşma}}$) termodinamik tablolarda **326 kJ/kg** olarak verilmektedir.

Yoğuşma süreci için toplam enerji kaybı:

$$Q_{\text{yoğuşma}} = \dot{m} \cdot \Delta H_{\text{yoğuşma}} \quad (\text{Denklem 8})$$

Burada:

$\dot{m}$: Kütlesel debi (768,38 kg/s),

$\Delta H_{\text{yoğuşma}}$: CO₂'nin yoğuşma gizli ısısı (326 kJ/kg).

$$Q_{\text{yoğuşma}} = 768,38 \cdot 326$$

$$Q_{\text{yoğuşma}} = 250.492 \text{ (kJ/s) kW olarak bulunur.}$$

Toplam ısı kaybı, gazın yoğuşma sıcaklığına kadar soğutulması için gereken enerji ve yoğuşma sırasında faz değişimi için gereken enerjinin toplamıdır:

$$Q_{\text{toplam}} = Q_{\text{soğutma}} + Q_{\text{yoğuşma}}$$

$$Q_{\text{toplam}} = 554.524 + 250.492$$

$$Q_{\text{toplam}} = 805.016 \text{ kW olarak bulunur.}$$

CO₂'nin önce soğutulup ardından yoğuşarak sıvı faza geçmesi için toplamda yaklaşık **805.016 kW** yaklaşık olarak **805 MW** ısı enerjisi açığa çıkmaktadır. Bu enerjinin çeşitli şekillerde yeniden kullanılması mümkündür. Yeniden kullanım olanakları ile ilgili ileriki bölümlerde ayrıntılı bilgi verilmiştir.

ABG+CO₂ karışım noktası sonrası hacmi 5,96 m³/s= 21.456 m³/h tir. Burada hedef en kısa sürede 21.456 m³ lük hacimdeki, 545 °C sıcaklığa sahip CO₂'nin soğutulması ve yoğuşturulmasıdır. Bu da ön bekletme tanklarının ısı transfer kapasitelerine bağlıdır. Isı transfer kapasitesi ise tankın yüzey alanı ile doğrudan ilgilidir. Tank yüzey alanı ne kadar büyükse ısı transferi o kadar kısa sürede gerçekleşir.

805.016 kW ısı enerjisinin soğuma ve yoğuşması için gerekli süreyi; enerji korunumu prensibine dayalı olarak elde edilen, ısı enerjinin güç ile süre arasındaki ilişkisinin ifadesi olan aşağıdaki denklemle hesaplayabiliriz:

Isı Transfer Oranı (Güç) ve Süre İlişkisi:

$$t = \frac{Q}{P} \quad (\text{Denklem 9})$$

Burada:

t: Süre (s),

Q: Soğuma ve yoğunlaşma için sistemden atılması gereken ısı enerjisi (kW),

P: Tankın ısı transfer (soğutma) kapasitesi (kW).

Toplam ısı enerjisi (Q), tankın ısı transfer kapasitesi ile belirlenen bir hızda çevreye aktarılacaktır. Tankın soğutma kapasitesini (P) bulmak için doğal konveksiyon ısı transfer katsayısı (h) ve tank yüzey alanını (A) kullanarak, ısı transfer oranını hesaplayabiliriz:

$$P = h \cdot A \cdot |\Delta T| \quad (\text{Denklem 10})$$

Burada:

P(ısı transfer kapasitesi) (kW)

h (Isı transfer katsayısı): 25 W/m²·K

Kanatlı ve oluklu bir çelik tankın doğal soğutma koşullarında ısı transfer katsayısı genellikle 5-25 W/m²·K aralığındadır. Burada 25 W/m²·K olarak alınmıştır.

A: Tank yüzey alanı her bir tank için (555,78 m²)

Ön bekleme tankı 1000 m³ olarak planlanmıştır. Tankın yüzey alanı arttıkça ısı transfer kapasitesi de artacaktır. Tanka ait ölçüler: r= 5 m; h=12,7 m olarak boyutlandırılmıştır. Bu tankların 3 tanesi satın alınmış 2.568,6 tonluk CO₂'nin depolanması için kullanılacaktır. Sıvılaştırılan CO₂, ilk 3 tank boşalana kadar diğer 3 tanka gönderilecektir.

1 tankın yüzey alanını hesaplarsak:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r^2 + 2\pi \cdot r \cdot h$$

$$A = 555,78 \text{ m}^2$$

Soğutma için ilk saatte 3 tank kullanılabilir. Bu tankların toplam yüzey alanı:

$$A = 555,78 \cdot 3 = 1.667,34 \text{ m}^2 \text{ dir.}$$

|\Delta T| (Sıcaklık farkı): 69,4 °C

$|\Delta T|$ Hesaplanırken $T_{\text{hedef}} - T_{\text{çevre}}$ sıcaklığı kullanılmıştır. Hedef sıcaklık: 73,97 bar basınç altında sıvı CO₂'nin yoğuşma sıcaklığı olan -56,4°C (216,6 K)'dir.

Çevre sıcaklığı 13 °C (286 K) olarak kabul edilmiştir.

$|\Delta T| = |216,6 - 286| = 69,4$ K olarak hesaplanmıştır.

$$P = 25 \cdot 1.667,34 \cdot 69,4 \quad (\text{Denklem 10})$$

$P = 2.892.834,9$ W = 2.892,8 kW olarak bulunur.

P değerini Denklem 9'da yerine koyarak CO₂'nin yoğuşması için ön bekletme tankında bekletme süresini bulabiliriz:

$$t = \frac{Q}{P} \quad (\text{Denklem 9})$$

$Q_{\text{toplam}} = 805.016$ kW

$P = 2.892,8$ kW

$$t = \frac{805.016 \text{ kW}}{2.892,8 \text{ kW}}$$

$t = 278,2$ s yaklaşık olarak 5 dakika olarak bulunur.

Yani saatlik olarak elde edilen sıkıştırılmış CO₂'nin, pasif soğumayla sıcaklığının düşmesi ve yoğuşmanın sağlanabilmesi için ön bekletme tankında bekletilmesi gereken süre 5 dakika olmalıdır.

Beş dakika içinde ön bekletme tanklarına gelecek olan CO₂'nin hacmi $5,96 \cdot 60 \cdot 5 = 1.789,8$ m³tür.

Beş dakika içinde ön bekletme tankından ABG soğutmak üzere çıkan CO₂ hacmi = $3,95 \cdot 60 \cdot 5 = 1.185$ m³tür.

Yani beş dakikanın sonunda, ilk kullanım için satın alınan 2.292,85 m³ = 2.568,6 ton CO₂'nin bulunduğu tanklardan biri boşalmış olacaktır ve boşalan bu ön bekletme tankı da soğutma, yoğuşurma için kullanıma hazır hale gelecektir. İkinci beş dakikada ikinci tank ve üçüncü 5 dakikanın sonunda tüm tanklar kullanıma hazır hale gelecektir.

4.15. Kompresörün Çalışması için Gerekli Enerji Miktarının Hesaplanması

CO₂'nin kompresör kullanılarak sıvılaştırılmasında kompresörle sıkıştırma için elektrik enerjisini hesaplamada sıkıştırma işlemi ve kompresör verimliliği ile ilgili temel enerji ve güç denklemleri kullanılmıştır.

Kompresöre giren CO₂ debisi; ABG içindeki CO₂ ve ABG soğutma için kullanılan CO₂ debilerinin toplamına eşittir. Şekil 4.21'de 2 numara ile gösterilen nokta için yapılan ikinci hesaplamayla bulunan toplam debilerin hacim olarak karşılığı 6.3'te gösterilmiştir. Kompresöre giren bu karışımın hacimsel debisi 435,49 m³/s ve sıcaklığı 31°C'dir. Kompresör verimi (μ) %95 olarak kabul edilmiştir. Sıkıştırma yöntemi izotermaldir. İzotermal sıkıştırma, gazın sıcaklığının sabit kaldığı bir süreçtir; bu nedenle, gazın iç enerjisinde bir değişim olmaksızın tüm enerji dışarıya ısı olarak verilir veya sistem tarafından yapılacak iş olarak harcanır. Bu tür bir sıkıştırmada enerji gereksinimi, izotermal sıkıştırma işini hesaplamak için ideal gaz yasasından türetilen denklemlerle belirlenir.

ABG+CO₂ hacimsel debisinden kütleli debisini Denklem 1'le hesaplayabiliriz:

$$\dot{m} = \dot{v}\rho \quad (\text{Denklem 1})$$

Burada:

ρ : CO₂'nin atmosfer basıncı ve 31 °C sıcaklıktaki yoğunluğu (1.85 kg/m³)

$\dot{v}$: Hacimsel debi (435.49 m³/s)

$$\dot{m}=435,49 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1,85 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$\dot{m}= 805,66 \text{ kg/s}$ olarak hesaplanmıştır. (buradaki $\dot{m}$ kütleli debi değeri ABG içindeki CO₂(54,88 kg/s)+ ABG soğutma için kullanılan CO₂(713,5 kg/s) kütleli debilerinin toplamıdır.)

İzotermal Sıkıştırma Enerji İhtiyacı:

$$W_{izotermal} = \dot{m} \cdot R \cdot T \cdot \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (\text{Denklem 12})$$

Bu denklemde:

Wizotermal: İzotermal sıkıştırma için teorik enerji gereksinimi (W),

$\dot{m}$: Kütleli debi (805,66 kg/s),

R: CO₂ gaz sabiti (188,9 J/kg·K),

T: sıcaklık (304 K),

P1: Başlangıç basıncı (101.325 Pa)

P2: Hedef basıncıdır (7.397.000 Pa)

$$W_{izotermal} = 805,66 \text{ kg/s} \cdot 188,9 \text{ J/kgK} \cdot 304 \cdot \ln \left(\frac{7.397.000}{101325} \right)$$

$$W_{izotermal} = 198.479.033,16 \text{ W} = 198,5 \text{ MW}$$

İzotermal sıkıştırma için teorik enerji gereksinimi, yaklaşık olarak 198.599.092 W (198,5 MW) olarak hesaplanmıştır.

Gerçek enerji gereksinimini, kompresör verimliliğini dikkate alarak bulabiliriz:

$$W_{gerçek} = \frac{W_{izotermal}}{\mu} \quad (\text{Denklem 13})$$

$$W_{gerçek} = \frac{198.479.033,16}{0,95}$$

$$W_{gerçek} = 208.925.298,06 \text{ W} (208,9 \text{ MW}) \text{ olarak bulunur.}$$

KETS'in yıllık üretim kapasitesi 2000 GWh olarak kabul edilmişti (Tablo 4.1).

Ortalama saatlik elektrik üretimini üretimi hesaplarırsa:

$$\text{Ortalama Saatlik Üretim (MW)} = 2000 \text{ GWh} / 8760 \text{ saat} \approx 228.31 \text{ MW}$$

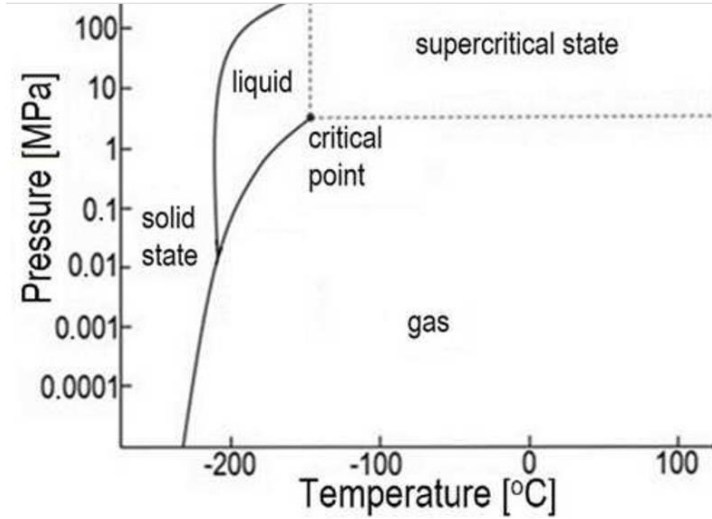
Kompresörle CO₂ sıkıştırma için kullanılan enerji düştüğünde net saatlik üretimi hesaplırsak;

$$\text{Net Saatlik Üretim (MW)} = 228.31 \text{ MW} - 208,9 \text{ MW} = 19.26 \text{ MW} \text{ olarak bulunur.}$$

Yani termik santralde saatte üretilen 228,31 MW elektrik enerjisinin yaklaşık %91,5'i CO₂ yakalamak için kullanılmak zorunda kalınacaktır.

4.15.1. N₂ gazının termodinamik özellikleri ve CO₂ sıvılaştırma sürecindeki rolü

Bu aşamaya kadar yapılan hesaplamalar ABG içeriğinde bulunan ve soğutma için kullanılan CO₂ dikkate alınarak yapılmıştır. Ancak ABG içeriğinde; 284 m³/s hacimsel debiye, 263,27 kg/s kütleli debiye sahip N₂ de bulunmaktadır. Aşağıdaki grafikte N₂'nin faz diyagramı görülmektedir (Şekil 4.22).



Şekil 4.22. N₂ faz diyagramı.

N₂'nin termodinamik özellikleri ve faz davranışı, CO₂ sıvılaştırma süreçlerinde sistem performansı ve gaz ayrıştırma açısından kritik öneme sahiptir. N₂ gazına ait faz diyagramı incelendiğinde, kritik sıcaklık değerinin -146,9 °C (126,1 K) ve kritik basınç değerinin 33,5 bar olduğu görülmektedir (Şekil 4.22). Bu değerler, N₂ gazının sıvı fazda bulunabileceği maksimum sıcaklık ve bu geçişin sağlanması için gereken minimum basınç sınırlarını tanımlar.

CO₂ sıvılaştırma işlemi, ≤ 31 °C sıcaklık ve 73,97 bar basınç gibi şartlarda gerçekleştirilir. Bu koşullar, N₂'nin kritik sıcaklığının oldukça üzerinde ve kritik basıncının ise yaklaşık iki katıdır. Dolayısıyla, N₂ gazı bu sıcaklık ve basınç değerlerinde sıvı faza geçemez ve gaz fazında kalır. Bu durum, CO₂ sıvılaştırma işlemi sırasında N₂ gazının CO₂'den fiziksel olarak ayrılmasını mümkün kılmaktadır.

Sistemde N₂ gazının gaz fazında kalması, sıvı faza geçen CO₂'nin saflığının korunmasını sağlamaktadır. Bu, ayrıştırılan CO₂'nin yüksek saflıkta elde edilmesiyle enerji dönüşümü, karbon yönetimi veya kimyasal süreçler gibi uygulamalarda daha etkin kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Ayrıca, N₂'nin gaz fazında kalması sayesinde sistemde karmaşık faz geçişleri yaşanmaz, bu da tasarımın sadeleşmesini ve operasyonel verimliliğin artmasını sağlamaktadır.

Özetle; CO₂ sıvılaştırma sürecinde, N₂ gazının kritik sıcaklık ve basınç değerleri, sistemde uygulanacak basınç ve sıcaklık koşullarına kıyasla oldukça düşüktür. Bu nedenle, N₂ gaz fazında kalarak sıvılaştıran CO₂'den kolaylıkla ayrılır. Bu ayrışma, CO₂'nin saflığının korunmasına olanak tanımaktadır. N₂'nin gaz fazında kalması,

ayırıştırma sürecini kolaylaştırır. Ancak; kompresöre 263,27 kg/s debiyle giren N₂'nin kompresörün enerji ihtiyacını artıracakını da vurgulamak gerekmektedir.

4.15.2. Kompresör enerji kullanımında N₂'nin etkisi

CO₂'nin sıkıştırılarak sıvılaştırılmasında kompresöre giren karışımın bileşenlerinin kütleli debi oranları: 263,27 kg/s N₂, 54,88 kg/s CO₂ ve 713,5 kg/s soğutma amacıyla kullanılan ek CO₂. Toplam kütleli debi 1031,65 kg/s olacaktır. Kompresörün enerji kullanımı, karışımındaki gazların sıkıştırılması için gerekli iş miktarını belirleyen termodinamik özelliklere dayanır. N₂'nin kompresör üzerindeki etkisini değerlendirmek için aşağıdaki faktörler incelenmelidir:

Kompresör enerjisi ihtiyacı, sıkıştırılan gaz karışımının toplam kütleli debisine ($\dot{m}$), gazların özgül ısı kapasitesine, sıcaklık değişimine (ΔT), basınç değişimine ($\ln(P_2/P_1)$) ve sıkıştırma verimliliğine bağlıdır. İlgili denklem şu şekildedir:

$$W_{izotermal} = \dot{m} \cdot R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (\text{Denklem 12})$$

Burada;

$$\dot{m} = 1031,65 \text{ kg/s}$$

R: Gaz sabiti (karışıma göre ağırlıklandırılmış değer),

T: Giriş sıcaklığı (31 °C = 304 K)

P₁ ve P₂ : Giriş ve çıkış basınçları (101.325 Pa ve 7.397.000 Pa)

N₂, sistemde yüksek kütleli debi oranına sahiptir (263,27/1031,65≈25%) ve gaz fazında kalacağı için sıkıştırılma sürecine dahil olur. Ancak N₂'nin sıvılaşmaması, kompresör çıkışında bu bileşenin dışarı salınması anlamına gelir. Bu, N₂'nin sıkıştırılması için harcanan enerjinin süreç verimliliği açısından kayıp enerji olarak değerlendirilmesine neden olur.

R gaz sabiti karışıma göre ağırlıklandırılmış değeri:

R_{N₂} : (N₂ özgül gaz sabiti) = 296,8 J/kg·K (Çengel & Boles, 2020).

R_{CO₂}: (CO₂ özgül gaz sabiti) = 188,9 J/kg·K (Çengel & Boles, 2020).

$\dot{m}_{N_2}$: (N₂ kütleli debisi) = 263,27 kg/s

$\dot{m}_{CO_2}$: (CO₂ kütleli debisi) = 713,5+54,88 = 768,38 kg/s

Toplam $\dot{m}$: (Toplam Kütlesel Debi)= 1.031,65 kg/s

$$R = \frac{(\dot{m}_{N_2} \cdot R_{N_2}) + (\dot{m}_{CO_2} \cdot R_{CO_2})}{\text{toplam } \dot{m}} \quad (\text{Denklem 15})$$

$$R = \frac{(263,27 \text{ kg/s} \cdot 296,8 \text{ J/kg} \cdot \text{K}) + (768,38 \text{ kg/s} \cdot 188,9 \text{ J/kg} \cdot \text{K})}{1.031,65} = 216,44 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

$$W_{izotermal} = \dot{m} \cdot R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (\text{Denklem 12})$$

$$W_{izotermal} = 1031,65 \text{ kg/s} \cdot 216,44 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \cdot 304 \text{ K} \cdot \ln(7.397.000 \text{ Pa}/101.325 \text{ Pa})$$

$$W_{izotermal} = 291.240.022 \text{ W} = 291,24 \text{ MW} \text{ olarak bulunur.}$$

%95 ($\mu = 0,95$) verimle çalışan kompresör için gerçek gücü ($W_{gerçek}$) Denklem 13'le hesaplırsak;

$$W_{gerçek} = \frac{W_{izotermal}}{\mu} \quad (\text{Denklem 13})$$

$$W_{gerçek} = \frac{291.240.022 \text{ W}}{0,95}$$

$$W_{gerçek} = 306.568.444 \text{ W} = 306,6 \text{ MW} \text{ olarak bulunur.}$$

Yani ABG içindeki CO₂+Soğutma için kullanılan CO₂+ABG içindeki N₂'nin toplam kütlesel debilerinin 73,97 bar basınç altında sıkıştırılmaları için kompresörün ihtiyaç duyacağı elektrik enerjisi 291,24 MW olacaktır.

Bu değer sadece ABG içindeki CO₂ için hesaplandığında;

$$W_{izotermal} = \dot{m} \cdot R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (\text{Denklem 12})$$

$$\dot{m}_{CO_2}: (\text{ABG içeriğindeki CO}_2 \text{ kütlesel debisi}) = 54,88 \text{ kg/s}$$

$$R: (\text{CO}_2 \text{ Gaz sabiti}) = 188,9 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

$$T: \text{Giriş sıcaklığı} (31 \text{ }^\circ\text{C} = 304 \text{ K})$$

$$P_1 \text{ ve } P_2 : \text{Giriş ve çıkış basınçları} (101.325 \text{ Pa ve } 7.397.000 \text{ Pa})$$

$$W_{izotermal} = 54,88 \text{ kg/s} \cdot 188,9 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \cdot 304 \text{ K} \cdot \ln(7.397.000 \text{ Pa}/101.325 \text{ Pa})$$

$$W_{izotermal} = 13.521.573 \text{ W} = 13,52 \text{ MW} \text{ olarak bulunur.}$$

%95 ($\mu = 0,95$) verimle çalışan kompresör için gerçek gücü ($W_{gerçek}$);

$$W_{gerçek} = \frac{W_{izotermal}}{\mu} \quad (\text{Denklem 13})$$

$$W_{gerçek} = \frac{13.521.573 \text{ W}}{0,95}$$

$W_{gerçek} = 14.233.234 \text{ W} = 14 \text{ MW}$ olarak bulunur.

Sadece ABG içeriğindeki CO₂ ve N₂'nin 73,97 bar basınç altında sıkıştırılması için gerekli enerji ihtiyacı:

$$W_{izotermal} = \dot{m} \cdot R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (\text{Denklem 12})$$

$\dot{m}_{CO_2+N_2}$: (ABG içeriğindeki CO₂+ N₂'nin kütleli debisi) = 54,88+263,27= 318,15 kg/s

R: (CO₂ Gaz sabiti)= 188,9 J/kg·K

T: Giriş sıcaklığı (31 °C = 304 K)

P₁ ve P₂ : Giriş ve çıkış basınçları (101.325 Pa ve 7.397.000 Pa)

R gaz sabiti karışıma göre ağırlıklandırılmış değeri:

$$R = \frac{(\dot{m}_{N_2} \cdot R_{N_2}) + (\dot{m}_{CO_2} \cdot R_{CO_2})}{\text{toplam } \dot{m}} \quad (\text{Denklem 15})$$

R_{N₂} : (N₂ özgül gaz sabiti) = 296,8 J/kg·K (Moran & Shapiro, 2014)

R_{CO₂}: (CO₂ özgül gaz sabiti) = 188,9 J/kg·K (Moran & Shapiro, 2014)

$\dot{m}_{N_2}$: (N₂ kütleli debisi) = 263,27 kg/s

$\dot{m}_{CO_2}$: (CO₂ kütleli debisi) = 54,88 kg/s

Toplam $\dot{m}$: (Toplam Kütleli Debi)= 318,15 kg/s

$$R = \frac{(263,27 \text{ kg/s} \cdot 296,8 \text{ J/kg} \cdot \text{K}) + (54,88 \text{ kg/s} \cdot 188,9 \text{ J/kg} \cdot \text{K})}{318,15}$$

R= 278.19 J/kg·K olarak bulunur. Bu değer Denklem 12'de yerine konulursa;

$$W_{izotermal} = \dot{m} \cdot R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (\text{Denklem 12})$$

$\dot{m}_{CO_2+N_2}$: (ABG içeriğindeki CO₂+ N₂'nin kütleli debisi) = 54,88+263,27= 318,15 kg/s

R: (CO₂ Gaz sabiti)= 278,19 J/kg·K

T: Giriş sıcaklığı (31 °C = 304 K)

P₁ ve P₂ : Giriş ve çıkış basınçları (101.325 Pa ve 7.397.000 Pa)

$$W_{izotermal} = 318,15 \text{ kg/s} \cdot 278,19 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \cdot 304\text{K} \cdot \ln (7.397.000/101.325)$$

$$W_{izotermal} = 115.439.540,6 \text{ W} = 115,44 \text{ MW} \text{ olarak bulunur.}$$

Kompresör için gerekli enerji ihtiyacı hesaplama sonuçları Tablo 7.1’de gösterilmiştir.

- **Cooler sistemlerinin enerji tüketimi ve önemi**

Literatürdeki çeşitli raporlar, özellikle DOE/NETL (2007) ve IPCC (2005) çalışmalarına göre, sıkıştırma süreçlerinde cooler sistemlerinin enerji tüketimi, toplam enerji ihtiyacının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Cooler birimlerinin enerji tüketiminin, toplam sıkıştırma enerji gereksiniminin yaklaşık %20-30’una denk geldiği belirtilmiştir. Bu durum, sıkıştırma sırasında oluşan sıcaklığın kontrol edilmesi için harcanan enerjinin, sistemin toplam verimliliğini doğrudan etkileyen kritik bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, mevcut sistemde cooler birimlerinin enerji tüketimini hesaplayarak, tasarlanan sistemin cooler ihtiyacını ortadan kaldırmasıyla sağladığı enerji tasarrufu ayrıntılı olarak analiz edilecektir. Hesaplamalarda, sıkıştırılan CO₂ debisi ve sistemin enerji gereksinimleri temel alınarak cooler sistemlerinin etkisi karşılaştırmalı şekilde değerlendirilecektir.

Kompresör tarafından kullanılan enerjinin %25’i cooler tarafından kullanılmış olsaydı:

1. ABG içindeki CO₂ debisi için cooler enerji ihtiyacı:

$$W_{cooler} = 0.25 \cdot W_{compressor} \quad (\text{Denklem 14})$$

$$W_{cooler} = 0.25 \cdot 14$$

$$W_{cooler} = 3,5 \text{ MW}$$

Sistem için gerekli enerji ihtiyacı= 14+3,5 = 17,5 MW olurdu (Tablo7.4).

2.ABG içindeki CO₂+Soğutma için kullanılan CO₂ debisi için cooler enerji ihtiyacı:

$$W_{cooler} = 0.25 \cdot W_{compressor} \quad (\text{Denklem 14})$$

$$W_{cooler} = 0.25 \cdot 208,9$$

$$W_{cooler} = 52,3 \text{ MW}$$

Sistem için gerekli enerji ihtiyacı= 208,9+52,3 = 261,125 MW olurdu (Tablo7.4).

3.ABG içindeki CO₂+Soğutma için kullanılan CO₂+ABG içindeki N₂ debisi için cooler enerji ihtiyacı:

$$W_{\text{cooler}} = 0.25 \cdot W_{\text{compressor}} \quad (\text{Denklem 14})$$

$$W_{\text{cooler}} = 0.25 \cdot 306,6$$

$$W_{\text{cooler}} = 76,65 \text{ MW}$$

Sistem için gerekli enerji ihtiyacı= 306,6+76,65 = 383,25 MW olurdu (Tablo7.4).

4.ABG içindeki CO₂+ABG içindeki N₂ debisi için cooler enerji ihtiyacı:

$$W_{\text{cooler}} = 0.25 \cdot W_{\text{compressor}} \quad (\text{Denklem 14})$$

$$W_{\text{cooler}} = 0.25 \cdot 115,44$$

$$W_{\text{cooler}} = 28,86 \text{ MW}$$

Sistem için gerekli enerji ihtiyacı= 115,44 + 28,86 = 144,3 MW olurdu (Tablo 7.1).

4.16. Mevcut Termik Santrallerle Tasarlanan Sistemin Maliyet Açısından Kıyaslanması

Tasarlanan sistem, mevcut termik santrallerde soğutma kulesi inşaatı, işletme maliyetleri ve soğutma suyu temini için gerekli olan finansal yükümlülükleri tamamen ortadan kaldıracaktır. Ayrıca, sistemin CO₂'nin tamamını yakalayarak atmosfere salınımını önlemesi, karbon emisyonlarına ilişkin vergiler ve emisyon ticaret sistemi kapsamında yapılan ödemeleri de elimine edecektir. Bu sayede, santralin işletme maliyetlerinin önemli ölçüde azalması sağlanmıştır. Maliyet kıyaslaması, aşağıdaki temel bileşenler dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir:

- **Soğutma kulelerinin inşaat maliyeti:** Termik santrallerde ısı yönetimi için kullanılan soğutma kulelerinin tasarım, inşaat ve devreye alma süreçlerinden kaynaklanan sermaye giderleri.
- **Soğutma suyu temini yatırım maliyetleri:** Santralin termal verimliliğini sürdürebilmesi için gerekli suyun teminine yönelik maliyetler.

- **Karbon emisyonlarına ilişkin mali yükümlülükler:** Karbon piyasaları çerçevesinde belirlenen ton başına karbon vergisi veya emisyon ticaret sistemleri kapsamında satın alınması gereken karbon kredileri ile ilişkili maliyetler.

4.16.1. Mevcut sistemin yatırım maliyetleri

4.16.1.1. Soğutma kulesi inşaat maliyeti:

Tipik bir açık devre mekanik çekişli soğutma kulesinin soğutma kapasitesi 60.000 – 80.000 m³/saat aralığında değişmektedir (EPRI, 2008). Hesaplamalarda, daha dengeli ve gerçekçi bir değerlendirme sağlamak amacıyla, bu aralığın ortalaması olan 70.000 m³/saat referans değer olarak alınmıştır.

KETS için soğutma suyu ihtiyacı: 1.823.231.064 ton/yıl (1 ton $\approx$ 1 m³ kabul edilerek 1.823.231.064 m³/yıl) olarak hesaplanmıştır.

KETS için gerekli soğutma suyu hacimsel debisi yaklaşık 56,40 m³/s (deniz suyu yoğunluğu 1025 kg/m³ (Çengel ve Boles, 2020, Tablo A-3)).= 203.040 m³/h

Soğutma kulelerinin boyutları, santralin kapasitesi, kullanılan teknoloji ve çevresel koşullara bağlı olarak değişiklik gösterir. Genel olarak, büyük ölçekli endüstriyel soğutma kulelerinin yüksekliği 100 ila 150 metre arasında değişmektedir (Kumar ve Sharma, 2023). Hesaplamalarda ortalama bir değer olarak 125 metre kabul edilmiştir.

EPRI (2008) tarafından yayınlanan raporlarda, büyük mekanik çekişli soğutma kulelerinin çapının genellikle 70-90 metre aralığında olduğu belirtilmektedir. Bu çalışmada soğutma kulesi çapı ortalama değer olan 80 m olarak kabul edilmiştir.

Gerekli Soğutma Kulesi Sayısını Belirleme:

$203.040 \text{ m}^3/\text{h} : 70.000 \text{ m}^3/\text{h} = 2,9 \approx 3$ adet soğutma kulesine ihtiyaç duyulacaktır.

Soğutma kulesi inşası için gerekli toplam alan: $\approx 15.072 \text{ m}^2$

Soğutma kulelerinin maliyeti kapasiteye, malzeme türüne ve tasarıma bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Örneğin, H₂O Cooling şirketinin 2024 yılı için verdiği bilgilere göre, 1.000 tonluk bir soğutma kulesinin maliyeti yaklaşık **50.000 USD** olarak belirtilmiştir. Bu değer, kullanılan malzeme ve tasarıma göre farklılık gösterebilir.

Türkiye'de, 2000 GWh yıllık üretim kapasitesine sahip bir termik santral için her biri 125 metre yüksekliğinde ve 80 metre çapında olan 3 adet açık devre mekanik çekişli

soğutma kulesinin inşaat maliyetini belirlemek, çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu faktörler arasında coğrafi konum, malzeme kalitesi, işçilik maliyetleri ve piyasa koşulları bulunmaktadır. Bu çalışmada mevcut spesifik verilere dayanarak, Türkiye'deki ortalama değerler ve güncel döviz kuru dikkate alınarak, 3 adet soğutma kulesinin inşası için genel bir maliyet hesaplaması yapılmıştır:

Toplam Maliyet

$$= \frac{\text{Saatlik Soğutma Suyu İhtiyacı}}{1.000} \times 1.000 \text{ ton Başına Maliyet} \\ \times \text{Gerekli Kule sayısı}$$

$$\text{Toplam Maliyet} = \frac{203.040}{1.000} \times 50.000 \times 3$$

$$\text{Toplam Maliyet} = \mathbf{30.456.000 \text{ USD}}$$

Gerekli pompa gücünün hesaplanması

Soğutma suyu transferi için gerekli pompa gücü Bernoulli denklemi ve pompa güç denklemi kullanılarak hesaplanabilir. Pompa gücü aşağıdaki denkleme göre belirlenmektedir:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta}$$

Burada:

P = Pompa gücü (W)

ρ = Su yoğunluğu (kg/m^3) (**1025 kg/m^3** - deniz suyu için)

g = Yerçekimi ivmesi (**9,81 m/s^2**)

Q = Debi (m^3/s) (**208.131,4 ton/saat $\approx$ 57,8 m^3/s**)

H = Toplam basma yüksekliği (m) (Denizden santrale transfer için 3 km boyunca 10 m yükseklik farkı + boru sürtünme kayıpları tahmini 20 m olmak üzere toplam 30 m)

η = Pompa verimi (%80 veya 0,80 olarak alınmıştır)

$$P = \frac{1025 \cdot 9,81 \cdot 57,8 \cdot 30}{0,80}$$

$$P = 21.794.754 \text{ W} \approx \mathbf{21,8 \text{ MWh}}$$

Soğutma suyu transferi için gerekli pompa gücü yaklaşık **21,8 MW** olarak hesaplanmıştır.

4.16.1.2. Pompa ve Boru Sisteminin Yatırım Maliyeti

a) Pompa maliyeti:

Büyük ölçekli endüstriyel pompaların maliyetleri, tasarım özellikleri, malzeme kalitesi, üretim teknolojisi, enerji verimliliği, üretici firma ve kullanım alanı gibi çeşitli mühendislik ve ekonomik faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Pompa gücü arttıkça, üretim maliyetleri, işletme giderleri ve montaj gereksinimleri doğrultusunda birim yatırım maliyeti de artmaktadır.

Büyük ölçekli su transfer projelerinde, yüksek kapasiteli santrifüj pompalar, dayanıklılığı, verimli akışkan taşıma kapasitesi ve uzun ömürlü kullanımı nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Mevcut literatürde, endüstriyel ölçekte kullanılan pompaların birim maliyetinin MW başına 500.000 - 1.500.000 USD arasında değiştiği belirtilmiştir (ASHRAE, 2016).

Bu bağlamda, 21,8 MW gücündeki bir pompa için maliyet hesaplamalarında, ortalama 1.000.000 USD/MW birim fiyat baz alınarak toplam yatırım maliyeti hesaplanmıştır:

$$C_{pompa} = P \times \text{Birim Pompa Maliyeti}$$

$$C_{pompa} = 21,8 \times 1.000.000$$

$$C_{pompa} = 21.800.000 \text{ USD}$$

Bu hesaplamalar doğrultusunda, **21,8 MW** gücündeki pompa sisteminin toplam yatırım maliyeti yaklaşık **21,8 milyon USD** olarak belirlenmiştir.

b) Boru sistemi maliyeti:

Büyük çaplı su transfer borularının maliyetleri, borunun çapı, malzeme türü, basınç dayanımı, üretim standardı ve uygulama alanı gibi çeşitli mühendislik ve ekonomik faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Özellikle boru çapı arttıkça, üretim maliyetleri ve montaj gereksinimleri doğrultusunda birim uzunluk başına düşen maliyet de artmaktadır.

ISO 4427 standardına uygun Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) borular, dayanıklılığı, düşük sürtünme katsayısı ve uzun ömürlü kullanımı nedeniyle büyük ölçekli su transfer projelerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Türkiye'deki mevcut

piyasa koşulları incelendiğinde, 3 km uzunluğundaki büyük çaplı su transfer borularının metre başına maliyetinin 3.000 - 7.000 USD arasında değiştiği tespit edilmiştir. Yapılan değerlendirmeler doğrultusunda, hesaplamalarda ortalama 5.000 USD/m birim maliyeti baz alınmıştır.

Bu doğrultuda, toplam boru hattı maliyeti aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$C_{\text{boru}} = L \times C_{\text{birim}}$$

Burada:

1. C_{boru} = Toplam boru maliyeti (USD)
2. L = Boru hattının toplam uzunluğu (m) = 3.000 m
3. C_{birim} = Metre başına boru maliyeti (USD/m) = 5.000 USD/m

$$C_{\text{boru}} = 3.000 \times 5.000 = 15.000.000 \text{ USD}$$

Bu hesaplamalar doğrultusunda, 3 km uzunluğundaki su transfer boru hattının toplam maliyeti yaklaşık **15 milyon USD** olarak belirlenmiştir.

Pompa ve boru sisteminin toplam yatırım maliyeti = 21.800.000 + 15.000.000 = **36.800.000 USD** olarak hesaplanmıştır.

4.16.1.3. Yıllık karbon emisyonlarına göre finansal yükümlülüklerin hesaplanması

Yıllık 2000 GW elektrik üretimi yapan bir termik santral bacasından, yıllık olarak **10.596.096 ton** CO₂ salınmaktadır. Bu emisyonun finansal yükümlülüklerini hesaplamak için, Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi (AB ETS) kapsamındaki güncel karbon fiyatları ve döviz kurları dikkate alınmıştır.

Karbon Fiyatları: Şubat 2025 itibarıyla, AB'nin referans karbon sözleşmesi ton başına yaklaşık **73 €** seviyesinden işlem görmektedir (ING Bank, 2024).

Döviz Kuru: Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası'nın (TCMB) 03.03.2025 tarihli gösterge niteliğindeki döviz kuru verilerine göre, hesaplamalarda güncel USD/TRY Döviz Satış Kuru **36,4753 TL**, EUR/TRY Döviz Satış Kuru **38,0191 TL** olarak esas alınmıştır (TCMB, 2025).

Toplam Maliyet (€) = Yıllık CO₂ Emisyonu (ton) × Karbon Fiyatı (€/ton)

Toplam Maliyet (€) = 10.596.096 ton × 73 €/ton = **773.516.008 € = 806.170.567,93 USD**

Yıllık elektrik üretimi 2000 GW olan kömür yakıtlı bir termik santralin yıllık karbon emisyonlarına ilişkin mali yükümlülükleri, mevcut tahminlere göre yaklaşık **806.170.567,93 USD** olarak hesaplanmaktadır. Bu maliyet, karbon piyasalarındaki fiyat dalgalanmaları ve döviz kuru değişikliklerine bağlı olarak farklılık gösterebilir.

4.16.1.4. Mevcut sistemin toplam maliyet analizi

Yıllık 2000 GW elektrik enerjisi üreten mevcut bir kömür yakıtlı termik santral için yapılan maliyet hesaplamaları, soğutma sistemleri ve karbon emisyonlarına ilişkin finansal yükümlülükleri kapsamaktadır. Bu analizde, santralin işletme ve yatırım giderleri detaylı olarak ele alınmış, farklı bileşenlerin toplam maliyet üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Maliyet kalemleri; soğutma kulesi inşaatı, pompa ve boru sistemlerinin yatırım maliyeti ve karbon emisyonlarına ilişkin mali yükümlülükler olmak üzere üç başlık altında incelenmiştir.

Aşağıda, yıllık 2000 GW elektrik enerjisi üreten mevcut bir kömür yakıtlı termik santral için toplam maliyet hesaplaması detaylandırılmıştır:

Toplam Maliyet=Soğutma Kulesi Maliyeti+Pompa ve Boru Sistemi Yatırım Maliyeti +Yıllık Karbon Emisyonları Maliyeti

Toplam Maliyet=31.224.672+36.800.000+806.170.567,93

Toplam Maliyet = 957.567.771,2 USD

4.16.2. Tasarlanan sistemin maliyet analizi

Bu bölümde, tasarlanan sisteme ait temel bileşenlerin hesaplamaları detaylandırılmıştır. Bu kapsamda:

1. ABG toplama haznesi,
2. ABG toplama haznesinde yer alan gaz soğutma sistemi,
3. ABG haznesindeki su buharının yoğunlaştırılması, su toplama haznesi, tahliye ve depolama sistemi,
4. N₂ ve CO₂'nin ayrıştırılması için kullanılacak membran sistemi,
5. CO₂'nin sıkıştırılması, sıvılaştırılması ve depolanmasına yönelik sistem için yapılan hesaplamalar ele alınmıştır.

4.16.2.1. ABG toplama haznesinin boyutlandırılması ve maliyet analizi

Bu bölümde, ABG toplama haznesinin boyutları, yoğunlaşmış su toplama haznesi, su tahliye borusu ve su deposu için gerekli boyutlandırma hesaplamaları ve maliyet analizleri yapılacaktır. Amaç, haznenin ABG'yi belirli bir süre tutarak kompresör için gerekli akışın dengelenmesini sağlamaktır.

Veriler:

- 1) ABG hacimsel debisi: 376 m³/s
- 2) ABG giriş sıcaklığı: 95°C
- 3) ABG çıkış sıcaklığı: 31°C
- 4) Soğutucu akışkan: -56,4°C sıcaklığa sahip CO₂
- 5) Yoğuşmuş su kütleli debisi: 15,49 kg/s
- 6) Su toplama haznesinde bekleme süresi: 15 - 21 gün

- **ABG toplama haznesinin boyutlandırılması**

Endüstriyel gaz depolama ve işleme tesislerinde gazın belirli bir süre tutulması, prosesin gereksinimlerine ve kullanılan ekipmanlara bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Özellikle, gazın işlenmesi, sıcaklık dengesi sağlanması ve proses ekipmanlarının verimli çalışabilmesi için gazın bekletilme süresi önemli bir tasarım kriteridir.

Örneğin, düzenli depolama sahalarında oluşan depo gazının meşale ile yakılması sürecinde, gazın 1000°C sıcaklıkta en az 3 saniye bekletilmesi önerilmektedir. Bu sürenin belirlenmesindeki temel amaç, gazın tam yanmasını ve zararlı bileşenlerin minimize edilmesini sağlamaktır (HLC Çevre, 2024).

Bu çalışmada tasarlanan ABG toplama haznesi, salınım dengesizliklerinin giderilmesi, gazın kompresör tarafından sıkıştırılması için gerekli süre boyunca tutulması amacıyla belirlenen ortalama 4 saniyelik bir bekleme süresi esas alınarak tasarlanmıştır.

Gerekli hacim hesabı:

Haznenin toplam hacmi, ABG'nin 4 saniye boyunca hazne içinde kalmasını sağlayacak hacim dikkate alınarak hesaplanabilir:

Hazne Hacmi=Hacimsel Debi×Bekleme Süresi

$$V=376 \times 4=1504 \text{ m}^3$$

Silindirik haznenin hacim denklemi:

$$V=\pi r^2 h$$

Buradan, uygun bir çap ve yükseklik belirlenerek maliyet açısından optimize edilebilir bir tasarım oluşturulacaktır.

Örneğin, hazne çapı 10 metre kabul edilirse:

$$h = \frac{V}{\pi \cdot r^2}$$

$h=19,2 \text{ m}$ olarak bulunur.

Buna göre:

- 1) ABG toplama haznesi çapı: **10 m**
- 2) ABG toplama haznesi yüksekliği: **19,2 m**
- **ABG toplama haznesi maliyeti**

Yapılan piyasa araştırmaları ve literatür taramalarına göre, çelik malzeme maliyetlerinin ton başına 600 - 3.500 USD arasında değiştiği, silindirik çelik tankların işçilik ve üretim maliyetlerinin ise birim hacim başına 200 - 1.000 USD/m³ aralığında olduğu belirlenmiştir ([Omega Çelik, 2025]; [Nova Santeck, 2025]).

Bu çalışmada, maliyet hesaplamalarında çelik malzeme maliyeti için 2.500 USD/ton ve silindirik çelik tank maliyeti için 500 USD/m³ birim değerleri baz alınmıştır. Belirlenen bu maliyet değerleri, ABG toplama haznesinin optimum maliyet analiziyle toplam yatırım maliyetinin hesaplanmasına olanak tanımaktadır.

Silindirik çelik tank maliyeti: 500 USD/m³

Hazne hacmi: 1504 m³

$$C_{ABG \text{ Haznesi}}=1504 \times 500=752.000 \text{ USD}$$

4.16.2.2. Yoğuşmuş su toplama haznesi ve depolama sisteminin boyutlandırılması ve maliyeti

Yoğuşmuş suyun haznede toplanması, tahliye edilmesi ve 15-21 gün süreyle depolanması planlanmıştır. Bu sürenin belirlenmesinde, elde edilen suyun uçucu kül ıslatma işlemlerinde kullanılacak olması ve uçucu külün çimento sektörüne satış

süreçlerinin tamamlanabilmesi için yeterli sürenin sağlanması gerekliliği dikkate alınmıştır. Böylece, suyun sürdürülebilir kullanımının sağlanması ve endüstriyel süreçlerde etkin bir şekilde değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

Günlük su toplama miktarı:

Günlük Su Miktarı= $15,49 \times 86400 = 1338,3 \text{ m}^3/\text{gün}$

Toplam su deposu hacmi:

- 15 gün için: $1338,3 \times 15 = 20.074,5 \text{ m}^3$
- 21 gün için: $1338,3 \times 21 = 28.104,3 \text{ m}^3$

Su deposu **30.000 m³** kapasitede olacak şekilde tasarlanmalıdır.

Su toplama haznesi boyutlandırılması:

- Hazne çapı: 5 metre
- Hazne yüksekliği: 3 metre

Tahliye borusu boyutlandırılması:

- Borunun iç çapı: 0,5 metre
- Borunun uzunluğu: 10 metre

Su toplama haznesi ve tahliye borusunun boyutları, yakalanacak suyun kütesel debisi, sistemin tahliye kapasitesi ve endüstriyel kullanım süreci göz önünde bulundurularak hidrolik ve operasyonel verimlilik açısından optimize edilmiştir. Haznenin çapı ve yüksekliği, suyun belirlenen bekleme süresi boyunca verimli bir şekilde toplanmasını ve tahliye edilmesini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca, tahliye borusunun çapı ve uzunluğu, depolama sürecinde tıkanma risklerini en aza indireyecek ve akışın yerçekimi etkisiyle düzenli bir şekilde gerçekleşmesini sağlayacak şekilde belirlenmiştir.

Bu tasarım yaklaşımı, su buharının yoğunlaşma sürecinin verimli bir şekilde yönetilmesi ve elde edilen suyun kesintisiz olarak sistemde tekrar kullanılmasını sağlamak amacıyla benimsenmiştir. Yoğuşmuş su toplama haznesi ve depolama sistemine ait maliyetler tablo 4.4'te sunulmuştur.

Tablo 4.4. Yoğuşmuş Su Toplama Haznesi ve Depolama Sistemi Maliyeti

Birim	Miktar	Birim Maliyet (USD)	Toplam Maliyet (USD)
Su toplama haznesi	1 adet (5m çap, 3m yükseklik)	10.000	10.000
Su deposu (30.000 m ³)	1 adet	400.000	400.000
Tahliye borusu (10m, 0.5m çap)	1 adet	5.000	5.000
Toplam			415.000 USD

4.16.2.3. CO₂ Sıkıştırma ve Sıvılaştırma Sistemi Hesaplamaları

1. Kompresör seçimi ve maliyeti

CO₂'nin verimli bir şekilde sıkıştırılarak sıvılaştırılması için, yüksek basınç ve kapasiteye sahip özel kompresörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tür kompresörlerin maliyetleri, teknik özellikleri, enerji verimlilikleri ve üretici firmalara göre farklılık göstermektedir.

Piyasa araştırmaları ve literatür incelemeleri sonucunda, CO₂ sıkıştırma ve sıvılaştırma uygulamalarında kullanılan kompresörlerin maliyetlerinin, kapasite ve teknik özelliklere bağlı olarak değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle, yüksek basınçlı ve büyük kapasiteli kompresörlerin maliyetleri daha yüksek olmaktadır.

Bu çalışmada, CO₂ sıkıştırma ve sıvılaştırma sistemi için uygun bir kompresör seçimi yapılırken, literatürde ve piyasada bulunan veriler dikkate alınarak, ortalama bir maliyet belirlenmiştir. Yapılan değerlendirmeler doğrultusunda, seçilecek kompresörün maliyeti yaklaşık olarak **50.000 USD** olarak kabul edilmiştir.

2. Zamanlayıcı, çek valf ve boru maliyetleri

CO₂'nin 545°C'ye kadar çıkan yüksek sıcaklık ve yüksek basınç koşullarında, sıkıştırılan gazın ön bekletme tanklarına sırasıyla aktarılması için, her bir tankın girişine yerleştirilecek yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklı tek yönlü valfler (çek valfler) ve programlanabilir zamanlayıcı kontrol üniteleri kritik öneme sahiptir. Bu

bileşenler, sistemin güvenliğini sağlarken, CO₂'nin kontrollü bir şekilde yönlendirilmesini ve verimli bir sıkıştırma-sıvılaştırma sürecini mümkün kılmaktadır.

CO₂'nin 545°C'deki sıcaklığı ve yüksek basıncı dikkate alındığında, standart paslanmaz çelik çek valfler yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, 600°C'ye kadar dayanıklı Inconel 625 veya Inconel 718 alaşımlı valflerin kullanımı uygun bir çözüm olacaktır. Bu alaşımlar, yüksek sıcaklık ve korozyon direnci açısından endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmekte olup, yüksek performans ve uzun ömürlü kullanım sağlamaktadır.

Ancak, bu tür özel alaşımlardan üretilen valflerin maliyetleri, standart paslanmaz çelik valflere göre daha yüksek olabilir. Örneğin, Inconel 718 alaşımının kilogram başına fiyatı, tedarikçi ve sipariş miktarına bağlı olarak değişmekle birlikte yaklaşık 46 USD civarındadır (LF Metal Product, 2025). Bu nedenle, valflerin boyutu ve ağırlığına bağlı olarak toplam maliyet artacaktır.

CO₂'nin her bir ön bekletme tankına belirli bir sırayla yönlendirilmesi için, yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklı, programlanabilir zamanlayıcı kontrol üniteleri gereklidir. Bu üniteler, her bir valfi belirlenen zaman aralıklarında açıp kapatarak CO₂'nin tanklara kontrollü bir şekilde dağıtılmasını sağlar. Örneğin, Omega Engineering firması, yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında çalışabilen çeşitli kontrol üniteleri ve valf çözümleri sunmaktadır (OMEGA Engineering, 2025; ThermOmegaTech, 2025; DwyerOmega, 2025).

Bu çalışmada, CO₂ sıkıştırma ve sıvılaştırma sisteminde kullanılacak zamanlayıcı ve valflerin maliyeti için, piyasada bulunan benzer endüstriyel ekipmanların fiyatları dikkate alınarak ortalama bir değer belirlenmiştir. Yapılan değerlendirmeler doğrultusunda, 600°C'ye dayanıklı Inconel alaşımlı valfler ve programlanabilir zamanlayıcı kontrol ünitesi için toplam maliyetin yaklaşık **5.000 USD** olduğu kabul edilmiştir.

Buna ek olarak, CO₂'nin sıkıştırılarak sıvılaştırılması sürecinde, yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklı transfer borularının kullanılması gerekmektedir. Sistemin tasarımına göre, korozyon direnci ve termal dayanımı yüksek olan Inconel 718 alaşımlı borular tercih edilmiştir. Toplam boru uzunluğu 150 m ile 180 m arasında değişmekte olup, her bir borunun çapı ve duvar kalınlığı dikkate alınarak ortalama ağırlık değeri 10 kg/m olarak belirlenmiştir.

Piyasa verilerine göre, Inconel 718 alaşımlı boruların kilogram başına fiyatı yaklaşık **46 USD** olup, yapılan hesaplamalar doğrultusunda boru maliyetleri minimum 69.000 USD ve maksimum 82.800 USD arasında değişmektedir. Bu çalışmada, ortalama boru maliyet değeri olarak **76.000 USD** kabul edilmiştir.

3. Ön bekletme ve nihai depolama tank maliyetleri

KETS'te kullanılacak 6 adet ön bekletme tankına ilişkin yapılan piyasa araştırmaları ve literatürde yer alan maliyet analizleri doğrultusunda, 1000 m³ kapasiteli bir ön bekletme tankının maliyetinin **55.000 USD** olduğu belirlenmiştir. Bu kapsamda, 6 adet ön bekletme tankı için toplam maliyet **330.000 USD** olarak hesaplanmıştır.

KETS'ten kaynaklanan yıllık CO₂ emisyonu 10.596.096 ton olarak hesaplanmıştır. Yakalanan ve sıvılaştırılan CO₂'nin depolanması ve yönetimi kapsamında, depolama süresi 1 ay olarak belirlenmiştir. Bu süre zarfında, planlanan satış işlemlerinin gerçekleştirilmesi ve depolama kapasitesinin sürekliliğinin sağlanması amacıyla tankların periyodik olarak boşaltılması öngörülmektedir. Bu doğrultuda, aylık yakalanan 883.008 ton CO₂'nin güvenli şekilde depolanabilmesi için gerekli tank sayısı yaklaşık **15** olarak hesaplanmıştır.

Öte yandan, nihai depolama tanklarında bulunan -56,4°C'deki sıvı CO₂, çürük buharın yoğunlaştırılması için kullanılacaktır. Bu süreçte, 330 ton/saat çürük buharın yoğunlaştırılarak besleme suyuna eklenmesi için gerekli CO₂ debisi 28.165,7 ton/saat olarak hesaplanmıştır. Çürük buhar yoğunlaştırma işleminde kullanılan CO₂, buharlaşarak -20°C sıcaklığına yükselmektedir ve döngü içerisinde tekrar soğutulması gerekmektedir. Bu soğutma sürecinin verimli bir şekilde gerçekleştirilmesi için, belirli bir tank kapasitesine ihtiyaç duyulmaktadır. Sistem tasarımına uygun olarak, çürük buhar yoğunlaştırma işleminde döngüsel olarak kullanılacak CO₂'nin soğuma süresini ve tank içerisindeki sıcaklık dengesini sağlamak amacıyla **3** adet nihai depolama tankı tahsis edilmiştir. Buna ek olarak, sıvılaştırılan CO₂'nin depolanması ve satış işlemlerinin yönetimi için gereken 1 aylık CO₂ depolama ihtiyacı göz önünde bulundurularak, 60.000 tonluk yaklaşık **15** adet nihai depolama tankı gerektiği hesaplanmıştır.

Bu çalışma kapsamında yapılan analizler, CO₂'nin sürdürülebilir şekilde yönetimi için tank kapasitelerinin sistemin verimliliği ve operasyonel sürekliliği açısından belirleyici bir unsur olduğunu ve tasarım parametrelerine bağlı olarak optimize

edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Depolama süresi, döngüsel kullanım miktarı ve satış işlemleri dikkate alınarak, nihai depolama tanklarının kapasitesi 60.000 ton ve sayısı **18 adet** olarak kabul edilmiştir.

Yapılan piyasa araştırmaları ve literatürde yer alan maliyet analizlerine göre, 60.000 ton kapasiteli nihai depolama tanklarının birim maliyeti **1.400.000 USD** olarak belirlenmiş olup, toplam 18 tank için toplam maliyet **25.200.000 USD** olarak hesaplanmıştır.

Bu doğrultuda, sistemde yer alan tüm tankların 6 adet ön bekletme tankı ve 18 adet nihai depolama tankının toplam yatırım maliyeti **25.530.000 USD** olarak belirlenmiştir.

4.17. Çürük Buharın Yoğuşturulmasında CO₂ Kullanımı

Bu bölümde, çürük buharın yoğuşturulması sürecinde CO₂'nin soğutucu akışkan olarak kullanımı ele alınmıştır. CO₂'nin fiziksel ve termodinamik özelliklerinden faydalanılarak yoğuşma işleminin verimliliği artırılmaya çalışılmıştır. Yoğuşma prosesi sırasında kullanılan CO₂'nin soğutma kapasitesi ve çevresel etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca, bu süreçte CO₂'nin kapalı devre bir sistemde dolaştırılmasıyla enerji tasarrufu sağlanması hedeflenmiştir.

4.17.1. Buhar yoğuşturma prosesi

Çalışmanın ikinci kısmında, mevcut termik santrallerde çürük buharın yoğuşturulmasına yönelik kullanılan yöntemler incelenmiş ve bu sürece alternatif bir çözüm önerisi oluşturulmuştur. Günümüzde termik santrallerde çürük buharın yoğuşturulması amacıyla soğutma suyu genellikle deniz, göl veya akarsu gibi doğal su kaynaklarından sağlanmaktadır. Bu çalışmada, mevcut su bazlı yoğuşturma sistemlerine alternatif olarak, termik santralin bacasından yakalanan CO₂ soğutucu akışkan olarak kullanılması önerilmektedir.

Termik santrallerde, yüksek sıcaklık ve basınca sahip buhar, elektrik üretim sürecinin temel enerji taşıyıcısıdır. Genellikle 150-300 bar basınç ve 500-600 °C sıcaklık aralığında üretilen buhar, türbinlere yönlendirilir. Türbin içerisindeki buhar, kanatçıklara çarparak genişler ve bu süreçte mekanik enerji üretir. Buharın genişlemesi sırasında, enerjisinin büyük bir kısmını kaybetmesi nedeniyle iç enerjisi azalır.

Buharın bu genişleme süreci, türbinin dönme hareketini sağlayarak elektrik jeneratörlerini çalıştırır ve böylece elektrik üretimi gerçekleştirilir.

Türbinlerde iş yaptıktan sonra, buharın basıncı ve sıcaklığı önemli ölçüde düşer. Bu duruma gelen buhara "çürük buhar" adı verilir. Çürük buhar, artık türbin üzerinde iş yapabilecek enerjiden yoksun olduğu için iki seçenekle değerlendirilir: Ya doğrudan atmosfere salınır ya da yeniden kullanıma kazandırılmak amacıyla yoğunlaştırma sistemine yönlendirilir (Stultz & Kitto, 1992).

Yoğuşurma sistemine gönderilen çürük buhar, genellikle soğutma suyu ile temas ettirilerek sıvı faza dönüştürülür ve elde edilen yoğunlaşmış su, besleme suyu olarak yeniden termik santral çevriminde kullanılır. Çalışmada önerilen yeni yöntemde, soğutucu akışkan olarak su yerine termik santral bacasından yakalanan CO₂ kullanılacaktır. Bu yöntem, yalnızca soğutma suyu kullanımını azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda karbon yönetimi açısından da fayda sağlayarak sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunacaktır. Bu yeni yaklaşım, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de enerji verimliliği hedeflerini destekleyen yenilikçi bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

4.17.1.1. Çürük buhar (Exhaust Steam)

Termik santrallerde veya buhar türbini kullanılan enerji santrallerinde, türbinin iş üretme işlemi sırasında enerjisinin büyük kısmını kaybetmiş, basıncı ve sıcaklığı düşmüş buharı ifade eder. İş görme kapasitesi büyük ölçüde azalmış olan bu buhar, enerji santrallerinin verimli çalışması için yoğunlaştırulup besleme suyu olarak geri dönüştürülmektedir. Çürük buharın yoğunlaştırulup besleme suyu olarak yeniden kazanılması, santralin termal verimliliğini artırarak enerji israfını azaltmakta, su döngüsünün devamını sağlayarak su tasarrufu sağlamakta ve atmosfere salınımını önleyerek çevresel etkileri azaltmaktadır (Stultz & Kitto, 1992).

Çürük buhar, hala az miktarda da olsa enerji içerir; bu nedenle, enerji verimliliğini artırmak amacıyla yoğunlaştırulup besleme suyu olarak yeniden kullanılmaktadır. Çürük buharın yoğunlaşmasıyla elde edilen su, buhar kazanına geri gönderilerek yeniden yüksek basınçlı buhar haline dönüştürülmektedir. Bu işlem, santralin su ve enerji döngüsünü tamamlamasına ve kaynak kullanımını optimize etmesine yardımcı olmaktadır (Stultz & Kitto, 1992).

Çürük buhar, yoğuşturucu sistemlerde (kondenser) soğutularak yoğuşturulur ve su haline getirilmektedir. Çürük buharın yoğuşturulması işlemi, sistem verimliliğini artırmak, buhar çevrimini devam ettirmek ve su tasarrufu sağlamak için kritik bir aşamadır. Bu amaçla kullanılan başlıca yoğuşurma yöntemleri şunlardır:

4.17.1.2. Su soğutmalı yoğuşturucular (Kondenserler)

Bu sistemde, çürük buhar soğutma suyu kullanılarak yoğuşturulur. En yaygın kullanılan yöntemdir ve iki ana tipe ayrılır:

Yüzey Yoğuşturucular (Surface Condensers): Çürük buhar, yoğuşturucunun içinde borular boyunca dolaşan soğutma suyu ile temas etmeden yoğuşur. Buhar, boruların etrafında dolaşırken soğutma suyu boruların içinden akar. Bu şekilde çürük buhar doğrudan soğutma suyu ile karışmaz, yani su kirliliği önlenmiş olur.

Karışmalı Yoğuşturucular (Direct Contact Condensers): Çürük buhar ve soğutma suyu doğrudan temas eder. Bu sayede buhar doğrudan soğutma suyuna karışarak yoğuşur. Ancak, bu yöntem genellikle sınırlı uygulamalarda kullanılır, çünkü buhar ve suyun karışması istenmeyen maddelerin birikimine yol açabilir.

4.17.1.3. Hava soğutmalı yoğuşturucular (Air-Cooled Condensers)

Bu sistemlerde çürük buhar, soğutma suyu yerine hava ile soğutularak yoğuşturulur. Hava soğutmalı yoğuşturucular, özellikle su kaynaklarının sınırlı olduğu yerlerde tercih edilir. Fanlar aracılığıyla soğutma havası sağlanarak buharın yoğuşması sağlanır. Ancak hava soğutmalı sistemler, su soğutmalı sistemlere göre daha büyük alan ve daha yüksek enerji tüketimi gerektirir.

4.17.1.4. Evaporatif soğutma sistemleri

Bu sistemlerde, soğutma kulesi yardımıyla çürük buhar yoğuşturulur. Su, kulede buharlaşarak soğur ve bu soğutma suyu çürük buharı yoğuşturmak için kullanılır. Evaporatif soğutma sistemleri genellikle büyük termik santrallerde ve nemli iklime sahip bölgelerde tercih edilir. Soğutma suyu, bir kısmı buharlaşarak soğur ve yoğuşturucuya geri döner.

4.17.1.5. Isı geri kazanım yoğuşturucuları (Heat Recovery Condensers)

Bu sistemde, çürük buharın içerdiği ısı başka bir sürece geri kazandırılır. Örneğin, buharın yoğuşturulması sırasında açığa çıkan ısı, besleme suyu veya başka bir

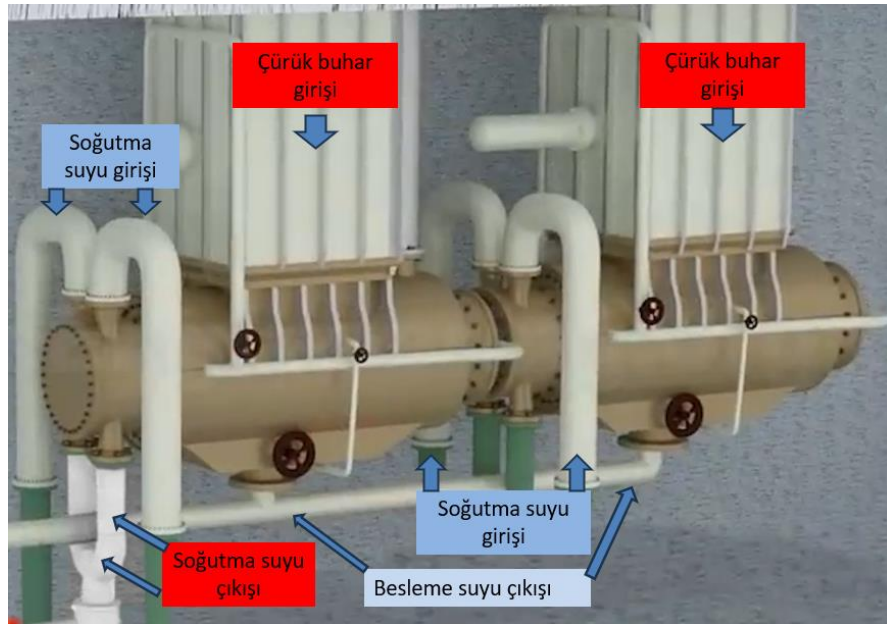
endüstriyel süreçte kullanılabilir. Bu tür sistemler, özellikle enerji verimliliğini artırmak ve atık ısıyı değerlendirmek amacıyla kullanılır.

4.17.1.6. Vakum yoğusturucular

Vakum yoğusturucularda, çürük buharın yoğuşması düşük basınç altında gerçekleştirilir. Düşük basınçta buharın yoğuşma sıcaklığı düştüğünden, yoğusturma işlemi daha düşük sıcaklıkta yapılabilir. Bu yöntem, özellikle düşük sıcaklıkta yoğuşma sağlamak istendiğinde ve yüksek verim gerektiğinde kullanılır. Vakum yoğusturucular, özellikle kombine çevrim santrallerinde veya buhar türbini verimliliğini artırmak için tercih edilir.

Çürük buharın basınç ve sıcaklık değerleri, buhar türbininin özelliklerine ve santralin çalışma koşullarına göre değişebilir. Genel olarak çürük buharın basınç değerleri 0,1-1 bar aralığında, atmosfer basıncına çok yakındır veya suyun soğuması sebebiyle vakum altındadır. Türbinde enerjisini kaybeden buharın sıcaklığı ise 30 - 70 °C aralığındadır(Stultz & Kitto, 1992).

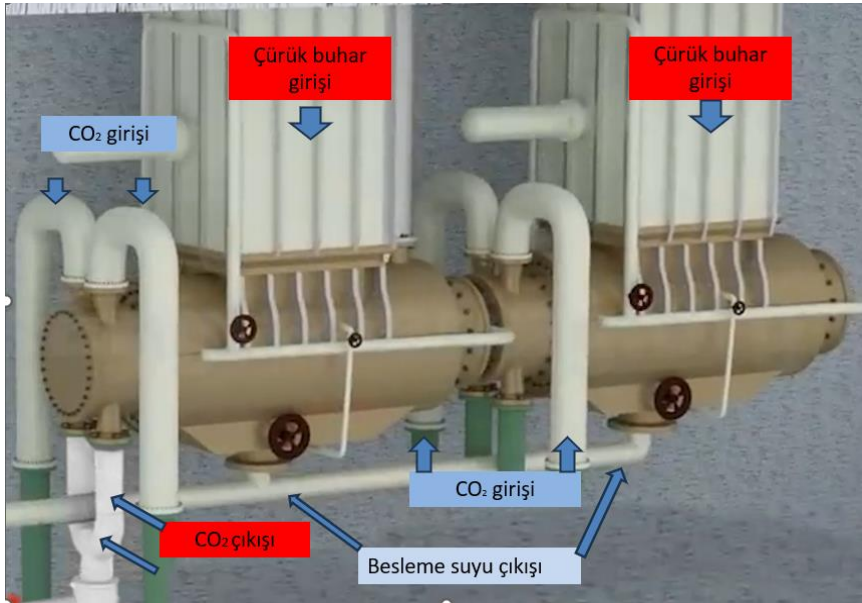
Bu çalışmada, günümüzde su yoğusturma sistemleri arasında en yaygın olarak kullanılan su soğutmalı yüzey yoğusturucular (Şekil 4.23) incelenmiş ve bu sistemlerde soğutucu akışkan olarak kullanılan soğutma suyunun yerine CO₂ kullanımı için bir sistem tasarımı yapılmıştır.



Şekil 4.23. Mevcut sistemlerdeki çürük buhar yoğusturma boyleri.

Besleme suyunun, sistemde korozif etkilere sebep olmasını önlemek için sertlik maddeleri ve tuzlardan arındırılmış olması gerekir. Besleme suyunun minerallerden arınmış yapısının korunabilmesi için soğutma suyu ile karışmaması önemlidir. Bu sebeple termik santrallerde kullanılan soğutma boyleri (kondanser) genellikle yüzeyli tiptir. Soğutma suyunun ve yoğunlaştırılan çürük buharın birbirine karışmasını önlemek için yüzey tipli kondanserler tercih edilmektedir.

Termik santrallerde kullanılan soğutma suyu genellikle deniz, göl ve akarsu gibi doğal su kaynaklarından temin edilmektedir. Bu nedenle, bu tür santrallerin su kaynaklarına yakın bölgelerde inşa edilmesi yaygındır. Ancak, bu durum su kaynaklarının kirlenmesi ve sucul ekosistemlerin zarar görmesi gibi çevresel sorunlara yol açmaktadır. Soğutma işlemi sonrasında ısınan su, genellikle alıcı ortamlara deşarj edilmekte ve bu da termal kirlilik oluşturarak ekosistem dengesini olumsuz yönde etkilemektedir (Rao & Kumar, 2017). Özellikle, sucul yaşam üzerinde stres faktörü yaratan termal kirlilik, biyolojik çeşitliliğin azalmasına ve doğal ekosistemlerin bozulmasına neden olabilmektedir. Bu durum, su kaynaklarının korunması ve termal kirlenmenin önlenmesi için daha sürdürülebilir soğutma teknolojilerinin geliştirilmesini gerektirmektedir (Rao & Kumar, 2017).



Şekil 4.24. Tasarlanan çürük buhar yoğunlaştırma boyleri.

Tasarlanan sistemde, çürük buharın yoğunlaştırılması için soğutucu akışkan olarak CO₂'nin kullanılması önerilmektedir (Şekil 4.24). Bu amaçla, termik santralin bacasından yakalanan CO₂'nin kullanımı planlanmaktadır. Mevcut sistemlerde, çürük

buhar yoğuşturulmasında standart olarak soğutucu akışkan su kullanan yüzey tipi soğutma boylerleri kullanılmaktadır. Tasarlanan sistemde, mevcut boyler yapısında herhangi bir değişiklik yapılmaksızın, soğutucu akışkan olarak CO₂ kullanılması öngörülmektedir. Bu sayede, yeni bir yatırım maliyetine gerek duyulmamakta ve termik santral bacasından yakalanan CO₂'nin değerlendirilmesi sağlanmaktadır.

Tasarlanan sistemde kullanılan CO₂'nin boyler giriş ve çıkış basınçlarının sabit olduğu varsayılmaktadır. Ancak, boyler çıkışındaki CO₂'nin sıcaklığı artış gösterecektir. Bu sıcaklığın düşürülmesi için CO₂'nin doğal soğutmalı nihai depolama tanklarında bekletilerek pasif soğuma yöntemiyle soğutulması sağlanacaktır. Çürük buharın yoğuşturulması sonucunda elde edilen su, mevcut termik santral süreçlerinde olduğu gibi besleme suyu olarak yeniden sisteme kazandırılacaktır.

Yüzey tipi soğutma boylerleri, soğutucu gaz veya sıvının geçirildiği boruların bulunduğu bir yapıya sahiptir. Bu boruların yüzey alanı, ısı transferini artırmak amacıyla genişletilerek tasarlanır. Boru yüzeyine temas eden çürük buhar, boru içerisindeki akışkanla ısı transferi gerçekleştirir ve bu süreçte sıcaklığı düşen çürük buhar sıvılaşarak yoğuşmuş su (kondensat) haline gelir. Yoğuşmuş su, bir pompa yardımıyla termik santralin besleme suyu hattına aktarılır (Çengel & Boles, 2020).

Boyerlerde kullanılan borular genellikle bakır veya bakır-nikel alaşımlarından üretilmekte olup, boru malzemelerinin kalınlığı genellikle 1 mm civarındadır. Bu malzemeler, yüksek ısı iletkenliği ve dayanıklılık özellikleriyle öne çıkar (Incropera et al., 2007). Çürük buhar, boyler içerisine girdiğinde, boruların dış yüzeyine temas ederek sıcaklığını kaybeder ve sıvı faza geçer. Bu sistem, CO₂'nin soğutucu akışkan olarak kullanılmasıyla mevcut teknolojilerle entegre bir çözüm sunarak enerji geri kazanımı ve karbon yönetimine katkı sağlamaktadır (Çengel & Boles, 2020; Incropera et al., 2007).

Tablo 4.5. Soğutma boyları tasarımı için kullanılan; çürük buhar, CO₂ ve deniz suyuna ait parametreler.

	Değer
Çürük buhar debisi (ton/h)	330
Çürük buhar basıncı (kPa)	20
Çürük buhar sıcaklığı (°C)	50
h_1 (kJ/kg°C)	2802,5
h_{2f}	151,48
C_p (kJ/kg°C)	0,96589
T_3 (°C)	-56,4
T_4 (°C)	0 (kabul edilmiştir.)
Deniz Suyu Sıcaklığı (°C)	20 (kabul edilmiştir.)

Yoğuşurma sistemi hesaplamalarında kullanılan KETS'e ait özellikler Tablo 4.5'te gösterilmiştir. Bu veriler, ortalama değerler olup ilgili literatürde belirtilen aralıklar temel alınmıştır; örneğin, çürük buhar basıncı 0,1-1 bar aralığında bir değer olarak 0,2 bar; sıcaklık ise 30-70 °C aralığında bir değer olarak 50 °C alınmıştır (Doğaka, 2019). Debi, yıllık ortalama 2000 GWh elektrik enerjisi üretim kapasitesine sahip termik santrallerin çürük buhar debi verileri incelenerek 330 ton/h olarak kabul edilmiştir.

Yoğuşurma için kullanılacak olan CO₂, nihai depolama tanklarından yönlendirilecek ve boylere girerek yoğuşurma işini tamamladıktan ve boylerden çıktıktan sonra yine nihai bekleme tanklarında bekletilerek pasif soğuması sağlanacaktır.

Nihai depolama tanklarında CO₂'nin basıncı 10 bar ve sıcaklığı -56,4 °C'dir. Basınç aynı kalmak şartıyla, sıcaklık -20 °C'nin altına düşmediği sürece, CO₂'nin sıvı fazda kalacağı, CO₂ faz diyagramında (Şekil 4.16) görülmektedir.

4.17.2. Su yoğuşurma sistemi hesaplamaları

330 ton/h debi ve 50 °C sıcaklığa sahip çürük buharın yoğuşturulması için kullanılması gereken CO₂ kütleli debisi, Enerjinin Korunumu Kanunu denklemi kullanılarak hesaplanmıştır (Denklem 4).

Yoğuşturma boylerinde, giriş ve çıkış basınçları sabit kalmak üzere, çürük buhar sıcaklığının düşürülmesi ve su haline gelmesi için gerekli deniz suyu ve CO₂ debileri hesaplanarak karşılaştırılmıştır.

$$\dot{Q}_{\text{buhar}} = \dot{Q}_{\text{CO}_2} \quad (\text{Denklem 4})$$

$$\dot{m}_{\text{buhar}} \cdot (h_1 - h_{2f}) = \dot{m}_{\text{CO}_2} \cdot C_p \cdot |T_4 - T_3|$$

Denklemde;

$$\dot{m}_{\text{buhar}} (\text{Çürük buharın kütleli debisi}) = 91,7 \text{ kg/s}$$

$$h_1 (\text{Buharın giriş durumundaki entalpisi}) (\text{Tablo A: CO}_2 \text{ CO}_2 \text{'nin mükemmel gaz özellikleri tablosu}) = 2640 \text{ kJ/kg} = 2640 \cdot 1000 = 2.640.000 \text{ J/kg}$$

$$h_{2f} (\text{Yoğuşmuş buharın su haline gelmesi ve çıkış durumundaki entalpisi}) = 210 \text{ kJ/kg} \cdot 1000 = 210.000 \text{ J/kg}$$

$$C_{p\text{CO}_2} (\text{Tablo A}) = 850 \text{ J/kg K}$$

$$T_3 (\text{CO}_2 \text{'nin giriş ısısı}) = -56,4 \text{ °C}$$

$$T_4 (\text{CO}_2 \text{'nin çıkış ısısı}) = -20 \text{ °C} (10 \text{ bar basınç altındaki sıvı fazda bulunan CO}_2 \text{'nin sıvı fazda kalabileceği en yüksek sıcaklık değeri})$$

$$\Delta T = 36,4$$

Su buharını yoğuşturmak için gerekli CO₂ debisi:

$$91,7 \cdot (2.640.000 - 210.000) = \dot{m}_{\text{CO}_2} \cdot 850 \cdot (-56,4 - (-20))$$

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = 7.823,8 \text{ kg/s} = 28.165.723 \text{ kg/h} = 28.165,7 \text{ ton/h}$$

olarak bulunmuştur. 330 ton/h çürük buharın yoğuşturularak besleme suyuna eklenmesi için gerekli CO₂ debisi 28.165,7 ton/h tir.

Mevcut termik santrallerin su yoğuşturma sistemlerinde, soğutucu akışkan olarak genellikle deniz suyu, akarsu ve göllerden elde edilen 20-22 °C sıcaklıktaki su kullanılmaktadır. Soğutma amacıyla inşa edilen soğutma kuleleri, ihtiyaca göre boyutlandırılmakta olup, çapı 100 metreye ve yüksekliği 120 metreye kadar ulaşabilen yapılar mevcuttur. Soğutma için kullanılan suyun yaklaşık %5'i, aldığı atık ısı enerjisiyle buharlaşırken, kalan %95'i ise suyun alındığı deniz, akarsu veya göle yüksek sıcaklıkta deşarj edilmektedir (İmal, 2023).

Deniz suyu sıcaklığına ilişkin hesaplamalar, 31.12.2004 tarih ve 25687 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği’nde belirtilen sınır değerlere dayandırılmıştır. Yönetmeliğin Tablo 9.6’sinde yer alan ve 12/5/2023 tarihinde Resmi Gazete’de yapılan değişikliğe göre, soğutma amaçlı olarak kullanılan deniz suyunun sıcaklığındaki artış, Haziran-Eylül aylarını kapsayan yaz döneminde 1°C’yi, diğer aylarda ise 2°C’yi geçmemelidir. Buna göre, ortalama 20°C kabul edilen deniz suyu sıcaklığının, boyler çıkışında en fazla 21°C olarak deşarj edileceği varsayılmıştır (Resmi Gazete, 2004; RG-12/5/2023-32188).

Bu sıcaklık kriterleri, çalışmada yapılan hesaplamaların temel dayanağını oluşturmakta ve termal deşarjların alıcı ortam üzerindeki etkilerini minimize etmeyi amaçlayan çevresel sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumludur. Yönetmelikte yer alan ilgili tablo ve dipnot bilgileri EK A’da sunulmuştur.

Boylerde soğutucu akışkan olarak deniz suyu kullanılması durumunda, ihtiyaç duyulacak deniz suyu kütleli debisi aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_{CO_2} = \dot{Q}_{\text{deniz suyu}} \quad (\text{Denklem 4})$$

$$\dot{m}_{CO_2} \cdot C_{pCO_2} \cdot (T_4 - T_3) = \dot{m}_{\text{deniz suyu}} \cdot C_{p\text{deniz suyu}} \cdot (T_2 - T_1)$$

Denklemde;

$$\dot{m}_{CO_2} (\text{CO}_2\text{'nin kütleli debisi}) = 7.823,8 \text{ kg/s}$$

$$C_{pCO_2} = 850 \text{ J/kg K}$$

$$T_4 (\text{Boylere çıkışındaki CO}_2\text{'nin sıcaklığı}) = -20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_3 (\text{Boylere girişindeki CO}_2\text{'nin sıcaklığı}) = -56,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{CO_2} = 36,4$$

$$\dot{m}_{\text{deniz suyu}} (\text{Deniz suyunun kütleli debisi})$$

$$C_{p\text{deniz suyu}} (\text{Deniz suyunun özgül ısısı}) = 4,187 \text{ kJ/kgK} = 4187 \text{ J/kgK}$$

$$T_2 (\text{Boylere çıkan deniz suyu sıcaklığı}) = 21 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_1 (\text{Boylere giren deniz suyu sıcaklığı}) = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{deniz suyu}} = 1$$

$$\dot{m}_{CO_2} \cdot C_{pCO_2} \cdot \Delta T_{CO_2} = \dot{m}_{\text{deniz suyu}} \cdot C_{p\text{deniz suyu}} \cdot \Delta T_{\text{deniz suyu}}$$

$$7.823,8 \text{ kg/s} \cdot 850 \text{ J/kgK} \cdot 36,4 = \dot{m}_{\text{deniz suyu}} \cdot 4187 \text{ J/kgK} \cdot 1$$

$$\dot{m}_{\text{deniz suyu}} = 57.814,2 \text{ kg/s} = 208.131.392 \text{ kg/h} = 208.131,4 \text{ ton/h}$$

Tasarlanan sistemde soğutucu akışkan olarak CO₂ kullanıldığından, 208.131,4 ton/h'lik deniz suyu kullanımına gerek kalmayacaktır. Bu değer yıllık olarak hesaplandığında: 1.823.231.064 ton/yıl soğutma suyu kullanımı engellenmiş olacaktır. Bu suyun %5'i (91.161.553,2 ton/yıl) buharlaşmakta; %95'i (1.732.069.510,8 ton/yıl) denize deşarj edilmektedir.





5. BULGULAR

Bu çalışmanın birinci bölümünde, CO₂'nin soğuk bir ortamda ($\leq 31,1$ °C) ve yüksek basınç altında (73,97 bar) sıkıştırılarak sıvılaştırılması incelenmiştir. Bu sıcaklık ve basınç değerleri, CO₂'nin sıvı faza geçişi için gerekli olan kritik koşullar olup, bu nedenle tercih edilmiştir. Günümüzde, atık baca gazı (ABG) soğutma işlemleri genellikle N₂ ve türevlerinin kullanıldığı soğutma sistemleri aracılığıyla gerçekleştirilmekte, bu süreçte baca gazının sıcaklığı $\leq 31,1$ °C'ye düşürülerek sıkıştırılmakta ve sıvılaştırılmaktadır. Ancak bu sistemler hem enerji tüketimi hem de operasyonel maliyetler açısından önemli dezavantajlar barındırmaktadır.

Soğuk ortamda ve yüksek basınç altında CO₂ sıvılaştırma sistemlerinde, baca gazının SO_x, N₂ oksitler NO_x, PM ve is gibi kirleticilerden arındırılmış olması gerekmektedir. Bu çalışmada, baca gazının bu tür kirleticilerden tamamen arındırıldığı varsayılmıştır. Çalışmanın temel amacı, baca gazını soğutma işlemlerinde CO₂'nin yenilikçi bir şekilde kullanımını incelemektir. Geleneksel sistemlerin aksine, bu çalışmada CO₂, ayrı bir soğutma sistemi gerektirmeksizin doğrudan arıtılmış baca gazı içerisine püskürtülerek kullanılacaktır. Soğutma işlemi için kullanılacak olan CO₂, basınç altında sıvılaştırılmış ve sıcaklığı -56,4 °C'ye düşürülmüş bir formda olacaktır. Bu bağlamda, termik santral baca gazından elde edilen CO₂, soğuk ortamda ve basınç altında sıvılaştırıldıktan sonra baca gazını soğutmak için yeniden kullanılacaktır. Böylece, baca gazını soğutmak için ayrı bir sistem veya soğutucu akışkan kullanımına gerek kalmayacaktır.

Bu yaklaşım hem enerji verimliliğini artırmayı hem de çevresel sürdürülebilirliği desteklemeyi hedeflemektedir. CO₂'nin bu şekilde kullanımı, yalnızca soğutma işlemlerinde enerji tüketimini azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda karbon yönetimi açısından da önemli bir katkı sağlayarak sera gazı emisyonlarının azaltılmasına olanak tanımaktadır.

Yıllık elektrik üretim kapasitesi 2000 GW olan ve taş kömürü kullanılan bir termik santral için yapılan hesaplamalara göre baca gazı içindeki CO₂'nin kütleli debisi

54,88 kg/s olarak bulunmuştur. Bu santralin yıllık CO₂ üretim miktarı 10.596.096 ton olarak hesaplanmıştır. Bu değer IPCC verileri, Türkiye Enerji Bakanlığı ve diğer uluslararası enerji ajanslarının emisyon faktörleri de göz önüne alınarak kıyaslanmıştır.

IPCC'ye göre, taş kömürü yakıldığında ortalama 1 ton taş kömürü yaklaşık 2.4 ton CO₂ salmaktadır. Bu değer, kömürün karbon içeriği ve yakma teknolojisine bağlı olarak değişebileceği belirtilmiştir. Elektrik üretimi için gereken enerji, santral verimliliğine bağlıdır. Ortalama bir termik santralin verimliliği genellikle %35 civarındadır. Bu, daha fazla kömür yakılarak elektrik üretildiği anlamına gelir. Yine IPCC ve diğer resmi kurumlarca 1 kWh elektrik üretimi için yaklaşık 0.9-1.0 kg CO₂ salımı öngörülmektedir (IPCC, 2006).

IPCC verilerine göre yıllık 2000 GW elektrik üreten bir taş kömürü termik santralinin yaklaşık 10-12 milyon ton CO₂ salımı beklenir. Türkiye Enerji Bakanlığı ve diğer uluslararası enerji ajanslarının emisyon faktörleri de benzer değerlerdedir (IPCC, 2006; EİGM, 2021).

Yapılan kıyaslama sonucunda, hesaplanan 10.596.096 ton CO₂ salımı, IPCC ve diğer güvenilir kurumların tahmin ettiği aralıklarla uyumludur. Bu değer, taş kömürünün karbon yoğunluğu ve santral verimliliğine bağlı olarak beklenen düzeyde bir emisyon miktarını ifade etmektedir. Hesaplama sonucu uluslararası referanslarla paralellik göstermektedir.

IPCC verileri ve bilimsel kaynaklara göre, ağaçların yıllık karbon yakalama kapasitesine dayanarak 10.596.096 ton CO₂'nin ağaçlar tarafından yakalanması için gerekli ağaç sayısı ve orman alanı hesaplanmıştır. KETS bacasından yıllık olarak salınan 10.596.096 ton CO₂'nin yakalanması için gerekli ağaç sayısı: yaklaşık 481 milyon ağaç olarak hesaplanmıştır. Gerekli orman alanı ise yaklaşık 1.059.610 hektar olarak bulunmuştur.

Şekil 4.21'de gösterilen noktalar için yapılan, ABG içinden yakalanan CO₂'nin ve ABG soğutma için kullanılan CO₂'nin, basınç ve sıcaklık değişimlerinin, hacmi ve fazı üzerindeki etkileri, İdeal Gaz Yasası denklemi ($PV = nRT$) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 4.3'te gösterilmiştir.

Tablo 4.3'te;

1, 2, 3, 4-a, 4-b, 6, 7 no.lu hesaplama sonuçları, sadece ABG içinde bulunan 54,88 kg/s debiye sahip CO₂'ye ait sonuçlardır. Burada soğutma için kullanılacak olan CO₂ miktarı hesaplamalara dahil edilmemiştir.

5-a ve 5-b no.lu sonuçlar; sadece ABG soğutma için kullanılacak CO₂'ye ait sonuçlar olup ABG içindeki CO₂ bu hesaplamalara dahil edilmemiştir.

2-b, 3-b ve 4-c no.lu sonuçlar; ABG içindeki CO₂+ ABG soğutma için kullanılan CO₂'ye ait hesaplama sonuçlarını ifade etmektedir.

95 °C ve atmosfer basıncındaki ABG içinde bulunan CO₂'nin hacmi, 37,65 m³/s (Tablo 4.3.1) iken (Şekil 4.21-1. nokta) ABG+CO₂ karışım noktasından geçerek (Şekil 4.21-2. nokta) sıcaklığının 31 °C'ye düşürülmesi sonrasında hacmi 31,10 m³/s'ye (Tablo 4.3. 2) düşmüştür. Bu noktada CO₂ gaz fazındadır.

5.1. Sıkıştırma İşleminin CO₂ Sıcaklığı Üzerine Etkisi

Kompresörden geçerek 73,97 bar basınçla sıvılaştırılmak üzere sıkıştırılan CO₂'nin (Şekil 4.21 3. nokta) sıkıştırma sebebiyle iç enerjisi ve entalpisinin önemli ölçüde artmasına bağlı olarak sıcaklığının 545 °C'ye yükseldiği görülecektir (Tablo 4.3. 3-a). Sıkıştırma işlemi sırasında gaz üzerinde yapılan iş, gazın iç enerjisine eklenmiş ve moleküllerin kinetik enerjisi artmıştır. Özellikle adyabatik sıkıştırma işlemleri söz konusu olduğunda, ısı alışverişi olmadan yapılan tüm iş gazın iç enerjisini ve dolayısıyla sıcaklığını artırır. Bu noktada yani 545 °C ve 73,97 bar basınç altındaki CO₂ süper akışkan fazdadır.

Ön bekletme tankına 545 °C ve 73,97 bar basınç altında gelen CO₂ (Şekil 4.21 4. nokta), burada bekletilerek pasif soğuma ile sıcaklığının -56,4 °C'ye düşmesi sağlanacaktır (Tablo 4.3 4-a). Bu noktadaki hesaplama ABG içindeki CO₂'ye aittir. Yani ABG soğutma için kullanılan CO₂ buradaki hacme dahil değildir.

Bu noktada (Şekil 4.21 4. Nokta) (Tablo 4.3. 4-a) yeterli soğumanın sağlanabilmesi için gerekli süre; Termodinamiğin Birinci Yasası, Enerjinin Korunumu Prensibine dayana adyabatik sıkıştırma denklemi ile hesaplanmış ve 5 dakika olarak bulunmuştur. Tankın yüzey alanı, ısı transfer kapasitesi ve çevre sıcaklığı bekleme süresine etki eden faktörlerdir. Bu süre 1000 m³ kapasiteli, h (Isı transfer katsayısı): 25 W/m²·K olarak

kabul edilen oluklu ve kanatlı, doğal soğutmalı tank için geçerlidir. Ayrıca çevre sıcaklığı 13 °C olarak kabul edilmiştir.

Ön bekletme tankında 5 dk bekleyerek sıcaklığı -56,4 °C'ye düşmesi sağlanan CO₂'nin hacminin 0,30 m³e (Tablo 4.3. 4-b) düştüğü görülecektir. Bu değer; ABG içinden yakalanarak sıvılaştırılan ve nihai bekleme tanklarına gönderilecek olan sıvı CO₂'nin saniyedeki hacmidir.

Yıllık yakalanan gaz fazındaki CO₂ hacmi (atmosfer basıncında) = 1.187.330.400 m³/yıl,

Yıllık yakalanan sıvı fazdaki CO₂ hacmi (73,97 bar basınç altında) = 9.460.800 m³/yıl'dır.

Sıkıştırma işlemi sonucunda CO₂ hacminde %99,2 oranında, yaklaşık 126 katlık bir azalma sağlanmıştır. Bu önemli hacim küçülmesi sayesinde, depolama için gerekli tank sayısı büyük ölçüde azalacak, tank çiftliği için ayrılacak alan ihtiyacı minimize edilecek ve tank maliyetlerinde ciddi tasarruflar elde edilecektir. Ayrıca, sıkıştırılmış CO₂'nin transferi daha verimli ve hızlı hale gelirken, lojistik süreçlerdeki enerji tüketimi ve operasyonel zorluklar da önemli ölçüde azaltılacaktır. Bu durum, hem maliyet etkinliği hem de operasyonel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

ABG sıcaklığının; 95 °C'den CO₂'nin sıvılaştırılabilmesi için gerekli 31°C'ye düşürülebilmesi için gerekli CO₂ kütleli debisi; Termodinamiğin Birinci Kanunu Enerjinin Korunumu Yasası kullanılarak 713,5 kg/s olarak bulunmuştur. Bu kütleli debiye sahip CO₂'nin, ABG sıcaklığını ≤ 31 °C'ye düşürebilmesi için kendi sıcaklığının -56,4 °C olması gerekmektedir.

ABG soğutma için kullanılacak 73,97 bar basınç altında ve -56,4 °C sıcaklığa sahip CO₂'nin hacmini belirlemek için (Şekil 4.21 5. nokta) yapılan hesaplamada hacim 3,95 m³ olarak bulunmuştur (Tablo 4.3 5-a). CO₂ burada sıvı fazdadır.

ABG soğutmak üzere; zamanlayıcılarla belirlenecek süre ve hacimdeki CO₂, ön bekletme tankında bulunan tek yönlü valften geçerek bir boru aracılığıyla ABG+CO₂ karışım noktasına iletilecektir (Şekil 4.21 5. nokta). Mevcut basıncı 73,97 bar olan pozitif basınçlı bu CO₂'nin iletilmesi için ayrıca pompa vb. bir sisteme ihtiyaç duyulmayacaktır. Boruya geçişi sağlanan CO₂'nin basıncı atmosfer basıncına düşecek

ve sıvı fazdayken gaz fazına geçecektir. Hacmi ise 288 m³e yükselecektir (Tablo 4.3 5-b).

Nihai bekleme tanklarına gönderilecek CO₂ (Şekil 4.21 6. nokta), sıvı fazda ve 0,30 m³ debiye sahiptir (Tablo 4.3. 4-b).

Nihai bekleme tanklarının hacimlerinin, elde edilecek 10.596.096 ton/yıl CO₂'nin, satış ve pazarlaması ya da depolanabilmesi için geçecek sürede depolanabilmesi için çok büyük kapasiteye sahip olmaları gerekecektir. Bu yüzden; piyasada hali hazırda kullanılmakta olan, 10 bar basınca dayanıklı, 60.000 m³ hacme sahip, amonyak depolama için kullanılan tanklar kullanılabilir. Bu hacimdeki tanklardan yaklaşık 295 tanesi, 3 ayda elde edilecek CO₂'yi depolamak için gerekli kapasiteyi sağlayacaktır. 73,97 bar basınçla sıvılaştırılmış ve sıcaklığı pasif soğutmayla -56,4 °C'ye düşürülmüş CO₂'nin basıncı, 10 bar olacak şekilde nihai bekleme tanklarına aktarılacaktır. Bu tanklarda bulunan basınç ölçerler, 10 bar basınca kadar CO₂ girişine izin verecek, tank kapasitesi dolduğunda, ön bekletme tankı çıkışındaki zamanlayıcılar aracılığıyla CO₂ akışının diğer tanklara yönlendirilmesi sağlanacaktır.

Nihai depolama tanklarına yönlendirilen ve 10 bar basınca düşürülen -56,4 °C sıcaklığa sahip sıvı CO₂'nin (Şekil 4.21 6. ve 7. noktalar) hacmi, 2,25 m³/s olarak bulunmuştur (Tablo 4.3- 6-7). Yani saniyede 2,25 m³ CO₂ nihai depolama tanklarına gönderilecektir.

5.2. CO₂ Salımının Ağaçlarla Bağlanması için Gerekli Ağaç Sayısı ve Orman Alanı

Termik santral bacasından yıllık olarak salınan 10.596.096 ton CO₂'nin atmosferden çekilerek bağlanması için gerekli ağaç ve orman ihtiyacı hesaplanmıştır. Bu hesaplama, karbon döngüsü, fotosentez süreçleri ve literatürde yer alan IPCC verileri doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Bir ağacın yılda ortalama 22 kilogram CO₂ depoladığı varsayımı temel alınarak, bu miktarın bağlanabilmesi için yaklaşık 481.640.727 ağacın dikilmesi gerektiği bulunmuştur.

Bu değer, tek başına KETS gibi bir termik santralden kaynaklanan yıllık karbon emisyonlarının ne denli yüksek olduğunu ve bu emisyonların doğal yollarla telafi edilmesi için gereken büyük ölçekli biyolojik kapasiteyi ortaya koymaktadır. Ayrıca, bu miktarın bağlanabilmesi için gerekli orman alanı incelenmiş ve hektar başına 10

ton CO₂ yakalama kapasitesine sahip olduğu varsayılarak, bu miktarın bağlanabilmesi için yaklaşık 1.059.610 hektar ormanlık alana ihtiyaç duyulacağı hesaplanmıştır. Türkiye'nin orman varlığı, Orman Genel Müdürlüğü'nün (OGM) 2023 yılı verilerine göre 23.245.000 hektar olarak belirlenmiştir (OGM, 2023). Bu verilere dayanarak, 1.059.610 hektarlık bir orman alanı, Türkiye'nin toplam orman varlığının yaklaşık %4,56'sına tekabül etmektedir. Bu alan, Türkiye'nin toplam yüzölçümünün yaklaşık %1,4'üne eşdeğer olup, böyle bir alanın yalnızca bu karbon emisyonunu dengelemek amacıyla tahsis edilmesinin ekolojik ve ekonomik açıdan ne denli büyük bir ölçek gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgu, yalnızca karbon yakalama teknolojilerinin gerekliliğini değil, aynı zamanda enerji üretim süreçlerinde sürdürülebilirlik hedeflerinin doğa temelli çözümlerle desteklenmesi gerektiğini de vurgulamaktadır. Özellikle, enerji sektöründen kaynaklanan emisyonların biyolojik yollarla telafi edilmesi için geniş çaplı ağaçlandırma programları ve karbon dengeleme projelerinin devreye alınmasının yanı sıra, karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin uygulanmasının elzem olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, bu veriler, termik santrallerin karbon emisyonlarının yalnızca doğal yöntemlerle telafi edilmesinin büyük ölçekli zorluklarını açıkça göstermekte ve iklim değişikliğiyle mücadelede daha teknolojik ve entegre yaklaşımlara duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır.

5.3. Kullanılan Kompresörün Enerji İhtiyacı

CO₂ sıkıştırma ve sıvılaştırma için kullanılacak kompresörün %95 verimle çalıştığı kabulüyle kompresör için gerekli elektrik enerjisi, Termodinamiğin Birinci Yasası (Enerji Korunumu Yasası) esas alınarak türetilen izotermal sıkıştırma denklemi kullanılarak hesaplanmıştır (Denklem 12). Bu hesaplama, izotermal koşullarda bir kompresörün CO₂'yi sıkıştırırken harcadığı enerji miktarını belirlemek için yapılmış olup, sistemin enerji tüketimi ve verimliliğini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır.

Tablo 5.1. Kompresör enerji ihtiyacı

Gaz İçeriği	Gaz Debisi (kg/s)	Reynolds Sabiti (J/kg·K)	Kompresör İçin Gerekli Enerji İhtiyacı (MW)	Cooler İçin Gerekli Enerji İhtiyacı	Kompresör+Cooler için Gerekli Enerji İhtiyacı
ABG içindeki CO ₂	54,88	188,9	14	3,5	17,5
ABG içindeki CO ₂ +Soğutma için kullanılan CO ₂	805,66	188,9	208,9	52,3	261,125
ABG içindeki CO ₂ +Soğutma için kullanılan CO ₂ +ABG içindeki N ₂	1031,65	216,44	306,6	76,65	383,25
ABG içindeki CO ₂ +ABG içindeki N ₂	318,15	278,19	115,44	28,86	144,3

Tablo 5.1, kompresöre giren gaz içeriğinin farklı kombinasyonlarının enerji ihtiyacını nasıl etkilediğini göstermektedir. Bu analiz, sıkıştırma işlemi sırasında karışımdaki gaz türlerinin, gaz debisinin ve gaz sabitinin enerji tüketimi üzerindeki etkisini anlamak açısından önemlidir.

5.4. ABG İçindeki CO₂'nin Sıkıştırılması

Bu durumda yalnızca ABG'deki CO₂ sıkıştırılmaktadır. CO₂'nin gaz sabiti ($R = 188,9$ J/kg·K) ve kütleli debisinin (54,88 kg/s) düşük olması, enerji ihtiyacını azaltmaktadır. Bu kombinasyon, diğer durumlara kıyasla en düşük enerji gereksinimine sahiptir ve izotermal sıkıştırma için yalnızca 14 MW enerji ihtiyacı hesaplanmıştır.

Cooler birimleri, sıkıştırma işlemi sırasında açığa çıkan ısıyı gidermek için kullanılır. Bu durumda sıkıştırılan gazın debisinin düşük olması (54,88 kg/s), cooler enerji ihtiyacını da düşük tutmaktadır. Sadece 3,5 MW enerji ihtiyacı hesaplanmış ve toplam enerji tüketimine etkisi sınırlı olmuştur.

5.5. ABG İçindeki CO₂ ve Soğutma için Kullanılan CO₂ 'nin Sıkıştırılması

Bu durumda hem ABG içindeki CO₂ hem de baca gazının soğutulması için kullanılan CO₂ sıkıştırılmaktadır. Toplam kütleli debi (805,66 kg/s) ciddi ölçüde artmış, bu da sıkıştırma için gereken enerji miktarını önemli ölçüde yükseltmiştir. Enerji ihtiyacı, bir önceki duruma kıyasla yaklaşık **15 kat artışla** 208,9 MW olarak hesaplanmıştır. Soğutma amacıyla kullanılan CO₂'nin yüksek debisi, enerji ihtiyacını artıran en önemli etkidir.

Cooler enerji ihtiyacı, sıkıştırılan gaz debisinin artmasıyla birlikte 52,3 MW'a yükselmiştir. Soğutma için kullanılan CO₂'nin eklenmesiyle, sıkıştırma işlemi sırasında oluşan sıcaklık daha fazla enerji tüketimine neden olmuştur. Cooler birimlerinin enerji ihtiyacındaki bu artış, sıkıştırılan toplam gaz miktarının ve termodinamik koşulların önemini vurgulamaktadır.

5.6. ABG İçindeki CO₂ , Soğutma İçin Kullanılan CO₂ ve ABG İçindeki N₂ 'nin Sıkıştırılması

Bu durumda, soğutma için kullanılan CO₂ ve ABG içindeki N₂ da sıkıştırma işlemi kapsamına alınmıştır. N₂'nin özgül gaz sabiti ($R = 296,8 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$), CO₂ ($188,9 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$)'den daha yüksektir. N₂'nin toplam karışıma dahil edilmesi, gaz karışımının toplam gaz sabitini (R) artırmış ve sıkıştırma sırasında enerji ihtiyacının artmasına yol açmıştır. Ayrıca, toplam gaz debisinin 1031,65 kg/s'ye ulaşması, enerji ihtiyacını daha da artırarak 306,6 MW gibi en yüksek değere çıkmasına neden olmuştur.

Bu durumda cooler enerji ihtiyacı, karışımındaki toplam debi artışı (1031,65 kg/s) ve gaz sabitindeki değişikliklerle birlikte en yüksek seviyeye ulaşmıştır (76,65 MW). N₂'nin yüksek özgül gaz sabiti ve sıkıştırma sonrası sıcaklık artışı, cooler birimlerinin enerji tüketimini önemli ölçüde artırmıştır. Bu durum, büyük hacimli gaz karışımlarının soğutulmasında enerji tüketiminin dikkatlice değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

5.7. ABG İçindeki CO₂ ve ABG İçindeki N₂'nin Sıkıştırılması

Bu durumda, yalnızca ABG içindeki CO₂ ve N₂ sıkıştırılmaktadır. Soğutma için kullanılan ek CO₂'nin çıkarılması, toplam gaz debisinin 318,15 kg/s'ye düşmesini sağlamıştır. Enerji ihtiyacı, azalan debi nedeniyle önceki duruma göre önemli ölçüde

azalmış ve 115,44 MW olarak hesaplanmıştır. Ancak, N_2 'nin yüksek gaz sabiti ($R = 296,8 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$), enerji ihtiyacını ABG'de yalnızca CO_2 'nin bulunduğu ilk duruma kıyasla artırmıştır.

Soğutma için kullanılan ek CO_2 'nin çıkarılması, cooler enerji ihtiyacını azaltmış ve 28,86 MW seviyesine düşürmüştür. Bununla birlikte, N_2 'nin yüksek özgül gaz sabiti nedeniyle sıkıştırma sırasında oluşan sıcaklık artışı, cooler birimlerinin tamamen düşük enerji tüketiminde çalışmasını engellemiştir. Yine de, azalan toplam debi nedeniyle cooler enerji ihtiyacında genel bir düşüş gözlemlenmiştir.

5.8. Su Buharının Ayrıştırılması, Depolanması ve Yeniden Kullanımı

Soğuk ortamda basınç altında sıvılaştırma sistemlerindeki diğer bir gereklilik ise ABG içinde bulunan su buharının ayrıştırılmasıdır. Su buharı, N_2 ve CO_2 'nin karışımından ayrıştırılmaması durumunda; kompresör, valf ve transfer boruları üzerinde çeşitli olumsuz etkilere neden olabilir. Kompresörlerde, su buharı yoğunlaşarak metal yüzeylerde korozyona yol açar ve bu durum karbonik asit oluşumu ile birleştiğinde aşınmayı hızlandırmaktadır. Ayrıca, yoğunlaşan su, kompresör kanatlarında sıvı birikimine neden olarak aerodinamik verimi düşürür ve sıkıştırma işlemini zorlaştırmaktadır. Valflerde, su buharının yoğunlaşması sızdırmazlık problemlerine ve mekanik aşınmaya sebep olabilirken, karbonik asit oluşumu valf yüzeylerinin kimyasal olarak aşınmasına yol açmaktadır. Transfer borularında ise su buharı, yoğunlaşarak boru çapını daraltabilir ve bu durum hem basınç kayıplarına hem de sistem performansında düşüşe neden olabilir. Aynı zamanda yoğunlaşan suyun boruların iç yüzeyinde korozyona neden olması, boruların dayanıklılığını azaltır ve tıkanmalara yol açabilir. Bu etkiler, sıkıştırma sisteminin enerji tüketimini artırırken, bakım ve onarım maliyetlerini de yükseltmektedir. Bu tür sorunların önüne geçebilmek için su buharının sisteme girmeden önce ayrıştırılması zorunludur.

Konvansiyonel sistemlerde bu ayırma işlemi için bir yoğuşturucuya ve soğutucu akışkanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada baca gazı soğutma için kullanılan CO_2 ile buhar yoğuşurma işleminin de gerçekleştirilebileceği görülmüştür. Baca gazından yoğuşturularak ayrıştırılan su yeniden kullanım için depolanacaktır.

ABG içindeki su buharının hacimsel ve kütleli debileri sırasıyla $36 \text{ m}^3/\text{s}$ ve $13,28 \text{ kg/s}$ olarak hesaplanmıştır. Enerjinin Korunumu Kanununa göre su buharından elde

edilecek suyun kütleli debisi de 13,28 kg/s olacaktır. Bir yılda sistemden yakalanacak su miktarı 418.798,080 ton/yıl olacaktır. Bu su, yine baca gazından yakalanan, çimento sanayi vb. endüstriye ürün olarak sunulacak uçucu külün ısılatılmasında kullanılacaktır.

5.9. Uçucu Kül

Baca gazında %2 oranında bulunan uçucu külün hacimsel ve kütleli debileri sırasıyla; 8 m³/s ve 9,6 kg/s'dir. Yıllık elde edilecek uçucu kül miktarı 302.745,600 ton olarak hesaplanmıştır. IPCC'ye göre, taş kömürünün kül oranı genellikle %20-30 arasında değişir ve 1 ton taş kömürünün yakılmasıyla 200-400 kg uçucu kül oluşur. Enerji Bakanlığı ise 1 kWh enerji üretimi başına yaklaşık 150-250 gram kül üretildiğini belirtmektedir. Bu verilere göre, 2000 GWh (2 milyar kWh) enerji üretimi için beklenen uçucu kül miktarı yaklaşık olarak 300.000-500.000 ton/yıl arasında hesaplanabilir. Santralde elde edilen 302.745,600 ton/yıl kül miktarı, bu tahminlerin alt sınırına yakın bir değerdedir. Sonuç olarak, belirtilen kül miktarı IPCC ve Enerji Bakanlığı'nın verileriyle genel olarak uyumludur.

5.10. Çürük Buharın Yoğuşturulması

Çalışmanın ikinci kısmında, termik santrallerde türbinlerden geçen su buharının yoğuşturulması için CO₂ kullanımı değerlendirilmiştir. Günümüz termik santrallerinde çürük buharın yoğuşturulması işlemi, büyük ölçüde deniz, göl veya akarsulardan sağlanan suyun soğutucu akışkan olarak kullanılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Ancak, bu süreçte kullanılan su miktarı oldukça yüksek olup, kıt su kaynaklarının tüketilmesine ve sucul ekosistemlerde termal kirliliğe yol açmaktadır. Bu çalışmada, bu olumsuz etkilerin önüne geçebilmek amacıyla soğutucu akışkan olarak su yerine CO₂'nin kullanılması önerilmektedir.

KETS'te çürük buhar yoğuşturmak için deniz suyu kullanılması durumunda, ihtiyaç duyulacak deniz suyu miktarı Termodinamiğin birinci kanunu olan Enerjinin Korunumu Kanunu denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Çürük buhar debisi 330 ton/h olan KETS'te çürük buharın yoğuşturulabilmesi için yıllık 1.823.231.064 ton/yıl deniz suyuna ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir. Bu suyun %5'lik kısmı, yaklaşık 91.161.553,2 ton su, buharlaşarak atmosfere verilmektedir. Geri kalan %95'lik kısmı ise 1.732.069.510,8 tonluk miktarla, sıcaklığı artmış halde denize deşarj edilmektedir.

Atmosfere salınan buhar, bölgesel nem dengesi ve iklim üzerinde doğrudan etkiler yaratabilmektedir. Buharlaşıma, atmosferdeki nem oranını artırarak yerel iklim koşullarında değişimlere yol açabilir; bu durum, özellikle yağış rejimlerinde değişiklik ve bölgesel sıcaklıkların artışı gibi etkilerle kendini gösterebilir.

Diğer yandan, denize deşarj edilen sıcak suyun sebep olduğu termal kirlilik, sucul canlıların yaşam koşullarında bozulmaya yol açar. Sıcak su, çözülmüş oksijen seviyelerini düşürerek balık ve diğer sucul organizmalar için elverişli ortamları yok etmektedir. Balık popülasyonlarının azalması, ekosistemin besin zincirindeki dengesini bozmaktadır. Ayrıca, su sıcaklığının artışı, bazı mikroorganizmalar ve bitkiler için hızlandırıcı bir etkiye sebep olmaktadır. Bu durum, alg patlamaları gibi istenmeyen olayların sıklığını artırmaktadır. Alg patlamaları, su kalitesini düşürerek ekosistemin biyolojik çeşitliliğini tehdit etmekte ve bazı durumlarda toksik etkilere sebep olarak diğer sucul organizmalar için ölümcül hale gelebilmektedir. Sonuç olarak, atmosfere buharlaşan suyun iklimsel etkileri ve termal kirlilik yoluyla sucul ekosistemlere verilen zararlar, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bu etkilerin azaltılması hem ekosistemlerin korunması hem de doğal kaynakların sürdürülebilir yönetimi açısından kritik öneme sahiptir.

Çalışmada, deniz suyu yerine CO₂ kullanılması durumunda ihtiyaç duyulan CO₂ miktarı da hesaplanmıştır. Çürük buharın yoğunlaştırılması için gerekli CO₂ kütledebisi 7.823,8 kg/s olarak belirlenmiştir. Bu değer saatlik olarak 28.165,7 ton CO₂'ye denk gelmektedir. CO₂'nin kapalı devre olarak kullanılacağı bu sistemde, yoğunlaştırma işlemi sırasında kullanılan CO₂, sürekli bir döngü içinde yer alacak ve nihai depolama tanklarından temin edilecektir. Nihai depolama tanklarında 10 bar basınç ve -56,4 °C sıcaklıkta bulunan CO₂'nin sıcaklığı, pasif soğutma yoluyla düşürülerek sisteme yeniden entegre edilecektir.

Mevcut çürük buhar yoğunlaştırma boyleri modifiye edilerek CO₂ kullanımına uygun hale getirilerek yeniden bir yatırım gerekmeksizin CO₂ ile yoğunlaşturmaya geçilecektir.

5.11. CO₂ Kullanımının Avantajları ve Üstünlükleri

Bu çalışmada tasarlanarak önerilen sistem, soğutucu akışkan olarak deniz suyu yerine CO₂'nin kullanılmasını içermektedir. CO₂'nin kullanımı, geleneksel yöntemlere kıyasla birçok avantaj sunmaktadır:

- **Su kaynaklarının korunması:** Deniz suyu yerine CO₂'nin kullanılması, büyük miktarda suyun termik santrallerde tüketilmesini önler. Bu durum hem su kaynaklarının korunmasına hem de su kullanımına bağlı çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlar.
- **Kapalı devre döngüsü:** CO₂, yoğuşurma sisteminde kapalı devre olarak kullanılacağından, sürekli bir döngü içinde işlem görecektir. Bu, ek bir CO₂ tüketimi gerektirmez ve sistemin sürdürülebilirliğini artırır.
- **Termal kirliliğin azaltılması:** Deniz suyu kullanımında görülen termal kirlilik, CO₂'nin kapalı devre kullanımında tamamen ortadan kalkar. Böylece, çevresel etkiler en aza indirilir ve sucul ekosistemlerin korunmasına katkıda bulunulur.
- **Daha az yatırım gereksinimi:** Mevcut su yoğuşurma sistemleri, CO₂ kullanımı için kolaylıkla modifiye edilebilecek durumdadır. Yeni bir soğutma sistemi yatırımına gerek duyulmaksızın mevcut boylerler üzerinde yapılacak değişiklikler ile sisteme entegrasyon sağlanabilir.
- **Düşük enerji tüketimi:** CO₂, yoğuşurma işlemi sırasında pasif soğutma tankları ile doğal yollardan soğutulacağından, ek bir enerji maliyeti yaratmaz. Ayrıca, -56,4 °C sıcaklıkta ve 10 bar basınçta depolanan CO₂'nin bu işlemdeki sabit basınç özelliği, sistemin enerji verimliliğini artırır.
- **Ekonomik ve çevresel fayda:** Deniz suyu temini ve deşarj işlemlerine kıyasla CO₂'nin kullanımı, operasyonel maliyetleri düşürür. Ayrıca, bu süreçte elde edilen yoğuşturulmuş suyun, uçucu külün ıslatılmasında veya diğer süreçlerde kullanılması, su tasarrufuna katkıda bulunur.
- **Çürük buharın daha etkin yoğuşturulması:** CO₂'nin termodinamik özellikleri, çürük buharın daha etkin bir şekilde yoğuşturulmasına olanak sağlamakta, sistem verimliliğini artırırken daha kısa işlem süreleri sunmaktadır.

Yapılan hesaplamalar, çürük buharın yoğuşturulması için saatte 28.165,7 ton CO₂'ye ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. CO₂'nin kapalı devre olarak kullanılması sayesinde bu miktar sürekli olarak geri kazanılacaktır. Deniz suyu kullanımında

görülen yüksek tüketim ve termal kirliliğin, CO₂ kullanımı ile tamamen ortadan kaldırılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Sonuç olarak, CO₂'nin çürük buhar yoğunlaştırma sistemlerinde soğutucu akışkan olarak kullanılması, sadece su kaynaklarının korunması ve çevresel etkilerin azaltılması ile sınırlı kalmayıp, aynı zamanda sistemin enerji verimliliğini artıran, ekonomik ve sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır. Bu yaklaşım, gelecekte termik santral teknolojilerinde önemli bir değişim yaratma potansiyeline sahiptir.

5.12. Yakalanan CO₂'nin Tasarlanan Sistemde Kullanımı

Yakalanan CO₂'nin yeniden kullanım alanları arasında, bu tez kapsamında tasarlanan sistemdeki uygulamalar ön plana çıkmaktadır. İlk kullanım alanı, termik santral baca gazlarının soğutulmasında CO₂'nin soğutucu akışkan olarak değerlendirilmesidir. Bacadan yakalanan CO₂, soğutma sistemi içerisinde yeniden kullanılarak hem çevresel fayda sağlamakta hem de baca gazı sıcaklığının düşürülmesine katkı sunmaktadır. Bu yöntem, termik santrallerde karbon yönetimi ve enerji verimliliği açısından yenilikçi bir çözüm sunmaktadır.

Yakalanan CO₂'nin ikinci kullanım alanı ise, buhar türbinlerinin döndürülmesi sonrası çürük buhar haline gelen, nispeten düşük basınç (2 bar) ve nispeten düşük sıcaklıktaki (50°C) buharın yoğunlaştırılmasıdır. Çürük buharın yoğunlaştırılmasında CO₂'nin soğutucu akışkan olarak kullanılması, mevcut sistemlerde yaygın olarak kullanılan su bazlı soğutma sistemlerine çevresel açıdan bir alternatif sunmaktadır. CO₂'nin bu süreçte soğutucu akışkan olarak değerlendirilmesi hem enerji tasarrufu hem de karbon yönetimi hedefleri doğrultusunda katkı sağlamaktadır. Bu uygulama, karbon emisyonlarının azaltılması ve endüstriyel süreçlerde atık CO₂'nin faydalı bir şekilde yeniden kullanılması açısından sürdürülebilir bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

Sisteme giriş yapacak baca gazı, mevcut arıtma teknolojileri kullanılarak uçucu kül, NO_x, SO_x ve diğer zararlı kirleticilerden arındırılacaktır. Bu işlem sonrasında elde edilen arıtılmış baca gazı, su buharı, N₂ ve CO₂ bileşenlerini içeren bir yapı kazanacaktır.

Arıtılmış baca gazının karakteristik özellikleri, sistem tasarımı ve analiz süreçlerinde temel veri olarak ele alınmıştır. Bu bağlamda, sıkıştırma öncesinde baca gazının

soğutulması için gerekli CO₂ miktarının belirlenmesinde 400 m³/s debiye sahip ABG karakteristikleri referans alınmıştır (Tablo 4.1). Bu yaklaşım, sistemde kullanılacak soğutma ve sıkıştırma süreçlerinin optimize edilmesi için temel oluşturarak hem enerji verimliliğini artırmak hem de karbon yönetimini desteklemek adına önemli bir adım sunmaktadır.

5.13. Mevcut Sistem ve Tasarlanan Sistemin Maliyet Kıyaslaması

Tablo 5.2. Mevcut Sistemin Maliyetleri

Maliyet Kalemi	Toplam Maliyet (USD)
Soğutma Kulesi İlk Yatırım Maliyeti	31.224.672
Soğutma Suyu Transfer Sistemi Pompa Yatırım Maliyeti	21.800.000
Karbon Emisyonlarına Ait Yıllık Mali Yükümlülükler	806.170.567,93
TOPLAM MALİYET	874.195.239,93

Tablo 5.3. Tasarlanan Sistemin Maliyetleri

Maliyet Kalemi	Toplam Maliyet (USD)
ABG Toplama Haznesi Yatırım Maliyeti	752.000
ABG Su Toplama, Tahliye, Depolama Sistemi Yatırım Maliyeti	415.000
CO ₂ Sıkıştırma, Sıvılaştırma, Depolama Sistemi Kompresör Maliyeti	50.000
CO ₂ Sıkıştırma, Sıvılaştırma, Depolama Sistemi Zamanlayıcı ve Çek Valf Maliyeti	5.000
CO ₂ Sıkıştırma, Sıvılaştırma, Depolama Sistemi Boru Maliyeti	76.000
CO ₂ Sıkıştırma, Sıvılaştırma, Depolama Sistemi Ön Bekletme Tank Maliyeti (6 adet)	330.000
CO ₂ Sıkıştırma, Sıvılaştırma, Depolama Sistemi Nihai Depolama Tank Maliyeti (18 adet)	25.200.000
TOPLAM MALİYET	26.828.000

Endüstriyel tesislerde enerji verimliliği ve karbon emisyonlarının azaltılması, sürdürülebilir üretim süreçleri için kritik öneme sahiptir. Mevcut sistem (Tablo 5.2) ile

tasarlanan sistemin (Tablo 5.3) maliyet analizleri, ilk yatırım ve yıllık maliyetler açısından aşağıdaki gibi karşılaştırılmıştır:

Karşılaştırmalı Analiz:

- **İlk Yatırım Maliyeti:** Mevcut sistemin ilk yatırım maliyeti **53.024.672 USD** iken, tasarlanan sisteminki **26.828.000 USD**'dir. Bu, tasarlanan sistemin ilk yatırım maliyetinin yaklaşık %49 daha düşük olduğunu göstermektedir.
- **Yıllık Karbon Emisyon Maliyeti:** Mevcut sistem, yıllık **806.170.567,93 USD** karbon emisyon maliyetine sahiptir. Tasarlanan sistemde ise karbon emisyonu sıfırlandığı için bu maliyet tamamen ortadan kalkmaktadır.
- **Toplam Maliyet:** Mevcut sistemin toplam maliyeti **859.195.239,93 USD** iken, tasarlanan sisteminki **26.828.000 USD**'dir. Bu, tasarlanan sistemin toplam maliyetinin mevcut sisteme göre yaklaşık **%96,88** daha düşük olduğunu göstermektedir.

Amortisman Süresi:

Tasarlanan sistemin yatırım maliyeti, mevcut sistemin yıllık karbon emisyon maliyetinin sadece %3'üne denk gelmektedir. Bu durumda, tasarlanan sistemin kendini amorti etme süresi şu şekilde hesaplanabilir:

Amortisman Süresi = Tasarlanan Sistem Yatırım Maliyeti / Mevcut Sistemdeki Yıllık Tasarruf

Amortisman Süresi = 26.828.000 USD / (859.195.239,93 USD - 26.828.000 USD)
≈0,0322 yıl (yaklaşık 11,8 gün)

Bu hesaplama, tasarlanan sistemin kendini yaklaşık **11,8 gün** içinde amorti edebileceğini göstermektedir. Ancak, bu hesaplama yalnızca **ilk yatırım maliyetleri ve karbon emisyon ücretlerini** içermektedir; sistemin işletme, bakım ve onarım maliyetleri bu değerlendirmeye dahil edilmemiştir. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında, sisteme membran teknolojisinin entegre edilmesi ve ABG soğutma ile ABG su buharı yoğunlaştırma sistemlerine yönelik yeni tasarımların geliştirilmesi planlanmaktadır. Bu düzenlemeler, sistemin toplam maliyet analizinde değişikliklere yol açabileceğinden, nihai ekonomik değerlendirmede güncellenmiş maliyet unsurlarının dikkate alınması gerekecektir.

Çevresel Etki:

Mevcut sistem, yılda 10.596.096 ton CO₂ emisyonuna neden olmaktadır. Tasarlanan sistemde ise CO₂ emisyonu tamamen ortadan kaldırılmaktadır.

Sonuç olarak, tasarlanan sistem hem ekonomik hem de çevresel açıdan mevcut sisteme kıyasla önemli üstünlükler sunmaktadır. Daha düşük yatırım maliyeti, kısa amortisman süresi ve sıfır karbon emisyonu sayesinde sürdürülebilirlik hedeflerine doğrudan katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, sistemin hızlı amortisman süresi yalnızca yatırımın geri dönüş süresini kısaltmakla kalmayıp, aynı zamanda uzun vadede enerji sektöründe sürdürülebilir ve ekonomik olarak uygulanabilir bir model oluşturma potansiyeli taşımaktadır.



6. TARTIŞMA

Tartışma bölümünde, tasarlanan sistemin mevcut CO₂ yakalama teknolojileri ile enerji verimliliği, maliyet etkinliği, çevresel sürdürülebilirlik ve operasyonel basitlik açısından karşılaştırılması ele alınmaktadır. Tasarlanan sistemin inovatif katkıları ve geleneksel yöntemlere kıyasla sunduğu avantajlar, mevcut literatür ve teknolojik yaklaşımlar çerçevesinde analiz edilmiştir. Ayrıca, bu sistemin karbon yönetimi süreçlerine olası etkileri değerlendirilerek, enerji ve çevre alanlarında sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkıları tartışılmıştır.

6.1. Linde-Hampson ve Feng Chen - Tatiana Morosuk Sistemlerinin Entegrasyonu ile Baca Gazından CO₂ Yakalama ve Sıvılaştırma: Yenilikçi Bir Yaklaşım

Linde-Hampson sistemi ile Feng Chen ve Tatiana Morosuk tarafından geliştirilen sistemler, CO₂'nin soğuk ortamda basınç altında sıvılaştırılması amacıyla optimize edilmiş ileri termodinamik süreçlere dayanmaktadır. Bu sistemler, genellikle kriyojenik süreçlerde gazların ayrıştırılması ve sıvılaştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak mevcut literatür taramalarında, bu sistemlerin termik santral baca gazlarından CO₂ yakalamak amacıyla doğrudan uygulandığına dair spesifik bir çalışma bulunmamaktadır. Bu durum, söz konusu sistemlerin baca gazı uygulamalarında kullanılabilirliğinin araştırılmasını oldukça değerli kılmaktadır.

Bu çalışmada, termik santral baca gazında bulunan CO₂'nin yüksek verimlilikle yakalanması ve sıvılaştırılarak depolanması için Linde-Hampson sisteminin temel prensipleri ile Feng Chen ve Tatiana Morosuk sistemlerinin yenilikçi tasarım özelliklerinin entegrasyonu değerlendirilmiştir. Amaç, mevcut yöntemlerin enerji tüketimi ve maliyet dezavantajlarını ortadan kaldırırken, endüstriyel ölçekte uygulanabilir ve sürdürülebilir bir çözüm sunmaktır. Bu sistemlerin baca gazına uygulanabilirliği, CO₂'nin fiziksel özelliklerinden faydalanılarak optimize edilmiş bir soğutma ve sıvılaştırma süreciyle ele alınmıştır.

Tasarlanan sistemde, CO₂'nin baca gazından yüksek saflıkta yakalanmasını ve sıvı fazda depolanmasını sağlayan bu entegre yaklaşım, enerji yoğunluğunu azaltma,

maliyet etkinliği sağlama ve çevresel sürdürülebilirlik gibi temel kriterler doğrultusunda tasarlanmıştır. Özellikle CO₂'nin fiziksel özelliklerinden faydalanarak gerçekleştirilen soğutma süreci, kimyasal çözücü kullanımına olan bağımlılığı ortadan kaldırmakta ve böylece sistemin çevresel etkilerini önemli ölçüde azaltmaktadır.

Bu entegre yaklaşım, termik santral baca gazlarından CO₂ yakalama ve sıvılaştırma teknolojilerinde yeni bir paradigma oluşturma potansiyeline sahiptir. Linde-Hampson ve Feng Chen- Tatiana Morosuk sistemlerinin baca gazı uygulamalarında kullanılabilirliğini araştırmak ve bu sistemleri entegre bir şekilde tasarlamak, mevcut karbon yönetimi teknolojilerine kıyasla çok daha verimli ve ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Bu çalışma, termik santral baca gazlarından CO₂'nin yenilikçi bir yöntemle yakalanması ve depolanması için geliştirilen bu sistemin sektörde geniş bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, Linde-Hampson ve Feng Chen - Tatiana Morosuk sistemlerinin tasarlanan sistemle entegrasyonu, karbon yakalama ve depolama süreçlerinde yüksek performanslı, yenilikçi bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu yaklaşım, hem akademik araştırmalar hem de endüstriyel uygulamalar için değerli bir katkı sağlayarak, karbon yönetimi teknolojilerinde sürdürülebilir bir dönüşüm sunmaktadır.

6.2. Tasarlanan Sistem ve Diğer Soğuk Ortamda Basınç Altında CO₂ Sıkıştırma ve Sıvılaştırma Sistemlerin Kıyaslaması

Tasarlanan sistemin etkinliğini değerlendirmek ve avantajlarını ortaya koymak amacıyla, diğer soğuk ortamda basınç altında CO₂ sıkıştırma ve sıvılaştırma sistemleri ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu bölümde, yaygın olarak kullanılan sistemlerin temel prensipleri, enerji verimliliği, çevresel etkileri ve operasyonel maliyetleri ele alınarak, tasarlanan sistem ile aralarındaki farklılıklar detaylı bir şekilde incelenmiştir.

a) Linde-Hampson Sistemi

Linde-Hampson sistemi, gazların sıvılaştırılmasında yaygın olarak kullanılan bir termodinamik süreçtir. Sistem, gazın kompresörler ile sıkıştırılması, ardından ısı değiştiriciler kullanılarak soğutulması ve genleşme işlemi ile sıvı hale getirilmesi prensibine dayanmaktadır. Linde-Hampson sisteminde, sıkıştırma sonrası oluşan sıcaklık artışı, genellikle karşı akımlı ısı değiştiriciler aracılığıyla düşürülmektedir. Bu

süreçte harici bir soğutucu akışkan (örneğin, azot) kullanılmaksızın, sıkıştırılan gazın kendisi geri dönüşümlü bir şekilde soğutma sağlayabilmektedir.

Öte yandan, Feng Chen ve Tatiana Morosuk tarafından önerilen sistemde, CO₂'nin sıvılaştırılması sırasında sıcaklık kontrolünü sağlamak için çok kademeli soğutma süreçleri ve harici soğutucu akışkanlar kullanılmaktadır. Bu sistemde, sıkıştırma sonrası CO₂'nin sıcaklığının düşürülmesi için ek soğutucu birimler (cooler) devreye girmekte ve toplam enerji tüketiminin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Coolerlerin enerji tüketimi, sıkıştırma sırasında gazın sıcaklığında meydana gelen artışı gidermek için harcanmakta olup, soğutma süreçlerinin verimliliği doğrudan sistemin enerji ihtiyacını belirlemektedir. Bu bağlamda, sıkıştırma sonrası CO₂'nin faz değişim sıcaklığına ulaşmasını sağlamak için kullanılan soğutucular, genellikle sıkıştırma sürecinin toplam enerji ihtiyacının %20-30'unu oluşturmaktadır (IPCC, 2005)

Linde-Hampson sistemi ile tasarlanan sistem kıyaslaması ve tasarlanan sisteminin üstünlükleri

Linde-Hampson sistemi: Gazların sıvılaştırılması sürecinde yaygın olarak kullanılan termodinamik bir süreçtir. Sistem, gazın yüksek basınç altında sıkıştırılması, ardından ısı değiştirici kullanılarak sıcaklığının düşürülmesi ve nihayet genleşme ile sıvı hale getirilmesi prensibine dayanır (Yılmaz, 2019). Özellikle CO₂'nin sıvılaştırılması için kullanılan bu sistemde, sıkıştırma sonrası sıcaklık artışını gidermek amacıyla karşı akımlı ısı değiştiriciler bulunmaktadır (Luo et al., 2020). Bu sistemde, harici cooler birimleri kullanılmaz; soğutma işlemi, genellikle pasif olarak ısı değişim prensipleriyle gerçekleştirilir.

Linde-Hampson sisteminin çeşitli dezavantajları bulunmaktadır. Bu sistem, yüksek enerji tüketimi gerektirmesi nedeniyle enerji verimliliği açısından sınırlamalar taşımaktadır. Ayrıca, yüksek basınç ve sıcaklık seviyelerinde çalışan sistemin verimliliği, genleşme sırasında oluşan enerji kayıpları nedeniyle sınırlıdır. Bunun yanı sıra, enerji yoğunluğu dolayısıyla dolaylı karbon salımı artabilir.

Tasarlanan sistem: CO₂'nin sıvılaştırılmasında pasif soğutma yöntemine dayalı yenilikçi bir çözüm sunar. Mevcut baca gazı içindeki CO₂'nin kendisi bir soğutucu olarak kullanılarak soğutma ve sıvılaştırma işlemleri gerçekleştirilir. Soğutma işlemleri sırasında doğal soğutmalı, kanatlı ve oluklu tanklar kullanılır. Bu sayede,

tasarlanan sistemde de sıkıştırma sonrası sıcaklık düşüşü için harici cooler sistemlerine gerek duyulmaz. Tasarlanan sistemin işleyiş prensibi:

- **-56,4 °C sıcaklığa sahip CO₂**, doğrudan baca gazı akışına eklenerek baca gazının sıcaklığı ≤ 31 °C'ye düşürülür.
- Bu süreçte baca gazındaki su buharı yoğunlaşır ve sıvı faza geçer. Yoğuşan su, bir su haznesinde toplanarak depolanır.
- Sıkıştırılan CO₂, basınca dayanıklı doğal soğutmalı tanklarda pasif olarak bekletilerek faz değişimi tamamlanır.

b) Enerji tüketimi ve verimlilik

- **Linde-Hampson Sistemi:** Bu sistem, sıkıştırma ve soğutma işlemleri için yüksek miktarda enerji tüketmektedir. Karşı akımlı ısı değiştiriciler kullanılarak sıkıştırma sonrası gaz soğutulsa da, genleşme sırasında oluşan irreversibiliteler sistemin enerji verimliliğini sınırlamaktadır. Örneğin, 768.38 kg/s CO₂ debisi için sıkıştırma işlemi 241 MW enerji gerektirir (Luo et al., 2020). Ancak, genleşme sırasında kaybedilen enerji ve yüksek basınçlı çalışma koşulları nedeniyle sistemin termodinamik performansı düşük kalmaktadır.
- **Tasarlanan Sistem:** Tasarlanan sistem, enerji tüketimini minimize edecek şekilde optimize edilmiştir. Bu sistem, CO₂'nin kendisini soğutucu olarak kullanarak ek enerji ihtiyacını azaltır ve basınca dayanıklı doğal soğutmalı tanklar ile süreçteki ısı kayıplarını minimum seviyede tutar. Ayrıca, genleşme işlemleri sırasında başlangıç koşullarının daha verimli yönetilmesi sayesinde, enerji tüketimi önemli ölçüde azaltılmış ve termodinamik verimlilik artırılmıştır.

c) Maliyet ve teknolojik gereklilikler

- **Linde-Hampson Sistemi:** Tek kademeli tasarımı nedeniyle daha düşük kurulum maliyetlerine sahiptir; ancak enerji verimliliğinin düşük olması, işletme maliyetlerini artırır. Isı değiştirici verimliliği, sistem performansını etkileyen önemli bir faktördür (DOE/NETL, 2007).
- **Tasarlanan Sistem:** Tasarlanan sistem, basit bir yapıya sahiptir. Yüksek basınca dayanıklı doğal soğutmalı tanklar, hem kurulum hem de işletim

maliyetlerini düşürür. Cooler ve harici soğutucu akışkan ihtiyacının ortadan kaldırılması, teknolojik gereksinimleri sadeleştirir ve maliyet avantajı sağlar.

d) Çevresel etki

- **Linde-Hampson Sistemi:** Bu sistem, enerji yoğunluğu nedeniyle dolaylı olarak daha fazla fosil yakıt tüketimine ve karbon salınımına neden olabilir (Luo et al., 2020). Kullanılan enerji kaynaklarının çevresel etkisi, sistem performansı ile doğrudan ilişkilidir.
- **Tasarlanan Sistem:** Bu sistemde, soğutucu olarak termik santralin baca gazından yakalanan CO₂ kullanılır. Bu durum, çevresel etkileri en aza indirir. Ayrıca, yoğunlaşan suyun yeniden kullanımı, çevresel faydaları artırarak uçucu kül ıslatma gibi süreçlere katkı sağlar.

e) Operasyonel basitlik ve sürdürülebilirlik

- **Linde-Hampson Sistemi:** Tek kademeli bir sistem olmasına rağmen, yüksek basınç ve sıcaklık koşulları nedeniyle operasyonel süreçler dikkat gerektirir. Bakım ve işletim süreçleri daha fazla uzmanlık talep edebilir (Yılmaz, 2019).
- **Tasarlanan Sistem:** Doğal soğutmalı tanklar sayesinde daha basit bir yapı sunar. Operasyonel süreçler daha az karmaşık olup, sistemin uzun vadeli sürdürülebilirliği artırılmıştır.

Sonuç olarak tasarlanan sistem, enerji verimliliği, düşük maliyet, çevresel sürdürülebilirlik ve operasyonel basitlik açısından Linde-Hampson sistemine göre üstünlük sağlamaktadır. Sistem, pasif soğutma yöntemleri ve CO₂'nin kendisini soğutucu olarak kullanmasıyla enerji tüketimini minimize ederken, doğal soğutmalı tank yapıları sayesinde kurulum ve bakım maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca, sistemin çevresel etkileri en aza indirgenmiş, yoğunlaşan suyun yeniden kullanımı gibi sürdürülebilirlik odaklı yenilikler entegre edilmiştir. Bu yenilikçi yaklaşım, karbon yakalama ve depolama teknolojilerinde hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirliği sağlamak için etkili bir çözüm sunmaktadır.

a) Feng Chen ve Tatiana Morosuk sistemi ile tasarlanan sistem kıyaslaması ve tasarlanan sisteminin üstünlükleri

b) Feng Chen ve Tatiana Morosuk sistemi

Bu sistem, CO₂'nin sıvılaştırılması sürecinde enerji verimliliğini artırmayı ve süreç performansını optimize etmeyi hedefler. Sistem, yüksek basınçlı kompresörlerin yanı sıra enerji geri kazanım ünitelerini ve çok kademeli soğutma süreçlerini içerir. Sıkıştırma işlemi sonrası sıcaklığın düşürülmesi için aktif cooler birimleri kullanılır **(Feng Chen ve Morosuk, 2014)**. Sistem, her sıkıştırma aşamasında oluşan sıcaklık artışını dengelemek için dış enerji kaynaklarına bağımlıdır. Bunların yanında çok kademeli sıkıştırma ve gelişmiş cooler sistemleri, sistemin kurulum ve işletim maliyetlerini artırmaktadır **(Morosuk & Tsatsaronis, 2008)**. Enerji geri kazanım ünitelerinin kurulumu ve bakımı karmaşıktır ve harici enerji kaynaklarına bağımlılık, operasyonel sürdürülebilirliği sınırlamaktadır **(Fazelpour & Morosuk, 2014)**.

Cooler kullanımının elektrik enerjisi tüketimi

Adyabatik sıkıştırma sırasında gazın sıcaklığı önemli ölçüde artar. Örneğin, 31 °C sıcaklığındaki CO₂'nin, 73.97 bar basınca sıkıştırılması sonrası sıcaklığı 500-550 °C'ye kadar çıkabilir. CO₂'nin sıvılaştırılabilmesi için sıcaklığının, kritik sıcaklık olan 31,1°C'nin altına düşürülmesi gereklidir. Bu sıcaklık düşüşü için her sıkıştırma aşamasından sonra cooler kullanılarak, gazın sıcaklığı azaltılır.

Coolerler, genellikle mekanik soğutma prensibiyle çalışır ve bir kompresör yardımıyla çalışan soğutma çevrimine sahiptir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) "CO₂ Capture in the Industrial Sector" başlıklı raporunda, sıkıştırma işlemi sonrası coolerlerin enerji tüketimine olan etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Raporda, cooler sistemlerinin sıkıştırma sürecindeki toplam enerji yüküne önemli bir katkı sağladığı ve bu etkilerin enerji verimliliği açısından optimize edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. IPCC'nin 2005 yılında yayımladığı "Carbon Dioxide Capture and Storage" raporunda, cooler sistemlerinin enerji yoğunluğu üzerindeki etkileri ve bu sistemlerin genel verimlilik açısından rolü detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Raporda, coolerlerin enerji tüketiminin azaltılmasının, karbon yakalama ve depolama süreçlerinin maliyet ve verimlilik dengesi üzerindeki önemi vurgulanmaktadır.

Cooler sistemleri, sıkıştırma işlemi sırasında ortaya çıkan ısıнын uzaklaştırılmasında önemli bir rol oynamakta olup, bu süreçte toplam enerji tüketiminin yaklaşık %20-

30'unu oluşturmaktadır. **DOE/NETL** (2007) raporuna göre, karbon yakalama süreçlerinde kullanılan soğutucuların enerji tüketimi, sıkıştırma işlemi için harcanan enerjiye kıyasla %20-30 arasında değişmektedir. Bu oran, sıkıştırılan gazın debisi, basınç seviyeleri ve kullanılan soğutma sisteminin verimliliği gibi faktörlere bağlı olarak farklılık göstermektedir. Coolerların enerji tüketimi, karbon yakalama sistemlerinin toplam enerji maliyetlerini ve operasyonel verimliliğini etkileyen kritik bir parametredir.

Cooler Enerji Tüketimini Belirleyen Faktörler

- **Debi:** Daha yüksek debiler, daha fazla ısı enerjisinin giderilmesi gerektiği anlamına gelir.
- **Basınç Seviyeleri:** Daha yüksek sıkıştırma basınçları, sıcaklık artışını artırır ve bu da daha fazla soğutma gerektirir.
- **Soğutma Sisteminin Verimliliği:** Coolerlerin COP (Coefficient of Performance) değeri, enerji tüketimini etkiler. Yüksek COP değerine sahip sistemler, daha az enerjiyle daha fazla soğutma sağlar.
- **Çevre Koşulları:** Dış ortam sıcaklıkları düşükse, soğutma işlemi için daha az enerji gerekebilir.

Sonuç olarak; coolerlerin enerji tüketimi, sıkıştırma işleminin toplam enerji ihtiyacının önemli bir kısmını oluşturur. Feng Chen ve Tatiana Morosuk sisteminde cooler kullanımı, sistemin enerji yoğunluğunu artırmakta ve karbon yakalama teknolojilerinde maliyetlerin yükselmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, tasarlanan sistem gibi cooler gereksinimini ortadan kaldıran yenilikçi yaklaşımlar, enerji verimliliğini artırmak ve işletme maliyetlerini düşürmek açısından avantaj sağlayacaktır.

Kıyaslama ve avantajlar:

- a) Enerji tüketimi ve verimlilik
 - **Feng Chen ve Tatiana Morosuk Sistemi:** Çok kademeli sıkıştırma ve soğutma süreçleri, toplam enerji tüketiminin %20-30'unu yalnızca cooler sistemleri için ayırmaktadır (**DOE/NETL, 2007**).

- **Tasarlanan Sistem:** Cooler ihtiyacını ortadan kaldırdığı için enerji tüketimini minimuma indirir. Soğutucu olarak CO₂ kullanılması, harici soğutucu akışkan maliyetlerini tamamen ortadan kaldırır.

b) Maliyet ve teknolojik gereklilikler

- **Feng Chen ve Tatiana Morosuk Sistemi:** Gelişmiş soğutma teknolojileri ve enerji geri kazanım üniteleri yüksek maliyetlidir ve bakım süreçleri karmaşıktır (Yılmaz, 2019).
- **Tasarlanan Sistem:** Pasif soğuma tankları, düşük maliyetli ve uzun ömürlü bir çözüm sunar. Ayrıca, sistemin basitliği sayesinde kurulum ve işletim maliyetleri önemli ölçüde azalır.

c) Çevresel etki

- **Feng Chen ve Tatiana Morosuk Sistemi:** Harici enerji kaynaklarına bağımlılık, dolaylı olarak fosil yakıt tüketimini artırabilir ve karbon ayak izini büyütebilir (IPCC, 2005).
- **Tasarlanan Sistem:** Mevcut baca gazındaki CO₂'nin soğutucu olarak kullanılması, çevresel etkileri azaltır. Yoğuşan suyun yeniden kullanımı, çevre dostu bir yaklaşımı destekler.

d) Operasyonel basitlik ve sürdürülebilirlik

- **Feng Chen ve Tatiana Morosuk Sistemi:** Karmaşık enerji geri kazanım üniteleri ve çok kademeli yapı, operasyonel süreçleri zorlaştırır ve uzmanlık gerektirir (DOE/NETL, 2007).
- **Tasarlanan Sistem:** Daha az karmaşık bir yapı sunar. Doğal soğutmalı tanklar sayesinde sürekli ve kesintisiz bir süreç sağlanır.

Sonuç olarak tasarlanan sistem, Feng Chen ve Tatiana Morosuk sistemleriyle karşılaştırıldığında enerji verimliliği, düşük maliyet, çevresel sürdürülebilirlik ve operasyonel kolaylık gibi alanlarda önemli üstünlükler sunmaktadır. Özellikle soğutma süreçlerinde geleneksel olarak kullanılan cooler sistemlerinin tamamen ortadan kaldırılması ve soğutucu akışkan olarak CO₂'nin doğrudan kullanılması, çevresel etkileri en aza indirirken işletme maliyetlerini de belirgin şekilde azaltmaktadır. Bu yenilikçi tasarım, karbon yakalama ve depolama süreçlerinde enerji

yoğunluğu ve maliyet problemlerine etkin bir çözüm sağlayarak mevcut teknolojilere kıyasla ileri bir adım teşkil etmektedir.

6.3. Tasarlanan Sistemin Mevcut CO₂ Yakalama Teknolojileriyle Kıyaslanması

Bu bölümde tasarlanan sistemin temel prensipleri ve uygulama yöntemleri, mevcut CO₂ yakalama teknolojileri ile çok yönlü bir kıyaslamaya tabi tutulmuştur. Kimyasal absorpsiyon, fiziksel absorpsiyon, membran ayırma, kriyojenik ayırıştırma ve karbonat döngüsü gibi farklı yaklaşımlar, enerji tüketimi, maliyet, verimlilik ve çevresel etkiler açısından değerlendirilmiştir. Bu bölümde, tasarlanan sistemin sunduğu avantajlar ve sınırlandırmalar, diğer yöntemlerle olan farkları üzerinden ele alınarak, gelecekteki uygulama potansiyeli detaylandırılmıştır.

6.3.1. Kimyasal absorpsiyon ve soğuk ortamda basınç altında sıvılaştırma sistemlerinin kıyaslanması

Yanma sonrası karbon yakalama teknolojilerinde, amin bazlı çözücüler (örneğin, MEA) sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntem, CO₂'nin kimyasal emilim yoluyla ayırıştırılmasını ve ardından çözücü rejenerasyonu için enerji yoğun bir süreçten geçirilmesini gerektirir. Çözücü rejenerasyonu sırasında yüksek enerji tüketimi (3.2–4.2 MJ/kg CO₂) ve uzun süreli kullanımda çözücü bozulması, bu teknolojinin verimliliğini ve ekonomik uygulanabilirliğini sınırlandırmaktadır (Shamsi ve ark., 2023). Ayrıca, çözücü yenileme ihtiyacı nedeniyle işletme maliyetleri artmakta ve süreç daha karmaşık bir yapıya bürünmektedir.

Kimyasal absorpsiyon yönteminin aksine, tasarlanan sistem soğuk ortamda basınç altında CO₂'nin sıkıştırılarak sıvılaştırılmasını hedefleyen yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Bu sistemde, 95°C'deki arıtılmış baca gazı (ABG), sistemde elde edilen -56,4°C sıcaklıktaki CO₂ kullanılarak 31°C'ye kadar soğutulmakta ve 73,97 bar basınç altında sıvılaştırılmaktadır. Bu süreç, kimyasal çözücülere bağımlı olmadan CO₂'nin yüksek saflıkta (%100) yakalanmasını sağlamaktadır.

a) Enerji tüketimi ve verimlilik

- **Kimyasal Absorpsiyon:** Çözücü rejenerasyonu için 3.2–4.2 MJ/kg CO₂ enerji gereksinimi vardır ve bu durum sistemin toplam enerji tüketimini önemli ölçüde artırır (Shamsi ve ark., 2023).

- **Tasarlanan Sistem:** Soğutma ve sıvılaştırma işlemleri, CO₂'nin fiziksel özelliklerinden faydalanılarak gerçekleştirilir ve rejenerasyon süreci bulunmadığı için enerji tüketimi minimuma indirilmiştir.

b) Maliyetler ve teknolojik gereklilikler

- **Kimyasal Absorpsiyon:** CO₂'nin çözücü ile etkileşimi sonucunda oluşan gaz karışımları, safsızlıkların giderilmesi amacıyla ek arıtma işlemlerine ihtiyaç duyar. Ayrıca, elde edilen CO₂ gaz fazında bulunduğundan, sıkıştırma ve sıvılaştırma işlemleri için ayrı bir sistem gereklidir. Bu ek süreçlerin gerekliliği, toplam ilk yatırım ve işletme maliyetlerinde artışa neden olacaktır.
- **Tasarlanan Sistem:** CO₂'nin doğrudan sıvılaştırılması, hem ayrıştırma işlemini hem de %100 ürün saflığını tek aşamada sağlayarak, depolama veya diğer süreçler için kullanılmaya hazır bir yapı sunar. Bu yaklaşım, ek saflaştırma ve faz değişim süreçlerine duyulan ihtiyacı ortadan kaldırarak ilk yatırım ve işletme maliyetlerini azaltır.

c) Çevresel etki

- **Kimyasal Absorpsiyon:** Amin bazlı çözücüler, çevresel açıdan zararlı yan ürünler oluşturabilir ve atık yönetimi gerektirir.
- **Tasarlanan Sistem:** Kimyasal madde kullanılmadığı için çevresel etkiler en aza indirgenmiştir.

d) Operasyonel basitlik ve sürdürülebilirlik

- **Kimyasal Absorpsiyon:** Çözücü bozulması nedeniyle düzenli yenileme ihtiyacı ve enerji yoğun rejenerasyon süreçleri ihtiyaç duyulur. Ayrıca, kimyasal süreçlerin karmaşıklığı işletme zorlukları yaratır.
- **Tasarlanan Sistem:** Kimyasal çözücülere olan bağımlılığın ortadan kalkması, basit bir tasarıma sahip olması nedeniyle işletim ve bakım süreçleri daha kolaydır.

Sonuç olarak kimyasal absorpsiyon yöntemi, endüstriyel ölçekte yaygın olarak kullanılmasına rağmen enerji tüketimi, maliyet ve çevresel etkiler açısından sınırlılıklara sahiptir. Tasarlanan sistem, düşük enerji tüketimi, yüksek saflıkta CO₂ elde edilmesi ve kimyasal çözücü kullanımının ortadan kaldırılması ile bu

dezavantajları aşan bir alternatif sunmaktadır. Bu, sistemin hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sağladığını göstermektedir.

6.3.2. Fiziksel absorpsiyon ve tasarlanan sistemin kıyaslanması

Fiziksel absorpsiyon yöntemleri, CO₂'nin gaz akımlarından ayrıştırılmasında yaygın olarak kullanılan bir teknolojidir. Bu yöntemlerde genellikle Selexol ve Rectisol prosesleri tercih edilmektedir. Selexol prosesi, dimetil eter polietilen glikoller (DEPG) kullanarak CO₂'yi fiziksel olarak absorbe eder ve genellikle oda sıcaklığında etkili bir şekilde çalışır. Rectisol prosesi ise metanol bazlı bir çözücü kullanarak daha düşük sıcaklıklarda yüksek verimlilik sağlar. Ancak, Rectisol sürecindeki düşük sıcaklık gereksinimi enerji maliyetlerini artırmaktadır (Mohammed ve ark., 2014).

Tasarlanan sistem, fiziksel absorpsiyon yöntemlerinden farklı olarak, CO₂'nin doğrudan soğuk ortamda basınç altında sıvılaştırılmasına dayanmaktadır. Bu sistem, kimyasal çözücülere olan bağımlılığı ortadan kaldırarak, CO₂'nin kendi fiziksel özelliklerinden faydalanmak suretiyle yüksek verimlilik sağlamayı hedeflemektedir. Aşağıda, bu iki sistem enerji tüketimi, çözüm verimliliği ve saflık, maliyet ve işletme kolaylığı, çevresel etki gibi kriterler açısından karşılaştırılmıştır.

a) Enerji tüketimi ve verimlilik

- **Fiziksel Absorpsiyon:** Selexol ve Rectisol proseslerinde, özellikle düşük sıcaklık gerektiren Rectisol yöntemi, enerji tüketimi açısından maliyetli bir yapı sunmaktadır. Soğutucu çözücünün rejenerasyonu ve düşük sıcaklık koşullarının sağlanması, yüksek enerji tüketimine yol açmaktadır (Mohammed ve ark., 2014).
- **Tasarlanan Sistem:** Tasarlanan sistemde, CO₂'nin sıvılaştırılması sırasında harici kimyasal çözücüler kullanılmadığı için rejenerasyon süreci gerekmemekte ve enerji tüketimi minimum seviyede tutulmaktadır. Soğutma işlemi, CO₂'nin mevcut fiziksel özelliklerinden faydalanılarak gerçekleştirilmekte, böylece enerji verimliliği artırılmaktadır.

b) Maliyetler ve teknolojik gereklilikler

- **Fiziksel Absorpsiyon:** Kimyasal çözücülerin düzenli yenilenmesi ve rejenerasyonu, işletme maliyetlerini artırmaktadır. Ayrıca, bu süreçlerin

karmaşıklığı işletim açısından zorluklar yaratmaktadır (Mohammed ve ark., 2014).

- **Tasarlanan Sistem:** Kimyasal çözücü kullanımına ihtiyaç duyulmaması ve basit tasarımı nedeniyle, tasarlanan sistem daha düşük işletme maliyetleri ve kolay bir işletim süreci sunmaktadır.

c) Çevresel etki

- **Fiziksel Absorpsiyon:** Kimyasal çözücüler çevreye zararlı yan ürünler oluşturabilir ve bu durum ek atık yönetimi gerektirir.
- **Tasarlanan Sistem:** Kimyasal madde kullanılmadığından, çevresel etkiler en aza indirgenmiştir. Ayrıca, düşük enerji tüketimi çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir.

d) Operasyonel basitlik ve sürdürülebilirlik

- **Fiziksel Absorpsiyon:** CO₂'nin absorpsiyonu sırasında elde edilen karışımların saflaştırılması için ek işlemler gerekebilir. Bu durum, verimliliği sınırlamakta ve işlem adımlarını artırmaktadır.
- **Tasarlanan Sistem:** Tasarlanan sistemde, CO₂ doğrudan sıvılaştırılarak %100 saflıkta elde edilir. Saflaştırma için ek bir süreç gerektirilmemesi, sistemin verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Sonuç olarak fiziksel absorpsiyon yöntemleri, endüstriyel ölçekte CO₂ yakalama için etkili olmasına rağmen, yüksek enerji tüketimi, kimyasal çözücü gereksinimi ve çevresel etkiler gibi sınırlılıklara sahiptir. Tasarlanan sistem, bu dezavantajları aşarak, enerji verimliliği, maliyet optimizasyonu ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Kimyasal çözücülerin ortadan kaldırılması, işletme maliyetlerinin düşürülmesi ve %100 saflıkta CO₂ elde edilmesi, bu sistemi geleceğin karbon yönetimi teknolojileri arasında öne çıkarmaktadır. Tasarlanan sistemin endüstriyel uygulamalarda yaygınlaşması, daha sürdürülebilir ve ekonomik CO₂ yakalama çözümleri sağlayacaktır.

6.3.3. Adsorpsiyon (Adsorption) ve tasarlanan sistemin karşılaştırması

Adsorpsiyon yöntemleri, CO₂'nin gaz akımlarından ayrıştırılmasında yaygın olarak kullanılan teknikler arasında yer almaktadır. Bu yöntemlerde zeolitler, aktif karbon ve metal-organik kafesler (MOF'lar) gibi adsorban malzemeler tercih edilmektedir.

Örneğin, KIT-6 mezogözenekli silika üzerinde yapılan bir çalışmada, CO₂ adsorpsiyon kapasitesinin sıcaklıkla değiştiği ve 25°C'de maksimum 0,65 mmol/g kapasiteye ulaştığı belirlenmiştir (Sarı Yılmaz, 2020). Adsorpsiyon yöntemleriyle elde edilen CO₂ genellikle gaz fazında ayrıştırılır. Bu süreçte, adsorban malzeme üzerine tutunan CO₂, basınç ve sıcaklık gibi işlem parametrelerinin değiştirilmesiyle desorbe edilerek (ayrılarak) gaz fazında serbest bırakılır. Eğer sıvılaştırma gerekiyorsa, bu işlem genellikle adsorpsiyondan bağımsız bir süreç olarak gerçekleştirilir. CO₂'nin sıvı faza dönüştürülmesi, düşük sıcaklık ve yüksek basınç altında yoğunlaştırıldığı ayrı bir termodinamik işlem gerektirir ve bu süreç genellikle ek ekipmanlar kullanılarak gerçekleştirilir. Bu durum, adsorpsiyon yöntemlerini sıvılaştırma sürecinin öncül bir adımı olarak sınırlandırmaktadır.

Buna karşılık, tasarlanan sistem, termik santral baca gazındaki CO₂'yi doğrudan sıvı fazda yakalamayı hedefleyen yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Sistem, CO₂'nin fiziksel özelliklerinden faydalanarak, soğuk bir ortamda ve basınç altında sıvılaştırılmasını sağlamaktadır. Bu yöntem, harici kimyasal çözücülere ihtiyaç duymamasıyla öne çıkar ve çözücülerin rejenerasyonu için gereken enerji ve maliyetleri tamamen ortadan kaldırır. Ayrıca, CO₂'nin sıvılaştırılması işlemi, enerji verimliliğini artırarak operasyonel maliyetleri düşürmekte ve süreçte çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir. Adsorpsiyon yöntemleriyle karşılaştırıldığında, tasarlanan sistem hem işlem basamaklarının azaltılması hem de sıvılaştırmanın doğrudan gerçekleştirilmesi açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Böylece, CO₂'nin daha yüksek saflıkta ve kullanım alanlarına doğrudan uygun şekilde elde edilmesi mümkün olmaktadır.

a) Enerji tüketimi ve verimlilik

- **Adsorpsiyon:** Genellikle düşük enerji tüketimiyle avantaj sağlar.
- **Tasarlanan Sistem:** CO₂'nin sıvılaştırılması için gerekli basıncı sağlamak amacıyla kullanılan kompresör, enerji tüketiminin daha yüksek olmasına neden olabilir.

b) Maliyet ve teknolojik gereklilikler

- **Adsorpsiyon:** Rejenerasyon kolaylığı ve düşük enerji tüketimi nedeniyle işletme maliyetlerini düşürebilir. Ancak, adsorban malzemelerin maliyetleri ve düşük kapasitesi dezavantaj oluşturabilir.

- **Tasarlanan sistem:** Adsorban malzemelere ihtiyaç duymadığı için işletme maliyetlerini azaltabilir, ancak yüksek basınç gereksinimi nedeniyle yatırım ve işletme maliyetleri artabilir.

c) Çevresel etki

- **Adsorpsiyon:** Rejenerasyon sırasında oluşabilecek atıklar nedeniyle çevresel etki yaratabilir.
- **Tasarlanan Sistem:** Adsorban kullanmadığı için çevresel etkileri minimize edebilir.

d) Operasyonel basitlik ve sürdürülebilirlik

- **Adsorpsiyon:** Kullanılan adsorbanların sınırlı kapasite ve seçiciliğe sahip olması, elde edilen CO₂'nin saflığını düşürebilir ve ek arıtma gereksinimi doğurabilir.
- **Tasarlanan Sistem:** CO₂'nin doğrudan sıvılaştırılmasıyla %100 saflıkta elde edilmesini sağlayarak proses verimliliğini artırır ve operasyonel süreçleri optimize eder.

Sonuç olarak, tasarlanan sistem, adsorpsiyon yöntemlerine göre CO₂'nin saflığını artırma ve adsorbanlara bağımlılığı azaltma potansiyeline sahiptir. Ancak, enerji tüketimi ve maliyet açısından her iki yöntemin de avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

6.3.4. Membran ayırma (Membrane Separation) ve tasarlanan sistemin karşılaştırması

Membran ayırma yöntemleri, CO₂'nin gaz akımlarından ayrıştırılmasında yaygın olarak kullanılan teknolojiler arasında yer almaktadır. Bu yöntemlerde genellikle polimerik ve hibrit membranlar tercih edilmektedir. Örneğin, polieterimide (PEI) bazlı membranlar, CO₂/N₂ ayrıştırmasında etkili bir performans sergileyerek selektivite ve geçirgenlik açısından başarılı sonuçlar sunmaktadır (Zhao ve ark., 2019). Membran sistemleri, gazların geçirgenlik farklarına dayalı bir ayırma işlemi gerçekleştirmekte olup, bu süreçte gazların membran üzerinden taşınmasını sağlamak amacıyla genellikle basınç farkı oluşturacak bir kompresöre ihtiyaç duyulmaktadır. Kompresör, membran sistemlerinde yüksek enerji tüketimine yol açan temel bileşenlerden biridir ve bu durum, sistemin enerji verimliliğini sınırlayan önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.

Membran ayırma sistemleri, genellikle çözücü gerektirmeyen bir yöntem olarak bilinse de, hibrit membran teknolojilerinde veya membran süreçlerinin desteklenmesi için bazı kimyasal çözücülerin kullanıldığı örnekler bulunmaktadır. Örneğin, membran proseslerinde amonyak bazlı çözücülerin gaz akımlarından CO₂ ayrıştırılmasını kolaylaştırdığı bazı hibrit sistemlerde rapor edilmiştir (Smith ve ark., 2020). Ancak bu tür uygulamalar, membran teknolojisinin temel çalışma prensiplerinden ziyade, belirli durumlar için optimize edilen hibrit süreçler olarak değerlendirilmektedir.

Tasarlanan sistem, membran teknolojilerinden farklı olarak, CO₂'nin soğuk ortamda ve basınç altında doğrudan sıvı faza geçirilmesini hedeflemektedir. Bu süreçte, harici bir kimyasal çözücüye ihtiyaç duyulmamakta ve CO₂'nin fiziksel özelliklerinden faydalanılarak doğrudan sıvılaştırma gerçekleştirilmektedir. Tasarlanan sistemin bu özelliği, çözücü rejenerasyonu gibi ek enerji tüketimi gerektiren adımları ortadan kaldırmakta ve işlem maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca, sıvılaştırma sürecinin entegre yapısı, yüksek saflıkta CO₂ elde edilmesini sağlamakta ve operasyonel verimliliği artırmaktadır. Membran sistemleriyle karşılaştırıldığında, tasarlanan sistem, enerji tüketimini düşüren doğrudan sıvılaştırma avantajı ve yüksek saflıkta ürün elde edilmesi açısından dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, kompresör gereksinimi her iki sistemde de enerji tüketimini artıran bir unsur olarak yer almaktadır. Ancak tasarlanan sistemin yüksek saflıkta CO₂ üretimi ve geniş kullanım alanları, bu enerji tüketiminin ekonomik kazançlarla dengelenmesini sağlamaktadır.

a) Enerji tüketimi ve verimlilik

- **Membran Ayırma:** Membran sistemleri, genellikle düşük enerji tüketimiyle öne çıkar. Ancak, gazların membran üzerinden geçişini sağlamak için gerekli basınç farkını oluşturmak amacıyla bir kompresör kullanılması gerekmektedir. Bu durum, özellikle yüksek akış hızlarında enerji tüketimini artırabilir. Ayrıca, istenilen saflıkta CO₂ elde etmek için hibrit sistemlerde veya çok aşamalı membran süreçlerinde ek enerji ihtiyacı ortaya çıkabilir.
- **Tasarlanan Sistem:** Tasarlanan sistem, CO₂'nin sıvılaştırılması için basınçlandırma ve soğutma işlemleri nedeniyle enerji gereksinimi taşır. Sistemde kullanılan kompresör, enerji tüketiminin önemli bir kaynağıdır. Bununla birlikte, kimyasal çözücülerin rejenerasyonu gibi ek enerji gerektiren süreçlerin olmaması, toplam enerji tüketimini optimize etmekte ve sistemin

daha verimli çalışmasını sağlamaktadır. Ayrıca, yüksek saflıkta CO₂'nin doğrudan sıvılaştırılması, enerji tüketiminin ekonomik kazançlarla dengelenmesine katkı sunmaktadır.

b) Maliyet ve teknolojik gereklilikler

- **Membran Ayırma:** Kompakt yapısı ve modüler tasarımı sayesinde düşük yatırım maliyeti ve kolay işletim sunar. Ancak, membranların ömrü ve yenileme maliyetleri dikkate alınmalıdır.
- **Tasarlanan Sistem:** Yüksek basınç gereksinimi nedeniyle başlangıç yatırım maliyeti daha yüksek olabilir. Ancak, kimyasal çözücü kullanılmaması ve basit tasarımı sayesinde işletme maliyetleri düşüktür.

c) Çevresel etki

- **Membran Ayırma:** Kimyasal çözücü kullanılmadığından çevresel etkisi düşüktür. Ancak, membran üretimi ve atık membranların bertarafı çevresel etkiler yaratabilir.
- **Tasarlanan Sistem:** Kimyasal çözücü kullanılmadığı için çevresel etkiler minimize edilmiştir. Ayrıca, düşük enerji tüketimi çevresel sürdürülebilirliği destekler.

d) Operasyonel basitlik ve sürdürülebilirlik

- **Membran Ayırma:** Membranların seçiciliği ve geçirgenliği, elde edilen CO₂'nin saflığını belirler. Yüksek saflık genellikle düşük akış hızlarında elde edilir.
- **Tasarlanan Sistem:** CO₂ doğrudan sıvılaştırılarak %100 saflıkta elde edilir, bu da proses verimliliğini artırır.

Sonuç olarak membran ayırma yöntemleri, kompakt yapıları ve enerji verimlilikleri sayesinde CO₂ yakalama süreçlerinde etkili bir seçenek sunar. Ancak, yüksek akış hızlarında verimlilik düşebilir ve istenilen saflıkta CO₂ elde etmek zorlaşabilir. Tasarlanan sistem ise, CO₂'yi doğrudan sıvılaştırarak yüksek saflıkta elde etmeyi ve kimyasal çözücülere bağımlılığı ortadan kaldırmayı hedefler. Bu da enerji tüketimini optimize eder ve çevresel etkileri minimize eder. Her iki yöntemin de avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır; bu nedenle, uygulama alanına ve spesifik gereksinimlere bağlı olarak en uygun yöntemin seçilmesi önemlidir.

6.3.5. Kriyojenik ayırıştırma (Cryogenic Separation) ve tasarlanan sistemin karşılaştırması

Kriyojenik ayırıştırma, gaz karışımlarından CO₂'nin düşük sıcaklıklarda sıvılaştırılarak veya katılaştırılarak ayırıştırılmasını sağlayan etkili bir yöntemdir. Bu süreç, gaz akışının belirli bir sıcaklığa kadar soğutulması ve bileşenlerin farklı yoğuşma veya donma noktalarına göre ayrılmasına dayanır. Örneğin, biyogaz ve baca gazı bileşiminde bulunan CO₂, -56°C ile -78°C arasındaki sıcaklıklarda yoğunlaşarak sıvı faza geçerken, diğer gaz bileşenleri sıvılaşmadan sistemden ayrılabilir (Seo et al., 2020; Zhang et al., 2018). Fraksiyonel yoğuşurma ve distilasyon yöntemleri, gaz karışımlarındaki farklı yoğuşma sıcaklıklarından yararlanılarak bileşenlerin ayırıştırılmasını mümkün kılar (Yılmaz ve ark., 2011; Bui et al., 2018). Kriyojenik yöntem, özellikle doğal gaz işleme ve yüksek saflık gerektiren endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Bui et al., 2018).

Ancak bu yöntem, düşük sıcaklıklara ulaşmak için önemli miktarda enerji tükettiğinden enerji yoğun bir süreçtir (Garcia-Herrero et al., 2016). Soğutma ve faz değişimi için gerekli sıcaklık değerlerine ulaşmak amacıyla kriyojenik soğutucular ve kompresörler kullanılır, bu da işletme maliyetlerini artırır (IPCC, 2005). Özellikle büyük ölçekli karbon yakalama tesislerinde, kriyojenik ayırıştırma için ton başına yaklaşık 0.5–1.0 MWh enerji tüketimi gerekmektedir, bu da uzun vadede yüksek işletme maliyetlerine yol açmaktadır (Zhang et al., 2018).

Tasarlanan sistem, termik santral baca gazındaki CO₂'yi doğrudan sıvılaştırarak yakalamayı hedeflemektedir. Kriyojenik ayırıştırma farklı olarak, optimize edilmiş sıcaklık ve basınç koşullarında çalışarak enerji tüketimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu sistem, CO₂'nin fiziksel özelliklerinden faydalanarak herhangi bir kimyasal çözücü veya harici kriyojenik soğutucu kullanımına ihtiyaç duymadan sıvı faza geçmesini sağlar. Böylece, enerji tüketimi azaltılır ve çevresel sürdürülebilirlik sağlanır.

a) Enerji tüketimi ve verimlilik

- **Kriyojenik Ayırıştırma:** CO₂'nin kriyojenik olarak ayırıştırılması için -56°C ile -100°C arasında sıcaklık gereklidir. Bu sıcaklıklara ulaşmak için yoğun soğutma süreçleri uygulanır ve ton başına 0.5–1.0 MWh enerji tüketimi gerçekleşir (Zhang et al., 2018). Bu enerji ihtiyacı, büyük ölçekli tesislerde yüksek işletme maliyetlerine sebep olmaktadır (IPCC, 2005).

- **Tasarlanan Sistem:** Daha optimize edilmiş sıcaklık ve basınç koşullarında çalıştığından enerji tüketimi minimize edilmiştir. Soğutma işlemlerinde pasif soğutma yöntemleri kullanılarak enerji maliyetleri azaltılmıştır.

b) Maliyet ve teknolojik gereklilikler

- **Kriyojenik Ayrıştırma:** Özel yalıtımlı depolama tankları, kriyojenik ısı eşanjörleri ve yüksek basınçlı kompresörler gerektirdiğinden yatırım ve işletme maliyetleri yüksektir (Bui et al., 2018). Düşük sıcaklık gereksinimi ve soğutucuların enerji tüketimi maliyetleri artırmaktadır.
- **Tasarlanan Sistem:** Daha basit bir tasarıma sahiptir ve optimize edilmiş enerji tüketimi sayesinde maliyetler önemli ölçüde düşürülmüştür. Ekipmanların daha az karmaşık olması, işletme süreçlerini kolaylaştırır ve bakım maliyetlerini azaltır.

c) Çevresel etki

- **Kriyojenik Ayrıştırma:** Yüksek enerji tüketimi nedeniyle dolaylı karbon salınımına neden olabilir. Ayrıca, kriyojenik soğutma için kullanılan gazların çevresel etkileri de göz önüne alınmalıdır (Garcia-Herrero et al., 2016).
- **Tasarlanan Sistem:** Daha düşük enerji tüketimi ve kimyasal çözücü kullanılmaması sayesinde çevresel etkileri minimize eder. Sistem ayrıca, baca gazındaki su buharını yoğunlaştırarak yeniden kullanımını sağlar ve böylece çevresel sürdürülebilirliği destekler.

d) Operasyonel basitlik ve sürdürülebilirlik

- **Kriyojenik Ayrıştırma:** Yüksek saflıkta (%99'un üzerinde) CO₂ elde edilmesini sağlayarak, özellikle hassas endüstriyel uygulamalar ve gıda sektörü gibi yüksek saflık gerektiren alanlarda kullanım imkânı sunar (Seo et al., 2020).
- **Tasarlanan Sistem:** Benzer şekilde, baca gazından elde edilen CO₂'nin yüksek saflıkta ayrıştırılmasını mümkün kılar.

Sonuç olarak tasarlanan sistem, kriyojenik ayrıştırmaya göre enerji tüketimini azaltarak ve operasyonel maliyetleri düşürerek CO₂ yakalama süreçlerinde önemli avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, kimyasal soğutucu akışkanlara bağımlılığı ortadan kaldırması ve çevresel etkileri minimize etmesi, sürdürülebilir ve ekonomik bir çözüm olarak öne çıkmasını sağlamaktadır.

6.3.6. Karbonat döngüsü (Calcium Looping) ve tasarlanan sistemin karşılaştırması

Karbonat döngüsü (kalsiyum döngüsü), kalsiyum oksit (CaO) ve kalsiyum karbonat (CaCO₃) arasındaki reaksiyonları kullanarak CO₂'nin ayrıştırılmasını hedefleyen bir yöntemdir. Bu süreçte, CaO yüksek sıcaklıklarda CO₂ ile reaksiyona girerek CaCO₃ oluşturur; ardından CaCO₃, daha yüksek sıcaklıklarda kalsinasyon yoluyla tekrar CaO ve CO₂'ye ayrıştırılır. Bu yöntem, yan ürün olarak kullanılabilir malzemeler üretme potansiyeline sahip olsa da, yüksek sıcaklık gereksinimi nedeniyle enerji yoğun bir süreçtir (MTA, 2022).

Öte yandan, tasarlanan sistem, termik santral baca gazındaki CO₂'yi soğuk ortamda basınç altında sıvılaştırarak yakalamayı amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, CO₂'nin fiziksel özelliklerinden faydalanarak, harici kimyasal çözücülere ihtiyaç duymadan doğrudan sıvı faza geçişini sağlar. Böylece, enerji tüketimi ve operasyonel maliyetler minimize edilir.

a) Enerji tüketimi ve verimlilik

- **Karbonat Döngüsü:** Yüksek sıcaklık gereksinimi nedeniyle enerji tüketimi yüksektir.
- **Tasarlanan Sistem:** Daha düşük sıcaklık ve basınç koşullarında çalışarak enerji tüketimini azaltır.

b) Maliyetler ve teknolojik gereklilikler

- **Karbonat Döngüsü:** Yüksek sıcaklık gereksinimi ve malzeme dayanıklılığı nedeniyle maliyetlidir ve karmaşık işletme prosedürleri gerektirir.
- **Tasarlanan Sistem:** Daha basit tasarımı ve düşük enerji gereksinimi sayesinde maliyet etkin ve işletmesi kolaydır.

c) Çevresel etki

- **Karbonat Döngüsü:** Yüksek enerji tüketimi dolayısıyla dolaylı olarak çevresel etki yaratabilir.
- **Tasarlanan Sistem:** Düşük enerji tüketimi ve kimyasal kullanımının olmaması sayesinde çevresel etkileri minimize eder.

d) Operasyonel basitlik ve sürdürülebilirlik

- **Karbonat Döngüsü:** CO₂'nin ayrıştırılmasında etkilidir; ancak yan ürünlerin saflığı süreç koşullarına bağlıdır. Bu yüzden gazın saflaştırılması için ek süreçler gerekebilir.
- **Tasarlanan Sistem:** CO₂'yi yüksek saflıkta sıvılaştırarak depolamaya olanak tanır.

Sonuç olarak tasarlanan sistem, karbonat döngüsüne kıyasla enerji tüketimini ve maliyetleri düşürerek, CO₂ yakalama süreçlerinde daha sürdürülebilir ve ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca, kimyasal kullanımını ortadan kaldırması ve çevresel etkileri azaltması, bu yöntemin avantajlarını artırmaktadır.



7. ÖNERİLER

Bu tez çalışması, termik santral baca gazlarından elde edilen CO₂'nin yenilikçi yöntemlerle değerlendirilmesi, enerji verimliliğinin artırılması ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması amacıyla bir dizi öneri sunmaktadır. Çalışmada, karbon yakalama ve kullanımı (CCU) süreçlerinden enerji yönetimindeki yenilikçi yaklaşımlara kadar çeşitli öneriler geliştirilmiştir. Önerilen yöntemler, mevcut sistemlerin optimize edilmesi, enerji tasarrufunun sağlanması ve karbon ayak izinin azaltılması gibi temel hedefleri kapsamaktadır. Bu bağlamda, aşağıdaki öneriler sunulmuştur:

7.1. Karşı Ağırlık Prensibine Dayalı Yeni Sıkıştırma Sistemleri

Kompresörün enerji ihtiyacını optimize etmek amacıyla, elektrik enerjisi tüketimini minimize eden yenilikçi bir sıkıştırma sistemi tasarlanmıştır. Bu sistem, Pascal Prensibi ve karşı ağırlık mekanizmasına dayalı bir çalışma prensibi ile geliştirilmiş olup, yerçekimi ivmesinden etkin bir şekilde faydalanmaktadır. Çalışmanın bir parçası olarak geliştirilen ve ilerleyen aşamalarda uygulamaya geçirilmesi planlanan bu sistem, CO₂'nin sıkıştırılması ve sıvılaştırılması süreçlerinde enerji tüketimini azaltmayı hedeflemektedir. Gelecekteki uygulamalarda enerji verimliliğini artırmak ve karbon yönetimi süreçlerine katkı sağlamak için potansiyel bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

7.2. Membran Teknolojisi Kullanımı ile CO₂ ve N₂'nin Ayırıştırılması

Membran teknolojisi, CO₂ ve N₂ ayırıştırma süreçlerinde enerji verimliliğini artıran etkili bir yöntemdir. Özellikle, N₂'nin kompresöre ulaşmadan önce ayırıştırılması, enerji tüketimini düşürerek sistem maliyetlerini azaltabilir. Saflaştırılan N₂'nin ticari olarak değerlendirilmesi, sistemin ekonomik faydasını artırabilir.

7.3. Kompresör Enerji İhtiyacını Azaltmak için ABG Toplama Haznesine Yüzey Soğutmalı Boyler Entegrasyonu

Kompresör enerji ihtiyacını azaltmak amacıyla, ABG'yi soğutmak için kullanılan CO₂'nin, bu çalışmada incelendiği şekilde doğrudan ABG içine verilmesi yerine, toplama haznesine bir yüzey soğutmalı boyler entegre edilerek soğutucu akışkan olarak kullanılması önerilmektedir. Bu sistem, ince borular içerisinde CO₂'nin geçirilmesiyle soğutma sağlama prensibine dayanmaktadır. Böyle bir tasarım, hem enerji tasarrufunu artırmakta hem de kompresörün yükünü azaltarak sistemin genel enerji verimliliğini optimize etmektedir.

Yüzey soğutmalı boylerlerin kullanımı, yalnızca CO₂'nin kapalı devrede dolaştırılarak yeniden soğutulmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda ABG içinde bulunan su buharını da yoğunlaştırabilir. Bu işlem sonucunda oluşan yoğunlaşmış su buharı, tasarlanan sistemde mevcut olan "yoğunlaşmış su buharı toplama haznesi"nin ABG toplama haznesine entegrasyonu yoluyla toplanabilir ve uygun şekilde tahliye edilerek depolanabilir. Bu entegre yaklaşım, hem enerji kayıplarını minimize etmekte hem de su buharının yeniden kullanımını mümkün kılarak sistemin çevresel sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadır.

7.4. Karbon Yakalama ve Yeniden Kullanım (CCU) Süreçleri

Yakalanan CO₂'nin endüstriyel veya tarımsal süreçlerde kullanımı, ekonomik değer yaratarak sistemin çevresel etkisini azaltır. Bu, CO₂'nin katma değerli ürünlere dönüştürülmesini sağlayarak sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Bunun yanı sıra, çalışmanın ilerleyen aşamalarında geliştirilmesi ve hayata geçirilmesi planlanan yenilikçi bir sistemle, yakalanan CO₂'nin orman yangınlarının önlenmesi ve başlangıç aşamasında etkili bir şekilde söndürülmesi hedeflenmektedir. Bu sistem, CO₂'nin soğutma ve yangın söndürme özelliklerinden faydalanarak, özellikle yüksek risk taşıyan bölgelerde yangınların hızlı bir şekilde kontrol altına alınmasını sağlamayı amaçlamaktadır. Bu yenilikçi yaklaşım, gelecekte çevresel felaketlerin önlenmesinde karbon yönetimi ve sürdürülebilirlik adına önemli bir katkı sağlayabilir.

7.5. Süperkritik CO₂'nin Enerji Üretiminde Kullanımı

Süperkritik CO₂, kritik sıcaklık (31,1 °C) ve kritik basınç (73,9 bar) değerlerinin üzerinde bulunan, gaz ve sıvı faz özelliklerini aynı anda sergileyen benzersiz bir

akışkan durumudur. Bu fazın yüksek enerji yoğunluğu ve düşük viskozite gibi özellikleri, enerji üretiminde kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Özellikle süperkritik CO₂, geleneksel Rankine çevrimlerine alternatif olarak geliştirilen Brayton çevrimlerinde bir çalışma akışkanı olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerde, süperkritik CO₂'nin yüksek termodinamik verimliliği, enerji dönüşüm süreçlerini optimize ederek enerji kayıplarını minimize eder. Ayrıca, süperkritik fazdaki CO₂'nin yüksek yoğunluğu, kompakt ve hafif ekipman tasarımına olanak tanır, böylece enerji santrallerinde daha düşük maliyetli ve daha verimli sistemlerin geliştirilmesini sağlar.

Bununla birlikte, süperkritik fazdaki CO₂'nin enerji üretimi için doğrudan kullanımı durumunda, soğutma işlemine gerek kalmaksızın piyasaya bu şekilde sunulması mümkündür. Bu yaklaşım, hem enerji verimliliğini artırmakta hem de ek soğutma işlemleri ve maliyetlerini ortadan kaldırarak maddi kazanç sağlamaktadır. Özellikle güneş enerjisi, nükleer enerji ve atık ısı geri kazanımı gibi alanlarda süperkritik CO₂'nin doğrudan kullanımı, enerji üretimi süreçlerinde çevresel sürdürülebilirliği destekleyen ve ekonomik değer yaratan yenilikçi bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

7.6. CO₂'nin Topraksız Tarımdaki Kullanımı

KETS gibi kaynaklardan elde edilen CO₂'nin topraksız tarım sistemlerine entegrasyonu, fotosentez etkinliğini artırarak ürün verimliliğini %20-30 oranında iyileştirebilir. Bu uygulama, karbon ayak izini azaltarak hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirliği destekleyen bir çözüm sunmaktadır.

7.7. Akıllı Kontrol Sistemleri Entegrasyonu

Sistemin basınç ve sıcaklık değerlerinin optimize edilmesi için sensörlerle donatılmış akıllı bir kontrol sistemi entegre edilebilir. Bu sistem, operasyonel hataları önlemenin yanı sıra uzaktan izleme ve yönetim imkânı sunarak sistem güvenilirliğini artırabilir.

7.8. Faz Değişim Malzemelerinin (PCM) Kullanımı

Tanklarda faz değişim malzemelerinin (PCM) kullanımı ile pasif soğutma kapasitesi artırılabilir. PCM'ler, faz değişimi sırasında büyük miktarda enerji depolayıp serbest bırakarak soğutma süresini kısaltır ve sistem verimliliğini artırır.

7.9. Yenilenebilir Enerji Kullanımı

Kompresör ve diğer ekipmanlar için yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş, rüzgâr vb.) kullanılması, fosil yakıt bağımlılığını azaltır, karbon ayak izini küçültür ve çevresel sürdürülebilirliği sağlar.

7.10. Sıkıştırma Sırasında Açığa Çıkan Isı Enerjisinin Kullanımı

CO₂ sıkıştırması sırasında açığa çıkan ısı enerjisi, enerji geri kazanım süreçlerinde değerlendirilebilir ve sistemin genel verimliliğini artırabilir. Bu ısı enerjisi, termoelektrik jeneratörler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülebilir veya ısıtma-soğutma sistemlerinde kullanılabilir. Ayrıca, enerji geri kazanım üniteleri ile atık ısı, termal enerjiye dönüştürülerek sistemin diğer süreçlerinde (örneğin, termal depolama veya su buharı üretimi) etkin bir şekilde kullanılabilir. Bu uygulamalar, sıkıştırma sırasında açığa çıkan enerjinin faydalı bir şekilde değerlendirilmesini sağlayarak enerji kayıplarını minimize eder ve sistemin enerji verimliliğini önemli ölçüde artırır. Aynı zamanda, bu yaklaşım çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunarak karbon ayak izinin azaltılmasına olanak tanır.

7.11. Modüler Tasarım

Tanklar ve sistem bileşenlerinin modüler bir yapıya dönüştürülmesi, sistemin ölçeklendirilmesini kolaylaştırır. Ayrıca, modüler tasarım bakım ve onarım süreçlerini daha pratik hale getirir.

8. SONUÇ

Bu doktora tezi, termik santral baca gazlarından CO₂'nin yakalanması, sıkıştırılması ve sıvılaştırılması süreçlerini optimize ederek enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirliği artırmayı hedefleyen yenilikçi bir sistem tasarımı ortaya koymaktadır. Mevcut CO₂ yakalama ve soğutma teknolojilerinin enerji yoğunluğu, çevresel etkileri ve maliyetleri göz önünde bulundurularak, bu süreçlerin daha etkin, ekonomik ve çevre dostu bir şekilde gerçekleştirilmesi amacıyla yeni yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Tasarım kapsamında, termik santral baca gazından elde edilen CO₂'nin yeniden kullanımı sağlanmış; enerji tüketimini azaltmaya yönelik doğal soğutmalı tankların entegrasyonu, cooler birimlerinin ortadan kaldırılması ve baca gazındaki su buharının ayrıştırılarak faydalı bir şekilde değerlendirilmesi gibi yenilikçi yöntemler geliştirilmiştir. Bu bağlamda, yoğunlaştırılan su buharının uçucu küllerin soğutulmasında kullanılması, su kaynaklarının korunması ve sanayi süreçlerinde yeniden kullanımını teşvik etmesi açısından önemli bir katkı sunmaktadır. Ayrıca, çürük buharın CO₂ kullanılarak yoğunlaştırılması süreci, su tüketimini ve termik santrallerin çevresel etkilerini önemli ölçüde azaltmıştır.

Araştırma, kapalı devre bir sistemde CO₂'nin soğutucu akışkan olarak yeniden kullanımı sayesinde enerji tüketiminin büyük ölçüde azaltılabileceğini ve çevresel etkilerin en aza indirilebileceğini göstermektedir. Sıkıştırma sırasında açığa çıkan atık ısı enerjisinin geri kazanımı, sistemin enerji verimliliğini artırmış ve sürdürülebilir enerji yönetimi hedeflerine katkı sağlamıştır. Bu süreçler, karbon yönetiminde yeni yaklaşımlar geliştirilmesi ve santral operasyonlarının çevresel etkilerinin azaltılması adına değerli çıktılar sağlamıştır.

Tasarlanan sistemin, yalnızca enerji verimliliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda karbonun farklı endüstriyel ve tarımsal süreçlerde yeniden kullanımı ile çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağladığı görülmüştür. Özellikle, CO₂'nin topraksız tarım ve seracılık gibi alanlara entegre edilmesi, tarımsal verimliliği %20-30 oranında artırma potansiyeli sunmakta ve karbonun ekonomik bir değer olarak yeniden kullanımını

teşvik etmektedir. Bu, enerji santralleri ile tarımsal üretim süreçleri arasında güçlü bir entegrasyon sağlayarak, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda ekonomik ve çevresel faydalar yaratmaktadır.

Ayrıca, süperkritik CO₂'nin enerji üretimi ve endüstriyel süreçlerde kullanımı, enerji verimliliğini artıracak ve karbon emisyonlarının farklı sektörlerde yeniden değerlendirilmesini mümkün kılacak yenilikçi bir çözüm olarak önerilmektedir. Bu fazın benzersiz fiziksel ve termodinamik özellikleri, sistemin performansını artırırken enerji tüketimini minimize etmektedir. Çalışmanın bu yönde sağladığı bulgular, gelecekteki enerji yönetimi ve karbon yakalama teknolojileri için güçlü bir temel oluşturmaktadır. Gelecekte, bu sistemin farklı sanayi sektörlerine uygulanabilirliği araştırılarak, karbon yönetimi alanında geniş çaplı çözümler geliştirilmesi sağlanabilir.

Yapılan maliyet analizleri, tasarlanan sistemin yalnızca çevresel sürdürülebilirlik açısından değil, aynı zamanda ekonomik olarak da mevcut sistemlere kıyasla önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Mevcut sistemin toplam maliyeti 859.195.239,93 USD olarak hesaplanırken, tasarlanan sistemin maliyeti 26.828.000 USD olarak belirlenmiştir. Bu durum, tasarlanan sistemin toplam maliyetinin mevcut sisteme göre %96,88 daha düşük olduğunu göstermektedir. Ayrıca, karbon emisyon maliyetleri tamamen ortadan kaldırılarak yıllık 806.170.567,93 USD tutarındaki ek maliyet yükü ortadan kaldırılmıştır. Sistem, yalnızca 11,8 gün gibi kısa bir sürede kendini amorti edebilecek bir yapıya sahip olup, bu da yatırımın hızlı geri dönüşü açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Her ne kadar bu hesaplamalar yalnızca ilk yatırım maliyetleri ve karbon emisyon ücretlerini içermekte olup, işletme, bakım ve onarım maliyetleri değerlendirmeye dahil edilmemiş olsa da, tasarlanan sistemin düşük yatırım maliyeti ve karbon emisyon maliyetlerini sıfırlama yeteneği, ekonomik açıdan güçlü bir potansiyel sunduğunu göstermektedir. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında, membran teknolojisinin sisteme entegrasyonu ve ABG soğutma ile ABG su buharı yoğunlaştırma sistemlerine yönelik yeni tasarımların geliştirilmesi planlanmaktadır. Bu optimizasyonlar, sistemin toplam maliyet analizinde değişikliklere yol açabileceğinden, nihai ekonomik değerlendirmede güncellenmiş maliyet unsurlarının dikkate alınması gerekmektedir. Bununla birlikte, mevcut sonuçlar, tasarlanan sistemin enerji santralleri için hem ekonomik hem de çevresel açıdan uygulanabilir bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, termik santrallerde karbon yönetimi, enerji verimliliği ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılması için yenilikçi bir model sunmaktadır. Tasarlanan sistem, enerji tüketimini ve çevresel etkileri azaltma hedeflerini gerçekleştirmekte, sanayi-tarım entegrasyonu ve karbonun yeniden kullanımı gibi alanlarda öncü bir yaklaşım ortaya koymaktadır. Bu çalışma, hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilir çözümler sağlayarak enerji sektörü, tarım ve sanayi uygulamaları için önemli katkılar sunmaktadır. Gelecekte, bu sistemin daha ileri teknolojilerle birleştirilmesi, enerji ve çevre alanındaki etkisini artırarak sürdürülebilir kalkınma hedeflerine yönelik kapsamlı bir çözüm sunabilir.





KAYNAKLAR

- Abolhosseini, S., Heshmati, A. (2014). The main support mechanisms to finance renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 876–885.
- Acar, S., & Kitson, L. (2015). *Türkiye’de kömür ve yenilenebilir enerji teşvikleri*. The International Institute for Sustainable Development. Erişim adresi: https://www.iisd.org/gsi/sites/default/files/ffsandrens_turkey_coal_tk.pdf, Erişim tarihi: 15.02.2025.
- Adams, D., & Davison, J. (2007). *Capturing CO₂*. IEA Greenhouse Gas R&D Programme. ISBN: 978-1-898373-41-4.
- Adewunmi, A. A., Ismail, S., Owolabi, T. O., Sultan, A. S., Olatunji, S. O., & Ahmad, Z. (2017). Modeling the thermal behavior of coal fly ash-based polymer gel system for water reduction in oil and gas wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 157, 430-440.
- Afshari, F., & Dehghanpour, H. (2019). A review study on cooling towers; types, performance and application. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 1-10.
- Ağralı, S., Üçtuğ, F. G., & Türkmen, B. A. (2018). An optimization model for carbon capture & storage/utilization vs. carbon trading: A case study of fossil-fired power plants in Turkey. *Journal of Environmental Management*, 215, 305-315.
- Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 327-363.
- Akalın, M. (2013). Küresel ısınma ve iklim değişikliği nedeniyle oluşan doğal felaketlerin insan sağlığı üzerindeki etkisi. *Hitit Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 6(2), 29-43.
- Akgül, Ç., & Yoncacı, S. (2021). Türkiye kömür yakıtlı termik santral uçucu külleri. *TÜRKÇİMENTO Ar-Ge Enstitüsü*.
- Akgül, O. (2021). Zonguldak’ta kömür endüstrisinin halk sağlığı ve çevre üzerindeki etkisinin analizi. *Greenpeace*.
- Aktan, M. (2021). Kömür gazlaştırmanın Türkiye açısından stratejik önemi. *Yer Altı Kaynakları Dergisi*, 20, 85-106.
- Akyüz, E. (2017). Advantages and disadvantages of nuclear energy in Turkey: Public perception. *Eurasian Journal of Environmental Research*, 1(1), 1-11.
- Alkaya, D. (2009). The investigation of fly ash use in soil improvement. *Electronic Journal of Construction*, 61-72.
- Angelsen, A., & Dokken, T. (2018). Climate exposure, vulnerability and environmental reliance: A cross-section analysis of structural and stochastic poverty. *Environment and Development Economics*, 23(3), 257-278.

- Apergis, N., & Danuletiu, D. C. (2014). Renewable energy and economic growth: Evidence from the sign of panel long-run causality. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 4(4), 578-587.
- Apergis, N., & Payne, J. E. (2012). The electricity consumption-growth nexus: Renewable versus non-renewable electricity in Central America. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 7(4), 423-431.
- Apergis, N., & Payne, J. E. (2014). Renewable energy, output, CO₂ emissions, and fossil fuel prices in Central America: Evidence from a nonlinear panel smooth transition vector error correction model. *Energy Economics*, 42, 226–232.
- Apiratikul, R., & Pavasant, P. (2008). Sorption of Cu²⁺, Cd²⁺, and Pb²⁺ using modified zeolite from coal fly ash. *Chemical Engineering Journal*, 144(2), 245-258.
- Arditsoglou, A., Petaloti, C., Terzi, E., Sofoniou, M., & Samara, C. (2003). Size distribution of trace elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in fly ashes generated in Greek lignite-fired power plants. *Science of the Total Environment*, 323, 153-167.
- Aresta, M. (Ed.). (2010). *Carbon dioxide as chemical feedstock*. John Wiley & Sons.
- Aresta, M., Dibenedetto, A., & Angelini, A. (2013). The changing paradigm in CO₂ utilization. *Journal of CO₂ Utilization*, 3, 65-73.
- Arslan, V. (2009). Enerji kaynaklarında güvenilirlik ve kömürün yeri. *TMMOB İzmir Kent Sempozyumu*.
- ASHRAE. (2016). EPDM ve HDPE boru sistemleri maliyet analizi – HVAC systems and equipment. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*. <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook>
- ASHRAE. (2016). *HVAC systems and equipment*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook>
- Assayag, N., et al. (2009). Water–rock interactions during a CO₂ injection field test: Implications on host rock dissolution and alteration effects. *Chemical Geology*, 265, 227–235.
- Atçıl, E. B. (2019). Dünya genelinde su kaynaklarının durumu. *Artemis Arıtım*. <https://www.artemisaritim.com/dunya-genelinde-su-kaynaklarinin-durumu>
- Atılğan, İ. (2000). Türkiye'nin enerji potansiyeline bakış. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 15(1), 31-47.
- Atılğan, B., & Azapagic, A. (2016). Assessing the environmental sustainability of electricity generation in Turkey on a life cycle basis. *Energies*, 9(1), 31.
- Atkins, P., & de Paula, J. (2006). *Physical chemistry* (8th ed.). W. H. Freeman.
- Atlas Kompresör. (2024). 500 Lt vidalı kompresör teknik özellikleri. *Atlas Kompresör*. <https://www.atlaskompresor.com.tr/500-lt-vidali-kompresor/> Erişim tarihi: 21 Şubat 2025.
- Augutis, J., Martisauskas, L., Kriksitlaitis, R., & Augutiene, E. (2014). Impact of the renewable energy sources on the energy security. *Energy Procedia*, 61, 945-948.

- Avacı, M. (2004). Çatalağzı Termik Santralinin yarattığı hava kirliliğinin bitkiler üzerine etkileri. *İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliği*. (Proje No: 1780/21122001).
- Avacı, S. (2012). Türkiye'de termik santraller ve çevresel etkileri. *Coğrafya Dergisi*, 13.
- Avrupa Komisyonu. (2006). *Büyük yakma tesisleri için mevcut en iyi teknikler'e yönelik başvuru belgesi*.
- Baba, A. (2001). Yatağan (Muğla) Termik Santrali atık depolama sahasının yeraltı sularına etkisi. *Jeoloji Mühendisliği*, 25(2).
- Baba, A., & Türkman, A. (2001). Investigation of geochemical and leaching characteristics of solid wastes from Yeniköy (Muğla-Turkey) power plant. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 25, 321–328.
- Babcock & Wilcox Power Generation Group. (2023). *Combustion & fuel systems*.
- Badr, L., Boardman, G., & Bigger, J. (2012). Review of water use in US thermoelectric power plants. *Journal of Energy Engineering*, 138(4), 246-257.
- Bahamon, D., Díaz-Márquez, A., Gamallo, P., & Vega, L. F. (2018). Energetic evaluation of swing adsorption processes for CO₂ capture in selected MOFs and zeolites: Effect of impurities. *Chemical Engineering Journal*, 342, 458-473.
- Baker, R. W. (2012). *Membrane technology and applications* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Balaji, K., & Rabiei, M. (2022). Carbon dioxide pipeline route optimization for carbon capture, utilization, and storage: A case study for North-Central USA. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51, 101900.
- Baleta, J., Mikulcic, H., Vujanovic, M., Petranovic, Z., & Duic, N. (2016). Numerical simulation of urea-based selective non-catalytic reduction de-NO_x process for industrial applications. *Energy Conversion and Management*, 125, 59-69.
- Balgün, Y. E. (2009). Elektrostatik filtre verimini artırıcı çözümlerin incelenmesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi*.
- Barstow, S., Mørk, G., Mollison, D., & Cruz, J. (2007). The wave energy resource. In *Ocean wave energy*. Springer.
- Başaran, M. (2017). *Kömür yakıtlı santraller*. TMMOB Makina Mühendisleri Odası. (Yayın No: MMO/668, ISBN: 978-605-01-1018-0).
- Başaran, T. (2017). *Doğal gaz yakıtlı santraller*. TMMOB Makina Mühendisleri Odası. (Yayın No: MMO/668, ISBN: 978-605-01-1018-0).
- Başaran, Y. (2023). Türkiye’de deniz suyundan içme suyu üretiminin maliyeti. *Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü*. [https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/TEZLER/Yusuf%20BA%C5%9EARAN-%20Uzmanl%C4%B1k%20Tezi%20\(3\).pdf](https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/TEZLER/Yusuf%20BA%C5%9EARAN-%20Uzmanl%C4%B1k%20Tezi%20(3).pdf) Erişim tarihi: 19 Şubat 2025.
- Başol, K., Durman, M., & Önder, H. (2007). *Doğal kaynakların ve çevrenin ekonomik analizi*. Alfa Aktüel Yayınları.

- Başol, K., Durman, M., & Çelik, M. (2005). Kalkınma sürecinin lokomotifi: Doğal kaynaklar. *Muğla Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 61-71.
- Battiston, S., Dafermos, Y., & Monasterolo, I. (2021). Climate risks and financial stability. *Journal of Financial Stability*, 54, 100867.
- Bayazıt, Y. (2021). Hidroelektrik ve termik santrallerin karbon emisyonu üzerindeki etkilerinin araştırılması: Eskişehir ili örneği. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(2), 442-452.
- Bayraç, H. N. (2009). Küresel enerji politikaları ve Türkiye: Petrol ve doğalgaz kaynakları açısından bir karşılaştırma. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 10(1), 115-142.
- Becattini, V., Gabrielli, P., Antonini, C., Campos, J., Acquilino, A., Sansavini, G., & Mazzotti, M. (2022). Carbon dioxide capture, transport and storage supply chains: Optimal economic and environmental performance of infrastructure rollout. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 117, 103635.
- Benevolenza, M. A., & DeRigne, L. (2019). The impact of climate change and natural disasters on vulnerable populations: A systematic review of literature. *Journal of Human Behavior in the Social Environment*, 29(2), 266-281.
- Berkeley Earth. (2023). *2023 Global Temperature Analysis*. <https://berkeleyearth.org>
Erişim tarihi: 16 Aralık 2024.
- Bernardo, P., Drioli, E., & Golemme, G. (2009). Membrane gas separation: A review/state of the art. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(10), 4638-4663. <https://doi.org/10.1021/ie8019032>
- Bhattacharya, K. (2018). Water efficiency in thermal power sector: An outline of cooling technology in India.
- Biege, N., Pretti, H., & Pirwitz, W. (1997). Emerging and competing technologies for particulate control in cement plants. In *39th IEEE Cement Industry Technical Conference* (p. 326).
- Bilgen, S. (2016). The status of primary fossil energy resources in Turkey. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38, 3478–3483. <https://doi.org/10.1080/15567036.2016.1172139>
- Bilgili, M., Hassanzadeh, R., Sahin, B., Ozbek, A., Yasar, A., & Simsek, E. (2016). Investigation of wind power density at different heights in the Gelibolu peninsula of Turkey. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38, 512–518. <https://doi.org/10.1080/15567036.2013.799617>
- Birol, F., & Malpass, D. (2021). It's critical to tackle coal emissions.
- Bjerketvedt, V. S., Tomasgard, A., & Roussanaly, S. (2022). Deploying a shipping infrastructure to enable carbon capture and storage from Norwegian industries. *Journal of Cleaner Production*, 333, 129586.
- Blissett, R. S., & Rowson, N. A. (2012). A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. *Fuel*, 97, 1-23.
- Borenstein, S., & Bushnell, J. B. (2022). Do two electricity pricing wrongs make a right? Cost recovery, externalities, and efficiency. *American Economic Journal: Economic Policy*, 14(4), 80-110.

- Bosello, F., Roson, R., & Tol, R. S. (2006). Economy-wide estimates of the implications of climate change: Human health. *Ecological Economics*, 58(3), 579-591.
- BP. (2021). *Statistical review of world energy*. <https://www.bp.com/content/dam/bp/businesssites/en/global/corporate/pdfs/energyeconomics/statistical-review/bp-stats-review2021-coal.pdf>
- BP. (2022). *Dünya Enerji 2022 Yılı İstatistiksel İncelemesi (Statistical Review of World Energy 2022)*. <https://www.bp.com> Erişim tarihi: 18 Mart 2023.
- Bretschger, L., & Valente, S. (2018). Productivity gaps and tax policies under asymmetric trade. *Macroeconomic Dynamics*, 22(6), 1391-1427.
- Bruckner, T., Bashmakov, I. A., Mulugetta, Y., Chum, H., De la Vega Navarro, A., Edmonds, J., Faaij, A., Fungtammasan, B., et al. (2014). *Chapter 7 - Energy systems*. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. IPCC Working Group III Contribution to AR5. Cambridge University Press.
- Brunekreef, B., et al. (2012). Ten principles for clean air. *European Respiratory Journal*, 39(3), 525-528.
- Bryant, T. (2001). *Tsunamis*. Cambridge University Press.
- Bui, M., Adjiman, C. S., Bardow, A., et al. (2018). Carbon capture and storage (CCS): The way forward. *Energy & Environmental Science*, 11(5), 1062-1176. <https://doi.org/10.1039/C7EE02342A>
- Burke, K. D., Williams, J. W., Chandler, M. A., Haywood, A. M., Lunt, D. J., & Otto-Bliesner, B. L. (2018). Pliocene and Eocene provide best analogs for near-future climates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(52), 13288-13293.
- Büke, T. (2003). Dose assessment around the Yatağan coal-fired power plant due to gross alpha-radioactivity levels in flying ash. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 256(2), 323-328.
- Cambridge. (2023). *Cambridge İngilizce Sözlük, "Yenilenebilir Enerji"*. <https://dictionary.cambridge.org/> Erişim tarihi: 15 Mart 2023.
- Chakraborty, N., Mukherjee, I., Santra, A. K., Chowdhury, S., Chakraborty, S., Bhattacharya, S., Mitra, A. P., & Sharma, C. (2008). Measurement of CO₂, CO, SO₂ and NO emissions from coal-based thermal power plants in India. *Atmospheric Environment*, 42, 1073-1082.
- Chatham House. (2021). *Climate change risk assessment 2021*. <https://www.chathamhouse.org/2021/09/climatechange-risk-assessment-2021/summary>
- Chemnitz, C., Stiftung, B. H., & Becheva, S. (2014). *Meat Atlas (Et Atlası)* (Çev. Cana U. & Çağrı E.). Thomas Fatheuer Yağmur Ormanlarındaki Çiftlikler, 46-47. İstanbul.
- Chen, F., & Morosuk, T. (2021). Thermodynamic analysis and optimization of a CO₂ liquefaction process. *Energies*, 14(21), 7174. <https://doi.org/10.3390/en14217174>

- Chen, H., Goldberg, M. S., & Villeneuve, P. J. (2008). A systematic review of the relation between long-term exposure to ambient air pollution and chronic diseases. *Reviews on Environmental Health*, 23(4), 243-297. <http://www.medicine.mcgill.ca/epidemiology/goldberg/Review%20of%20Outdoor%20Air%20Pollution.pdf>
- Chen, Q., Dunn, J. B., & Allen, D. T. (2019). Greenhouse gas emissions of transportation fuels from shale gas-derived natural gas liquids. *Procedia CIRP*, 80, 346-351.
- Cheng, I., & Lammi, H. (2016). *Büyük su gaspı: Kömür endüstrisi küresel su krizini nasıl derinleştiriyor?* İstanbul: Printworld Matbaa San. Tic. A.Ş.
- Choi, S., Drese, J. H., & Jones, C. W. (2009). Adsorbent materials for carbon dioxide capture from large anthropogenic point sources. *ChemSusChem: Chemistry & Sustainability, Energy & Materials*, 2(9), 796-854.
- Çiçek, A., & Koparal, A. S. (2004). Accumulation of sulfur and heavy metals in soil and tree leaves sampled from the surroundings of Tuncbilek thermal power plant. *Chemosphere*, 57(8), 1031-1036.
- Climate Change. (2021). *Boğaziçi Üniversitesi İklim Değişikliği ve Politikaları Uygulama ve Araştırma Merkezi*. <http://climatechange.boun.edu.tr/>
- Coal Information. (2020). *2016 provisional data*.
- Cole-Dai, J. (2010). Volcanoes and climate. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(6), 824-839.
- Copernicus Climate Change Service. (2023). *Annual Global Climate Report 2023*. <https://climate.copernicus.eu> Erişim tarihi: 16 Aralık 2024.
- Cordoba, P. (2014). Status of flue gas desulphurisation (FGD) systems from coal-fired power plants: Overview of the physico-chemical control processes of wet limestone FGDs. *Fuel*, 144, 274-286.
- Coşkun, A. (2013). Çayırhan termik santralinin enerji ve ekserji analizi. *11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, 1.
- Craig, M. T., Cohen, S., Macknick, J., Draxl, C., Guerra, O. J., Sengupta, M., ... & Brancucci, C. (2018). A review of the potential impacts of climate change on bulk power system planning and operations in the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98, 255-267.
- CSB. (2017). *Termik santraller*. Çevre ve Şehircilik Bakanlığının ÇED alanında kapasitesinin güçlendirilmesi için teknik yardım projesi. (Sözleşme No: 2007TR16IPO001.3.06/SER/42).
- Çalapkulu, S. (2023). *Dalga enerjisinin kullanım alanları*. <https://www.sektorumdergisi.com/dalga-enerjisinin-kullanim-alanlari/>
- Çengel, Y. A. (2000). *Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik*. Literatür Yayıncılık.
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2020). *Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik* (9. baskı). Palme Yayıncılık.
- Çepel, N. (2008). *Ekolojik sorunlar ve çözümleri*. TÜBİTAK Yayınları.

- Çepel, N., & Ergün, C. (2004). *Temel çevre sorunları*. http://www.tema.org.tr/Sayfalar/CevreKutuphanesi/Pdf/KureselIsinma/EM_Konu12.pdf
- Çevre ve Orman Bakanlığı. (2008). *Politika ve strateji geliştirme alt grubu Türkiye'nin Kyoto Protokolüne taraf olmasına yönelik 1. değerlendirme raporu*. Çevre ve Orman Bakanlığı.
- Çokuysal, B. (2021). Tarım ve gıda etiğinin konuşulmayan alanı: Hayvan sömürüsü. *3. Uluslararası Tarım ve Gıda Etiği Kongresi Kongre Kitabı*, 269-275.
- ÇSB. (2016). *Sektörel atık kılavuzları: Termik santraller*. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü.
- ÇSB. (2022). *Enerji endüstrisi*. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/1-enerji--endustr-s--20220114142646.pdf>
- d'Amore, F., & Bezzo, F. (2017). Economic optimisation of European supply chains for CO₂ capture, transport and sequestration. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 65, 99-116.
- d'Amore, F., Romano, M. C., & Bezzo, F. (2021). Carbon capture and storage from energy and industrial emission sources: A Europe-wide supply chain optimisation. *Journal of Cleaner Production*, 290, 125202.
- d'Amore, F., Romano, M. C., & Bezzo, F. (2021). Optimal design of European supply chains for carbon capture and storage from industrial emission sources including pipe and ship transport. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 109, 103372.
- Dahl, C. A. (2004). *International energy market: Understanding pricing, policies and profits*. Penn Well Corporation.
- Dai, C., Cai, X. H., Cai, Y. P., Guo, H. C., Sun, W., Tan, Q., & Huang, G. H. (2013). An integrated simulation and optimization approach for managing human health risks of atmospheric pollutants by coal-fired power plants. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 64(6), 704-720.
- DAKA. (2018). *Sektörel analiz raporu*. <https://www.daka.org.tr/panel/files/files/yayinlar/Mikro%20HES%20Sektorel%20Analiz%20Raporu.pdf>
- Dale, L. L., Karali, N., Millstein, D., Carnall, M., Vicuña, S., Borchers, N., ... & Sohn, M. D. (2015). An integrated assessment of water-energy and climate change in Sacramento, California: How strong is the nexus? *Climatic Change*, 132, 223-235.
- D'Amato, G., & Cecchi, L. (2008). Effects of climate change on environmental factors in respiratory allergic diseases. *Clinical and Experimental Allergy*, 38(8), 1264-1274.
- Dartan, M. (1997). Türkiye'nin enerji sorununa genel bir bakış. *Madencilik Bülteni*, Mart-Nisan.
- Davis, C. P., Aladdine, D. J., & Carrie, F. J. (2007). Climate change strategies for the financial services industry. *Goodwin Procter*.

- Davis, G., Selkowitz, S., & Brook, M. (2003). Comparison of alternate cooling technologies for California power plants: Economic, environmental and other trade-offs. *Public Interest Energy Research, California Energy Commission*.
- Dellal, H., & Roser, M. (2020). CO₂ and greenhouse gas emissions. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>
- Demir, İ., Filazi, A., Sevim, O., & Simsek, O. (2022). Influence of freeze–thaw cycling on properties of cementitious systems doped with fly ash having optimized particle size distribution. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 22(4), 189.
- Demirel, Y. (2016). *Energy production, conversion, storage, conservation and coupling*. Springer.
- Demirkan, H. (2021). Türkiye’de ve dünyada kömürün güncel görünümü. *Madencilik ve Yer Bilimleri Dergisi*, 12(97), 84-106.
- Deneysan. (2022). *Bölüm-2 Termik santraller*. http://deneysan.com/Content/images/documents/es-02_67338194.pdf
- Destek, M. A., & Aslan, A. (2017). Renewable and non-renewable energy consumption and economic growth in emerging economies: Evidence from bootstrap panel causality. *Renewable Energy*, 111, 757-763.
- Deveci, E. Ü. (2019). Termik santrallerin MRV sistemi sera gazı emisyon hesabı ve emisyonların iyileştirilmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(4), 199-214.
- Dinamik Kompresör. (2024). *DSC serisi vidalı kompresörler*. <https://dinamikkompresor.com/vidali-kompresor-dsc.php> Erişim tarihi: 21 Şubat 2025.
- Dindi, A., Quang, D. V., Vega, L. F., Nashef, E., & Abu Zahra, M. (2019). Applications of fly ash for CO₂ capture, utilization, and storage. *Journal of CO₂ Utilization*, 29, 82-102.
- Do, T. N., & Burke, P. J. (2023). Phasing out coal power in a developing country context: Insights from Vietnam. *Energy Policy*, 176, 113512.
- DOE/NETL. (2007). *Carbon capture and storage: Research, development, and demonstration*. <https://www.netl.doe.gov/projects/carbon-storage> Erişim tarihi: 27 Aralık 2024.
- DOE/NETL. (2007). *Cost and performance baseline for fossil energy plants*. National Energy Technology Laboratory, U.S. Department of Energy. <https://www.nrc.gov/docs/ML0932/ML093280556.pdf> Erişim tarihi: 11 Aralık 2024.
- DOE/NETL. (2007). *Cost and performance baseline for fossil energy plants*. National Energy Technology Laboratory, U.S. Department of Energy. <http://large.stanford.edu/courses/2012/ph240/maas1/docs/NETL-401-110907.pdf> Erişim tarihi: 11 Aralık 2024.

- Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı (DOĞAKA). (2019). *Afşin-Elbistan Termik Santrali kaynaklı atık ısı ile seracılık projesi fizibilitesi*. <https://www.dogaka.gov.tr/assets/upload/dosyalar/19-1-afsin-elbistan-termik-santrali-kaynakli-atik-isi-ile-seracilik-projesi-fizibilitesi.pdf> Erişim tarihi: 16 Aralık 2024.
- Devlet Planlama Teşkilatı (DPT). (2001a). *Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Elektrik Enerjisi Özel İhtisas Komisyonu Raporu*. Devlet Planlama Teşkilatı yayını, Ankara.
- Dokuzuncu Beş Yıllık Kalkınma Planı. 5. *Kalkınma Planı*. <http://ekutup.dpt.gov.tr/imalatsa/oik551.pdf>
- Dragovic, S., Cujic, M., Beskoski, L. S., Gajic, B., Bajat, B., Kilibarda, M., & Onjia, A. (2013). Trace element distribution in surface soils from a coal burning power production area: A case study from the largest power plant site in Serbia. *Catena*, 104, 288-296.
- Dunxi, Y. (2009). Carbonation of coal fly ash under oxy-fuel combustion conditions. *International Conference on Power Engineering*, 16-20 November 2009, Kobe, Japan.
- Durmaz, A. (1998). Kömürün yanması. In O. Kural (Ed.), *Kömür – Özellikleri, teknolojisi ve çevre ilişkileri* (pp. 353–394). Özgün Ofset Matbaacılık A.Ş.
- Dutcher, B., Fan, M., & Russell, A. G. (2015). Amine-based CO₂ capture technology development from the beginning of 2013 – A review. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(4), 2137-2148.
- Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi. (2009). *Türkiye enerji raporu 2009*. DEK-TMK Yayın No: 0013/2009, Ankara.
- Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi. (2010). *Temiz kömür teknolojileri*. DEK-TMK Yayın No: 0015/2010. ISBN: 978-605-89548-4-7.
- DwyerOmega. (2025). *High temperature and high pressure transducers – PX91 series*. <https://www.dwyeromega.com/en-us/high-temperature-high-pressure-transducers/p/PX91> Erişim tarihi: 21 Şubat 2025.
- EDGAR. (2022). *CO₂ emissions of all world countries, 2022 report*. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2022::text=In%202021%2C%20China%2C%20the%20United,the%20world's%20largest%20CO2%20emitters
- EIA. (2016). *Energy Information Administration, Energy Explained*. <https://www.eia.gov/energyexplained/index.php>
- EIA. (2023). *Nükleer enerji*. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/nuclear>
- EİGM. (2021). *Türkiye Ulusal Enerji Raporu 2021*. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. <https://www.eigm.gov.tr>
- Ekolojist. (2021). *Bir şehrin karbon emisyonunu dengelemek için kaç ağaç gerekir?* Ekolojist. <https://ekolojist.net/bir-sehrin-karbon-emisyonunu-dengelemek-icin-kac-agac-gerekir/> Erişim tarihi: 15 Şubat 2025.
- El-Khozondar, B., & Koksall, M. A. (2017). Investigating the water consumption for electricity generation at Turkish power plants. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 22, p. 00039). EDP Sciences.

- Electric Power Research Institute (EPRI). (2008). *Power plant water use and management*. <https://www.epri.com/research/products/000000000001016987> Erişim tarihi: 19 Şubat 2025.
- Ellabban, O., Ebu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 748-764.
- Ember. (2023). *Yearly electricity data (2023); European electricity review (2022); Energy Institute - Statistical review of world energy (2023) – with major processing by Our World in Data*.
- Ember. (2023). *Türkiye elektrik görünümü raporu, 2023*. <https://ember-climate.org/tr/analizler/ara%C5%9Ft%C4%B1rma/turkiye-elektrik-gorunumu-2023/>
- Emeksiz, C., & Fındık, M. M. (2021). Sürdürülebilir kalkınma için yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye ölçeğinde değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (26), 155-164.
- International Energy Agency. (2014). *Energy technology perspectives 2014*. Paris, France.
- Enerji Piyasası Denetleme Kurulu. (2023). *Ocak ayı sektör raporu*. <https://www.epdk.gov.tr/detay/icerik/3-0-23-3/elektrikaylik-sektor-raporlar>
- Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2024). *Ulusal tarife birim fiyat listesi*. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-0-0-0/ElektrikTarifeleri> Erişim tarihi: 19 Şubat 2025.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022a). *Güneş*. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes>
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022b). *Rüzgar*. <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar>
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022e). *Kömür*. <https://enerji.gov.tr/bilgimerkezi-tabiiikaynaklar-komur>
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2024). *Elektrik*. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik#:~:text=2023%20y%C4%B1l%C4%B1%20Aral%C4%B1k%20ay%C4%B1%20sonu%20itibar%C4%B1yla%20kurulu%20g%C3%BCc%C3%BCm%C3%BCz%C3%BCn%20kaynaklara%20g%C3%B6re,s%C4%B1%20ise%20di%C4%9Fer%20kaynaklar%20%C5%9Feklindedir.>
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023). *Kömür*. <https://enerji.gov.tr/bilgimerkezi-tabiiikaynaklar-komur>
- enerjiatlası.com. (2021). *Jeotermal enerji santralleri*. <https://www.enerjiatlası.com/jeotermal/>
- enerjiatlası.com. (2023). *Kömür ve linyit yakıtlı termik santraller*. <https://www.enerjiatlası.com/komur/>
- EngineeringToolbox. (2006). *Gases – Densities*. https://web.archive.org/web/20060302054722/https://www.engineeringtoolbox.com/gas-density-d_158.html

- EPA. (2022). *Overview of greenhouse gases*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
Erişim tarihi: 28 şubat 2025.
- Erdoğan, S. (2020). Enerji, çevre ve sera gazları. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 10(1), 277-303.
- Erickson, C. A., & Rajaram, J. (2002). Current work on the impacts and control of SO₃ emissions from selective catalytic reduction systems. *Conference on SCR and SNCR for NO_x Control*.
- Erik, N. Y. (2022). Kömür özelliklerinin temiz kömür teknolojilerine (gazlaştırma, sıvılaştırma, karbon elyaf ve kok üretimi) etkisi: Derleme. *Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 4(2), 22-56.
- Erlat, E., & Türkeş, M. (2015). Influence of tropical volcanic eruptions on Turkey's summer air temperatures in the second half of the 20th century. *Ege Coğrafya Dergisi*, 24(1), 1-14.
- Eroğlu, G., & şahiner, M. (2017). Dünyada ve Türkiye'de uranyum ve toryum. MTA (General Directorate of Mineral Research and Exploration). <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgimerkezi/maden-serisi/Uranyum-Toryum.pdf>
- Erol, O. (2010). *Genel klimatoloji*. Ankara: Çantay Kitabevi.
- Ersoy, M. (2010). Sürdürülebilir kalkınmada Avrupa Birliği ve Türkiye kömür madenciliği. In *Proceedings of the 19th Coal Congress of Turkey* (2013).
- Erturgut, R., & Yılmaz, B. (2020). Afet ve insani yardım lojistiği alanında yapılan çalışmaların bibliyometrik analizi. *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (40), 105-123.
- Ertürk, H. (2009). *Çevre bilimleri*. Ekin Yayınları.
- Eti Menkul Kıymetler Aş. (2010). *Enerji sektörü raporu*. https://www.etiyatirim.com/upolad/rapor.../SKR_EN
- ETKB (Republic of Turkey Ministry of Energy and Natural Resources). (2015). *2015 yılı faaliyet raporu*.
- European Environment Agency (EEA). (2014a). *Air quality in Europe – 2014 report*. (EEA Report No: 5/2014). Denmark. <http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2014>
- EÜAş. (2018). *EÜAş yıllık rapor 2018*. <https://api.euas.gov.tr/file/6bbe8457-5164-42ff-9317-0a90ef33f55f?download>
- Falkner, R. (2016). The Paris Agreement and the new logic of international climate politics. *International Affairs*, 92(5), 1107-1125.
- FAO. (2020). *Forests and carbon sequestration: Annual carbon absorption per hectare*. <https://www.fao.org/forests/carbon-sequestration>
- FAOSTAT. (2020). *Statistics, food and agriculture organization of the United Nations*. Rome, Italy.
- Fazelpour, M., & Morosuk, T. (2014). Advanced CO₂ liquefaction systems: A thermodynamic approach. *Energy Science Journal*, 45(6), 120-135.

- Feuerborn, H. J. (2005). Coal ash utilization over the world and in Europe. *Workshop on Environmental and Health Aspects of Coal Ash Utilization*.
- Flynn, D. (Ed.). (2003). *Thermal power plant simulation and control* (No. 43). IET.
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Bernsten, T., Betts, R., Fahey, D. W., ... & Whorf, T. (2007). Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the 4th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Franklin, M., Kurtz, C., Alksnis, M., Steichen, L., & Younger, C. (2017). *Lights out in the cold: Reforming utility shut-off policies as if human rights matter*. Environmental and Climate Justice Program, Baltimore, USA.
- Gao, J., Wang, H., Cai, W., Wu, J., & He, Y. (2016). Pollution characteristics of atmospheric particulate mercury near a coal-fired power plant on the southeast coast of China. *Atmospheric Pollution Research*, 1-9.
- Garcia-Herrero, I., Margallo, M., Onandia, R., et al. (2016). Environmental challenges of the chlor-alkali production: Seeking answers from life-cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 117, 146-158. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.022>
- Geothermal Energy Association (GEA). (2012). *Why support geothermal energy?*
- Giaccio, G. M., & Malhotra, V. M. (1988). Concrete incorporating high volumes of ASTM Class F fly ash. *Cement, Concrete, and Aggregates*, 10(2), 88-95.
- Glick, P. (2001). The toll from coal: Power plants, emissions, wildlife and human health. *Bulletin of Science, Technology & Society*, 21(6), 482-500.
- Global CCS Institute. (2015). *The global status of CCS, summary report*. Melbourne, Australia.
- Global Energy Monitor. (2024). *Boom and bust coal 2023: Tracking the global coal plant pipeline*.
- Goos, M., & Manning, A. (2007). Lousy and lovely jobs: The rising polarization of work in Britain. *The Review of Economics and Statistics*, 89(1), 118-133.
- Gordon, J. (2008). Clean fuel? Methane leaks threaten natural gas' climate-friendly image. *Reuters*.
- Goto, K., Yogo, K., & Higashii, T. (2013). A review of efficiency penalty in a coal-fired power plant with post-combustion CO₂ capture. *Applied Energy*, 111, 710-720.
- Gökdayı, İ. (1997). *Çevrenin geleceği*. Türkiye Çevre Vakfı Yayını.
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M. S., & Demir, İ. (2009). Uçucu kül bölüm II: Kimyasal, mineralojik ve morfolojik özellikler. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(2), 33-42.
- Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). *Chemistry of the elements* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Guttikunda, S. K., & Jawahar, P. (2014). Atmospheric emissions and pollution from coal-fired thermal power plants in India. *Atmospheric Environment*, 92, 449-460.

- Gümüşel, D., & Stauffer, A. (2015). *Ödenmeyen sağlık faturası: Türkiye’de kömürlü termik santraller bizi nasıl hasta ediyor*. Sağlık ve Çevre Birliği (HEAL) Raporu.
- Gündoğan, A. C., Sayman, R. Ü., Baş, D., Arıkan, Y., & Özsoy, G. (2015). *A’dan Z’ye iklim değişikliği başucu rehberi*. Ankara: Bölgesel Çevre Merkezi (REC Türkiye).
- Gündoğan, A. C., Yaraç, N., & Bağatır, O. B. (2018). Türkiye’de linyit santralleri, su ihtiyaçları ve atıkları. In *Linyit Yanmaz Yakar* (EKOLOGOS 2018).
- Gündoğan, A. C., Baş, D., & Sayman, R. Ü. (2015). *A’dan Z’ye iklim değişikliği başucu rehberi*. Ankara: Ajanstürk Matbaacılık.
- Güngör, M. (2023). Doğal gaz jeopolitiği: Doğu Akdeniz. *Düşünce Dünyasında Türkiz*, 14(64), 131-160.
- Gür, F., & Yaprak, G. (2010). Natural radionuclide emission from coal-fired power plants in the southwestern of Turkey and the population exposure to external radiation in their vicinity. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 45, 1900-1908.
- Gürbüz, M., & Özdemir, Y. (2016). Afşin-Elbistan termik santrallerinin insan sağlığı üzerindeki etkilerinin mesafe tabanlı algı analizi. *Türk Coğrafya Dergisi*, (66), 43-50.
- H2O Cooling. (2024). *Cooling tower cost in 2024*. <https://h2ocooling.com/blog/cooling-tower-cost-in-2024/> Erişim tarihi: 18 şubat 2025.
- Han, J. H., Ryu, J. H., & Lee, I. B. (2012). A preliminary infrastructure design to use fossil fuels with carbon capture and storage and renewable energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(22), 17321-17335.
- Hansen, K. (2008). Water vapor confirmed as major player in climate change. *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, USA.
- Havey, T. (2008). *California’s coastal power plants: Alternative cooling system analysis*. Golden Co., California.
- Heper, Y. (2001). *Buhar santralleri teorisi ve uygulaması genişletilmiş*. Ankara: METU Press.
- House, K., Schrag, D., Harvey, C., & Lackner, K. (2006). Permanent carbon dioxide storage in deep-sea sediments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103, 12291–12295.
- Babcock & Wilcox. (n.d.). *Burners - Thermal combustion and fuel systems*. <https://www.babcock.com/home/thermal/combustion-and-fuel-systems/burners/>
- Huang, Y., Rebennack, S., & Zheng, Q. P. (2013). Techno-economic analysis and optimization models for carbon capture and storage: A survey. *Energy Systems*, 4(4), 315-353.
- Huang, Y., Yi, Q., Kang, J. X., Zhang, Y. G., Li, W. Y., Feng, J., & Xie, K. C. (2019). Investigation and optimization analysis on deployment of China coal chemical industry under carbon emission constraints. *Applied Energy*, 254, 113684.

- Hui, K. S., & Chao, C. Y. H. (2006). Pure, single-phase, high-crystalline, chamfered-edge zeolite 4A synthesized from coal fly ash for use as a builder in detergents. *Journal of Hazardous Materials*, 137(1), 401-409.
- Hui, K. S., & Chao, C. Y. H. (2006). Synthesis of MCM-41 from coal fly ash by a green approach: Influence of synthesis pH. *Journal of Hazardous Materials*, 137(2), 1135-1148.
- Hui, K. S., Chao, C. Y. H., & Kot, S. C. (2005). Removal of mixed heavy metal ions in wastewater by zeolite 4A and residual products from recycled coal fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, 127(1-3), 89-101.
- Hür, D. (2009). Moleküller arası kuvvetler, sıvılar ve katılar. In H. Türk (Ed.), *Genel kimya* (Ünite 2). Eskişehir: Anadolu Üniversitesi Yayınları.
- International Energy Agency (IEA). (2005). *Energy statistics manual*. <https://www.iea.org/areas-of-work/data-and-statistics/manuals>
- International Energy Agency (IEA). (2011). *CO₂ capture in the industrial sector*. <https://ieaghg.org/publications/cost-of-co2-capture-in-the-industrial-sector-cement-and-iron-and-steel-industries/> Erişim tarihi: 11 Aralık 2024.
- International Energy Agency (IEA). (2020). *World energy balances*. IEA World Energy Statistics and Balances (database), Paris.
- International Energy Agency (IEA). (2020). *Sustainable recovery: World energy outlook special report*. <https://www.iea.org/reports/sustainable-recovery>
- International Energy Agency (IEA). (2021). *Global energy review 2021*.
- International Energy Agency (IEA). (2022). International Energy Agency—IEA. In *The Europa Directory of International Organizations 2022* (pp. 701-702). Routledge.
- International Energy Agency (IEA). (2019). *Data and statistics*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=WORLD&energy=Balances&year=2019>
- International Energy Agency (IEA). (2021). *Covid-19 impact on electricity*. Paris. <https://www.iea.org/reports/covid-19-impact-on-electricity>
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer* (6th ed.). Wiley.
- ING Bank. (2024). AB'de karbon fiyat tahminleri 2025'in ilk çeyreği için öngörüler. *SteelOrbis*. <https://tr.steelorbis.com/celik-haberleri/guncel-haberler/ing-abde-karbon-fiyatlari-2025in-ilk-ceyreginde-70mta-cikacak-1370965.htm> Erişim tarihi: 19 Şubat 2025.
- International Energy Agency (IEA). (2011). *World energy outlook*. 9 rue de la Fédération 75739, Paris Cedex 15, France.
- International Energy Agency (IEA). (2013). *Renewable energy medium-term market report 2013*. 9 rue de la Fédération 75739, Paris Cedex 15, France.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2000). *Special report on emissions scenarios*. Cambridge University Press.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2005). *Carbon dioxide capture and storage*. <https://www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/> Erişim tarihi: 11 Aralık 2024.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2005). *Carbon dioxide capture and storage: Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Prepared by Working Group III of the IPCC. Cambridge University Press. Erişim tarihi: 11 Aralık 2024.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2005). *Special report on carbon dioxide capture and storage*. <https://www.ipcc.ch>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Volume 2 – Energy, Chapter 2 – Stationary combustion*. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf Erişim tarihi: 16 Aralık 2024.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Volume 2 – Energy*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). What is the greenhouse effect? *Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis*. https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/faq-1-3.html
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. In R. K. Pachauri & L. A. Meyer (Eds.), Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (p. 155). IPCC, Geneva, Switzerland.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *5. Değerlendirme Raporu; İkinci Çalışma Grubu, İklim Değişikliği: Etkiler, Uyum ve Kırılğanlık*. New York.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report Summary Chapter for Policymakers*. IPCC. https://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). *Global warming of 1.5°C: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). *Climate change and land*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM_UpdatedJan20.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Assessment Report 6 - WGI Report*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2022/04/AR6_Factsheet_April_2022.pdf

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Summary for policymakers*. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I. Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Summary for policymakers*. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., & Zhou, B. (Eds.)].* <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> Erişim tarihi: 28 Şubat 2025.
- ISO. (2007). *ISO 4427 Standardı - Plastik borular: Basınçlı su temini için polietilen (PE) borular ve ek parçaları*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/4427> Erişim tarihi: 27 Şubat 2025.
- Iyer, R. S., & Scott, J. A. (2001). Power station fly ash—A review of value-added utilization outside of the construction industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 31(3), 217-228.
- Izquierdo, M., & Querol, X. (2012). Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: An overview. *International Journal of Coal Geology*, 94, 54-66.
- İbadullayeva, J., Jumaniyazova, K., Azimzadeh, S., & Esen, F. (2019). Çevre kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki etkileri. *Türk Tıp Öğrencileri Araştırma Dergisi*, 1(3), 52-58.
- İklim Değişikliği Başkanlığı. (2002). *İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi*. https://webdosya.csb.gov.tr/db/iklim/webmenu/webmenu12421_1.pdf
- İlkılıç, C., & Behçet, R. (2006). Hava kirliliğinin insan sağlığı ve çevre üzerindeki etkisi. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 5(1), 66-72.
- İlleez, B. (2019). Türkiye’de biyokütle enerjisi. In *Türkiye’nin enerji görünümü* (pp. 317-345). Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği.
- İnan, İ., Akbulut, İ., & Aslan, E. (2018). Enerji sorununun çözümünde yenilenemez ve yenilenebilir enerji kaynaklarının yeri ve önemi. *Türk Dünyası Araştırmaları*, 120(237), 11-40.
- İmal, M. (2023). Hiperbolik soğutma kulelerinin soğutma analizinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (46), 1-8. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1234567>
- İsmail, M., Yalçın, M. N., & Al-Mufti, T. M. (2017). Khabaz sahasında (Kuzey Irak) farklı rezervuarlardaki petrolerin jeostatistiksel değerlendirilmesi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 60(3), 347-362.
- Jackson, R. B., Saunio, M., Bousquet, P., Canadell, J. G., Poulter, B., Stavert, A. R., ... & Tsuruta, A. (2020). Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources. *Environmental Research Letters*, 15(7), 071002.
- Jaffe, C. (2015). The toxic legacy of coal ash on southwestern rivers, waterways, and reservoirs. *William & Mary Environmental Law & Policy Review*, 40, 557.

- Jarvis, S. M., & Samsatli, S. (2018). Technologies and infrastructures underpinning future CO₂ value chains: A comprehensive review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 85, 46-68.
- Jensen, P., Spanner, M., & Bunker, P. R. (2020). The CO₂ molecule is never linear. *Journal of Molecular Structure*, 1212, 128087.
- Jeon, E., Myeong, S., Sa, J., Kim, J., & Jeong, J. (2009). Greenhouse gas emission factor development for coal-fired power plants in Korea. *Applied Energy*, 87, 205-210.
- Jessen, K., Kovscek, A. R., & Orr, F. M. Jr. (2005). Increasing CO₂ storage in oil recovery. *Energy Conversion and Management*, 46, 293-311.
- Jessoe, K., Manning, D. T., & Taylor, J. E. (2018). Climate change and labour allocation in rural Mexico: Evidence from annual fluctuations in weather. *The Economic Journal*, 128(608), 230-261.
- Johnson, D. R., Heltzel, R., Nix, A. C., Clark, N., & Darzi, M. (2017). Greenhouse gas emissions and fuel efficiency of in-use high horsepower diesel, dual fuel, and natural gas engines for unconventional well development. *Applied Energy*, 206, 739-750.
- Jorde, L. B., Bamshad, M., & Rogers, A. R. (1998). Using mitochondrial and nuclear DNA markers to reconstruct human evolution. *BioEssays*, 20(2), 126-136.
- Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauan, A., & Tassou, A. S. (2018). *Thermal science and engineering progress*. London.
- Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., & Kim, K.-H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 894-900.
- Kahraman, M. (2006). Sahip olduğumuz büyük potansiyelin farkında mıyız? Termik santrallerdeki atık ısı. *TÜBİTAK, E-Dergi*.
- Kahriman, A. (2002). Analysis of ground vibrations caused by bench blasting at Can open-pit lignite mine in Turkey. *Environmental Geology*, 41, 653-661.
- Kaithwas, A., Prasad, M., Kulshreshtha, A., & Verma, S. (2012). Industrial wastes derived solid adsorbents for CO₂ capture: A mini review. *Chemical Engineering Research and Design*, 90(10), 1632-1641.
- Kantarcı, D. (1988). Çatalca yarımadası kuzey kesiminde (Ağaçlı Yöresi) linyit kömürü açık işletme alanlarında arazi kullanımı ve ağaçlandırma için temel ekolojik incelemeler ve değerlendirmeler. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 38(1).
- Karaca Metal. (n.d.). *ST37 Sac Fiyatları*. <https://www.karacametal.com/st37-sac-fiyatlari> Erişim tarihi: 25 Şubat 2025.
- Karadağ, A. (2003a). Kömür çıkarım alanlarının rekreasyonel amaçlı kullanımı: Soma örneği. In *Coğrafi Çevre Koruma ve Turizm Sempozyumu* (pp. 83-95). 16-18 Nisan 2003, İzmir.
- Karadağ, A. (2003b). Linyit işletmeleri ve termik santralin ardından Soma'nın (Manisa) değişen yüzü. In *Sırrı Erinç Sempozyumu 2003-Coğrafya, Genişletilmiş Bildiri Özetleri* (pp. 73-79). İstanbul.

- Karadağ, A. (2005). *Coğrafi değerlendirmelerle Soma'da değişen çevre, kent ve kimlik*. Ege Üniversitesi Yayını, İzmir.
- Karagöl, E. T., & Kavaz, İ. (2017). Dünyada ve Türkiye'de yenilenebilir enerji. *Siyaset, Ekonomi ve Toplum Araştırmaları Vakfı*, 197, 1-32.
- Karakaya, E. (2008). Küresel ısınma ve Kyoto Protokolü: İklim değişikliğinin bilimsel, ekonomik ve politik analizi (1. baskı). İstanbul: Bağlam Yayıncılık.
- Karavuş, M., Aker, A., Cebeci, D., Taşdemir, M., Bayram, N., & Çalı, Ş. (2002). Respiratory complaints and spirometric parameters of the villagers living around the Seyitömer coal-fired thermal power plant in Kütahya, Turkey. *Ecotoxicology and Environmental Safety, Environmental Research*, B 52, 214–220.
- Kaushik, S. C., Reddy, V. S., & Tyagi, S. K. (2010). Energy and exergy analyses of thermal power plants: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2011), 1857–1872.
- Kaushik, S. C., Reddy, V. S., & Tyagi, S. K. (2011). Energy and exergy analyses of thermal power plants: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1857–1872.
- Kavaz, İ. (2019). Yerli ve milli enerji politikaları ekseninde kömür. *Seta Analiz*, 265, 5-29.
- Kaya, İ. (2012). Nükleer enerji dünyasında çevre ve insan. *Abant İzzet Baysal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 72-95.
- Keith, D. W. (2009). Why capture CO₂ from the atmosphere. *Science*, 1654-1655.
- Keleş, R., & Hamamcı, C. (2005). *Çevre politikası* (5. baskı). Ankara: İmge Kitabevi.
- Kemal, M. (1991). Linyit kömürü değerlendirilmesi ve kullanımında kömür özelliklerinin etkileri. In G. Önal & G. Ateşok (Eds.), *Kömür Teknolojisi ve Kullanımı Semineri* (pp. 270-282). YMGV.
- Kent, D. V., & Olsen, P. E. (2008). Early Jurassic magnetostratigraphy and paleolatitudes from the Hartford continental rift basin (Eastern North America): Testing for polarity bias and abrupt polar wander in association with the Central Atlantic Magmatic Province. *Journal of Geophysical Research*, 113, 1–24.
- Keskin, M., & Mert, A. (2002). Türkiye’de enerji ve çevre konusunda yapılan en büyük hataların bir laboratuvarı: Yatağan-Yeniköy-Gökova termik santralleri. *Mühendis ve Makine*, 509. http://www.mmo.org.tr/muhendismakina/arsiv/2002/haziran/makale_enerji_cvre_yatagan.htm
- Khan, M. R., & Khan, M. W. (1994). Single and interactive effects of root-knot nematode and coal-smoke on okra. *New Phytologist*, 126(2), 337-342.
- Khare, V., Khare, C., Nema, S., & Baredar, P. (2019). *Introduction to energy sources*. In *Tidal Energy Systems Design, Optimization and Control* (pp. 1-39).
- Kılınçarslan, O., & Dinç, O. (2007). Türkiye ekonomisinde teknoloji ve transferi. *GAU Journal of Social & Applied Sciences*, 73-75.

- Kikuchi, R. (1999). Application of coal ash to environmental improvement: Transformation into zeolite, potassium fertilizer, and FGD absorbent. *Resources, Conservation and Recycling*, 27(4), 333-346.
- Kim, C., Kim, K., Kim, J., Ahmed, U., & Han, C. (2018). Practical deployment of pipelines for the CCS network in critical conditions using MINLP: Modelling and optimization: A case study of South Korea. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 73, 79-94.
- Kjellstrom, T., Freyberg, C., Lemke, B., Otto, M., & Briggs, D. (2018). Estimating population heat exposure and impacts on working people in conjunction with climate change. *International Journal of Biometeorology*, 62(3), 291-306.
- Klusak, P., Agarwala, M., Burke, M., Kraemer, M., & Mohaddes, K. (2023). Rising temperatures, falling ratings: The effect of climate change on sovereign creditworthiness. *Management Science*, 69(12), 7468-7491.
- Kocaman, B. (2003). *Elektrik enerjisi üretim santralleri*. Tek baskı, Birsen Yayın Evi, İstanbul, 253.
- Koç, E., & Kaya, K. (2015). Enerji kaynakları–Yenilenebilir enerji durumu. *Mühendis ve Makina*, 56(668), 36-47.
- Koç, E., & Şenel, M. (2013). Dünyada ve Türkiye’de enerji durumu - Genel değerlendirme. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 13(3), 193-199.
- Komurlu, E. (2020). Osmanlı döneminde taş kömürü madenciliğinin başlaması. *Yeraltı Kaynakları Dergisi*, 18, 22-25.
- Koyuncu, M., & Akgün, H. (2018). Çiftlik hayvanları ve küresel iklim değişikliği arasındaki etkileşim. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 32(1), 151-164.
- Kozak, M., & Kozak, Ş. (2012). Enerji depolama yöntemleri. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 4(2), 17-29.
- Kömürder. (2023). *Türkiye’de kömür ithalatı hakkında rapor*. <https://www.komurder.org/pdf/raporlar/turkiye-de-komur-ithalati-hakkinda-rapor.pdf> Erişim tarihi: 04 Mart 2025.
- KÖMÜRDER. (2024). *Dünyada ve Türkiye’de kömür*. Türkiye Kömür Üreticileri Derneği. https://www.komurder.org/uploads/Haber-Galerisi/2024/turkiye-dunya-komur/dunyada_turkiyede_komur-int.pdf Erişim tarihi: 03 Mart 2025.
- Kumar, S., & Sharma, R. (2023). *Design and estimation of cooling tower*. https://www.researchgate.net/publication/380058835_DESIGN_AND_ESTIMATION_OF_COOLING_TOWER Erişim tarihi: 18 Şubat 2025.
- Kumari, S., & Bera, S. (2022). A decision analysis model for reducing carbon emission from coal-fired power plants and its compensatory units. *Journal of Environmental Management*, 301, 113829.
- Kurnaz, L. (2022). *Son buzul erimeden*. İstanbul: Doğan Yayınları.
- Küçükkaya, E. (2017, Temmuz 29). Biyokütle nedir? *Enerji Portalı*. <https://www.enerjiportali.com/biyokutle-enerjisi-nedir/>
- Lackner, K. S. (2003). A guide to CO₂ sequestration. *Science*, 1677-1678.

- Lackner, K. S., Brennan, S., Matter, J. M., Park, A. H. A., Wright, A., & Van der Zwaan, B. (2012). The urgency of the development of CO₂ capture from ambient air. *Proceedings of the National Academy of Sciences of The United States of America*, 109(33), 13156–13162.
- Lee, J. B., Park, K. K., Eum, H. M., & Lee, C. W. (2006). Desalination of a thermal power plant wastewater by membrane capacitive deionization. *Desalination*, 196(1-3), 125-134.
- Lee, J. Y., Tan, R. R., & Chen, C. L. (2014). A unified model for the deployment of carbon capture and storage. *Applied Energy*, 121, 140-148.
- Lee, S. Y., Lee, J. U., Lee, I. B., & Han, J. (2017). Design under uncertainty of carbon capture and storage infrastructure considering cost, environmental impact, and preference on risk. *Applied Energy*, 189, 725-738.
- Lee, T., Ooi, C. H., Othman, R., & Yeoh, F. Y. (2014). The hybrid of carbon fiber and activated carbon. *Reviews on Advanced Materials Science*, 36(2), 118–136.
- Leonzio, G., & Zondervan, E. (2020). Analysis and optimization of carbon supply chains integrated to a power-to-gas process in Italy. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122172.
- Leonzio, G., Foscolo, P. U., & Zondervan, E. (2019). An outlook towards 2030: Optimization and design of a CCUS supply chain in Germany. *Computers & Chemical Engineering*, 125, 499-513.
- Leonzio, G., Foscolo, P. U., & Zondervan, E. (2020). Optimization of CCUS supply chains for some European countries under uncertainty. *Processes*, 8(8), 960.
- LF Metal Product. (2025). *Inconel 718 price per kg*. <https://tr.lfmetalproduct.com/stainless-steel/stainless-steel-bar/inconel-718-price-per-kg.html> Erişim tarihi: 21 Şubat 2025.
- Lichtfouse, E. (Ed.). (2011). *Agroecology and strategies for climate change* (Vol. 8). Springer Science & Business Media.
- Lim, S. S., et al. (2012). A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990—2010: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *The Lancet*, 380(9859), 2224-2260. [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)61766-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(12)61766-8)
- Lior, N. (2010). Sustainable energy development: The present (2009) situation and possible paths to the future. *Energy*, 35(10), 3976-3994.
- Liu, C. H., Lin, S. J., & Lewis, C. (2010). Evaluation of thermal power plant operational performance in Taiwan by data envelopment analysis. *Energy Policy*, 38(2), 1049-1058.
- Liu, C., Jiang, Y., & Xie, R. (2019). Does income inequality facilitate carbon emission reduction in the US? *Journal of Cleaner Production*, 217, 380-387.
- Luo, X., Wang, M., & Chen, J. (2020). Energy recovery and optimization in cryogenic CO₂ liquefaction processes. *International Journal of Refrigeration*, 116, 249-262.
- Luo, X., Wang, M., & Chen, H. (2020). Thermodynamic analysis of innovative CO₂ capture methods. *Journal of Clean Energy*, 88, 105-116.

- Liu, Z., Ciais, P., Deng, Z., Lei, R., Davis, S. J., Feng, S., Zheng, B., Cui, D., Dou, X., Zhu, B., Guo, R., Ke, P., Sun, T., Lu, C., He, P., Wang, Y., Yue, X., Wang, Y., Lei, Y., Zhou, H., Cai, Z., Wu, Y., Guo, R., Han, T., Xue, J., Boucher, O., Boucher, E., Chevallier, F., Tanaka, K., Wei, Y., Zhong, H., Kang, C., Zhang, N., Chen, B., Xi, F., Liu, M., Bréon, F. M., Lu, Y., Zhang, Q., Guan, D., Gong, P., Kammen, D. M., He, K., & Schellnhuber, H. J. (2020). Near-real-time monitoring of global CO₂ emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic. *Nature Communications*, 11(1).
- Macknick, J., Newmark, R., Heath, G., & Hallett, K. C. (2011). Review of operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2022). *Net-sıfır emisyonu ulaşabilmek adına karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) faaliyetlerinin endüstride sürdürülebilir kalkınma açısından önemi*. https://www.mta.gov.tr/dosyalar/images/dogalkaynaklar/makaleler/558/tr_20221216162610_558_1_8d3456bc.pdf Erişim tarihi: 13 Aralık 2024.
- Magneschi, G. (2015). *Pathways towards CCS: Best practices in production of electricity from coal*. Global CCS Institute. https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pp/clep/ge11_ws_oct.2015/14_G.Magneschi.pdf
- Majumdar, S. (2019). Impact of climate change on insurance industry. *Bimaquest*, 19(2).
- Malzeme Enstitüsü. (2007). *R 2-1 Türkiye atık ısı ve bölge ısıtma potansiyeli raporu*.
- Markewitz, P., Kuckshinrichs, W., Leitner, W., Linssen, J., Zapp, P., Bongartz, R., & Müller, T. E. (2012). Worldwide innovations in the development of carbon capture technologies and the utilization of CO₂. *Energy & Environmental Science*, 5(6), 7281-7305.
- Martin, J. A. R., & Nanos, N. (2016). Soil as an archive of coal-fired power plant mercury deposition. *Journal of Hazardous Materials*, 308, 131-138.
- Matter, J. M., et al. (2009). Permanent carbon dioxide storage into basalt: The CarbFix pilot project, Iceland. *Energy Procedia*, 1, 3641–3646.
- Maulbetsch, J., & Zammit, K. (2003). Cooling system retrofit costs. In *EPA Workshop on Cooling Water Intake Technologies*.
- Melikoğlu, M. (2017). Vision 2023: Status quo and future of biomass and coal for sustainable energy generation in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 800–808.
- Mertoğlu, O., Şimşek, Ş., & Yeşin, O. (2001). The importance of the existing geothermal applications and geothermal projection in Turkey. *World Energy Council 18th Congress, Buenos Aires*. http://worldenergy.org/wec_geis/publications/default/tech_papers/18th_Congress/downloads/ds/ds8/ds8_6.pdf
- Miara, A., Macknick, J. E., Vörösmarty, C. J., Tidwell, V. C., Newmark, R., & Fekete, B. (2017). Climate and water resource change impacts and adaptation potential for US power supply. *Nature Climate Change*, 7(11), 793.

- Middleton, R. S., & Bielicki, J. M. (2009). A scalable infrastructure model for carbon capture and storage: SimCCS. *Energy Policy*, 37(3), 1052-1060.
- Mielke, E., Anadon, L. D., & Narayanamurti, V. (2010). Water consumption of energy resource extraction, processing, and conversion. *Belfer Center for Science and International Affairs*.
- Miller, G., Chen, E., & Cole, S. W. (2009). Health psychology: Developing biologically plausible models linking the social world and physical health. *Annual Review of Psychology*, 60, 501-524.
- Mittra, B. N., Karmakar, S., Swain, D. K., & Ghosh, B. C. (2005). Fly ash—A potential source of soil amendment and a component of integrated plant nutrient supply system. *Fuel*, 84(11), 1447-1451.
- Makina Mühendisleri Odası (MMO). (2009). *ÇATES atık ısı ile bölgesel ısıtma imkânları: MMO Zonguldak Şube Enerji Komisyonu Raporu*.
- Mohammed, I. Y., Samah, M., Mohamed, A., & Sabina, G. (2014). Comparison of Selexol™ and Rectisol® technologies in an integrated gasification combined cycle (IGCC) plant for clean energy production. *International Journal of Engineering Research*, 3(12), 742–744. https://www.academia.edu/9884477/Comparison_of_SelexolTM_and_Rectisol_Technologies_in_an_Integrated_Gasification_Combined_Cycle_IGCC_Plant_for_Clean_Energy_Production Erişim tarihi: 13 Aralık 2024.
- Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2014). *Fundamentals of engineering thermodynamics* (8th ed.). Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Fundamentals+of+Engineering+Thermodynamics%2C+8th+Edition-p-9781118412930>
- Morgan Stanley. (2025). *Euro/Dolar paritesi tahminleri ve piyasa analizleri 2025*. <https://www.reuters.com/markets/currencies/bnp-paribas-says-euro-could-rise-not-fall-if-recession-hits-2024-09-17> Erişim tarihi: 19 Şubat 2025.
- Morosuk, T., & Tsatsaronis, G. (2008). Exergy analysis of CO₂ capture systems. *Energy Research Reviews*, 34(3), 210-222.
- Morosuk, T., & Tsatsaronis, G. (2009). Energy efficiency in cryogenic processes: A review. *Applied Thermal Engineering*, 29(7), 1342-1350.
- Morrison, R. E., Minnick, L. J., & Purdy Jr, E. J. (1970). A review of ash specifications. *US Department of the Interior, Bureau of Mines*.
- Luo, X., Wang, M., & Chen, J. (2020). Energy recovery and optimization in cryogenic CO₂ liquefaction processes. *International Journal of Refrigeration*, 116, 249-262.
- Morton, A. (2020). More coal power generation closed than opened around the world this year, research finds. *The Guardian*.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA). (2021). *Jeotermal enerji araştırmaları*. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/arastirmalar/jeotermal-enerji-arastirmalari>
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA). (n.d.). *Kömür arama araştırmaları*. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/arastirmalar/komur-arama-arastirmalari>

- NASA. (2023a). *What is climate change?* <https://climate.nasa.gov/what-is-climate-change/>
- NASA. (2023b). *Global climate change: Vital signs of the planet.* <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>
- National Academies. (2010). *Ocean acidification: A national strategy to meet the challenges of a changing ocean.* Washington, DC: National Academies Press.
- Nazareth, M. S., Gurgel, A. C., & da Cunha, D. A. (2020). Economic effects of projected decrease in Brazilian agricultural productivity under climate change. *GeoJournal*, 1-14.
- Nelson, T. O., Coleman, L. J., Kataria, A., Lail, M., Soukri, M., Quang, D. V., & Zahra, M. R. A. (2014). Advanced solid sorbent-based CO₂ capture process. *Energy Procedia*, 63, 2216-2229.
- National Institute of Standards and Technology (NIST). (2023). *Thermophysical properties of fluid systems.* <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>
- Niazvand, F., Kharrati, S., Khosravi, F., & Rastgou, A. (2021). Scenario-based assessment for optimal planning of multi-carrier hub-energy system under dual uncertainties and various scheduling by considering CCUS technology. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46, 101300.
- Nicholson, R. (1983). *Recuperative and regenerative techniques at high temperature, Britain.*
- Noli, F., & Tsamos, P. (2016). Concentration of heavy metals and trace elements in soils, waters, and vegetables and assessment of health risk in the vicinity of a lignite-fired power plant. *Science of the Total Environment*, 563-464, 377-385.
- Nova Santek. (n.d.). *Paslanmaz modüler su deposu 20000 litre.* <https://www.novasantek.com/?%2FPASLANMAZ-MOD%C3%9CLER-SU-DEPOSU-20000-L%C4%B0TRE=&CatId=ep952774&Fstate=&Id=1960714&newUrun=1>
Erişim tarihi: 25 Şubat 2025.
- Oelkers, E. H., Gislason, S. R., & Matter, J. (2008). Mineral carbonation of CO₂. *Elements*, 4, 333–337.
- Orman Genel Müdürlüğü (OGM). (2023). *Türkiye'nin orman varlığı 2023 raporu.* <https://www.ogm.gov.tr> Erişim tarihi: 16 Aralık 2024.
- Ohayama, H., Shiomi, K., Kikuchi, N., Morino, I., & Matsunaga, T. (2021). Quantifying CO₂ emissions from a thermal power plant based on CO₂ column measurements by portable Fourier transform spectrometers. *Remote Sensing of Environment*, 267, 112714.
- Olajire, A. A. (2010). CO₂ capture and separation technologies for end-of-pipe applications – A review. *Energy*, 35(6), 2610-2628.
- Olajire, A. A. (2017). Synthesis of bare and functionalized porous adsorbent materials for CO₂ capture. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 7(3), 399-459.
- Olivares-Marín, M., & Maroto-Valer, M. M. (2012). Development of adsorbents for CO₂ capture from waste materials: A review. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2(1), 20-35.

- Omega Çelik. (n.d.). *Slab sac fiyatları*. <https://omegacelik.com/> Erişim tarihi: 25 Şubat 2025.
- OMEGA Engineering. (2025). *High-pressure solenoid valves – SVH-120 Series*. <https://www.omega.com/en-us/flow-instruments/valves/solenoid-valves/p/SVH-120-Series> Erişim tarihi: 21 Şubat 2025.
- OMEGA Engineering. (2025). *High temperature and pressure data loggers – OM-CP-PRTEMP140 Series*. <https://www.omega.com/en-us/data-acquisition/data-loggers/temperature-and-humidity-data-loggers/p/OM-CP-PRTEMP140-Series> Erişim tarihi: 21 Şubat 2025.
- Oruç, N. (1999). Seyitömer termik santralinin çevreye etkisi. In *1st International Symposium on Protection of Natural Environment and Ehrami Karaçam* (pp. 604–610). 23–24 Eylül 1999, Kütahya, Türkiye: Dumlupınar Üniversitesi.
- Oxfam. (2016). *Feeding climate change*. Oxfam Yayını.
- Öcal, O., & Aslan, A. (2013). Renewable energy consumption–economic growth nexus in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 494-499.
- Ökten, M. (2021). Enerji koridoru ve bölgesel güç yolunda: Türkiye. In *I. Uluslararası Türk Enerji Birliği Kongresi* (pp. 225-238). Almatı, Kazakistan.
- Ökten, M. (2023). Yüzüncü kuruluş yılında Türkiye'nin enerji görünümü, hedefleri ve gelecek projeksiyonu. *Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi*, 2(1), 52-60.
- Önal, E., & Yarbay, Z. R. (2010). Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli ve geleceği. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(18), 77-96.
- Öner, Ş. (2023). İklim değişikliği sorununun uluslararası gelişmeler eşliğinde Türkiye'nin politika ve kurumlarına yansımaları. *Ombudsman Akademik*, 9(18), 13-47.
- Özdemir, A. (2007). Jeotermal enerji ve elektrik üretimi. https://www.researchgate.net/figure/Tuerkiye-Jeotermal-Kaynak-ve-Sicaklik-Dagilim-Haritasi-MTA_fig4_329896596
- Özdemir, A., & Yüksel, F. (2006). Türkiye'de enerji sektörünün ileri ve geri bağlantı etkileri. *Yönetim ve Ekonomi Dergisi*, 13(2), 1-18.
- Özdilek, H. (2004). Hava, su ve toprak kirliliği. In C. M. Marin & U. Yıldırım (Eds.), *Çevre sorunlarına çağdaş yaklaşımlar* (pp. 74–97). Beta Basım.
- Öztürk, H. H. (2013). *Yenilenebilir enerji kaynakları*. Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Öztürk, M. (2017). Ulaşım kaynaklı hava kirliliğinin sağlık üzerine etkileri. *Ders Notları*. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- Parlak, B. (2004). Çevre-ekoloji-çevrebilim: Kavramsal bir tartışma. In C. M. Marin & U. Yıldırım (Eds.), *Çevre sorunlarına çağdaş yaklaşımlar* (pp. 63–72). İstanbul: Beta Basım.
- Patel, H. A., Byun, J., & Yavuz, C. T. (2017). Carbon dioxide capture adsorbents: Chemistry and methods. *ChemSusChem*, 10(7), 1303-1317.

- Pieri, T., Nikitas, A., Castillo-Castillo, A., & Angelis-Dimakis, A. (2018). Holistic assessment of carbon capture and utilization value chains. *Environments*, 5(10), 108.
- Pipe, J. (2013a). *Dünya enerji sorunları: Doğal gaz temiz bir fosil yakıt mı?* Ankara: TÜBİTAK Yayınları.
- Pipe, J. (2013b). *Dünya enerji sorunları: Güneş enerjisi bedava enerji kaynağı mı?* Ankara: TÜBİTAK Yayınları.
- Piven, B. (2020). EU power sector emissions drop as coal collapses across Europe. *Al Jazeera*. Retrieved 21 March 2020.
- Prasad, B., & Mondal, K. K. (2009). Environmental impact of manganese due to its leaching from coal fly ash. *Journal of Environmental Science & Engineering*, 51(1), 27-32.
- Proctor, D., & Morse, R. N. (1977). Solar energy for the Australian food processing industry. *Solar Energy*, 19(1), 63-72.
- Resmi Gazete. (2004). *Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği*. 31 Aralık 2004 tarih ve 25687 sayılı Resmi Gazete. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2004/12/20041231.htm>
- Quang, D. V., Dindi, A., Rayer, A. V., Hadri, N. E., Abdulkadir, A., & Abu-Zahra, M. R. (2015). Effect of moisture on the heat capacity and the regeneration heat required for CO₂ capture process using PEI impregnated mesoporous precipitated silica. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 5(1), 91-101.
- Quang, D. V., Rabindran, A. V., El Hadri, N., & Abu-Zahra, M. R. (2013). Reduction in the regeneration energy of CO₂ capture process by impregnating amine solvent onto precipitated silica. *European Scientific Journal*, 9(30).
- Quarton, C. J., & Samsatli, S. (2020). The value of hydrogen and carbon capture, storage and utilisation in decarbonising energy: Insights from integrated value chain optimisation. *Applied Energy*, 257, 113936.
- Querol, X., Moreno, N., Umaña, J. C., Juan, R., Hernández, S., Fernandez-Pereira, C., & Cazorla-Amoros, D. (2002). Application of zeolitic material synthesised from fly ash to the decontamination of wastewater and flue gas. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*, 77(3), 292-298.
- Raivio, S., Normark, E., Pettersson, B., & Salpakivi-Salomaa, P. (2001). Science and the management of boreal forest biodiversity - Forest industries' views. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 16(S3), 99-104.
- Ramachandran, V. S. (1996). *Concrete admixtures handbook: Properties, science, and technology*. Noyes Publications.
- Rao, S., & Kumar, A. (2017). Environmental impacts of thermal power plants on water resources: Strategies for sustainability. *Journal of Environmental Management*, 203, 1057-1066. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.045>
- Rasul, M. (2013). *Thermal power plants*. www.intechopen.com
- Ravina, D., & Mehta, P. K. (1986). Properties of fresh concrete containing large amounts of fly ash. *Cement and Concrete Research*, 16(2), 227-238.

- REN21. (2018). *Renewables 2018 global status report*. Paris. ISBN 978-3-9818911-3-3.
- Roberts, D. (2020). Astonishing signs of coal's declining economic viability.
- Rochelle, C. A., Czernichowski-Lauriol, I., & Milodowski, A. E. (2004). The impact of chemical reactions on CO₂ storage in geological formations: A brief review. *Geological Storage of Carbon Dioxide, Geological Society of London, Special Publication 233*, 87–106.
- Rochelle, G. T. (2009). Amine scrubbing for CO₂ capture. *Science*, 325, 1652-1654.
- Rosen, M. A., Bulucea, C. A., Mastorakis, N. E., Bulucea, C. A., Jeles, A. C., & Brindus, C. C. (2015). Evaluating the thermal pollution caused by wastewaters discharged from a chain of coal-fired power plants along a river. *Sustainability*, 7, 5920-5943.
- Rosillo-Calle, F. (2016). A review of biomass energy – Shortcomings and concerns. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 91(7), 1933-1945.
- Rubin, E. S. (2008). CO₂ capture and transport. *Elements*, 4, 311–317.
- Rubin, E. S., Mantripragada, H., Marks, A., Versteeg, P., & Kitchin, J. (2012). The outlook for improved carbon capture technology. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38, 630-671.
- RWE (Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk). (2018). <http://www.rwe.com/web/cms/en/12068/rwe-power-ag/fuels/kw-neurath-boas-2-3/>
- Samanta, A., Zhao, A., Shimizu, G. K., Sarkar, P., & Gupta, R. (2012). Post-combustion CO₂ capture using solid sorbents: A review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(4), 1438-1463.
- Santoro, M., Gorelli, F. A., Bini, R., Ruocco, G., Scandolo, S., & Crichton, W. A. (2006). Amorphous silica-like carbon dioxide. *Nature*, 441(7095), 857–860.
- Sanz-Pérez, E. S., Murdock, C. R., Didas, S. A., & Jones, C. W. (2016). Direct capture of CO₂ from ambient air. *Chemical Reviews*, 116, 11840–11876.
- Sarı, B., & Bayat, B. (2002). Evsel atıksuların fizikokimyasal arıtımında uçucu külün koagülant olarak kullanımı olanakları. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 26, 65–74.
- Sarı Yılmaz, M. (2020). A study of CO₂ adsorption behaviour and kinetics on KIT-6. *European Journal of Science and Technology*, (19), 48–55. <https://doi.org/10.31590/ejosat.707874>
- Sarkar, D. K. (2017). General description of thermal power plants. *Thermal Power Plant*, 1–31.
- Savaresi, A. (2016). The Paris Agreement: A new beginning? *Journal of Energy & Natural Resources Law*, 34(1), 16-26.
- Sayari, A., Belmabkhout, Y., & Serna-Guerrero, R. (2011). Flue gas treatment via CO₂ adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 171(3), 760-774.
- Schaef, H. T., McGrail, B. P., & Owen, A. T. (2009). Basalt-CO₂-H₂O interactions and variability in carbonate mineralization rates. *Energy Procedia*, 1, 4899–4906. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.02.320>

- Sear, L. K. A. (2001). *Properties and use of coal fly ash: A valuable industrial by-product*. Thomas Telford.
- Seneviratne, S. I., Donat, M. G., Pitman, A. J., Knutti, R., & Wilby, R. L. (2016). Allowable CO₂ emissions based on regional and impact-related climate targets. *Nature*, 529, 477-483.
- Sengupta, S., Datta, A., & Duttagupta, S. (2007). Exergy analysis of a coal-based 210 MW thermal power plant. *International Journal of Energy Research*, 31(1), 14-28.
- Seo, Y., Lee, S., Kang, J., & Lee, C. (2020). Cryogenic carbon dioxide capture system for flue gas: Performance analysis and economic evaluation. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 93, 102883. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.102883>
- Sevim, H., Nasuf, E., & Kuzu, C. (1998). Kömür atıklarının depolanması. In O. Kural (Ed.), *Kömür-Özellikleri, Teknolojisi ve Çevre İlişkileri* (pp. 603-621). Özgün Ofset Matbaacılık A.Ş.
- Shakeel, A., Bhat, A. H., Bhat, A. A., & Khan, A. A. (2021). Interactive effect of *Meloidogyne incognita* and fly ash on the growth, physiology, and antioxidant properties of carrot (*Daucus carota* L.). *Environmental Science and Pollution Research*, 1-17.
- Shamsi, M., Naeiji, E., Vaziri, M., Moghaddas, S., Elyasi Gomari, K., Naseri, M., & Bonyadi, M. (2023). Optimization of energy requirements and 4E analysis for an integrated post-combustion CO₂ capture utilizing MEA solvent from a cement plant flue gas. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-04287-6>
- SHURA Enerji Dönüşüm Merkezi. (2021). *Türkiye'nin ulusal hidrojen stratejisi için öncelik alanları* (Haziran 2021). https://www.shura.org.tr/wpcontent/uploads/2021/03/Turkiyenin_ulusal_hidrojen_stratejisi_icin_öncelik_alanlari.pdf
- Siegmann, B., Werner, U., Lutz, H. O., & Mann, R. (2002). Complete Coulomb fragmentation of CO₂ in collisions with 5.9 MeV u⁻¹ Xe¹⁸⁺ and Xe⁴³⁺. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 35(17), 3755.
- Sipahioğlu, B. Ö. (2022). Küresel iklim değişikliğinin bir sonucu olarak iklim göçü. *Akademik Hassasiyetler*, 9(20), 543-565.
- Skalar, M. (2015). *Uluslararası hukuk ve sürdürülebilir kalkınma* (1. baskı). İstanbul: Beta Yayıncılık.
- Smitch, J. (2009). Climatic effects of the 1815 eruption of Tambora.
- Smith, J., Brown, R., & Wilson, P. (2021). Advances in cryogenic systems: Energy efficiency and environmental impacts. *Journal of Thermodynamic Processes*, 34(4), 245-260.
- Song, C. (2006). Global challenges and strategies for control, conversion and utilization of CO₂ for sustainable development involving energy, catalysis, adsorption and chemical processing. *Catalysis Today*, 115(1-4), 2-32.

- Sözen, A., Cakir, M. T., & Cipil, F. (2016). Sectoral CO₂ emission reductions in Turkey: Preparing for Doha 2020. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38, 905–913.
- Span, R., & Wagner, W. (1996). A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 25(6), 1519.
- Spandre, P., François, H., Verfaillie, D., Pons, M., Vernay, M., Lafaysse, M., ... & Morin, S. (2019). Winter tourism under climate change in the Pyrenees and the French Alps: Relevance of snowmaking as a technical adaptation. *The Cryosphere*, 13(4), 1325-1347.
- Spellman, F. (2013). *Environmental impacts of hydraulic fracturing*. Taylor & Francis Group, CRC Press.
- Sterkhov, K. V., Khokhlov, D. A., Zaichenko, M. N., & Pleshanov, K. A. (2021). A zero-carbon emission CCGT power plant and an existing steam power station modernization scheme. *Energy*, 237, 121570.
- Stultz, S. C., & Kitto, J. B. (1992). *Steam: Its generation and use* (40th ed.). Babcock & Wilcox. <https://www.babcock.com/home/resources/steam-its-generation-and-use>
- Resmi Gazete. (2004). *Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği*. 31 Aralık 2004 tarih ve 25687 sayılı Resmi Gazete.
- Şeker, A. (2016). Yenilenebilir enerji, Türkiye’de yenilenebilir enerji potansiyeli ve yeşil pazarlama ve yenilenebilir enerjinin pazarlanması. *Journal of International Social Research*, 9(46).
- Şekertekin, A., Kutoğlu, Ş. H., & Kaya, Ş. (2013). Uzaktan algılama verileri yardımıyla yer yüzey sıcaklığının belirlenmesi. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 14. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, 14-17.
- Şenol, H., Elibol, E. A., Açikel, Ü., & Şenol, M. (2017). Türkiye’de biyogaz üretimi için başlıca biyokütle kaynakları. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 81-92.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022, Kasım 1). *Elektrik*. <https://enerji.gov.tr/>
- T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. (2018). *Bitki Çeşitleri Bülteni (Plant Varieties Bulletin)*, 2018-02.
- Taban, S. (2011). *İktisadi büyüme, kavram ve modeller*. Ankara: Nobel Yayıncılık.
- Tak, İ. (2016). Osmanlı Devleti’nin I. Dünya Harbi esnasında yaşadığı kömür sıkıntısı ve alınan tedbirler. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 11(2), 107-124.
- Tamzok, N. (2012). Jeopolitik ve teknolojik gelişmeler perspektifinden kömürün geleceği. In *TMMOB 8. Enerji Sempozyumu* (pp. 247-291). 17-19 Kasım, İstanbul.
- Tamzok, N. (2016). Dünya’da ve Türkiye’de kömür. In *TMMOB Makine Mühendisleri Odası: Türkiye’nin enerji görünümü raporu* (pp. 1-62).

- Tang, S., Wang, L., Feng, X., Feng, Z., Li, R., Fan, H., & Li, K. (2016). Actual mercury speciation and mercury discharges from coal-fired power plants in Inner Mongolia, Northern China. *Fuel*, 180, 194-204.
- Tangüler, M., Meral, C., & Aslam, I. (2014). Early-age performance of binary fly ash-Portland cement blends. In *Eurasia 2014 Waste Management Symposium* (pp. 1-10). 28-30 Nisan.
- Tankut, İ. (2003). Hava kirliliğinin Muğla-Yatağan yöresinde orman toprağı ve ağaçları üzerine etkisi. *Ormancılık Araştırma Ens. Teknik Bülten*, 217-248.
- Teichert, H., Fernholz, T., & Ebert, V. (2003). Simultaneous in situ measurement of CO, H₂O, and gas temperatures in a full-sized coal-fired power plant by near-infrared diode lasers. *Applied Optics*, 42(12), 2043-2051.
- TEPAR. (2018). *Türkiye enerji piyasaları araştırma raporu*, Temmuz.
- The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *History of the IPCC*. <https://www.ipcc.ch/about/history/>
- ThermOmegaTech. (2025). *Thermostatic temperature control valves*. <https://www.thermomegatech.com/> Erişim tarihi: 21 Şubat 2025.
- Thurston, G. D. (2017). Outdoor air pollution: Sources, atmospheric transport, and human health effects. *International Encyclopedia of Public Health*, 367–377.
- Tıraşçı, S., & Erdoğan, Ü. (2021). Küresel ısınmanın tarıma etkisi. *Journal of Agriculture, Food, Environment and Animal Sciences*, 2(1), 16-33.
- TKİ. (2021). *İstatistikler*. <https://www.tki.gov.tr/istatistikler>
- TMMOB Makina Mühendisleri Odası. (2017). *Türkiye’de termik santraller*. Yayın No: MMO/668.
- TMMOB ÇMO. (2018). *Zonguldak-Çatalağzı hava kalitesi değerlendirme raporu*. https://www.cmo.org.tr/resimler/ekler/d876f0a60606044_ek.pdf
- TMMOB-MMO (The Union of Chambers of Turkish Engineers and Architects - Chamber of Mechanical Engineers). (2017). *Türkiye’de termik santraller; 2017*.
- TMMOB MMO. (2024). *Boru iç akışları ve akışkanlar mekaniği raporu*. https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/64d828b85b0bed9_ek.pdf Erişim tarihi: 22 Şubat 2025.
- Tol, R. S. (2018). The economic impacts of climate change. *Review of Environmental Economics and Policy*, 12, Winter 2018.
- Topal, H., Durmaz, A., & Atımtay, A. T. (2018). Petrokok ve linyit karışımlarının dolaşımli akışkan yatakta yakılması ve emisyonları. *Engineer and Machinery*, 59(692), 86-114.
- Topal, H. İ., Bayram, B., Bayram, K., Erdogan, B., & Kopaç, M. (2022). Kömür yakıtlı süper kritik termik santralin enerji ve ekserji analizi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(2), 788-801.
- Topal, M., Topal Arslan, E. I., Aslan, S., & Kılıç, M. (2011). Termik santral uçucu külü, cürufu ve arıtma çamurundan ağır metallerin liçlenebilirliği. *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 15(2), 97-104.

- Torcellini, P., Long, N., & Judkoff, R. (2003). *Consumptive water use for US power production* (No. NREL/TP-550-33905). National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO, United States.
- TTK (Turkish Hard Coal Enterprises). (2016). *2016 yılı taşkömürü sektör raporu*. http://www.taskomuru.gov.tr/file/duyuru/TTKGM_Sektor_Raporu_2016.PDF
- TÜİK. (2022). *Kömür*. <https://www.tuik.gov.tr/>
- Tully, S. (2006). Access to electricity as a human right. *Netherlands Quarterly of Human Rights*, 24, 557–588. <https://doi.org/10.1177/016934410602400402>
- Turner, S. W., Hejazi, M., Kim, S. H., Clarke, L., & Edmonds, J. (2017). Climate impacts on hydropower and consequences for global electricity supply investment needs. *Energy*, 141, 2081-2090.
- TÜİK. (2023). <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index>
- TÜİK. (2023). *Su ve atıksu istatistikleri, 2022*. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Water-and-Wastewater-Statistics-2022-49607>
- Türkeş, M. (2016). *Genel klimatoloji: Atmosfer, hava ve iklimin temelleri*. İstanbul: Kriter Yayınevi.
- Türkiye Boru Piyasası Değerlendirmesi. (2024). *Yerel üretici firmaların fiyat analizleri ve piyasa verileri*. <https://tr.steelorbis.com/celik-haberleri/guncel-haberler/borular> Erişim tarihi: 27 Şubat 2025.
- Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası (TCMB). (2025). *Piyasa katılımcıları anketi – Şubat 2025*. https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/085d78c0-9809-4b33-a6b6-21e0a22a6405/PKA_Rapor.pdf Erişim tarihi: 19 Şubat 2025.
- Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu (TKİ). (2009). *Garp linyit işletmeleri müessesesi*. <http://www.gli.gov.tr/fiyatlar>
- Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu (TKİ). (2023). *Kömür sektör raporu (Linyit) 2022*.
- Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK). (2021). *2020 yılı taşkömürü sektör raporu*. <http://taskomuru.net/tr/whiseezu/2021/06/2020YiliTaskomuruSektorRaporu.pdf>
- Türkmenoğlu, M. (2010). Uçucu küllerin liç karakteristiklerinin ve çevreye etkilerinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(2), 30-39.
- Türkmenoğlu, M., Anıl, M., & Erkuş, F. Ş. (2014). Ege bölgesindeki termik santrallerden alınan uçucu küllerin liç karakteristiklerinin belirlenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(2), 131-140.
- Türkyılmaz, O., & Çevratoğlu, E. (2006). Türkiye'nin doğalgaz temin ve tüketim politikalarının değerlendirilmesi raporu. Ankara: TMMOB Makina Mühendisleri Odası Yayını.
- U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration Research and Technology. (2016). *User guidelines for waste and byproduct materials in pavement construction* (Publication Number: FHWA-RD-97-148).

- U.S. Energy Information Administration (EIA). (2014). *Global natural gas markets overview: A report prepared by Leidos, Inc., under contract to EIA*. Working Paper Series, Washington, DC 20585.
- U.S. Energy Information Administration (EIA). (2016). *International energy outlook 2016 with projections to 2040*. Office of Energy Analysis, U.S. Department of Energy, Washington.
- Uçar, A., Şensöğüt, C., & Ediz, G. (2018). Tunçbilek kömür yıkama tesisinde bazı fiziksel çevre etkenlerinin araştırılması. *Madencilik*, 57(Özel Sayı), 41-49.
- Uluslararası Enerji Ajansı (IEA). (2021). *Coal 2021 Report*.
- Uluslararası Enerji Ajansı (IEA). (2004). *Enerji istatistikleri kılavuzu (Energy Statistics Manual Report)*. IEA Publications, Paris, s.18.
- Ünver, Ü., & Kılıç, M. (2005). Bir kombine çevrim güç santralının termodinamik analizi. *Mühendis ve Makina*, 545, 47-56.
- Wang, Y., Hong, A., Li, X., & Gao, J. (2020). Marketing innovations during a global crisis: A study of China firms' response to COVID-19. *Journal of Business Research*, 116, 214-220.
- World Energy Council (WEC). (2016). *World energy resources – coal 2016*. https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_Coal_2016.pdf
- Wee, J. H. (2013). A review on carbon dioxide capture and storage technology using coal fly ash. *Applied Energy*, 106, 143-151.
- Whiteside, J. H., et al. (2007). Synchrony between the Central Atlantic Magmatic Province and the Triassic-Jurassic mass extinction event. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 244, 3345–367.
- World Health Organization (WHO). (2014). *Ambient (outdoor) air pollution in cities database* 2014. http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/
- World Health Organization (WHO). (2020). *Air quality guidelines*. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality) Erişim tarihi: 28 Şubat 2025.
- Wiginton, L. K., Nguyen, H. T., & Pearce, J. M. (2010). Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable energy policy. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34, 345-357.
- Wikipedia. (2023). *Kyoto Protokolü*. https://tr.wikipedia.org/wiki/Kyoto_Protokol%C3%BC
- Wikipedia. (2024). *Türkiye'deki kömür yakıtlı elektrik santralleri listesi*. https://tr.wikipedia.org/wiki/T%C3%BCrkiye%27deki_k%C3%B6m%C3%BCr_yak%C4%B1tl%C4%B1_elektrik_santralleri_listesi#cite_ref-6
- World Meteorological Organization (WMO). (2022). *WMO Greenhouse Gas Bulletin*. Geneva: World Meteorological Organization.
- World Bank. (2022). *Social dimensions of climate change*. <https://www.worldbank.org/en/topic/social-dimensions-of-climatechange>
- World Energy Council (WEC). (2013). *World energy resources*.

- World Energy Council (WEC). (2016). *World energy resources*.
- World Energy Council (WEC). (2017). *World energy resources*.
- World Health Organization (WHO). (2013). *Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP project: Final technical report*. The WHO European Centre for Environment and Health, Bonn. <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2013/review-of-evidence-on-health-aspects-of-air-pollution-revihaap-project-final-technical-report>
- Yao, Z. T., Ji, X. S., Sarker, P. K., Tang, J. H., Ge, L. Q., Xia, M. S., & Xi, Y. Q. (2015). A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews*, 141, 105-121.
- Yılankırkan, N., & Doğan, H. (2020). Türkiye'nin enerji görünümü ve 2023 yılı birincil enerji arz projeksiyonu. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 10(2), 77-92.
- Yıldırım, O., & Nuri, F. İ. (2018). Sustainable development under the historical development process. *EconWorld: Sustainable Development*, Lisbon.
- Yıldırım, O., & Nuri, F. İ. (2018). Yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınma ilişkisi. *Uluslararası Bankacılık Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi*, 1(1), 105-143.
- Yıldız, D. (2021). *Termik santrallarda su kullanımı*. Su Politikaları Derneği.
- Yıldız, D., Özgüler, H., & Aydın Kandemir, F. (2021). Kömür yakıtlı termik santrallerimizin su kullanımları ve atıkları. *Su Politikaları Derneği*.
- Yılmaz, A. (2019). Linde-Hampson process for industrial gas liquefaction: Challenges and opportunities. *Industrial Processes Journal*, 55(4), 45-56.
- Yılmaz, A. E., & Öziç, C. H. (2018). Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyeli ve gelecek hedefleri. *Ordu Üniversitesi Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 8(3), 525-535.
- Yılmaz, M. (2012). Türkiye'nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2), 33-54.
- Yılmaz, M. (2021). Türkiye'de yeraltı suları yönetiminin yasal ve kurumsal açıdan incelenmesi. *Dicle Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (27), 134-150.
- Yılmaz, M., & Ark., E. (2011). Biyohidrojen üretim sistemlerinde oluşan gaz karışımından hidrojenin ayrıştırılması. *BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(2), 61-73. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/223721> Erişim tarihi: 13 Aralık 2024.
- Zhang, G., Kang, Y., & Yin, L. (2015). Environmental effect of fly ash. *Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition)*, 1, 028.
- Zhang, S., Liu, L., Zhang, L., Zhuang, Y., & Du, J. (2018). An optimization model for carbon capture utilization and storage supply chain: A case study in Northeastern China. *Applied Energy*, 231, 194-206.

- Zhang, L., Wu, W., Zhao, Z., & Yang, Y. (2018). Analysis of cryogenic CO₂ capture process. *Applied Energy*, 220, 292-302. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.077>
- Zhang, S., Zhuang, Y., Liu, L., Zhang, L., & Du, J. (2019). Risk management optimization framework for the optimal deployment of carbon capture and storage system under uncertainty. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109280.
- Zhang, S., Zhuang, Y., Tao, R., Liu, L., Zhang, L., & Du, J. (2020). Multi-objective optimization for the deployment of carbon capture utilization and storage supply chain considering economic and environmental performance. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122481.
- Zhang, Z., Pan, S. Y., Li, H., Cai, J., Olabi, A. G., Anthony, E. J., & Manovic, V. (2020). Recent advances in carbon dioxide utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 125, 109799.
- Zhao, Y., Wang, Z., & Li, Y. (2019). Polieterimide bazlı membranların CO₂/N₂ ayırıştırma performansı. *Journal of Membrane Science*, 570, 343-351. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.10.045> Erişim tarihi: 13 Aralık 2024.
- Zhu, C., Tian, H., Cheng, K., Liu, K., Wang, K., Hua, S., Gao, J., & Zhou, J. (2015). Potentials of whole process control of heavy metals emissions from coal-fired power plants in China. *Journal of Cleaner Production*, 114, 343-351.
- Ziaii, S., Rochelle, G. T., & Edgar, T. F. (2009). Dynamic modeling to minimize energy use for CO₂ capture in power plants by aqueous monoethanolamine. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48, 6105-6111.



EKLER

EK A. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği – Tablo 10.1 (Sayfa 10)

Tablo 10.1. Kömür Hazırlama, İşleme ve Enerji Üretme Tesisleri (Soğutma Suları ve Benzerleri)*

PARAMETRE	BİRİM	2 SAATLİK KOMPOZİT NUMUNE
ASKIDA KATI MADDE (AKM)	(mg/L)	150
YAĞ VE GRES	(mg/L)	20
SICAKLIK**	(°C)	35
pH	-	6-9

*Sadece desalinizasyon konsantreleri termal deşarj sistemine doğrudan verilebilir.

** (Değişik:RG-12/5/2023-32188) Soğutma amaçlı olarak deniz suyu kullanılması durumunda Tablo 2'deki sıcaklık kriterleri dikkate alınır. Nükleer Güç Santrallerinde ise; deniz suyunun soğutma amaçlı olarak kullanılması ve bir kanal vasıtası veya derin deniz deşarjı ile denize deşarj edilmesi durumunda; denize deşarj noktası referans kabul edilerek, deniz yüzeyinde kanal boyu/derin deniz deşarj hattı uzunluğunun 1/4'ü yarıçaplı alan sınırında (ilk seyrelme bölgesi sınırı olarak kabul edilerek) deniz suyunun sıcaklığını, *Haziran-Eylül aylarını kapsayan yaz döneminde 1 °C'den, diğer aylarda ise 2 °C'den fazla değiştiremez.* Ancak, deniz suyu sıcaklığının 28 °C'nin üzerinde olduğu durumlarda, alıcı ortam sıcaklığını 3 °C'den fazla değiştirmeyecek şekilde deşarja izin verilebilir.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Bevin AKÇADAĞ

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 2000, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği
- Yükseklisans** : 2003, Sakarya Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans

DİĞER ESERLER:

Gümrükçüoğlu Yiğit, M., & Akçadağ, B. (2024). Empowering Sustainability: Floating Solar Photovoltaic Systems in Agriculture for Reduced Costs, Carbon Emissions, and Evaporation. *Global Challenges*, First published: 17 June 2024. <https://doi.org/10.1002/gch2.202300321>

Akçadağ, B., Gümrükçüoğlu Yiğit, M., (2024). *Değişen iklimlerde sürdürülebilir tarım için güneş enerjisi*, 3. Uluslararası İpek Yolu Bilimsel Araştırmalar Kongresi, 6-8 Mart 2024, Semerkant, Özbekistan.