

**LİNYİT YAKITLI PİLOT TERMİK SANTRAL İÇİN BACA
GAZI EMİSYON AZALTMA SEÇENEKLERİNİN YAŞAM
DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ**

**LIFE CYCLE ASSESSMENT OF FLUE GAS EMISSION
REDUCTION OPTIONS FOR LIGNITE BASED PILOT
THERMAL POWER PLANT**

EKİN TAŞKIN

YRD. DOÇ. DR. HATİCE ŞENGÜL
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2018

EKİN TAŞKIN'ın hazırladığı “**Linyit Yakıtlı Pilot Termik Santral İçin Baca Gazı Emisyon Azaltma Seçeneklerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Gülen GÜLLÜ
Başkan



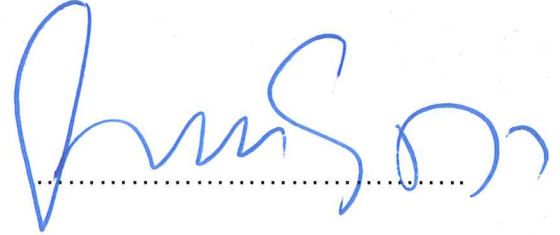
Yrd. Doç. Dr. Hatice ŞENGÜL
Danışman



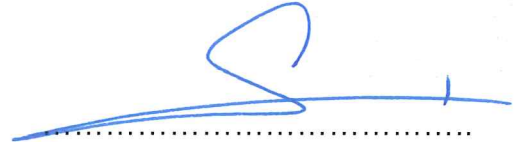
Doç. Dr. Merih AYDINALP KÖKSAL
Üye



Doç. Dr. Selim L. SANIN
Üye



Doç. Dr. Sibel MENTEŞE
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezinin / ~~raporunun~~ tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezinin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezinin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- o Enstitü/Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezinin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir. ⁽¹⁾
- o Enstitü/Fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile tezinin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren Ay ertelenmiştir. ⁽²⁾
- o Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir. ⁽³⁾

06 / 09 / 2018

Ekin TAŞKIN

“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”

- (1) Madde 6. 1. Lisansüstü teze ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir
- (2) Madde 6. 2. Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internetten paylaşılması durumunda 3. Şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü ve fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.
- (3) Madde 7. 1. Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, tezin yapıldığı kurum tarafından verilir*. Kurum ve kuruluşlarla yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, ilgili kurum ve kuruluşun önerisi ile enstitü veya fakültenin uygun görüşü üzerine üniversite yönetim kurulu tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir.
Madde 7. 2. Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.

* Tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu tarafından karar verilir.

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

06/09/2018



Ekin TAŞKIN

ÖZET

LİNYİT YAKITLI PİLOT TERMİK SANTRAL İÇİN BACA GAZI EMİSYON AZALTMA SEÇENEKLERİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

Ekin TAŞKIN

Yüksek Lisans, Çevre Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Hatice ŞENGÜL

Eylül 2018, 120 sayfa

Büyüyen dünya ekonomisi, nüfus artışı, sanayileşme ve kentleşme nedeniyle, doğal kaynaklara ve enerjiye olan talebi önemli ölçüde artmaktadır. Ülkemizde önemli yerli kaynaklardan biri olan linyit kömürü kullanımının, diğer fosil bazlı enerji kaynakları içerisinde devamlı ve güvenilir rolünü sürdürebilmesi için potansiyel çevresel etkilerinin azaltılması gerekmektedir.

Bu çalışmada, linyit yakıtlı pilot bir termik santralin elektrik üretim aşamasının yaşam döngüsünü değerlendirmek için GaBi Education yazılımı ile CML 2001 etki değerlendirme metodu kullanılarak çevresel etki potansiyelleri altı kategoride değerlendirilmiştir. 1 kWsaat elektrik üretimi için; küresel ısınma potansiyeli (KIP) 1,81 kg CO₂ eşdeğeri, asidifikasyon potansiyeli (AP) 3,98 g SO₂ eşdeğeri, ötrofikasyon potansiyeli (ÖP) 0,32 g fosfat eşdeğeri, fosil kaynaklar için abiyotik bozundurma potansiyeli (ABPfosil) 11,6 MJ, insan toksisite potansiyeli (İTP) 30,2 g DCB eşdeğeri, fotokimyasal ozon oluşturma potansiyeli (FOOP) 0,18 g etilen eşdeğeri ve bulunmuştur.

Pilot termik santralden kaynaklanan baca gazında bulunan SO₂ miktarının azaltılmasına yönelik olası üç iyileştirme seçeneğinin etkileri ne düzeyde değiştireceği belirlenmiştir. GaBi YDD yazılımı ile yapılan sistem analizi sonuçlarına göre; 1. Seçenek olan "baca gazı desülfürizasyon ünitelerinin iyileştirilmesi ile baca gazı SO₂ emisyonu konsantrasyonunun %50 azaltılması"

sonucu AP’de %27 ve FOOP’de %24 azaltım belirlenmiştir. 2. Seçenek olan “baca gazı desülfürizasyon sistemi öncesi kuru sorbent enjeksiyonu prosesinin eklenmesi” ile AP’de %94, ÖP’de %22 ve FOOP’de %31 azaltma sağlanırken KIP’ta kuru sorbent olarak sodyum bikarbonat kullanımına bağlı olarak %3 artış olacağı tespit edilmiştir. 3. Seçenek olan “kritikaltı pulverize kömür yakma sistemi yerine akışkan yatak teknolojisinin adaptasyonu” ile mevcut tesiste bulunan kazanlarla eşdeğer üretim kapasitesine sahip akışkan yataklı kazanlar için tam kapasite çalışma ile yakılan linyit miktarının azalmasına bağlı olarak ABP’de %23 ve KIP’de %19, emisyon değerlerinin düşüşü sonucu AP’de %94, İTP’de %2 ve FOOP’de %36 azaltım sağlanmıştır. Linyitin gelecekte enerji kaynakları arasında yerini koruması için bu tez kapsamında belirlenen ve diğer olası iyileştirme alternatiflerine geçişinin sağlanması için ilgili politika ve programların geliştirilmesi gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: linyit kömürü, elektrik üretimi, termik santral, pulverize kömür yakma sistemi, yaşam döngüsü değerlendirme, küresel ısınma potansiyeli, asidifikasyon potansiyeli, baca gazı emisyon azaltımı.

ABSTRACT

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF FLUE GAS EMISSION REDUCTION OPTIONS FOR LIGNITE COAL BASED PILOT THERMAL POWER PLANT

Ekin TAŞKIN

Master of Science, Department of Environmental Engineering

Supervisor: Ass. Prof. Dr. Hatice ŞENGÜL

September 2018, 120 pages

Due to the growing world economy, population growth, increasing industrialization and urbanization, demand for natural resources and energy are significantly increasing. Potential environmental impacts of lignite need to be reduced so that the use of lignite, one of the major local energy sources in Turkey, can be sustained and keep its reliable position among local supply of energy resources.

In this study, environmental impact potentials were evaluated in six categories using GaBi Education software and CML 2001 impact assessment method to evaluate the life cycle impacts of the electricity generation phase of a lignite based pilot thermal power plant. Environmental impact potentials for 1 kWh electricity generation were determined; Global Warming Potential (GWP) as 1,81 kg CO₂-equivalent, Acidification Potential (AP) as 3,98 g SO₂ equivalent, Eutrophication Potential (EP) as 0,32 g phosphate equivalent, Abiotic Depletion Potential for fossil sources (ADP_{fossil}) as 11,6 MJ, Human Toxicity Potential (HTP) as 30,2 g DCB-equivalent, Photochemical Ozone Creation Potential (POCP) as 0,18 g ethane-equivalent.

The degrees of improvement in environmental performance for three potential solutions for reducing amount of SO₂ emissions in the flue gas from the pilot thermal power plant were investigated. According to the results of system analysis via GaBi LCA software; Option 1 "reduction of the flue gas SO₂ emission concentration by 50% by improving the flue gas desulphurization units" resulted in

a reduction of 27% in the final AP and 24% in the FOOP categories. Option 2 "addition of dry sorbent injection process prior to flue gas desulphurization system" resulted in a reduction of 94% in AP, 22% in EP and 31% in POCP, 3% increase due to the use of sodium bicarbonate as dry sorbent in GWP. Option 3 "adoption of fluidized bed technology at the same capacity to the current capacity, replacing the existing critical pulverized coal combustion system ", resulted in a reduction of 23% ADP and 19% in GWP; 94% in AP, 2% in HTP and 36% in POCP. In order for lignite to maintain its position among future energy sources, it is vital to develop policies and programs so that lignite-based electricity producing companies will implement projects for adaptation of these potential environmental performance improvement actions.

Keywords: lignite coal, electricity generation, thermal power plant, pulverized coal combustion system, life cycle assessment, global warming potential, acidification potential, flue gas emissions reduction.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında ilgisi ve bilgisi ile bana destek ve yön veren değerli danışman hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. Hatice ŞENGÜL'e, Ciner Grubu Çevre Koordinatörü Sn. Murat AYTEKİN'e, tez çalışması kapsamında kullandığım GaBi Education yazılımını hazırlayan ve kullanım izni veren PE International (Almanya) firmasına, beni her daim destekleyen sevgili arkadaşlarım ve aileme; annem Berrin RAŞAN ve ağabeyim Elerki TAŞKIN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.



Eylül 2018

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	16
1.1. Genel Bilgiler	16
1.1.1. Dünyada ve Türkiye’de Enerji Sektörünün Mevcut Durumu ve Gelecekteki Görünümü	16
1.1.2. Dünyada ve Türkiye’de Kömür Potansiyeli	17
1.1.3. Dünyada ve Türkiye’de Kömür Yakıtlı Termik Santraller	20
1.1.4. Termik Santrallerde Kullanılan Yakma Teknolojileri	21
1.1.5. Termik Santrallerde Kullanılan Baca Gazı Arıtma Teknolojileri	23
1.2. Mevcut Sorun	27
1.3. Tezin Amacı	28
1.4. Tezin Kapsamı	29
1.5. Tezin Yöntemi	29
1.6. Bölüm Sonucu	30
2. KÖMÜR YAKITLI TERMİK SANTRALLERİN YAŞAM DÖNGÜSÜ ETKİLERİ İLE İLGİLİ LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	31
2.1. Enerji Kaynaklarının Etkilerinin Karşılaştırıldığı YDD Çalışmaları	31
2.2. Kömür Yakma Teknolojileri Özelinde Yapılan YDD Çalışmaları	36
2.3. Baca Gazı Arıtma Teknolojileri Özelinde Yapılan YDD Çalışmaları	39
2.4. Bölüm Sonucu	41
3. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ (YDD)	43
3.1. YDD’nin Tanımı, Uygulama Amaçları ve Özgün Yönleri	43
3.2. YDD’nin Aşamaları	43
3.2.1. Amaç ve Kapsam	43

3.2.2. Envanter Analizi	44
3.2.3. Etki Değerlendirmesi	45
3.2.4. Yorumlama	50
3.3. YDD'de Kullanılan Yazılım Programları	51
3.4. Bölüm Sonucu	51
4. PİLOT TERMİK SANTRALE İLİŞKİN BİLGİLER	52
4.1. Tesisin Tarihçesi	52
4.2. Tesisin Birimleri	53
4.2.1. Kömür Hazırlama Ünitesi	53
4.2.2. Saf Su Hazırlama Ünitesi	53
4.2.3. Kazan ve Yardımcıları	54
4.2.4. Türbin ve Yardımcıları	56
4.2.5. Elektrik Sistemleri	56
4.2.6. Baca Gazı Desülfürizasyon (BGD) Ünitesi	57
4.3. Emisyonlar ile İlgili Türk Çevre Mevzuatı Çerçevesinde Değerlendirme	59
4.4. Termik Santrallerde İyileştirme Gereksinimleri	61
4.5. Bölüm Sonucu	62
5. METODOLOJİ VE KULLANILAN VERİLER	63
5.1. YDD Amaç ve Kapsam Tanımı	64
5.2. Yaşam Döngüsü Envanter Analizi	64
5.3. Baca Gazı Emisyonlarını Azaltmaya Yönelik İyileştirme Seçenekleri ve Seçeneklere İlişkin Hesaplamalar	69
5.3.1. Mevcut Baca Gazı Desülfürizasyon Ünitelerinin İyileştirilmesi (1. Seçenek)	70
5.3.2. Mevcut Baca Gazı Desülfürizasyon Sistemi Öncesi Kuru Sorbent Enjeksiyonu Prosesinin Eklenmesi (2. Seçenek)	74
5.3.3. Mevcut Yakma Sistemi Yerine Akışkan Yatak Teknolojisinin Adaptasyonu (3. Seçenek)	80
5.4. Bölüm Sonucu	86
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	87
6.1. Tesise Ait 2016 Yılı İçin Yaşam Döngüsü Envanterleri (YDE'ler)	87
6.2. Tesisin Mevcut Durumuna Ait Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirme (YDED) Sonuçları	89

6.3. Etki Kategorilerine Ait Sonuçların Literatürdeki Sonuçlar ve GaBi Yazılımında Bulunan YDED Sonuçları ile Karşılaştırılması	91
6.4. Belirlenen Baca Gazı Emisyon Azaltma Seçeneklerine İlişkin İyileştirme Sonuçları	99
6.4.1. Mevcut Baca Gazı Desülfürizasyon Ünitelerinin İyileştirilmesi Durumunda Elde Edilen İyileştirme Sonuçları (1. Seçenek).....	102
6.4.2. Mevcut Baca Gazı Desülfürizasyon Sistemi Öncesi Kuru Sorbent Enjeksiyonu Prosesinin Eklenmesi Durumunda Elde Edilen İyileştirme Sonuçları (2. Seçenek).....	103
6.4.3. Mevcut Yakma Sistemi Yerine Akışkan Yatak Teknolojisinin Adaptasyonu Durumunda Elde Edilen İyileştirme Sonuçları (3. Seçenek).....	103
6.6. Bölüm Sonucu	104
7. İYİLEŞTİRME SEÇENEKLERİ İÇİN MALİYETLENDİRME	106
7.1. Yatırım Maliyetleri.....	106
7.2. İşletme Maliyetleri.....	107
7.3. İyileştirme Seçenekleri İçin Giderler ve Maliyetler	107
7.4. Bölüm Sonucu	110
8. GENEL SONUÇLAR	111
KAYNAKLAR.....	115
ÖZGEÇMİŞ	120

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Taşkömürü ve Kahverengi Kömür Çeşitleri [5].	18
Çizelge 1.2. Genel Sınıflandırmada Yer Alan Kömürlerin Tanıtıcı Özellikleri [5].	18
Çizelge 1.3. Türkiye’de Yıllara Bağlı Kömür Üretim-Tüketim Miktarları [2].	20
Çizelge 1.4. Kritikaltı ve Kritiküstü Kazanların Karşılaştırılması [7].	22
Çizelge 1.5. Baca Gazı Desülfürizasyon Prosesleri ve Özellikleri [10].	25
Çizelge 1.6. Türkiye’de Yerli Kömüre Dayalı Büyük Ölçekli Termik Santraller [6].	27
Çizelge 3.1. Etki Değerlendirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması [26].	46
Çizelge 4.1. Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği EK-5.A.1.3.1. Katı Yakıtlı Yeni Tesis Emisyon Sınır Değerleri Tablosu	59
Çizelge 4.2. Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği EK-5.A.1.4.1. Katı Yakıtlı Mevcut Tesis Emisyon Sınır Değerleri Tablosu	60
Çizelge 4.3. Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği EK-5.A.3.1. Katı Yakıtlı Mevcut Tesis Emisyon Sınır Değerleri	60
Çizelge 5.1. 2016 Yılı Toplam Ham Verileri	65
Çizelge 5.2. 2016 Yılı Emisyon Verileri	67
Çizelge 5.3. Tesisin Ortalama Emisyon Konsantrasyonları	68
Çizelge 5.4. İlk Ateşleme Sırasında Fuel-Oil ve Motorinin Yanması Sonucu Oluşan Emisyon Verileri	69
Çizelge 5.5. 1. Seçenek İçin Üniteler Bazında Hesaplanan Yıllık SO ₂ Miktarları..	72
Çizelge 5.6. 1. Seçenek İçin Hesaplanan Malzeme Miktarları	74
Çizelge 5.7. Sorbent Türlerinin Temel Özellikleri [36].	75
Çizelge 5.8. Sodyum Bikarbonat Kullanımının Avantaj ve Dezavantajları [36].	77
Çizelge 5.9. 2. Seçenek İçin Üniteler Bazında Hesaplanan Yıllık NaHCO ₃ Miktarları	78
Çizelge 5.10. 2. Seçenek İçin Üniteler Bazında Hesaplanan Yıllık SO ₂ Miktarları	79
Çizelge 5.11. 2. Seçenek İçin Hesaplanan Malzeme ve Emisyon Verileri	80

Çizelge 5.12. Sistemde Kullanılacak Linyitin Analizi.....	81
Çizelge 5.13. 3.Seçenek İçin Hesaplanan Malzeme ve Emisyon Verileri.....	86
Çizelge 6.1. 2016 Yılı Malzeme ve Enerji Envanteri.....	88
Çizelge 6.2. 2016 Yılı Prosesten Kaynaklı Oluşan Atık ve Atıksu Envanteri	88
Çizelge 6.3. Tesisin Baca Gazı Emisyon Envanteri.....	89
Çizelge 6.4. CML Yöntemi ile Yapılan Hesaplamalara Ait Etki Değerlendirme Sonuçları	90
Çizelge 6.5. TRACI Yöntemi ile Yapılan Hesaplamalara Ait Etki Değerlendirme Sonuçları	90
Çizelge 6.6. ReCiPe Yöntemi ile Yapılan Orta Nokta Seviyesinde Etki Değerlendirme Sonuçları.....	90
Çizelge 6.7. ReCiPe Yöntemi ile Yapılan Son Nokta Seviyesinde Etki Değerlendirme Sonuçları.....	90
Çizelge 6.8. Tez Çalışmasında Elde Edilen Etki Değerlendirme Sonuçlarının Literatürdeki Çalışma Sonuçları ile Karşılaştırılması (CML Etki Değerlendirme Yöntemi).....	91
Çizelge 6.9. Tez Çalışmasında Elde Edilen Etki Değerlendirme Sonuçlarının Literatürdeki Çalışma Sonuçları ile Karşılaştırılması (CML Etki Değerlendirme Yöntemi).....	92
Çizelge 6.10. Tez Çalışmasında Elde Edilen Etki Değerlendirme Sonuçlarının GaBi Yazılımında Bulunan 18 Ülkenin Etki Değerlendirme Sonuçlarının Karşılaştırılması (CML 2001 Yöntemi – 2010 Sürümü)	95
Çizelge 6.11. 1. Seçenek için Etki Kategorileri Bazında Elde Edilen İyileştirme Yüzdeleri	102
Çizelge 6.12. 2. Seçenek için Etki Kategorileri Bazında Elde Edilen İyileştirme Yüzdeleri	103
Çizelge 6.13. 3. Seçenek için Etki Kategorileri Bazında Elde Edilen İyileştirme Yüzdeleri	104
Çizelge 7.1. İyileştirme Seçenekleri İçin İhtiyaç Duyulacak Giderler	107

Çizelge 7.2. Farklı Teknolojilere Göre Yatırım ve İşletme Maliyetleri	110
Çizelge 8.1. Tüm Sistem İçin Seçilen Etki Kategorilerine Göre Elde Edilen Sonuçlar	111
Çizelge 8.2. Mevcut Durum ve Seçenekler İçin Seçilen Etki Kategorilerine Göre Elde Edilen Sonuçlar (CML 2001-2016)	113
Çizelge 8.3. Mevcut Durum ve Seçenekler İçin Seçilen Etki Kategorilerine Göre Elde Edilen Sonuçlar (TRACI 2.1)	113
Çizelge 8.4. Mevcut Durum ve Seçenekler İçin Seçilen Etki Kategorilerine Göre Elde Edilen Sonuçlar (ReCiPe 1.08 Orta Nokta – Son Nokta)	113



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. 2016 Yılı Sonu İtibariyle Dünyada Kaynaklara Göre Birincil Enerji Tüketimi [2].....	16
Şekil 1.2. 2016 Yılı Sonu İtibariyle Kaynaklara Göre 50.000 Milyon Ton Üzeri Kanıtlanmış Kömür Rezervine Sahip Olan Ülkeler [2].....	19
Şekil 1.3. 2016 Yılı Sonu İtibariyle Kaynaklara Göre 20.000 ile 50.000 Milyon Ton Arası Kanıtlanmış Kömür Rezervine Sahip Olan Ülkeler [2].....	19
Şekil 1.4. 2016 Yılı Sonu İtibariyle Kaynaklara Göre 20.000 Milyon Ton Altı Kanıtlanmış Kömür Rezervine Sahip Olan Ülkeler [2].....	20
Şekil 4.1. Pilot Tesisin İş Akış Şeması	53
Şekil 4.2. Elektrostatik Filtre Görünümü	55
Şekil 4.3. Baca Gazı Desülfürizasyon Tesis Akış Şeması	57
Şekil 5.1. YDD Çalışmasının Aşamaları	63
Şekil 6.1. Tez Çalışmasında Elde Edilen KIP Sonucu ile 18 Ülkeye Ait Linyit YDE Sonucunun KIP Etki Kategorisi için Karşılaştırması (CML 2001 Yöntemi)	96
Şekil 6.2. Tez Çalışmasında Elde Edilen AP Sonucu ile 18 Ülkeye Ait Linyit YDE Sonucunun AP Etki Kategorisi için Karşılaştırması (CML 2001 Yöntemi)	97
Şekil 6.3. Tez Çalışmasında Elde Edilen ÖP Sonucu ile 18 Ülkeye Ait Linyit YDE Sonucunun ÖP Etki Kategorisi için Karşılaştırması (CML 2001 Yöntemi)	97
Şekil 6.4. Tez Çalışmasında Elde Edilen ABP, İTP ve FOOP Sonuçları ile 18 Ülkenin ABP, İTP ve FOOP Sonuçlarının Karşılaştırması (CML 2001 Yöntemi)..	98
Şekil 6.5. Tez Çalışmasında Elde Edilen Pilot Tesisin KIP Sonucu ile İyileştirme Seçeneklerinin KIP Sonuçlarının Karşılaştırması (CML 2001 Yöntemi)	99
Şekil 6.6. Tez Çalışmasında Elde Edilen Pilot Tesisin AP Sonucu ile İyileştirme Seçeneklerinin AP Sonuçlarının Karşılaştırması (CML 2001 Yöntemi)	100
Şekil 6.7. Tez Çalışmasında Elde Edilen Pilot Tesisin ÖP Sonucu ile İyileştirme Seçeneklerinin ÖP Sonuçlarının Karşılaştırması (CML 2001 Yöntemi).....	100
Şekil 6.8. Tez Çalışmasında Elde Edilen Pilot Tesisin ABP Sonucu ile İyileştirme Seçeneklerinin ABP Sonuçlarının Karşılaştırması (CML 2001 Yöntemi).....	101

Şekil 6.9. Tez Çalışmasında Elde Edilen Pilot Tesisin İTP Sonucu ile İyileştirme Seçeneklerinin İTP Sonuçlarının Karşılaştırması (CML 2001 Yöntemi)	101
Şekil 6.10. Tez Çalışmasında Elde Edilen Pilot Tesisin FOOP Sonucu ile İyileştirme Seçeneklerinin FOOP Sonuçlarının Karşılaştırması (CML 2001 Yöntemi).....	102



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AP	Asidifikasyon Potansiyeli
AYK	Akışkan Yataklı Kazan
AYY	Akışkan Yataklı Yakma
BET	Best Available Techniques
BGD	Baca Gazı Desülfürizasyon
Cl	Klor
CML	Center of Environmental Science of Leiden University
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
DALY	Disability Adjusted Life Year
DAY	Dolaşım Akışkan Yatak
E-Beam	Amonyaklı Ortamda Elektron Işıma
EKGKÇ	Entegre Kömür Gazlaştırma Kombine Çevrim
EÜAŞ	Elektrik Üretim Anonim Şirketi
FeCl ₃	Demir (III) Klorür
FOOP	Fotokimyasal Ozon Oluşturma Potansiyeli
IKBGD	Islak Kireçtaşı Baca Gazı Desülfürizasyon
ISO	Uluslararası Standartlar Örgütü
İTP	İnsan Toksisite Potansiyeli
KAY	Kabarcıklı Akışkan Yatak
K-altı	Kritikaltı Kazan Teknolojisi
KETP	Karasal Ekotoksisite Potansiyeli
KİP	Küresel Isınma Potansiyeli
KSE	Kuru Sorbent Enjeksiyonu
KTA	Karbon Tutma Ve Ayırma
kWh / kWsaat	Kilo Watt Saat
MET	Mevcut En İyi Teknikler
MWh / MWsaat	Mega Watt Saat
MTA	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
Mtoe	Milyon Ton Petrol Eşdeğeri
NO	Azotmonoksit
NO ₂	Azotdioksit
NOx	Azotoksitler
ÖP	Ötrofikasyon Potansiyeli

OTİP	Ozon Tabakasının İncelmesi Potansiyeli
PK	Pulverize Kömür
PM ₁₀	Partikül Madde
SBC	Sodyum Bikarbonat
SK	Süperkritik Kazan
SKHKKY	Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği
SKİ	Seçici Katalitik İndirgeme
SKOİ	Seçimli Katalitik Olmayan İndirgeme
SKTP	Su Kirliliği Toksisite Potansiyeli
SO ₂	Kükürtdioksit
SO _x	Kükürtoksitler
TKİ	Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu
TRACI	Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts
TSETP	Tatlı Su Ekotoksisite Potansiyeli
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TÜRKAK	Türk Akreditasyon Kurumu
USK	Ultra Süperkritik Kazan
YDD	Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi
YDE	Yaşam Döngüsü Envanteri
YDEA	Yaşam Döngüsü Envanter Analizi
YDED	Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi

1. GİRİŞ

Bu bölümde tezin konusu ile ilgili genel bilgiler verilmiş, tez kapsamında Türkiye'deki mevcut durum belirlenmiştir. Tezin amacı ve kapsamı açıklanarak tezin yapısı hakkında bilgi verilmiştir.

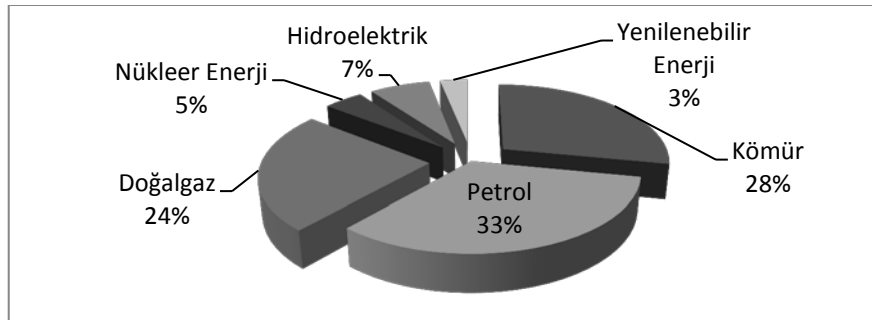
1.1. Genel Bilgiler

Öncelikle dünyada ve Türkiye'de enerji sektörünün mevcut durumu ve gelecekteki görünümü hakkında bilgi verilmiştir. Kömür çeşitleri, dünyada ve Türkiye'de kömür potansiyeli ile kullanıldıkları elektrik üretim teknolojilerinden bahsedilerek termik santraller ve çevresel etkileri hakkında bilgi verilmiştir.

1.1.1. Dünyada ve Türkiye'de Enerji Sektörünün Mevcut Durumu ve Gelecekteki Görünümü

Dünya nüfusu sürekli artmakta ve 2014 yılında 7,3 milyar olan nüfusun 2040 yılında 9,2 milyara yükselmesi öngörülmektedir. Nüfus ve istatistiklerdeki değişiklikler enerji ihtiyacının miktarını ve yapısını önemli derecede etkilemekte olup, nüfus artışı dolayısıyla enerji talebi de artacaktır. Mevcut enerji politikalarının devam etmesi durumunda 2040 yılında dünya enerji talebinin 2014 yılına göre % 43,5 daha fazla olacağı tahmin edilmektedir. Enerji talebindeki bu artışın (2014-2040 dönemi) % 73,3'lük bölümünün petrol, doğal gaz ve kömürden karşılanacağı düşünülmektedir [1].

2016 sonu itibariyle birincil enerji tüketimi dünyada yaklaşık 13,3 milyar ton petrol eşdeğeridir. Bu tüketimin kaynaklara göre dağılımı için Şekil 1.1'e bakıldığında, % 33'ü petrol, % 28'i kömür, % 24'ü doğalgaz, % 7'si hidroelektrik, % 5'i nükleer enerji ve % 3 'ü yenilenebilir enerji kaynaklıdır [2].



Şekil 1.1. 2016 Yılı Sonu İtibariyle Dünyada Kaynaklara Göre Birincil Enerji Tüketimi [2].

2014-2040 döneminde elektrik üretiminde petrol, doğalgaz ve kömürün dünya ekonomisine güç veren enerji kaynakları olmaya devam edeceği; bunun yanı sıra enerji kaynakları arasında en büyük yüzdelik artışın % 4,4 ile rüzgar enerjisi payından beklendiği, bu artışı % 2,8 ile doğalgazın izleyeceği, en fazla azalmanın % 3,2 ile kömürün payında olacağı, bunu % 3 ile petrolün, % 2,3 ile hidroelektriğin ve % 1,4 ile nükleer enerjinin takip edeceği tahmin edilmektedir [1]. Uzun dönem için kömüre dayalı elektrik üretimine bakılırsa; sera gazı emisyonlarını kabul edilebilir sınırlara çekebilecek yöntemlerin teknik ve ekonomik olarak uygulanabilirliğine, kömür fiyatlarındaki değişime, sera gazı emisyonlarını azaltmaya veya sınırlamaya yönelik ulusal ve uluslararası politika ve anlaşmaların belirlediği ciddi hedefler ile sabit karbon vergisi veya emisyon ticareti gibi maliyeti yükselten uygulamalara ve kaya gazı kullanımına yönelik gelişmelere bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterebilir [1,3].

Türkiye'nin 2016 yılında elektrik tüketimi 277,5 milyar kWh, elektrik üretimi ise 272,56 milyar kWh olarak gerçekleşmiştir. Elektrik talebinin 2025 yılında yüksek talep seçeneğine göre 482,7 milyar kWh, düşük talep seçeneğine göre ise 359,6 milyar kWh düzeyine ulaşması beklenmektedir. Toplam elektrik üretiminin % 33,9'u kömürden, %32,1'i doğalgazdan, % 24,7'si hidrolik kaynaklardan, % 5,7'si rüzgârdan, % 1,8'i jeotermalden, % 1,0'i sıvı yakıtlardan, % 0,8'i biyoyakıtlar ve güneş enerjisinden karşılanmıştır. Ayrıca elektrik enerjisi üretim santrallerinin sayısı 2016 yılı sonu itibarıyla 2321'e yükselmiştir. Mevcut santrallerin 597 adedi hidrolik, 40 adedi kömür ve linyit, 171 adedi rüzgâr, 31 adedi jeotermal, 260 adedi doğal gaz, 1.045 adedi güneş, 178 adedi ise diğer santrallerdir [1,4].

1.1.2. Dünyada ve Türkiye'de Kömür Potansiyeli

Enerji üretiminde petrol ve doğalgaz gibi dünyada önemli bir konumda olan kömür, petrol ve doğalgazın aksine tüm dünya genelinde bulunmakta ve enerji ihtiyacını karşılamak üzere yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kömür üretimi, kullanımı ve kömür teknolojileri konusunda gelişmiş ülkeler kendi kömürlerinin özelliklerine göre yaptıkları sınıflamalara ek olarak, uluslararası genel bir sınıflama için ortak standartlar geliştirmişlerdir. Uluslararası Standartlar Örgütü (ISO) tarafından da desteklenerek yapılan sınıflamada kömürler, çeşitli özellikleri temel alınarak taşkömürü ve kahverengi kömürler olarak iki ayrı sınıfa ayrılmıştır.

Bunlar da kendi içinde ikiye ayrılmaktadır [5]. Taşkömürü ve kahverengi kömür çeşitleri Çizelge 1.1’de, bu kömürlerin genel özellikleri ise Çizelge 1.2’de verilmiştir.

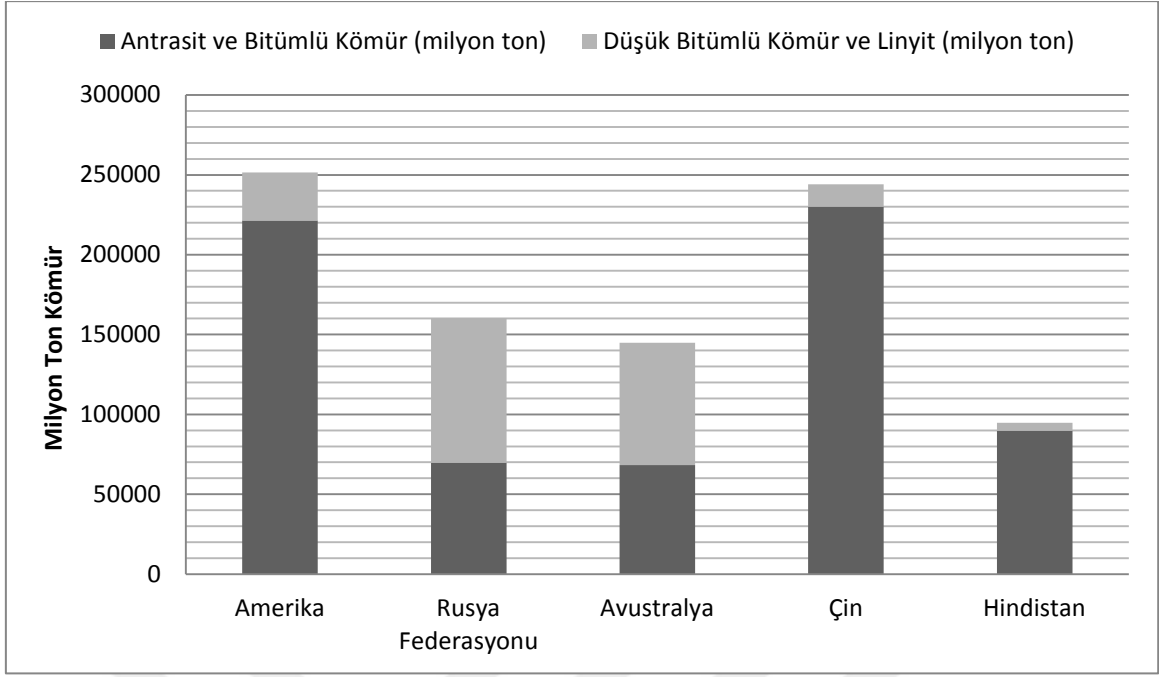
Çizelge 1.1. Taşkömürü ve Kahverengi Kömür Çeşitleri [5].

TAŞKÖMÜRÜ	KAHVERENGİ KÖMÜR
<u>Koklaşabilir kömür</u> <u>Koklaşamayan kömür</u> • Bitümlü kömür • Antrasit	• Linyit • Düşük bitümlü kömür

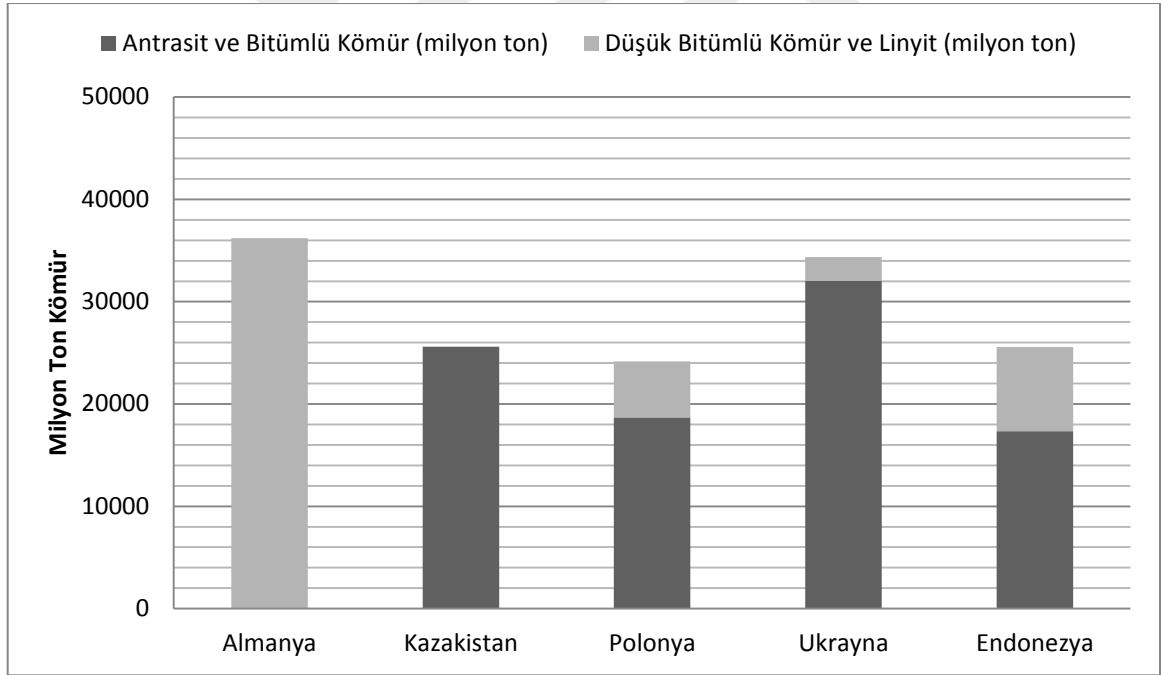
Çizelge 1.2. Genel Sınıflandırmada Yer Alan Kömürlerin Tanıtıcı Özellikleri [5].

KÖMÜR ÇEŞİDİ	LİNYİT	DÜŞÜK BİTÜMLÜ KÖMÜR	BİTÜMLÜ KÖMÜR	ANTRASİT
Renk	Kahverengi	Siyah	Koyu Siyah	Parlak Siyah
Fiziksel Özelliği	Kırılgan, kolaylıkla toz halinde ufalanma	Kurutma veya oksidasyon sonucu ince parçalar ve toz halinde ufalanma	Blok şeklinde kırılma	Merceksi kırılma
Dayanımı	Masif, odunsu veya üniform kilsli doku	Masif	Bantlı ve kompakt	Sert ve dayanıklı
Isıl Değeri	4610 kcal/kg’nin altında	4610-6390 kcal/kg arasında	5390-7700 kcal/kg arasında	7700 kcal/kg’nin üstünde
Uçucu Madde Miktarı	Yüksek	Bitümlü kömürden daha yüksek	Düşük	Düşük
Nem İçeriği	Yüksek	Bitümlü kömürden yüksek	Düşük	Düşük
Karbon İçeriği	Düşük	Bitümlü kömürden düşük	Yüksek	Yüksek

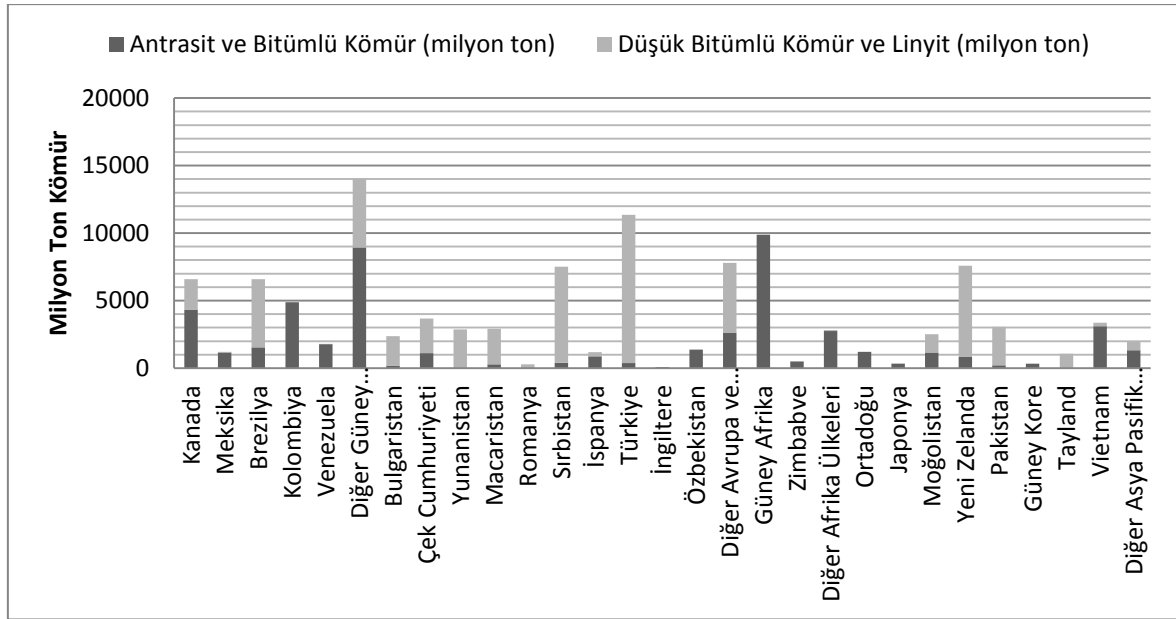
Dünya’da 2016 yılı sonu itibariyle genel sınıflandırma içinde olan antrasit, linyit, bitümlü ve düşük bitümlü kömürlerin kanıtlanmış rezerv dağılımları ülkelere göre farklılık göstermektedir. Kaynaklara göre; 50.000 milyon ton üzeri, 20.000 ile 50.000 milyon ton arası ve 20.000 milyon ton altı kanıtlanmış kömür rezervine sahip olan ülkeler sırasıyla Şekil 1.2, Şekil 1.3 ve Şekil 1.4’te karşılaştırılmış olup, Türkiye 20.000 milyon ton altı kanıtlanmış kömür rezervine sahip ülkeler arasındadır.



Şekil 1.2. 2016 Yılı Sonu İtibariyle Kaynaklara Göre 50.000 Milyon Ton Üzeri Kanıtlanmış Kömür Rezervine Sahip Olan Ülkeler [2].



Şekil 1.3. 2016 Yılı Sonu İtibariyle Kaynaklara Göre 20.000 ile 50.000 Milyon Ton Arası Kanıtlanmış Kömür Rezervine Sahip Olan Ülkeler [2].



Şekil 1.4. 2016 Yılı Sonu İtibariyle Kaynaklara Göre 20.000 Milyon Ton Altı Kanıtlanmış Kömür Rezervine Sahip Olan Ülkeler [2].

Dünyada, söz konusu kömür çeşitlerinin tamamı olmak üzere, toplam kanıtlanmış kömür rezervi 1.139.331 milyon ton'dur. Türkiye'de 2016 yılı sonu itibariyle 378 milyon ton antrasit ve bitümlü kömür, 10.975 milyon ton düşük bitümlü kömür ve linyit kömürü olmak üzere toplam 11.353 milyon ton kanıtlanmış kömür rezervi bulunmaktadır.

Türkiye'de kömür üretim ve tüketim miktarları yıllara bağlı olarak değişkenlik göstermiş, 2016 yılı sonu itibariyle, Çizelge 1.3'te görüldüğü üzere, üretim ve tüketim miktarlarında artış olmuştur [2].

Çizelge 1.3. Türkiye'de Yıllara Bağlı Kömür Üretim-Tüketim Miktarları [2].

Yıl	2012	2013	2014	2015	2016
Üretim* (Mtoe)	17.0	15.5	16.4	12.8	15.2
Tüketim** (Mtoe)	36.5	31.6	36.1	34.7	38.4

* Sadece ticari katı yakıtlar; yani bitümlü kömür ve antrasit (taş kömürü), linyit ve kahverengi (düşük bitümlü) kömür ve diğer ticari katı yakıtlar. Kömür-sıvı ve kömür-gaz dönüşümleri için üretilen kömürü içerir.

** Sadece ticari katı yakıtlar; yani bitümlü kömür ve antrasit (taş kömürü), ve linyit ve kahverengi (düşük bitümlü) kömür ve diğer ticari katı yakıtlar. Sıvı veya gaz yakıtlara dönüştürülmüş kömür hariç tutulmaktadır, ancak dönüşüm süreçlerinde tüketilen kömürü içerir.

1.1.3. Dünyada ve Türkiye'de Kömür Yakıtlı Termik Santraller

Dünyada kömür yakıtlı 1442 adet termik santral olup, bu santrallerin büyük bir çoğunluğu Amerika ve Çin gibi büyük kömür rezervlerine sahip ülkelerde bulunmaktadır [6].

Türkiye'de kayıtlı 40 adet kömür yakıtlı termik santral bulunmakta olup, toplam kurulu gücü 18.871 MW elektrik'tir [4].. Bunun yanı sıra yapım aşamasında olan 9 adet, üretim lisansı almış olan 7 adet ve ön lisans alan 7 adet termik santral bulunmaktadır. Henüz planlanma aşamasında olan 7 adet termik santral projesi de söz konusudur [2].

1.1.4. Termik Santrallerde Kullanılan Yakma Teknolojileri

Kömüre dayalı termik santrallerde; kömürde var olan kimyasal enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Bu dönüşüm sırasıyla, büyük miktardaki kömürün kazan adı verilen yanma odasında yakılması, buradan elde edilen ısı ile bir dizi arıtma işlemiyle saflaştırılan suyun yüksek basınç ve sıcaklıkta buharlaştırılması ve bu buharın türbinde mekanik enerjiye, jeneratörde de elektrik enerjisine dönüşmesiyle gerçekleştirilir.

Dünya genelinde termik santrallerde iki yakma teknolojisi ön plandadır:

- Pulverize kömür (PK) yakma teknolojisi
- Akışkan yataklı yakma (AYY) teknolojisi

Pulverize kömür yakma sisteminde; bunkerlerden alınan kömür bantlar aracılığıyla değirmenlere gelir, değirmenlerde toz haline getirilerek yanma odasına sıcak havayla püskürtülür ve yanar. Bu şekilde kömürün kimyasal enerjisi kazanda meydana gelen yanma sonucu ısı enerjisine dönüşür. Yanma sonucu oluşan baca gazları, ısılarını kazan borularına vererek boruların içinden geçen suyun sıcaklığını yükseltir. Su sıcaklığı kazan basıncının karşılığı olan buharlaşma sıcaklığına eriştiğinde buharlaşma başlar. Bu şekilde meydana gelen su-buhar karışımı “dom” denilen bir büyük tankta doymuş buhar ve su olmak üzere ikiye ayrılır. Doymuş buhar daha sonra yine baca gazları ile kızdırılır. Su ise tekrar çevrimin başlangıç noktasına gönderilerek yeniden ısıtılır. Kızdırıcılarda mümkün olduğu kadar yüksek sıcaklıklara erişilmesi istenir. Bunun sebebi sıcaklık artışına bağlı olarak verimin de artmasıdır.

Pulverize kömür yakma kazanları, sıcaklık ve basınç farklılıklarına göre iki gruba ayrılmaktadır:

- Kritikaltı (K-altı) kazanlar
- Kritiküstü kazanlar:

- o Süperkritik (SK) çevrimli
- o Ultra süperkritik (USK) çevrimli

Yapılan çeşitli termodinamik incelemelerde verimin; çevrim basıncı, tekrar kızdırma sayısı, ara buhar alma sayısı ve kondense basıncının düşürülmesi ile arttığı görülmüştür. Çevrim ve kondense basıncı en etkili parametreler olup, çevrim basıncının artırılması sonucunda kritik noktanın (221 bar ve 375 °C) üzerinde su, yaş buhar fazına geçmeden doğrudan kuru buhara dönüşmektedir. Kritik nokta üzerindeki basınçlarda çalışan çevrimlere “kritiküstü/süperkritik” çevrim denmektedir. Buhar parametreleri dışında “kritik altı ve kritik üstü kazanlar arasında en önemli fark “dom” olarak bilinen ve genellikle kritik altı kazanlarda bulunan buhar ayırıcısının kritik üstü kazanlarda olmamasıdır” şeklinde ifade edilmektedir [7].

Kritikaltı ve kritiküstü kazanların sıcaklık, basınç, güç ve verim aralıklarının karşılaştırılması Çizelge 1.4’te verilmiştir.

Çizelge 1.4. Kritikaltı ve Kritiküstü Kazanların Karşılaştırılması [7].

Kazan Tipi	Kritikaltı (K-altı)	Süperkritik (SK)	Ultra Süperkritik (USK)
Sıcaklık (°C)	540	610	700
Basınç (bar)	160-250	250-285	300
Güç (MW)	150-350	500-1000	500-1100
Verim (%)	30-37	39-43	43-50

Kritiküstü kazan teknolojisi, kritikaltı kazan teknolojisi ile kıyaslandığında çevrimin farkı, bir buharlaştırıcı paketine gereksinim duyulmadan buharın kızıştirılmasıdır. ABD Enerji Bakanlığı’nın hazırladığı bir raporda kritikaltı ve süperkritik kazanlarda su kaybının 0,22-0,5 m³/MWsaat arasında değiştiği belirtilmiştir. Buna göre 500 MW’lık süperkritik bir termik santralde buharlaşma kaynaklı su kaybı yaklaşık 110 m³/saattir [8].

Akışkan yataklı yakma (AYY) teknolojisi, akışkan bir havanın içinde ısıtılmış ve askıda durabilen taneciklerden oluşan bir yatakta kömürün yakılması işlemine dayanır. Yüksek hızlardaki hava akımında bu yatak, akışkan gibi davranarak taneciklerin çok hızlı bir şekilde karışmasını sağlar. Bu hareket ile düşük sıcaklıklarda bile kömürün tamamıyla yanması sağlanır.

AYY teknolojileri, “atmosferik” ve basınçlı” olmak üzere iki grupta sınıflandırılmakta olup, atmosferik akışkan yataklı yakma teknolojisi de kendi içinde iki grupta incelenir:

- Atmosferik akışkan yataklı yakma teknolojileri
 - o Kabarcıklı akışkan yatak (KAY) teknolojisi
 - o Dolaşımli akışkan yatak (DAY) teknolojisi
- Basınçlı akışkan yataklı yakma teknolojisi

KAY teknolojisinde, dağıtıcıdan geçen hava yatak içinde kabarcıklar oluşturarak yatak içindeki katı tanecikleri kaldırır ve yatağa kaynayan akışkan görüntüsü kazandırır. Başlangıçta 500°C'ye kadar ön ısıtmaya tabi tutulan yatağa beslenen yakıt tutuşur ve yanmaya başlar. Yatak içindeki gaz kabarcıkların sebep olduğu türbülanslı hareket ve şiddetli karışım, sabit sıcaklıkta bir ortam oluşmasını sağlar. Emisyonların azaltılması amacıyla 750-950 °C arasında çalıştırılırlar [9].

AYK içinde hava hızının yukarıya doğru artırılması ve yataktaki tüm partiküllerin yukarıya taşınması ile DAY şartlarına ulaşılır. Partiküller, yükseltici boru içini doldurarak yanma gazı ile kazandan dışarıya, siklonlara taşınır. Baca gazından ayrılan partiküller geri dönüş borusu ile yükseltici boru içerisine yeniden verilir. Yanma bölgesi olan yükseltici boruda tam yanmamış kömür tanecikleri varsa, bu geri dönüş sayesinde tanecikler daha uzun süre sistemde kalacağından tam yanma sağlanabilmektedir [9].

AYK'da yatak maddesi olarak inert partiküller kullanılmaktadır. Bunlara kum veya kül örnek verilebilir. Yatakta kullanılan bu partiküllerin ısı kapasitesi de kazana ısıl kararlılık sağladığından dolayı diğer tip kazanlarda farklı olarak kullanılan yakıtın özellikleri AYK'nın kararlı performansını fazla etkilemez [9].

AYK'da genelde yüksek kül içerikli kömür kullanılır. Bunlar arasında santral boyutunda başarıyla uygulanmış ve kullanımı giderek yaygınlaşan tip, DAY teknolojisidir.

1.1.5. Termik Santrallerde Kullanılan Baca Gazı Arıtma Teknolojileri

Yakma teknolojileri ile birlikte, kömür kullanımı sonucu ortaya çıkan baca gazlarını (SO_2 ve NO_x) azaltmak için baca gazı arıtma teknolojileri kullanılmaktadır:

- Baca gazı desülfürizasyon (kükürt arıtma) teknolojileri
- Baca gazı denitrifikasyon (azot arıtma) teknolojileri

Baca gazı desülfürizasyon teknolojileri, alkali çözeltiler kullanılarak SO₂'nin kalsiyum ve sodyum bileşikleri halinde tutulması esasına dayanır. Prosesin seçiminde uygulanacak tesisin kapasitesi, yakıt türü, yakıttaki kükürt oranı, kullanılacak adsorbanın kolay temin edilmesi ve ekonomik olması, proses sonucu oluşan atığın özellikleri, depolanması gibi faktörlerin detaylı olarak incelenmesi ve bunun sonrasında arıtma teknolojisine karar verilmesi gerekir.

Baca gazı desülfürizasyon prosesleri, kullanılan maddenin toz veya çözelti halinde gazla temas etmesine göre yaş prosesler ve kuru prosesler olmak üzere iki şekilde sınıflandırılır. Çizelge 1.5'te yaş ve kuru proseslerin özellikleri sunulmuştur.

“Büyük Yakma Tesisleri için Mevcut En İyi Sistemler” raporunda kömür yakıtlı termik santrallerin %80'inde yaş prosesli baca gazı arıtma sistemi kullanıldığı belirtilmiştir [8]. Termik santrallerde uygulanan en yaygın proses, yaş proseslerden kireç/kireçtaşı ile yıkama prosesidir. Kullanılan absorbanın temininin kolay ve ucuz olmasından dolayı tercih edilmektedir. Yanma sonrası ortaya çıkan baca gazındaki SO₂'nin bir absorplama ünitesinde kireç/kireçtaşı çözeltisiyle yıkanarak kalsiyum sülfat/sülfid çamuruna dönüştürülmesi sağlanır. %92-97 SO₂ giderimi sağlanabilmektedir. Proses sonucu oluşan çamur (alçı taşı) yan ürün olarak geri kazanılabilmektedir.

Çizelge 1.5. Baca Gazı Desülfürizasyon Prosesleri ve Özellikleri [10].

	Proses	Özellikler
Yaş	Kireç/kireçtaşı ile yıkama	- Absorban ucuz ve temini kolay %95 SO₂ giderim verimi - Proses sonucu oluşan çamur (alçı taşı) yan ürün olarak geri kazanımı mümkün
	Sodyum bileşikleriyle yaşıyla yıkama	- Absorban pahalı - Proses sonucu oluşan alkali çözeltinin atılmaması için ikinci bir alkali ile reaksiyona sokularak sodyum çözeltisinin geri kazanımı mümkün
	Amonyum sülfat prosesi	- Absorban pahalı %95 SO₂ giderim verimi - Azotlu gübre formunda geri kazanım
	Wellman-Lord prosesi	- Absorban olarak sodyum sülfat (Na₂SO₃) çözeltisi kullanımı ve çözeltinin geri kazanılması - Kükürt oranı çok yüksek tesislerde uygulanmakta (rafineriler, fuel oil ile çalışan termik santraller) - SO₂ giderim verimi çok yüksek - Atık oluşumu yok - Yan ürün olarak sıvı SO₂, sülfürik asit ve saf kükürt eldesi - Yatırım maliyeti yüksek
	Magnezyum oksit ile yaşıyla absorpsiyon	- Absorban olarak MgO çözeltisi kullanımı - SO₂ giderim verimi %90'ın üzerinde - Proses sonucu oluşan Mg tuzlarının kalsinasyon işlemine tabi tutulması ile derişik SO₂ gazı ve MgO geri kazanılması - Yatırım maliyeti yüksek
	Deniz suyu ile arıtma teknolojileri	- Çözünebilir sülfat formları oluşumu, üniteden çıkan asidik atıksuların arıtılma gereksinimi - SO₂ giderim verimi %90'ın üzerinde - İşletme ve bakım maliyetleri diğer proseslere göre daha az
	Püskürtmeli kurutma (spray drying) prosesi	- Absorban olarak kireç ya da soda kullanımı - Kireç kullanımında %80-90, soda kullanıldığında %95'in üzerinde SO₂ giderim verimi - Kuru atık oluşumu - İşletme ve bakım sorunları az - Düşük kükürt oranında daha ekonomik
Kuru	Kuru püskürtme (enjeksiyon) prosesi	- Toz haline getirilmiş kireç ya da soda kullanımı - Aynı ekipmanla SO₂ ve kül giderimi - Suya gereksinim yok - Yüksek basınç kaybı yok - Kireç kullanımında %80 civarı, soda kullanıldığında %95'in üzerinde SO₂ giderim verimi
	Aktif kok ile adsorpsiyon	- Proses sonucu sülfürik asit oluşumu - Doğru hale gelen aktif kok rejenere gereksinimi, - Rejenerasyon sonucu derişik SO₂ gazından sıvı SO₂, sülfürik asit veya saf kükürt eldesi

Baca gazı denitrifikasyon teknolojileri, yanma sırasında oluşan NO_x emisyonlarının kontrolünün yeterli olmaması durumunda NO_x'lerin uzaklaştırılması için geliştirilmiş teknolojilerdir. Ticari anlamda uygulanabilir olan iki teknoloji bulunmaktadır:

- Seçici katalitik indirgeme (SKİ) teknolojisi
- Seçimli katalitik olmayan indirgeme (SKOİ) teknolojisi

SKİ teknolojisi, büyük yakma tesislerinden çıkan baca gazlarındaki azot oksitlerin azatlımı için geniş çapta uygulanan bir işlemdir. Baca gazındaki NOx'lerin amonyak ve katalizör kullanılarak su ve nitrojene ayrıştırılması esasına dayanır. NOx reaksiyonu 170-510°C arası sıcaklıkta katalitik yüzeyde gerçekleşir. Kömür yakıtlı termik santrallerde elektrostatik filtre sonrasında uygulanması tercih edilmektedir. NOx giderim verimi %80-90 arasında olabilmektedir [10]. Amonyak reaktif olarak kullanıldığında sulu bir solüsyon olarak ya da 20°C'de yaklaşık 17 bar basınçta sıvılaştırmış bir durumda saklanır. Daha küçük bazı uygulamalarda (Örnek: <50 MW) üre, enjekte edilmeden önce suda çözünen beyaz kristal granülleri şeklindedir [10].

SKOİ teknolojisi ise, baca gazındaki NOx'lerin yanma sisteminin üst kısmına beslenen amonyak ile reaksiyona girmesi, böylece su ve nitrojene ayrışması esasına dayanır. 850-1050 °C sıcaklıkta gerçekleşir. Katalizör kullanılmadığından işletme maliyeti daha düşüktür. NOx giderim veriminin %60-80 arasında kalması ve yüksek miktarda amonyak atılması dezavantajlarıdır [10].

Bunların haricinde, SOx ve NOx'lerin birlikte giderilmesini hedefleyen çeşitli teknolojiler geliştirilmekte olup, pratik olarak uygulanabilme aşamasına gelen “amonyaklı ortamda elektron ışıma (E-Beam)” ve “aktif karbon prosesleri” bu teknolojilere örnektir. E-Beam teknolojisi ile %90 SO₂ ve %80 NOx giderimi hedeflenmektedir. Yan ürün olarak amonyum sülfat oluşmakta ve gübre olarak kullanılabilir. Aktif karbon prosesi ise, kuru desülfürizasyon proseslerinden aktif kok ile adsorpsiyon prosesinin geliştirilmiş halidir. SO₂ ve NOx giderimi aktif karbon ve amonyak ile gerçekleştirilmektedir. Hedeflenen SO₂ giderim verimi %95, NOx giderim verimi ise %85'tir. Yan ürün olarak elementel kükürt elde edilmektedir [10].

Ticari boyuta ulaşmış olan yakma teknolojileri pulverize kömür yakma ile atmosferik dolaşım akışkan yataklı yakma teknolojisi olup, enerji üretiminde yerli yakıt kullanan büyük ölçekli termik santrallerde çoğunlukla baca gazı desülfürizasyon (BGD) teknolojilerinden kireç/kireçtaşı ile yıkama prosesiyle birlikte kullanılmaktadır Türkiye'de yerli kömürden elektrik üreten büyük ölçekli

termik santrallere ilişkin yakıt, kullanılan teknoloji ve kurulu güç bilgileri Çizelge 1.6'da sunulmuştur.

Çizelge 1.6. Türkiye'de Yerli Kömüre Dayalı Büyük Ölçekli Termik Santraller [6].

Santralin Adı	Konumu	Yakıt	Kullanılan Teknoloji	Kurulu Güç (MW)
Çan	Çanakkale	Linyit	DAY	320
Orhaneli	Bursa	Linyit	PK+BGD	210
Soma	Manisa	Linyit	PK	990
Seyitömer	Kütahya	Linyit	PK	600
Tunçbilek B	Kütahya	Linyit	PK	300
Yatağan	Muğla	Linyit	PK+BGD	630
Yeniköy	Muğla	Linyit	PK+BGD	420
Kemerköy	Muğla	Linyit	PK+BGD	630
Afşin-Elbistan A	Kahramanmaraş	Linyit	PK	1355
Afşin-Elbistan B	Kahramanmaraş	Linyit	PK+BGD	1440
Kangal	Sivas	Linyit	PK+BGD	457
Çayırhan	Ankara	Linyit	PK+BGD	620
Bolu Göynük	Bolu	Linyit	DAY	270
Tufanbeyli	Adana	Linyit	DAY	450
Çatalağzı	Zonguldak	Taş Kömürü	PK	300
Silopi	Şırnak	Asfaltit	DAY	405

Akışkan yataklı yakma ve pulverize kömür yakma teknolojileri, Avrupa Birliği'nin (AB) Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol Yönetmeliği için 2006 yılında yayınlanan ilk referans dokümanda [11] büyük yakma tesisleri kapsamında kömürden elektrik üretimi için BET (Best Available Techniques), yani “mevcut en iyi teknikler” önerilmektedir. Mevcut En İyi Teknikler (MET), emisyon sınır değerlerine baz olacak şekilde ve bu prensibin uygulanamadığı durumlarda emisyonları ve çevreye etkiyi azaltacak şekilde tasarlanmış ve pratikte uygulanabilen en etkin ve ileri teknikler olarak tanımlanmıştır. Aynı maddede, “mevcut teknik” terimi ile elektrik üretiminde ekonomik ve teknik olarak uygulanabilir kapasiteye ulaşmış teknikler, “en iyi” terimi ile de çevrenin bir bütün olarak en üst seviyede korunmasını sağlayacak en etkili teknikler olarak tanımlanmıştır. Ayrıca Aralık 2003 tarihinde Birleşmiş Milletler/Dünya Bankası tarafından hazırlanmış olan “Türkiye Enerji ve Çevre Değerlendirmesi Sentez Raporu”nda akışkan yataklı yakma teknolojisinin kömürden elektrik üretiminde kullanılabilecek en temiz kömür yakma teknolojilerinden biri olduğu vurgulanmıştır [12].

1.2. Mevcut Sorun

Dünyada ve Türkiye'de termik santraller, çevreye etkileri nedeniyle olumsuz yönde değerlendirilmektedir. Özellikle doğalgaz ve taşkömürü gibi yakıtların kullanımıyla karşılaştırıldığında, linyit kömürünün kullanımından kaynaklanan çevresel etkiler

oldukça fazladır. Linyit yakıtlı termik santrallerde “Mevcut En İyi Teknikler” olan belli başlı yakma ve baca gazı arıtma teknolojileri kullanılmakta olup, bunlardan pulverize kömür yakma ve baca gazı desülfürizasyon sistemi kullanımı ülkemizde oldukça yaygındır.

Termik santrallerde baca gazı, atıksu, düzenli depolama alanları gibi çevreye olumsuz yönde etkisi olan kirleticiler için Çevre Mevzuatı ve ilgili yönetmelikleri esas alınarak ölçüm ve analiz çalışmaları yapılmaktadır. Termik santraller kurulduğu ve işletildiği sürece bu etkileri tamamen ortadan kaldırmak mümkün değildir. Ancak uzun vadede görülecek olumsuz etkileri minimum düzeyde tutmak ve termik santrallerle elektrik üretimini çevreyle uyumlu olarak sürdürülebilir kılmak mümkündür.

Bir termik santralin elektrik üretim faaliyetinden kaynaklı küresel ısınma, asidifikasyon ve ötrofikasyon gibi çevresel etkileri genel olarak bilinmektedir. Ancak çevresel etkilerin sayısallaştırılması için çok çeşitli yöntemler bulunmakta olup, birim elektrik başına ne kadar etkide bulunulduğunun belirlenmesi, hem çevreye verilen zararın azaltılması hem de işletmecilerin çevreye duyarlı yaklaşımlara öncelik verebilmesi adına önem arz etmektedir.

Termik santrallerde emisyon azaltma seçeneklerinin nicel olarak değerlendirilmesi ve hangi seçeneklerin uzun vadede daha fazla çevre açısından kazançlı olduğunun belirlenmesi hem mevcut santrallerin iyileştirilmesi hem de yeni santrallerin daha kazançlı teknolojilerle donatılması açısından önem taşımaktadır.

Termik santrallerin çevresel performanslarının iyileştirilmesi, enerji kaynaklı çevre sorunlarının boyutunun azaltılması noktasında sosyal, ekonomik ve çevresel etkileri olan önemli bir konudur.

1.3. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının ana amacı, linyit kömüründen elektrik üretimi yapan pilot bir termik santralin 1 kW elektrik üretimi için çevresel etki potansiyellerinin hesaplanması ve tesisten alıcı ortama verilen SO₂ miktarının azaltılmasına yönelik belirlenen iyileştirme seçenekleri ile tesisin mevcut durumuna ilişkin hesaplanan çevresel etki potansiyelleri ile karşılaştırılmasıdır.

Pilot termik santralin;

- Kritikaltı pülverize kömür yakma sistemi ve bu sistemle birlikte ek olarak kullanılan baca gazı arıtma sisteminin proses olarak incelenmesi ve mevcut çevresel performansının tanımlanması,
- Bu proseslerde, elektrik üretimi için ne kadar enerji ve yakıt gerektiği/kullanıldığı ve bunun sonucunda ne kadar ürün/atık olu tu unun hesaplanması, yani envanter analizinin yapılması,
- Envanter analizinde belirlenen çevresel yüklerin neden olduğu çevresel etki potansiyellerinin belirlenmesi ve sonuçların literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılması,
- Bunların sonucunda çevresel etki potansiyellerinin azaltılması için iyileştirme ve değişikliklerin belirlenmesi ve bu iyileştirme ve değişikliklerin uygulanması durumunda oluşacak çevresel etki potansiyellerinin mevcut durumla kar ıla tırılarak değerlendirilmesidir.

1.4. Tezin Kapsamı

Tez kapsamında seçilen pilot tesise ait yaşam döngüsü envanteri oluşturularak YDD yazılımı ile tesisin mevcut çevresel performansını ortaya koyan yaşam döngüsü etkileri belirlenmiştir. Tesisin  evresel performansının iyileştirilmesi seçeneklerinin neler olabileceği araştırılmış ve bu seçeneklerin performansı ne düzeyde iyile tirdi ini belirlemek için YDD  alı maları gerçekleştirilmiştir. İyileştirme  ncesi ve sonrası etki sonuçları literatürde linyit yakıtlı tesislere ait yer alan değerlerle kar ıla tırılarak yorumlanmış ve seçeneklerin mali açıdan getireceği y k belirlenmiştir.

1.5. Tezin Yöntemi

Yaşam Döngüsü Değerlendirme (YDD) Yöntemi, ISO standartlarında belirtilen şekilde uygulanacaktır. Sistemin sınırları yakıtların yanması ve baca gazı arıtma sistemi etrafında çizilmiştir. Klasik YDD  alı ması dört a amadan meydana gelmekte olup, çalışmada bu aşamalar izlenecektir:

- Verilerin proseslerle ilişkilendirilmesi (enerji ve materyal girdileri, her proses için havaya, suya, toprağa verilen emisyon ve atıklar),
- Envanter analizi (ham verilerin envanter verisine dönüştürülmesi),

- Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (envanter verilerinin YDD için kullanılacak yazılım programına girilmesi, etki değerlendirme metodolojisinin ve etki kategorilerinin belirlenmesi ve YDD programı GaBi Education yazılımı kullanılarak envanterden etki sonuçlarına gidilmesi)
- Sistemin çevresel performansının geliştirilmesi için iyileştirme seçeneklerinin belirlenmesi.

1.6. Bölüm Sonucu

Bu bölümde dünyada ve Türkiye’de enerji sektörünün mevcut durumu ve gelecekteki görünümünden bahsedilerek, 2014-2040 döneminde elektrik üretiminde kömürün dünya ekonomisini etkileyen enerji kaynaklarından biri olmaya devam edeceği belirtilmiştir. Bununla birlikte Uluslararası Standartlar Örgütü (ISO) tarafından desteklenerek yapılan kömür sınıflandırmasına göre kömürlerin kalorifik değer, uçucu madde içeriği, sabit karbon miktarı, koklaşma ve kekleşme özellikleri temel alınarak iki sınıfa ayrıldığı, bunların taşkömürü ve kahverengi kömürler olduğu ve tanıtıcı özellikleri hakkında bilgi verilmiştir.

Dünya genelinde termik santrallerde “pulverize kömür yakma teknolojisi” ve “akışkan yatak teknolojisi”nin ön planda olduğu, bunlarla birlikte kömür kullanımı sonucu ortaya çıkan baca gazlarından SO₂’yi azaltmak için “baca gazı desülfürizasyon teknolojileri” ve NO_x’i azaltmak için ise “baca gazı denitrifikasyon teknolojileri” kullanımından söz edilmiştir. Bu teknolojiler kendi içlerinde sınıflandırılarak özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Akışkan yataklı yakma ve pulverize kömür yakma teknolojilerinin büyük yakma tesisleri kapsamında kömürden elektrik üretimi için önerilen, emisyon sınır değerlerini temel alan ve uygulanamadığı durumlarda emisyonları ve çevresel etkileri azaltacak şekilde tasarlanmış, pratikte uygulanabilen en etkin ve ileri teknikler, yani “Mevcut En İyi Teknikler (MET)” olarak tanımlandığı vurgulanmıştır.

2. KÖMÜR YAKITLI TERMİK SANTRALLERİN YAŞAM DÖNGÜSÜ ETKİLERİ İLE İLGİLİ LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Ulusal ve uluslararası literatürde elektrik üretimine ilişkin yapılmış YDD çalışmalarında genel olarak; fosil yakıtlara ve yenilenebilir enerji kaynaklarına bağlı olarak elektrik üretimi için enerji kaynaklarının karşılaştırıldığı çalışmalar yer almaktadır. Literatüre ek olarak mevcut Yaşam Döngüsü Envanterleri kapsamında enerji kaynaklarının envanterleri de yer almaktadır ve bu envanterler kullanılarak rahatlıkla farklı coğrafyalara ait farklı enerji kaynaklarının etkileri karşılaştırılabilmektedir. Bu çalışmalarda linyit kömüründen elektrik üretiminin çevresel etki potansiyelleri, diğer kaynak ya da enerji çeşitleri ile kıyaslandığında olumsuz yöndedir. Büyük yakma tesisleri kapsamında kömürden elektrik üretimi için önerilen en iyi mevcut tekniklere ilişkin ulusal ve uluslararası literatürde kısıtlı sayıda karşılaştırmalı YDD çalışması bulunmaktadır.

Yapılan çalışmalarda ISO 14001 Çevre Yönetim Sistemi standardının bir parçası olan ISO 14040/14044 Yaşam Döngüsü Değerlendirme standardı metodolojik bir çerçeve oluşturmakta olup, izlenen aşamalar aşağıdaki gibidir:

- Hedef ve Kapsam,
- Yaşam Döngüsü Envanter Analizi (YDEA),
- Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi (YDED),
- Yorumlama.

Bu bölümde mevcut YDD çalışmaları; farklı enerji kaynakları, kömür yakma teknolojileri ve baca gazı arıtma teknolojileri özelinde olmak üzere üç kısma ayrılarak sunulmuştur.

2.1. Enerji Kaynaklarının Etkilerinin Karşılaştırıldığı YDD Çalışmaları

Fosil yakıtların ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile elektrik üretimi için çok çeşitli uluslararası çalışmalar hâlihazırda bulunmaktadır.

Gagnon vd'nin çalışmasında [13], on yıllık süreçte dünya çapında gerçekleştirilen çok sayıda yaşam Yaşam Döngüsü Değerlendirme (YDD) çalışmalarına dayanan elektrik üretim sistemlerinin çevresel etkileri yakıtların çıkarılması, işlenmesi ve taşınması, enerji santrallerinin kurulması ve elektrik üretimi aşamaları için

sunulmuştur. Karşılaştırmalı analizden elde edilen sonuçlar, hidroelektrik ve rüzgâr gücünün mükemmel bir performansa sahip olduğunu göstermiştir. Çalışmada, nükleer enerjinin de mükemmel bir performansa sahip olduğu, ancak radyoaktif atıklar ve katastrofik kaygılar nedeniyle bazı grupların bu seçeneğe karşı çıkacağı belirtilmiştir. Doğal gazın elektrik üretim aşaması için performansı kömür veya petrolden çok daha iyidir, ancak yenilenebilir enerji kaynaklarına göre yüksek emisyonlara sahiptir. Uzun mesafelerde taşınması sırasındaki etkileri nedeniyle çevresel performansı olumsuz etkilenmektedir. Kömürün sera gazı emisyonları, SO₂, NO_x, uçucu organik bileşikler, partiküller, toksik metal ve arazi gereksinimleri gibi çoğu kriterde en kötü performansa sahip olduğu ve enerji geri ödeme oranının, arıtma ve minimum taşıma mesafesi olduğunda iyi olabileceği belirtilmiştir [13].

Meksika'da elektrik üretimi üzerine ilk kez yapılan bir Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) çalışmasında, GaBi yazılımı ve CML 2001 yöntemi kullanılarak 10 etki kategorisi için kömür, doğal gaz, sıvı yakıtlar, yenilenebilir enerjiler ve nükleer enerjinin karşılaştırması yapılmıştır [14]. “Beşikten mezara” yaklaşımı ile Meksika'nın kamu sektörü 2006 yılı verileri baz alınarak yapılan YDD çalışmasının sonuçları;

- 225 TWh elektrik üretiminin yılda 129 milyon ton CO₂ eşdeğerine sebep olduğunu, Küresel Isınma Potansiyeline (KIP) % 87 oranında katkının fosil yakıtlı enerji santrallerinin işletilmesine bağlı olduğunu göstermiştir. Kömür için 1094 g CO₂ Eşd. / kWh, ağır fuel-oil için 964 g CO₂ Eşd. / kWh ve doğal gaz için 468 g CO₂ Eşd. / kWh bulunmuştur. Yenilenebilir enerji ve nükleer enerji tüketimi toplam CO₂ eşdeğerine yalnızca %1,1 oranında katkı sağlamaktadır. Nükleer ve hidroelektrik sadece 12 g CO₂ Eşd. / kWh yaymaktadır.
- Asidifikasyon Potansiyeli (AP) etki kategorisinde; yıllık toplam 1,5 milyon ton SO₂ eşdeğerinin %65'inden fazlası, yakıtta yüksek kükürt oranına (%3-4) bağlı olarak ağır fuel-oil yakıtlı enerji santrallerinin işletilmesinden kaynaklandığı bulunmuştur. En büyük ikinci katkısı ise, kömürlü enerji santrallerinin (% 20) işletmesi olarak bulunmuştur. Bunun başlıca nedeni, yerli kömürün %1, ithal kömürün %0,5 olan kükürt içeriğidir. Böylece, akaryakıt enerji santrallerinin işletilmesinden oluşan SO₂, AP'nin %77'sini oluşturmaktadır. Gaz santrallerinin işletilmesinden kaynaklanan NO_x

emisyonları, bu etkiyi %21 artırmaktadır. Kalan küçük katkılar, kömürle ilgili faaliyetlerden salınan hidrojen klorit (% 0,8), amonyak (% 0,2) ve hidrojen flüoritten (% 0,2) oluşmaktadır.

Diğer çevresel etkilerin büyük bir kısmı enerji santrallerinde fosil yakıtların yanmasıyla ve en fazla katkı sağlayan ağır fuel-oil ile gerçekleşmektedir [14].

Türkiye'deki fosil yakıtlı termik santralleri linyit kömürü, taş kömürü ve doğal gaz kullanımına göre üç ana sektöre ayırarak beşikten mezara yaklaşımıyla değerlendirmeleri yapılan bir çalışmada [15] sistem sınırları; yakıtların çıkarılması, işlenmesi ve taşınması, santrallerde elektrik üretimi için yanma, tesis yapımı ve tesis ömrünün sonunda sökme işlemleri olarak belirlenmiştir. CML 2001 etki değerlendirme metodu ile kWsaat başına tahmin edilen çevresel etki potansiyelleri ve sonuçları şu şekildedir:

- **KIP:** En yüksek etki taşkömürüne ait olup (1,126 kg CO₂-eşd.), bunu sırasıyla linyit kömürü (1,062 kg CO₂-eşd.) ve doğal gaz (0,499 kg CO₂-eşd.) izlemiştir. Üç seçenek için de KIP'nin çoğunluğu (liniyit için %97, taşkömürü için %83 ve gaz için %74 olmak üzere) yakıt yanmasından kaynaklanmaktadır.
- **ATP elementler:** Linyit, taş kömürü ve doğal gaz tüketimi için kWsaat başına ATP sırasıyla 20, 81 ve 24 mg Sb-eq olarak tahmin edilmiştir. Taş kömürünün etkisinin yüksek olmasının ana sebebi, madencilik ve tesis yapımı aşamalarıyla birlikte taşkömürünün uzun mesafede taşınmasıdır. Buna karşılık, linyit ithal edilmediğinde, nakliye aşamasının etkileri olmadığından linyitten elektrik üretimi için ATP elemanlarının çoğunun madencilik sırasında meydana geldiği görülmüştür.
- **ATP fosil kaynaklar:** Elektrik üretimi için fosil kaynakların tüketilmesi; taşkömürü için 13.5 MJ/kWsaat, linyit için 15.1 MJ/kWsaat ve doğal gaz için 8.8 MJ/kWsaat'tir. Doğal gaz kullanan tesislere kıyasla kömür esaslı tesislerin, daha düşük verimliliğe ve ayrıca linyit ve katı kömürün gazla karşılaştırıldığında daha düşük ısıtma değerlerine sahip olması nedeniyle, gaz gücündeki etki yaklaşık olarak iki kat daha düşüktür. Yakıtın çıkarılması, yakıt taşımacılığı olmadığından, linyit tesisleri için bu etkinin tümünü açıklamaktadır.

- **AP:** Linyitten elektrik üretimi için en yüksek olup (10,8 g SO₂-eşd.), linyitteki yüksek kükürt içeriği ve bazı santrallerde kükürt giderme teknolojisi eksikliği nedeniyle gerçekleştiği belirtilmiştir. Bunu sırasıyla taşkömürü (6 g SO₂-eşd.) ve doğal gaz (0,8 g SO₂-eşd.) izlemiştir. Taşkömürü için AP'nin çoğunluğu, santrallerin çalışması sırasında büyük oranda üretilen SO₂ (%86) ve NO_x (%12) emisyonlarından kaynaklanmaktadır. Doğal gazdan elektrik üretiminde ise AP'nin büyük kısmını gazın çıkarılması (%57) ve gazın yanması (%26); geri kalan kısmını gazın dağıtımı oluşturmaktadır (%17).
- **FOOP:** Linyit ve taşkömürü bazlı elektrik üretimi için bu etkinin büyük çoğunluğu, kömür yanması aşamasında ortaya çıkan SO₂, NO_x ve CO emisyonlarından kaynaklanmaktadır (Linyitli: 0,48 g C₂H₄-eşd. ve taşkömürü 0,33 g C₂H₄-eşd.). Bunun aksine doğal gazdan elektrik üretimi için HTP, 180 mg C₂H₄ eşdeğeri olarak tahmin edilmekte olup, metan dışındaki uçucu organik bileşiklerden olan N₂O ve SO₂ emisyonları nedeniyle yakıtın çıkarılması aşamasıdır.
- **ÖP:** En yüksek değer linyitten elektrik üretimi için olup (11,9 g PO₄-eşd.), bu etkinin yaklaşık %85'inin maden sahasında meydana gelen fosfatların temiz suya karışmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Taşkömürü için ÖP, yaklaşık olarak beş kat daha düşüktür (2,3 g PO₄-eşd.) ve gaz için çok daha düşüktür (0,1 g PO₄-eşd.).
- **İTP:** Linyitten elektrik üretiminde en yüksek değer hesaplanmış olup (1393 g DCB-eşd.), bunun büyük oranda linyit madenciliği (%62) ve özellikle selenyum, molibden, berilyum ve baryum emisyonlarının bir sonucu olarak ortaya çıktığı belirtilmiştir. Gaz enerjisi, krom, arsenik ve nikel gibi ağır metallerin havaya gönderilmesinden dolayı, tesis yapımının İTP'nin yaklaşık yarısına katkıda bulunduğunu göstermiştir (6 g DCB-eşd.). Taş kömüründe, diğerlerinden farklı olarak yakıtın taşınması aşamasının katkısı olduğu gösterilmiştir (301 g DCB-eşd.).
- **OTİP:** Linyitin OTİP'sinin %60'ı madencilik, geri kalanının ise tesis işletmesinden kaynaklanmıştır (1,9 mg R11-eşd.). Taşkömürüden gelen etki dört kat daha fazladır (7,6 mg R11-eşd.) ve doğal gazdan 48 kat daha

yüksek olup (92 mg R11-eşd.), büyük ölçüde yakıtların taşınması ve özellikle gaz boru hattı dağıtım sisteminde yangın söndürücü ve soğutucu olarak kullanılan halon emisyonlarından kaynaklanmaktadır.

Ayrıca METP (Marin ekotoksisite potansiyeli), TSETP (tatlısu ekotoksisite potansiyeli) ve KETP (karasal ekotoksisite potansiyeli) de tahmin edilmiş olup, doğal gazın çıkarılması aşaması dolayısıyla doğal gaz için METP (6,9 kg DCB-eşd.), TSETP (3,5 g DCB-eşd.) en ve KETP en düşüktür (0,3 g DCB-eşd.) [15].

Çalışmanın literatürdeki başka çalışmalarda karşılaştırması yapılmış olup; Türkiye'de fosil yakıtlardan elde edilen elektrik üretimi hakkında başka yaşam döngüsü değerlendirme araştırması yapılmamış olması nedeniyle sonuçların ulusal bazda karşılaştırılmasının mümkün olmadığı, ancak akademik literatürde diğer ülkeler için yapılan, farklı yakıt kullanımları içeren, benzer çalışmaların bulunması dolayısıyla mevcut sonuçların karşılaştırıldığı vurgulanmıştır. Bu çalışmada tahmin edilen kWsaat başına elektrik üretiminin tüm etkileri, literatürde bildirilen aralıkların çok üzerinde olduğu gösterilmiştir [15].

Brizmohun vd.'nin çalışması [16], elektrik üreticilerinin ve karar vericilerin çevresel etkileri nasıl azaltılabileceğine dair bilgi vermeyi amaçlayarak, Mauritius'ta elektrik üretiminin çevreye olan yaşam döngülerini ilk kez ortaya koymuştur. Ülkenin elektriğinin çoğunluğu fosil yakıtlardan, %40 oranında kömür ve %37 oranında fuel-oilden oluşmakta, geri kalanı ise şeker kamışı küspesi(%19) ve hidroelektrik(%4)ten sağlanmaktadır. Çalışmada SimaPro 7 yazılımı ile CML 2 Baseline 2001 metodu kullanılarak, belirlenen dört kaynak kullanımı ile elektrik üretimleri için 10 etki kategorisi incelenmiştir. Etkiler, Avrupa koşullarına atıfta bulunan AP ve FOOP hariç, çoğu kategori için küresel etki (karakterizasyon) faktörlerine dayanılarak hesaplanmıştır ve etkiler özel olarak Mauritius ya da Afrika ile ilişkilendirilmemektedir. Sonuçlar, petrolden elde edilen elektriğin, diğer üç kaynağa kıyasla on kategoriden altısı için en yüksek etkiye sahip olduğunu göstermektedir: AP, TSETP, KETP, İTP, OTİP ve FOOP. Kalan dört etki (ATP, KIP, ÖP ve DSETP) kömür için en yüksektir. Kömür için küresel ısınma potansiyeli (KIP) 1444 kg CO₂ Eşd./MWh ve petrol için 754 kg CO₂ Eşd./MWh olarak tahmin edilirken, küspe ve hidroelektrik için bu etkiler oldukça düşüktür (sırasıyla 29 ve 8,6 kg CO₂ Eşd./MWh). Kömürden elektrik üretimi için belirlenen üç aşamanın (kömür üretimi, taşıma ve elektrik üretimi) potansiyel etkileri grafik olarak

karşılaştırılmış, ancak sayısal olarak sonuçlar verilmemiştir. Grafiğe göre KIP, AP, ÖP, İTP, FOOP, TSETP ve KETP sonuçları en yüksek elektrik üretimi aşaması için görülmektedir. En düşük etkiler hidroelektrik için bulunmuştur. Petrol ve kömürün Mauritius'taki elektriğin genel etkilerine en çok katkıda bulunan kaynaklar olduğu ortaya konmuştur [16].

Pakistan'da halihazırda kullanımda olan yedi elektrik üretim kaynağının yaşam döngüsünü kapsayan toplam 20 sürdürülebilirlik göstergesinin değerlendirildiği bir çalışmada [17], hidroelektrik en düşük çevresel ve ekonomik etkilere sahip en sürdürülebilir seçenek olarak bulunmuştur. En kötü ekonomik ve sosyal etkilerden dolayı petrol, ülke için en az sürdürülebilir seçenek olarak görülmektedir. Bu çalışmanın odak noktası ekonomi, çevre ve toplum olup, teknoloji ya da işlevsellik ile ilgili göstergeler dikkate alınmamıştır. Elektrik üretim kaynaklarına göre 1 kWh elektrik için sonuçlar karşılaştırıldığında; kömürün ÖP (11337,25 mg PO₄ Eşd.), KETP (2,82 g DCB Eşd.), TSETP (1634,78 g DCB Eşd.), METP (4023,88 kg DCB Eşd.), İTP (947,91 g DCB Eşd.) ve ATPfossil (25,73 MJ) etki potansiyellerinin en yüksek olduğu görülmektedir. Kömür için diğer etki potansiyellerinin değerleri; KIP 790,11 g CO₂ Eşd., AP 3207,02 mg SO₂ Eşd., OTİP 3,40 µg CFC-11 Eşd. ve FOOP ise 60,2 mg Eten eşdeğeridir. Petrol için; KIP (1502,86 g CO₂ Eşd., AP (12456,88 mg SO₂ Eşd.), OTİP (161,66 µg CFC-11 Eşd.) ve FOOP (459,14 mg Eten Eşd.) değerleri diğer kaynaklara göre en yüksek değerlere sahiptir [17].

2.2. Kömür Yakma Teknolojileri Özelinde Yapılan YDD Çalışmaları

Çin'de yapılan bir çalışmada [18] yakma teknolojisine göre; pulverize kömür (PK) teknolojileri, yani kritikaltı (K-altı), süperkritik (SK) ve ultra süperkritik (USK) kazan teknolojileri ve entegre kömür gazlaştırma kombine çevrim (EKGKÇ) teknolojisi olmak üzere dört yakma teknolojisi karşılaştırılmış ve 1 MW elektrik üretimi için 1. Aşama kömür madenciliği, 2. Aşama malzeme ve yakıt taşımacılığı, 3. Aşama ise santrallerin işletilmesi olmak üzere tüm yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışma kapsamında hesaplanan çevresel etki potansiyelleri ve sonuçları şu şekildedir:

- **KIP (Küresel ısınma potansiyeli):** Üretilen MWsaat elektrik başına sera gazı emisyonunun net üretim verimiyle ters bağıntılı olduğunu göstermiştir. En yüksek net üretim verim ve en düşük KIP USK'ye ait olup (801 kg CO₂-

eq), bunu sırasıyla EKGKÇ (813 kg CO₂-eq), SK (830 kg CO₂-eq) ve K-altı (971 kg CO₂-eq) izlemiştir.

- **ATP (Abiyotik tükenme potansiyeli):** Hammadde üretimiyle ilişkili olan AP'ye ilişkin sonuçlar net üretim verimliliğiyle tutarlı olup, en düşük değer USK (0.118 kg Sb-eq) ve EKGKÇ'ye (0.12 kg Sb-eq) aittir.
- **AP (Asidifikasyon potansiyeli) ve FOOP (Fotokimyasal ozon oluşturma potansiyeli):** En düşük SO₂ ve NO_x çıktıları nedeniyle, AP ve FOOP değeri en düşük olan EKGKÇ'dir (AP: 0.379 kg SO₂-eq, POPC: 0,0331 kg Ethene-eq). EKGKÇ'de sülfür emisyonu H₂S formunda bulunmakta olup, neredeyse %100 giderimi gerçekleştirilmektedir. Diğer teknolojilerde SO₂ ve NO_x kontrolü baca gazı desülfürizasyon (FGD) ve seçici katalitik indirgeme (SKİ) teknolojisi ile sağlansa da, AP ve FOOP değerleri EKGKÇ'ye göre daha yüksektir.
- **ÖP (Ötrofikasyon potansiyeli) ve İTP (İnsan toksisite potansiyeli):** Hesaplanan ÖP ve İTP sonuçları, EKGKÇ'nin en düşük değerlere sahip olduğunu göstermiştir (ÖP: 0.051 kg fosfat-eşdeğeri, İTP: 2.87 kg DCB-eşd.). Bunu nedeni de ağır metaller, partikül madde, VOC gibi zararlı gazların, emisyon içinde en az düzeyde bulunmasıdır. Sonuçlar diğer teknolojilerin net üretim verimliliği ile ters bağıntılı olup, sırasıyla USK, SK ve K-altı'dır.
- **OTİP (Ozon tabakasının incilmesi potansiyeli):** Hesaplanırken iki adet halojenli organik emisyonun (trikloroflorometan ve diklorotetrafloroetan) toplam verileri kullanılmıştır. Sonuçlar, K-altı'nın en yüksek değerde olduğunu göstermiştir ($1.62 \cdot 10^{-6}$ kg R11-eşd.). Bunun nedeninin de MWsaat başına kömür tüketiminin en yüksek bu sistemde olması şeklinde belirtilmiştir. Bunu da sırasıyla SK ($1.37 \cdot 10^{-6}$ kg R11-eşd.), USK ($1.31 \cdot 10^{-6}$ kg R11-eşd.). ve EKGKÇ ($1.31 \cdot 10^{-6}$ kg R11-eşd.) izlemiştir.

Bu çalışmada genel olarak en iyi sonuçları USK ve EKGKÇ vermiş olup, eğer USK ve EKGKÇ'ye karbon tutma ve ayırma (KTA) teknolojisi dahil edilirse sonuçlarda ne gibi değişiklikler olacağı da gösterilmiştir. Sonuç olarak karbon tutumu dolayısıyla KIP'nin oldukça düşeceği belirtilmiş, USK ve EKGKÇ + KTA'da büyük bir düşüş olduğu sayısal olarak ifade edilmiştir [18].

Eski bir enerji santralinde termal güç üretiminin çevresel etkilerini ölçmek için yaşam döngüsü envanterleri geliştirilmiş ve aynı güç kapasitesi için kömür tüketimini en aza indirmenin yolları belirlenmiştir [19]. Bu santral için yapılan YDD'de SimaPro yazılımında Eco Indicator 99 (H) yöntemi kullanılmıştır. Sistem sınırları mümkün olduğunca geniş tutulmuş ve kömür madenciliği, ulaştırma, kimyasal kullanımı, açık ocak madenciliği ve enerji santrali operasyonları için depolama gibi kömürden elektrik üretmek için gerekli tüm ana süreçler dâhil edilmiştir. Toplanan veriler için fonksiyonel birim 1 GWsaat olarak belirlenmiştir.

Araştırma bulgularına göre;

- Karsinogenik emisyonlar için elektrik üretimi emisyonların yaklaşık %63'ünü oluşturmaktadır (madencilik %31 ve ulaşım yaklaşık %6).
- Solunum organlarını etkileyen emisyonların %52'si santralden, %40'ı madencilik operasyonlarından ve yaklaşık %8'i ulaşımdan kaynaklanmaktadır.
- Respiratuar inorganik emisyonların, emisyonların %63'ünü santral, %6'sını kömür madenciliği, %11'ini taşımacılık oluşturmaktadır.
- İklim değişikliğine katkıda bulunan etkilerin %49'u elektrik üretiminden kaynaklıdır. Santralin ozon tabakasının tükenmesi üzerindeki etkileri toplam etkinin %61'ini oluştururken, kömür madenciliği %38 ve taşıma %1 oranında gerçekleştirilmektedir.
- Enerji Santrali ekotoksik etkilerin %34'ünü oluşturmaktadır (kömür madenciliği %52 ve taşımacılık %14).
- Santral % 63'lük oranla asitleştirme üzerinde en büyük etkiye sahiptir (Kömür madenciliği %30 ve taşımacılık %7).
- Elektrik üretimi, etkinin yaklaşık %78'ini oluşturan küresel ısınma potansiyelinin en büyük yüzdesine sahiptir (kömür madenciliği yaklaşık %15 ve taşıma yaklaşık %5).

Çalışmada, çevresel etki azaltma müdahalelerinin çoğunun santralde, kömür madenciliğinde ve ulaşımda olması gerektiği ve belirsizlik analizi, atığın bertaraf senaryoları ve bu konuların bu analizde yer almayan sosyal konular ve ekonomik konular olarak dâhil edilmesi çalışmalarına ihtiyaç olduğu belirtilmiştir [19].

İngiltere'de Pulverize Kömür (PK) enerji santrallerinin yaşam döngüsü sera gazı emisyonlarını inceleyen bir çalışmada [20], elektrik üretim tesisinin yaşam

döngüsü değerlendirmesi inşaat, işletme ve hizmet dışı bırakma aşamalarını içermektedir. Kullanılan metodoloji, ilgili her bir işlem için toplam emisyonların hesaplanmasını sağlayan malzeme bazlı süreç analizidir. Santralin enerji ve malzeme gereksinimlerini tahmin etmek için geliştirilen basit bir modelle ön hesaplamalar İngiltere’de yapılan geçmiş çalışmalarla ayrıntılı bir şekilde karşılaştırıldığında, tipik bir kömür yakıtlı termik santral için yaşam döngüsü emisyonlarının 990 g CO₂-e/kWh olacağını göstermiştir. Bu emisyonların büyük bir kısmı doğrudan yakıt yanmasından kaynaklanmaktadır (882 g/kWh, % 89). Dolaylı emisyonların %60’ını oluşturan maden işletmelerinden metan sızıntısı vardır. Toplamda, madencilik faaliyetleri (metan sızıntısı dahil), dolaylı emisyonların %67,4’ünü oluştururken, kireçtaşı ve diğer malzeme üretimi ve taşımacılığı %31,5’tir. Geliştirilen metodoloji, tipik bir EKGKÇ santraline de uygulanmıştır. EKGKÇ için yaşam döngüsü emisyonlarının, PK enerji santrallerinden %15 daha az olduğu bulunmuştur [20].

2.3. Baca Gazı Arıtma Teknolojileri Özelinde Yapılan YDD Çalışmaları

Literatürde termik santrallerden kaynaklı emisyonların azaltılması için kullanılan baca gazı arıtma teknolojileri özelinde yapılmış uluslararası çalışmalar mevcuttur.

Baca Gazı Desülfürizasyon (BGD) teknolojileri; Dolaşımli Akışkan Yataklı Baca Gazı Desülfürizasyon (DAY-BGD) ve Islak Kireçtaşı Baca Gazı Desülfürizasyon (IKBGD) teknolojileri için karşılaştırmalı yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılan bir çalışmada [21], sistemin imalatı, imalat malzemeleri üretimi, imalat malzemelerinin taşınması, BGD sisteminin taşınması ve işletilmesi aşamaları dahil DAY-BGD ve IKBGD teknolojilerinin tüm yaşam döngüsü boyunca enerji tüketimleri, kaynak tüketimleri ve çevresel etkileri tanımlanarak ölçülmüştür. Tahmin edilen çevresel etki kategorileri; küresel ısınma, asidifikasyon, yapı maddesi zenginleştirme, fotokimyasal ozon, yağma atık, cüruf ve küller olarak 6 farklı şekilde incelenmiştir. Çalışmada genel değerlendirme için toplam enerji tüketimleri, kaynak tükenmesi endeksi ve FGD teknolojilerinin çevresel etki yükleri bulunmuştur. IKBGD teknolojisi, bu çalışmada YDD’ye dayalı olarak nispi anlamda çevresel açıdan iyi ve enerji tasarruflu olarak kabul edilmiştir. Çevresel etkilerle ilgili olarak, yağma atık her iki tip BGD teknolojisi için en kritik olandır. Ayrıca yapılan gözlemlerin, DAY-BGD teknolojisinde karışık katı atık ve karbon monoksit

(CO), IKBGD teknolojisinde ise karışık katı atık ve kükürtdioksit (SO₂) dahil olmak üzere bazı hassas parametrelerin belirlenmesine yardımcı olduğu belirtilmiştir [21].

Zhou vd.'nin Kanada, Saskatchewan'taki linyit kömürü ile çalışan The Boundary Dam Güç Santrali'ni, elektrik üretim istasyonundaki operasyonların modellenmesi için bir senaryo çalışması olarak seçtiği çalışmada [22], tesise üç farklı CO₂ tutma teknolojisi entegre ederek “beşikten kapıya” yaklaşımı ile yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılmıştır. 1 MW elektrik üretimi için TRACI etki metodu ile yapılan çalışmada; yanma sonrası, ön yanma ve oksijen yakıt olarak seçilen üç farklı CO₂ tutma teknolojisinin de KIP etki kategorisinde önemli ölçüde azaltılmış etkiler gösterdiği belirtilmiştir. Karşılaştırmada, ön yanma ve oksijen yakıt teknolojilerinin çeşitli çevresel etki kategorilerinde yanmadan sonra daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Ön yanma teknolojisinin, SO_x ve NO_x emisyonlarının çoğunun kömür gazlaştırmasından sonra gaz temizleme prosesinde arıtıldığından dolayı, AP etki kategorisinde en az etkisi olduğunu görülmüştür. ÖP etki kategorisinde, oksijen esaslı yanmada sadece az miktarda NO_x ve NH₃ üretildiği ve bu bileşiklerin elektrostatik filtre, BGKG ve CO₂ sıkıştırma ve saflaştırma birimlerinde uzaklaştırılmasından dolayı, oksijen yakıt teknolojisi en az etkiyi göstermiştir [22].

Sampattagul vd. [23], Tayland'ın en büyük linyitle çalışan enerji santralinin ve BGD'nin çevre üzerindeki etkisini değerlendirmek için Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi - Sayısal Eko-yük Toplam Standardizasyon (LCA-NETS, YDD-SETP) çalışması yapmıştır. Çalışmanın yaşam döngüsü envanteri ISO 14040 ve ISO 14041 (ISO, 1997; ISO, 1998) çerçevesine ve prosedürlerine göre gerçekleştirilmiştir. Tesisin ve BGD'nin envanter analizi; tesis tarafından sağlanan mevcut veriler, ham enerji için kullanılan malzemelerin tedarikinin çevresel yükleri raporu gibi kamu veritabanı veya literatür bilgileri kullanılarak hazırlanmıştır. Sistem sınırları; kömür madenciliği, termik santralin inşası, taşıma ve termik santralde yakıt tüketimi olarak belirlenmiştir. BGD'nin kurulumundan önce ve sonra alternatifler arasında bir karşılaştırma sağlamak için Yaşam Döngüsü Maliyetlendirme (YDM-LCC) kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları, linyit yakıtlı termik santralin tüm yaşam döngüsü boyunca eko-yük değerlerinde gösterilmiş olup, BGD sisteminin kurulumunun linyitle çalışan tesislerle ilişkili asidifikasyon problemini yaklaşık % 97 azaltabileceğini göstermiştir [23].

Japonya'da yapılan bir çalışmada[24] ise pulverize kömür santralleri için KTA kurulmasının olası çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Çevresel etki kategorileri olarak KIP, AP, ÖP, fotokimyasal oksidant, kentsel alan hava kirliliği, İTP, suda biyolojik toksisite (SBT), KETP ve kaynak tüketimi seçilen Tang vd.(2014)'nin çalışmasında, yaşam döngüsü değerlendirme yaklaşımı kullanılarak;

Senaryo 1: USK kömür santrali,

Senaryo 2: Monoetanolamin (MEA) çözücüsü ile CO₂ yakalama, sıkıştırma, deniz tabanından boru hattı taşımacılığı ve deniz tabanında depolama olmak üzere iki KTA sistemi,

Senaryo 3: Durum 2'deki ile aynı ancak CO₂ nakliyesi gemi yoluyla olan KTA sistemi olmak üzere üç senaryo ele alınmıştır.

Senaryoların çevresel etkilerini değerlendirmek ve karşılaştırmak için, Japon çevre şartlarına göre geliştirilen bir yaşam döngüsü etki değerlendirme metodu olan LIME (son nokta modellemesine dayalı yaşam döngüsü etki değerlendirme) yöntemi kullanılmıştır. Daha sonra, LIME'de dört temel koruma alanı (insan sağlığı, sosyal varlık, biyoçeşitlilik ve birincil üretim) olarak tanımlanan bitiş noktası seviyesindeki çevresel hasarı ölçmek için bir hasar değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. 1. senaryo için KIP 0.89 kg CO₂/kWsaat bulunmuştur. Senaryo 2 ve Senaryo 3 için sera gazı emisyonları, Senaryo 1'in emisyonlarının sırasıyla %20 ve %29'u kadardır. Ancak, Senaryo 2 ve 3 için, özellikle CO₂ yakalama prosesinde NH₃ emisyonları ve MEA üretim prosesinde etilen oksit olmak üzere, sera gazı dışı emisyonlar artmıştır. Dört koruma alanı üzerindeki zararı tahmin eden son nokta düzeyindeki üç senaryo için bulunan sonuçlarda, Senaryo 2 ve 3 için biyoçeşitlilik ve birincil üretime verilen zararın %40 oranında arttığı gösterilmiştir. Özetle bu çalışmanın sonuçları, insan toksisitesi, AP ve ÖP üzerindeki etkilerin büyük oranda arttığını gösterirken KTA'nın yerleştirilmesinin küresel ısınmayı azalttığını göstermiştir. Hasar tespiti sonuçlarına göre NH₃ emisyonları ve CO₂ yakalama aşamasındaki yüksek miktarda enerji tüketiminden dolayı sosyal varlıklara ve ekosistemlere büyük zarar verildiği tespit edilmiştir [24].

2.4. Bölüm Sonucu

Elektrik üretimine ilişkin yapılmış ulusal ve uluslararası literatürdeki ISO 14040/14044 Yaşam Döngüsü Değerlendirme standardına uygun olarak yapılmış

YDD çalışmalarında, kaynağa göre (linyit, taşkömürü ve doğal gaz kullanılan termik santraller) veya enerji çeşidine göre (fosil yakıttan elektrik üretimi ve yenilenebilir enerjiden elektrik üretimi gibi) karşılaştırılmaların bulunduğu görülmektedir.

Linyit kömüründen elektrik üretiminin çevresel etki potansiyellerinin, diğer kaynak ya da enerji eřitleri ile kıyaslandığında yüksek olduğu, kmrden elektrik üretimi için önerilen mevcut en iyi tekniklere ilişkin ulusal ve uluslararası literatürde kısıtlı sayıda karşılaştırmalı YDD alışması bulunduğu belirlenmiştir.

Çalışmaların neredeyse tümünde veri paylaşımı sınırlı olup, sadece sonuçlar üzerinden değerlendirme yapılması söz konusudur.



3. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ (YDD)

Bu bölümde YDD tanımlanarak, YDD'nin aşamaları ve bu aşamaların nasıl uygulandığından bahsedilmiştir. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirme (YDED) yöntemleri ve etki kategorilerine göre sayısal hesaplamaların yapıldığı yazılımlar hakkında bilgi verilmiştir.

3.1. YDD'nin Tanımı, Uygulama Amaçları ve Özgün Yönleri

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD), bir ürün veya hizmetin çevresel etkilerini detaylı olarak ortaya çıkarmaya yarayan niceliksel ve sistematik bir yaklaşım olarak tanımlanabilir [25]. YDD çalışması, verilecek olan kararlara yardımcı olma niteliği taşımakta olup, ürünlerin hammaddelerinin, üretim süreçlerinin, ekipmanlarının vb. değiştirilmesi veya yeniden tasarlanması ile çevresel etkilerin önlenmesi/azaltılması amacıyla kullanılır [26].

3.2. YDD'nin Aşamaları

YDD çalışmaları ISO 14040 ve 14044 standartlarına göre yürütülür. ISO 14040 standardı, Yaşam Döngüsü Değerlendirme (YDD) Prensipler ve Çerçeve adıyla ürünlerin ve sistemlerin çevresel etkilerinin değerlendirilmesi ve bu etkilerin azaltılmasını sağlamaya yönelik geliştirilen YDD yöntemini ve kullanım alanlarını tanımlamaktadır [25]. ISO 14044 standardı ise YDD Gereksinimler ve Yönergeler adıyla YDD'nin aşamalarını tanımlayan bir kılavuz görevi görmektedir. YDD'ler dört aşamadan oluşur:

1. Amaç ve Kapsam
2. Envanter Analizi
3. Etki Değerlendirmesi
4. Yorumlama

3.2.1. Amaç ve Kapsam

Bir YDD çalışmasının ilk aşaması amaç ve kapsam tanımının yapılarak işlevsel birim ve sistem sınırlarının belirlenmesidir.

Amaç tanımında çalışmanın neden yapıldığı, ulaşılmak istenen hedefler, YDD raporunun sunulacağı hedef kitle ve karşılaştırma yapılıp yapılmayacağı hakkında bilgi verilir.

Kapsam tanımında ise değerdendirilecek ürün veya süreç sisteminin sınırları tanımlanır ve tüm varsayımlar detaylandırılır [25].

İşlevsel Birim

İşlevsel birim, bir ürünün niceliksel işlevinin tanımı olup, girdilerin ve çıktılarının normalleştirildiğı bir referans sağlar [18]. Örneğın, bir içecek paketinin işlevi, sıvının korunmasının yanı sıra taşınabilirlik ve depolanabilirliktir. İşlevsel birim, sıklıkla performansın teknik yönlerini yerine getirecek şekilde 1 Lt'lik sıvı sağlanması olarak tanımlanabilir. Bu işlev, farklı paketleme özellikleriyle eşleştirilebilir [28].

Sistem Sınırları

Sistem sınırları, hangi süreçlerin sisteme dâhil edileceğini veya hangilerinin hariç tutulacağını tanımlar. Sistemin sınırlarını belirlemek tamamen kullanıcının çalışma kapsamına göre seçimine bağlıdır. Sistem sınırlarını belirlemede dört ana seçenek bulunmaktadır [26]:

- **Beşikden mezara:** Malzeme ve enerji üretim zincirini içermekte olup, ham maddenin çıkarılmasından, taşınması ve ürünün yaşam süresi sonunda bertarafını da içeren kullanım aşamasına kadar olan tüm süreçleri içerir.
- **Beşikden Kapiya:** Ham maddenin çıkarılmasından başlayarak üretim aşamasını da kapsayan (fabrikadan çıkışa kadar olan) tüm süreçleri içerir.
- **Kapıdan Mezara:** Üretim sonrasındaki her şeyi içeren, kullanım ve yaşam sonu aşamalarından kaynaklanan süreçleri içerir.
- **Kapıdan Kapiya:** Yalnızca üretim aşamasından kaynaklanan süreçleri içerir. Tek bir üretim adımı veya sürecin çevresel etkilerini belirlemede kullanılır. Kısıtlayıcı bir sistem sınırıdır. Operasyonel girdi-çıkıtı analizleri yapıldığından sıklıkla yanlış kullanılan terimler, işletmenin ekobalansı, ek açıklamaların eksikliği gibi nedenlerle bir sorun geliştirme riski vardır.

3.2.2. Envanter Analizi

Belirlenen sistem sınırları içinde gerekli olan enerji, su, hammadde kullanımı ve bunlara bağlı oluşan çevresel salımlar gibi bütün verilerin toplandığı aşama envanter analizidir. Bütün malzeme ve enerji girdi ve çıktıları tablo halinde listelenir ve kullanılacak YDD programına işlenir.

3.2.3. Etki Değerlendirmesi

Bu aşamada, sistemin olası çevresel salımlarının miktar ve önemi tanımlanarak çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkisi değerlendirilir. Etki değerlendirme analizi yüzlerce emisyon arasından aynı etkide payı olan emisyonların bir arada toplanmasını ve etkilerle ilişkilendirilmesini ve etkinin ortak bir birim olarak ifade edilmesi için emisyonlar için stres etkeni-etki zincirlerinin, karakterizasyon katsayılarının ve etkiler için ağırlık katsayılarının belirlenmesini kapsar [26].

▪ *Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi (YDED) Yöntemleri*

Bir YDED gerçekleştirmek için kullanılabilecek çeşitli yöntemler bulunmakta olup, bunlar sürekli olarak farklı metodolojilere ait farklı bilimsel gruplar tarafından araştırılıp geliştirilir. Leiden Üniversitesi Institute of Environmental Sciences tarafından geliştirilen CML (Center of Environmental Science of Leiden University) ve US EPA'nın geliştirdiği TRACI (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts) bu yöntemlere örnek olarak verilebilir. Bunun dışında ReCiPe, Eco-Indicator 99, EDIP, Impact 2002 gibi yöntemler de bulunmaktadır. Çizelge 3.1.'de en yaygın olarak kullanılan CML, TRACI ve ReCiPe yöntemlerinin etki kategorileri karşılaştırılması yapılmıştır.

CML 2001, belirsizliklerin sınırlandırılması için neden-sonuç zincirinde kantitatif modellemeyi erken aşamalara sınırlayan bir etki değerlendirme yöntemidir. Sonuçlar, ortak mekanizmalara (örneğin, iklim değişikliği) veya yaygın olarak kabul edilen gruplara (örneğin, ekotoksisite) göre orta nokta kategorilerinde gruplandırılmıştır. CML 2001'in ortalama Avrupa karakterizasyon faktörleri, dünyada ve Avrupa'da şu anda mevcut en iyi uygulama olarak önerilmektedir. CML 2001'de bölgesel faktörler temel olarak kabul edilmemiştir, çünkü YDD'deki emisyon alanları arasındaki farklılıkları göz önünde bulundurmamak her zaman mümkün olmamakta ve istenmemektedir [29].

TRACI metodolojisinde etki kategorileri, neden-sonuç ilişkisi içinde modellemenin kesinliklerine ilişkin daha yüksek bir toplumsal anlaşıma düzeyi dahil olmak üzere, orta nokta seviyesinde tanımlanmıştır. Asidifikasyon, duman oluşumu, ötrofikasyon, insan sağlığı kanser, insan sağlığı kriteri gibi etki kategorilerinde yapılan araştırmalar, ABD ve Kanada koşullarına uygun girdi verilerini kullanarak özellikle ABD koşullarına yönelik olarak geliştirilmiştir.

Çizelge 3.1. Etki Değerlendirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması [26].

CML	Birim	TRACI	Birim	ReCiPe	Birim
Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)	kg CO ₂ -Eşd.	Küresel Isınma - Hava	kg CO ₂ -Eşd.	İklim Değişimi	kg CO ₂ -Eşd.
Asidifikasyon Potansiyeli (AP)	kg SO ₂ -Eşd.	Asidifikasyon - Hava	mol H ⁺ -Eşd.	Karasal Asitleşme	kg SO ₂ -Eşd.
Ötrofikasyon Potansiyeli (ÖP)	kg Fosfat-Eşd.	Ötrofikasyon - Hava Ötrofikasyon - Su	kg N-Eşd.	Deniz Ötrofikasyonu	kg N-Eşd.
Temiz Su Akuatik Ekotoksisite Potansiyeli (FAETP)	kg DCB-Eşd.	Ekotoksisite – Hava	kg 2,4 Dikloro fenoksi asetik asit	Tatlı Su Ekotoksisitesi	kg 1,4-DB Eşd.
Deniz Akuatik Ekotoksisite Potansiyeli (MAETP)		Ekotoksisite - Su		Deniz Ekotoksisitesi	
Abiyotik Tükenme Potansiyeli (ABP)	kg Sb-Eşd.	İnsan Sağlığı Kriteri – Hava – Noktasal Kaynak	kg PM ₁₀ - Eşd.	Fosil Tükenme	kg Petrol Eşd.
Ozon Tabakası Tükenme Potansiyeli (ODP)	kg R11-Eşd.	Kirli Hava Kütlesi	kg O ₃ -Eşd.	Stratosferik Ozon Tükenmesi	Kg CFC 11-Eşd.
Fotokimyasal Ozon Oluşturma Potansiyeli (POCP)	kg Eten-Eşd.	Fotokimyasal Duman Oluşumu - Hava	kg NO _x -Eşd.	Fotokimyasal Oksidan Oluşumu	Kg NMVOC
Karasal Ekotoksisite Potansiyeli (TETP)	kg DCB-Eşd.	İnsan Sağlığı Kanser - Hava	kg Benzer Eşd.	Karasal Ekotoksisite	kg 1,4-DB Eşd.
İnsan Toksisite Potansiyeli (HTP)		İnsan Sağlığı Kanser - Su		İnsan Toksisitesi	

ReCiPe yönteminin öncelikli amacı, yaşam döngüsü envanteri sonuçlarını sınırlı sayıda gösterge puanına dönüştürmektir. Bu gösterge puanları, çevresel etki kategorisinde göreceli şiddeti ifade eder. ReCiPe'de göstergeler orta nokta ve son nokta olmak üzere iki seviyede belirlenir. Örnek olarak iklim değişimi etki kategorisi için orta nokta seviyesinde etki değerlendirme yapıldığında sonuçlar kg CO₂ eşdeğeri olarak ifade edilirken, son nokta seviyesinde etki değerlendirmede ekosistem ve insan sağlığı olarak ikiye ayrılmaktadır. Ekosistem üzerine

değerlendirmede birim “canlı türü.yıl”, insan sağlığı üzerine değerlendirmede ise DALY (Disability Adjusted Life Year), yani “işlev kaybına uyarlanmış yaşam yılı” şeklindedir.

Modellemenin temeli olarak ReCiPe’nin kullandığı çevresel mekanizma, insan sağlığı veya ekosistemler için belirli bir düzeyde zarar oluşturabilecek bir dizi etki olarak görülebilir. Örneğin, iklim değişikliği için bir dizi maddenin, radyal zorlanmayı arttırdığı bilinmekte olup, bu da ısının toprağa doğru yayılmasının önlenmesi anlamına gelmektedir. Sonuç olarak, yeryüzünde daha fazla enerji tutulur ve sıcaklık artar. Bunun sonucu olarak da canlılar için yaşam ortamlarında değişiklikler beklenebilir ve bu durumda türlerin soyu tükenebilir.

Etki değerlendirmesinin zorunlu (sınıflandırma ve karakterizasyon) ve gönüllü (normalizasyon ve ağırlıklandırma) alt aşamaları ISO 14040:2006’da tanımlanmış olup, bu tanımlar aşağıda verilmiştir [27]:

Sınıflandırma: Ayrı ayrı olan envanter öğeleri, ilgili çevresel etki kategorilerine göre atanır. Örneğin, CO₂ emisyonları “küresel ısınma” kategorisine konur.

Karakterizasyon: Aynı çevresel soruna katkısı olan envanter öğeleri ilgili katsayılarla çarpılarak ortak birim üzerinde toplanır ve her çevresel etki kategorisi için toplam etki hesaplanır. Örneğin, küresel ısınmaya yol açan CO₂, CH₄, N₂O emisyonlarının tümü kg CO₂ eşdeğeri üzerinden ifade edilir ve Küresel Isınma Potansiyeli (KIP) hesaplanır.

Normalizasyon: Kabul görmüş normalizasyon yöntemleri kullanılarak ortak referans sistemine göre birimsiz hale getirilen farklı çevresel etki potansiyelleri birbiri ile karşılaştırılır. Böylece normalizasyon, hangi çevresel etki potansiyelinin daha yüksek olduğunu ortaya koyar.

Ağırlıklandırma: Normalizasyon sonuçlarının yine kabul görmüş ve her çevresel etki kategorisi için azaltım hedeflerine dayanan ağırlıklandırma yöntemlerinden biri kullanılarak katsayılarla çarpılmasıdır. Hangi çevresel etki potansiyelinin daha önemli olduğunu ortaya koymak için hesaplanır.

▪ **Etki Kategorilerinin Seçimi**

Çalışmanın amacına bağlı olarak değişmekte olup, etki kategorilerinin ve etki değerlendirme yöntemlerinin seçimi, çalışmanın amaç ve kapsam tanımında verilmelidir [25].

o **Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)**

Küresel ısınma potansiyeli, belirli bir zaman aralığında belirli bir sera gazının CO₂ eşdeğeri cinsinden ısı tutma kabiliyetini nitelendirir.

CO₂, N₂O, CH₄, HFC, PFC ve SF bu etki kategorisini oluşturan emisyonlar olarak sıralanır. CO ve N₂O hariç diğer azot oksitler (NO_x) tam olarak sera gazı olarak görülmeseler de diğer sera gazı konsantrasyonlarını etkiledikleri için dolaylı olarak sorumludurlar. Sera gazlarının atmosferde kalma süreleri 100 yıl olarak belirlenmektedir.

Karbondioksit; renksiz, kokusuz, asidik tatlı, yanmayan ve küresel ısınmadan sorumlu birincil antropojenik sera gazıdır. Doğal olarak oluşan bir gaz olmasına rağmen, aynı zamanda atmosfere fosil yakıtların yanması sonucu yan ürün olarak salınmaktadır. Endüstriyel süreçler, arazi kullanım değişiklikleri ve biyokütle de CO₂ salınımına sebep olmaktadır [28].

Küresel ısınmaya sebep olan sera gazı emisyonlarına ilişkin dünyada çeşitli çalışmalar ve görüşmeler yapılmaktadır. Örneğin; tüm ülkelerin sera gazı emisyonlarının azaltılması konusunda sorumluluk alması adına 12 Aralık 2015 Paris İklim Zirvesi'nde "Paris Anlaşması" yapılmıştır. Bu anlaşma ile 2018 yılında tüm tarafların 2050 ve sonrasına yönelik uzun dönemli düşük karbonlu ekonomiye geçiş planlarını gösterecek ulusal katkı beyanlarını hazırlamalarını istenmiştir [30].

o **Asidifikasyon Potansiyeli (AP)**

Asidifikasyon potansiyeli, bazı maddelerin H⁺ iyonları kurma ve serbest bırakma kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır. Verilen S, N ve halojen atomları emisyonun moleküler kütlesi ile orantılı olarak ayarlandıysa bazı emisyonlar da bir asitleşme potansiyeline sahip olabilir. Referans madde SO₂ olup, SO₂ eşdeğeri ile ifade edilmektedir.

Asidifikasyonun besinlerin zamanla toprağı yok etmesi veya topraktaki metallerin çözünürlüğünün artması gibi doğrudan ve dolaylı etkileri vardır [29]. Topraktaki

hasarlara, çeşitli kirlетici faktörlerden en önemlisi olan hava kirlетicilerinin neden olduğu bilinmektedir:

- SO₂'nin sülfürik aside (H₂SO₄) oksidasyonu
- NO_x'lerin nitrik aside (HNO₃) oksidasyonu
- Amonyanın (NH₃) NO_x ve HNO₃'e oksidasyonu
- Hidroflorik asit (HF)
- Hidroklorik asit (HCl)
- Otooksidantlar (ozon, peroksiasetilnitrat vb.)
- Sadece troposferde OH⁻ ve NO_x ile reaksiyona giren organik bileşikler [31].

Genellikle su ve atmosferik karbondioksit arasındaki reaksiyonlardan dolayı yağmur suyunun pH seviyesi 5,6'dır. Ancak SO₂, NO_x, klor ve flor oksidasyonları sonucu yağmur suyunun pH'ını 4 seviyesine düşürebilir.

Asit yağışları sonucunda betonarme yapılarda beton malzeme zarar görürken, demir-çelik yapılarda korozyon oluşumu görülebilmektedir. Metallerin korozyonunda amonyak ve amonyum tuzları, kükürt oksitler, hidrojen kükürt, oksijen, ozon, su, klor, hidrolik asit, klor tuzları ve erimiş alkali metal tuzları stres faktörleridir [26].

o Ötrofikasyon Potansiyeli (ÖP)

Ötrofikasyon, bir ekosistemde anormal üretkenliğe neden olan bir besin konsantrasyonunun biriktirilmesidir. Nehirlerde su kalitesi ve hayvan popülasyonlarında ciddi azalmalara neden olan algler gibi çeşitli organizmaların aşırı büyümesine neden olur. Amonyak, nitratlar, azot oksitler ve fosforun havaya veya suya olan emisyonları ötrofikasyon üzerinde bir etkiye sahiptir. Ötrofikasyon potansiyelinin referans birimi kg fosfat (PO₄³⁻) eşdeğeri olarak ifade edilir.

Sucul ortamda biyokütlenin artması ve dolayısıyla ölü organik malzemenin daha fazla çökmesi nedeniyle, sucul ortamda çözünen oksijen, aerobik ayrışma yoluyla daha hızlı tüketilir. Bu tortu içinde yaşayan biyolojik popülasyonlarda ciddi hasarlara yol açabilir [32]. Aynı şekilde karasal ortamda da besin zenginleşmesine bağlı olarak bitkilerin dayanıklılığının azalması nedeniyle bitkilerin hastalık ve böceklerle karşı duyarlılığının artmasına yol açar. Besinlerin seviyesinin maksimum ürün alınması için gerekli olan azot seviyesini aşması ile bu durum nitratın

zenginleşmesine ve yeraltı suyunda nitrat konsantrasyonunun artmasına neden olur. Nitrat düşük konsantrasyonlarda zararsız olmasına karşın nitratın reaksiyon ürünü olan nitritin insan sağlığı açısından toksik özelliği vardır [26].

o **Fotokimyasal Ozon Oluşturma Potansiyeli (FOOP)**

Azot oksitler ve uçucu organik bileşikler (VOC), atmosferlerde güneş ışığının etkisiyle ozon oluşturabilir. Fotokimyasal ozonun meydana gelmesinin bitki örtüsü ve malzemelere hasar verdiği düşünülmekte ve bu olay yaz sisi olarak da adlandırılmaktadır. Yüksek konsantrasyonlarda hidrokarbonun bulunması; yüksek sıcaklık, düşük nem ve havanın göreceli olarak statik olduğu durumlarda ozonun açığa çıkmasına sebep olur [26].

Fotokimyasal ozon yaratma potansiyeli etilen (C_2H_4) eşdeğeri olarak ifade edilir. Fosil yakıtlarla elektrik üretimi yapılan tesislerde bu etkinin büyük çoğunluğu, yakıtın yanması sonucu ortaya çıkan SO_2 , NO_x ve CO emisyonlarından kaynaklanmaktadır.

o **Toksisite Potansiyelleri**

Bir maddenin toksisitesi ile ilgili olarak akut, yarı akut/kronik ve kronik toksisite etkinin süresi ve frekansı ile tanımlandığı ve bir maddenin toksisitesi birçok parametreye göre değerlendirildiği belirtilmektedir. Bayrak (2014)'in çalışmasında “Buna göre bir maddenin kimyasal kompozisyonu, fiziksel özellikleri, noktasal emisyon kaynaklarına bağlı toksisite potansiyeli söz konusu maddenin çevreye deşarjına göre karakterize edilir. Karakterizasyon faktörleri örneğin CML yönteminde yağmur suyu ve havanın küçük karşılıklı değişimleri, maddelerin uzun yerleşme süreleri, orta şiddette rüzgar ve sistem sınırları üzerindeki küçük yer değiştirmelere göre oluşturulan bir modelle hesaplanır” denmektedir [26].

Toksisite potansiyelleri belirsizlik içerir. Bunu sebebi, bir maddenin etkisinin farklı potansiyel etkilere ve maruziyet sürelerine bağlı olarak değişkenlik göstermesidir. Hava, su ve toprak olmak üzere üç farklı alıcı ortama göre hesaplanabilen toksisite potansiyellerinde, her madde için eşik değerler belirlenir [29].

3.2.4. Yorumlama

Yorumlama, envanter analizi ve etki değerlendirmesi aşamalarından elde edilen sonuçların kontrol edildiği, yorumlandığı ve iyileştirme değerlendirmesinin yapıldığı

aşamadır. Ortaya çıkan bulgular, çalışmanın amaç ve kapsamıyla uyumlu olarak anlaşılır bir şekilde sunulmalıdır.

3.3. YDD’de Kullanılan Yazılım Programları

YDD gerçekleştirmek amacıyla kullanılan GaBi, SimaPro, openLCA gibi yazılımlar örnek olarak verilebilir. Söz konusu bu yazılımlarda seçilen çevresel etki değerlendirme yöntemine göre yaşam döngüsü aşamaları için çevresel etkileri hesaplanmasında, aralarındaki temel farklar kullanıcı ara yüzleri, etki kategorileri ve veri tabanlarının içerikleridir.

GaBi, dünya çapında en çok kullanılan YDD aracından biri olup, veri sağlamanın yanı sıra bir YDD’nin gerçekleştirilmesine yardımcı olan tam servis-YDD tabanlı bir yazılım programıdır. Verilere, birden çok düzeyde sürdürülebilirliğe odaklanan uluslararası bir şirket olan Thinkstep üzerinden erişilebilmektedir. Tüm YDD ile ilgili veriler ISO 14040 ve ISO 14044 uyumludur. GaBi yazılımının, her biri farklı bir amaç için tasarlanmış çok sayıda versiyonu bulunmaktadır. Bu çalışmada, üniversitelerdeki dersler veya akademik çalışmalar kapsamında belirli süreli lisans izni verilmesi yoluyla kullanılan GaBi Education versiyonu kullanılmıştır.

3.4. Bölüm Sonucu

Bu bölümde, çalışmanın yöntemi olan YDD yönteminin tanımı yapılarak YDD yönteminin uygulama amaçları ve özgün yönleri hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra YDD’nin aşamaları ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Bu aşamalar; amaç ve kapsam tanımı, envanter analizi, etki değerlendirmesi ve yorumlama olmak üzere dört kısımdan oluşmaktadır. En yaygın kullanılan etki değerlendirme yöntemleri hakkında bilgi verilerek karşılaştırması yapılmıştır.

YDD için kullanılan GaBi, SimaPro, openLCA gibi yazılımlar hakkında bilgi verilerek bu yazılımlar arasındaki en temel farkların kullanıcı ara yüzleri, etki kategorileri ve veri tabanlarının içerikleri olduğu vurgulanmıştır.

4. PİLOT TERMİK SANTRALE İLİŞKİN BİLGİLER

Bu bölümde, bu tez çalışması için seçilen pilot tesise ilişkin bilgiler ve termik santrallerin Çevre Mevzuatı ve ilgili yönetmelikleri kapsamında değerlendirilmesi yapılmıştır. Tesisin bölümlerine ilişkin teknik bilgi verilerek hangi sebeplerle termik santrallerde iyileştirme kararlarının alındığı ve bu kararların içerikleri hakkında bilgi verilmiştir.

4.1. Tesisin Tarihçesi

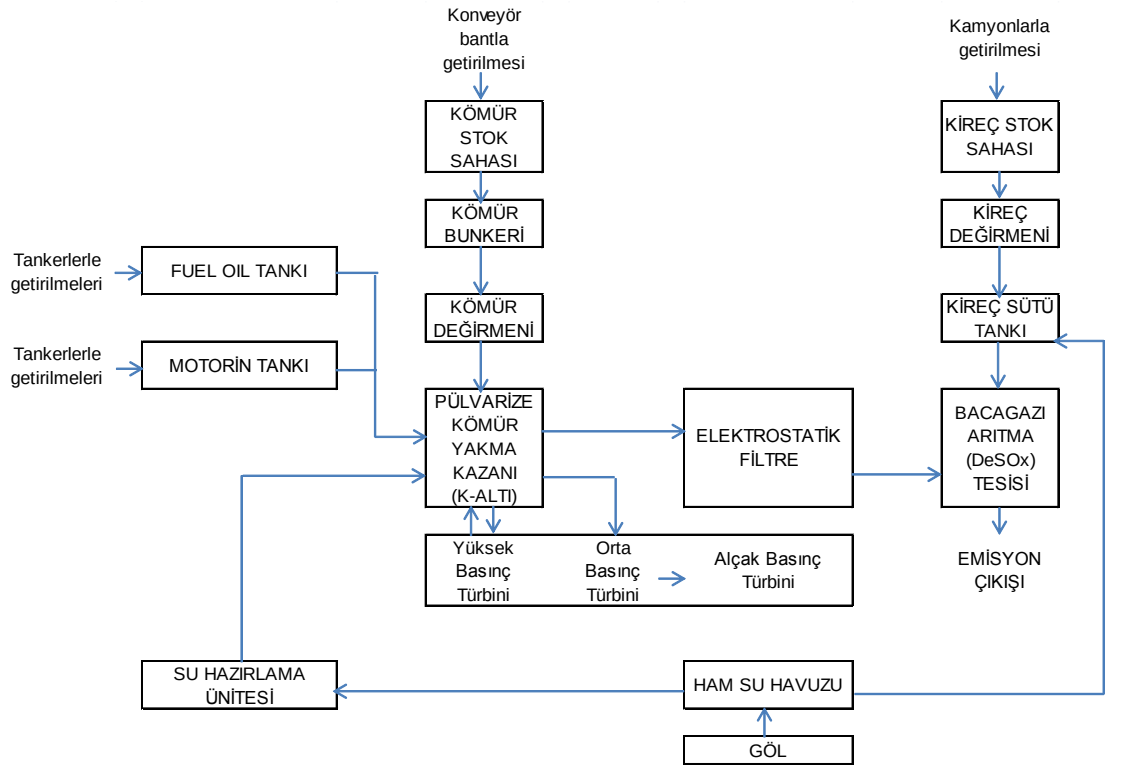
80'li yıllarda yapımına başlanan ve inşaat-montaj işlemleri tamamlanarak devreye alınan tesis kamuya bağlı olup, 6446 Sayılı Elektrik Piyasası Kanunu Geçici 8. Maddesi kapsamında; *“EÜAŞ veya bağlı ortaklık, iştirak, işletme ve işletme birimleri ile varlıklarına ve 4046 sayılı Kanun kapsamında oluşturulacak kamu üretim şirketlerine ve kamu üretim şirketlerine ait üretim tesislerine, bunlardan bu maddede yapılan değişikliğin yürürlüğe girdiği tarihten önce özelleştirilmiş olanlarla, yürürlük tarihinden sonra özelleştirilecek olanlar için de geçerli olmak üzere, çevre mevzuatına uyumuna yönelik yatırımların gerçekleştirilmesi ve çevre mevzuatı açısından gerekli izinlerin tamamlanması amacıyla 31/12/2019 tarihine kadar süre tanınır. Bu süre zarfında ve önceki dönemlere ilişkin olarak bu gerekçeyle, EÜAŞ veya bağlı ortaklık, iştirak, işletme ve işletme birimleri ile varlıklarında ve 4046 sayılı Kanun kapsamında oluşturulacak kamu üretim şirketlerinde ve kamu üretim şirketlerine ait üretim tesislerinde, bunlardan bu maddede yapılan değişikliğin yürürlüğe girdiği tarihten önce özelleştirilmiş olanlarla, yürürlük tarihinden sonra özelleştirilecek olanlar için de geçerli olmak üzere, elektrik üretim faaliyeti durdurulamaz ve idari para cezası uygulanmaz. Çevre mevzuatına uyuma yönelik yatırımların gerçekleştirilmesi ve çevre mevzuatı açısından gerekli izinlerin tamamlanmasına ilişkin usul ve esaslar bu maddenin yürürlüğe girdiği tarihten itibaren bir yıl içinde Bakanlık tarafından çıkarılan yönetmelikle belirlenir.”* hükmünce değerlendirilmektedir.

Bu kapsamda, bu tez çalışması için verilerinden faydalanan pilot tesis, Türk Çevre Mevzuatı çerçevesinde uyumlu hale getirilmesi ve gerekli izinlerinin tamamlanması istenen tesisler arasındadır.

4.2. Tesisin Birimleri

Genel hatlarıyla tesis altı ana birimden oluşmaktadır. Bunlar:

- Kömür Hazırlama Ünitesi
- Saf Su Hazırlama Ünitesi
- Kazan ve Yardımcıları
- Türbin ve Yardımcıları
- Elektrik Sistemleri
- Baca Gazı Desülfürizasyon (BGD) Ünitesi



Şekil 4.1. Pilot Tesisin İş Akış Şeması

4.2.1. Kömür Hazırlama Ünitesi

Sistem içerisine alınmadan önce kömürün kaba ve ince kırıcılardan geçirilerek en son 0-30 mm boyutlarına getirildiği ünedir. Buradan da kömür, taşıyıcı bantlarla yakıt besleme sisteminin bir parçası olan kömür bunkerlerine verilir.

4.2.2. Saf Su Hazırlama Ünitesi

Kazan ve BGD ünitelerinde kullanılmak üzere gölden çekilen suyun geçici ve kalıcı sertliğinin alındığı ünedir. Üretilen su, saf su tankında depolanır ve ihtiyaç oranında sisteme pompalar vasıtasıyla gönderilir. Suyun arıtılması; boru

hatlarında, kazanlarda ve türbin kanatlarında oluşabilecek korozyon, depozit ve çatlakların önlenmesi için önemlidir.

Gölden alınan su, klor (Cl) ile reaksiyona girerek ham su havuzlarına boşaltılır. Ham su havuzlarında bulunan su, ısıtıcılardan geçirilerek 14-15°C'de flokülatöre verilir ve burada suyun geçici sertliği alınır.

Karbonat ve bikarbonatlar suda geçici sertlik yaparlar. Bunlar için demir (III) klorür (FeCl_3) kullanılır. Flokülatörlerin içinde helezonik motorla çalışan karıştırıcı vardır. Kireç ve FeCl_3 dibe çöker. Geçici sertliği alınmış olan su, savaklardan akarak flokülatörün yüzeyine çıkar. Su, kum filtrelerinden geçirilerek geçici sertliği alınmış su tanklarında toplanır ve yardımcı soğutma suyu olarak soğutma kulesi ile yangın sisteminde kullanılır.

Saf su eldesi için; suyun kalıcı sertliğinin alınması amacıyla geçici sertliği alınmış olan su, su tanklarından demineralize grubuna gider. Sertliği yapan tuzlar artı ve eksi iyonlardan meydana gelir. Bu iyonların sudan alınması halinde su, saf hale gelmiş olur. Bu işlem reçineler vasıtasıyla yapılır.

Reçineler bir iyonla diğer bir iyonun yer değiştirmesini sağlayan ve yer değiştirdikleri iyonları geçici olarak tutabilme özelliğine sahip maddelerdir. Bu durum sadece aynı cins iyonlar için mümkündür. Hem katyon hem de anyon reçinelerinin bir arada bulunduğu reçineye ise Mixed Reçine denmektedir. Reçinelerden geçirilerek elde edilen su, saf su tankında depolanır. Buradan ihtiyaç oranında ünitelere pompalar vasıtasıyla gönderilir.

Su Geri Kazanım Tesisi: Kazan altı tekneleri cüruf yıkama, soğutma kuleleri drenaj, by-pass filtre geri yıkama suları, su tasfiye drenajları gibi çeşitli yerlerden gelen suların fiziksel arıtmadan geçirildiği tesistir. Böylece yıkama suyu ve kül ıslatma suyu gibi yumuşak su gerektirmeyen ve önemli miktarlarda su kaybına sebep olan yerlerde yeniden kullanımını sağlanmış olur.

4.2.3. Kazan ve Yardımcıları

Termik santralde bulunan kazan, tabii sirkülasyonlu, domlu, içten yanmalı, dikey tip kritikaltı pulverize kömür yakma kazanıdır.

Kazanın dört tarafı ekran boruları denilen boru paketleriyle çevrilidir. Kazanda kızdırıcılar, tekrar kırıcılar ve ekonomizer mevcuttur.

Su-Buhar Çevrimi: Kazana gelen besleme suyu ön ısıtıcılardan geçerek doma ulaşır. Domdan düşü borularıyla kazan altında kollektöre gelen su, kazanın etrafında bulunan ekran borularından yükselerek tekrar doma ulaşır. Domdan çıkan buhar, kızdırıcılarda kızdırıldıktan sonra yüksek basınç türbinine gider. Burada iş gören buhar, tekrar kızdırıcılara gelir. Sıcaklığı tekrar kızdırıcılarda istenen değere ulaştıktan sonra orta basınç türbinine gönderilir. Orta basınç türbininde iş gören buhar, direkt olarak alçak basınç türbinine girer ve orada da iş gördükten sonra kondenseye dökülerek su fazına geçer.

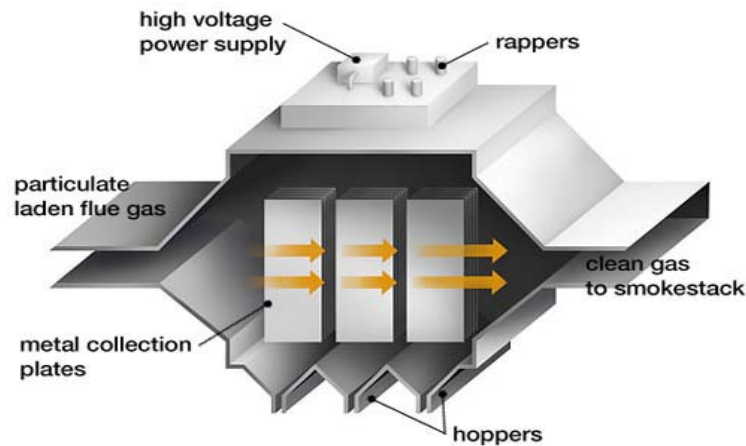
- **Yakıt Besleme Sistemi**

Kazanda, devreye alınması sırasında kullanılan motorin ve fuel-oil için yakıcılar bulunmaktadır. Kazanın motorin ve fuel-oil ile ısıtılması sonrası, kazana ait kömür bunkerlerine doldurulmuş kömür, değirmenlerdeki ön kırıcılara gelerek öğütülür ve kömür püskürtme kanalı ile kazan içerisine püskürtülür.

- **Hava ve Gaz Sistemleri**

Kazandaki yanma için gerekli olan taze havayı atmosferden emip kazanın içine gönderen iki adet taze hava fanı vardır. Hava, kazanın içine gönderilmeden ön ısıtıcılarda ısıtılır.

Kazanda yanma sonucu oluşan gazlar ve uçucu kül, cebri çekme fırınlarının emişi ile önce dönerli hava ısıtıcısında taze havayı ısıtır, sonra elektrostatik filtrelerde külden arındırılarak beton bacaya ya da baca gazı arıtma ünitesine gönderilir. Elektrostatik filtre plakalarını statik elektrikle yüklemek için elektrostatik filtre trafoları kullanılmaktadır.



Şekil 4.2. Elektrostatik Filtre Görünümü

- **Kurum Üfleme Sistemi**

Tesiste yanma odasında buharlı veya sulu kurum üfleme yapılmaktadır.

- **Kül ve Cüruf Atma Sistemi**

Elektrofiltre, dönerli hava ısıtıcı ve eko altlarında uçucu kül toplanmaktadır. Toplanan bu kül, sıkıştırılmış hava yardımıyla silolara depolandıktan sonra kamyonlara yüklenerek ya da suyla ıslatılarak bantlar yardımıyla tesise ait kül barajına depolanmaktadır.

Uçucu kül için tesiste uygulanan bir diğer yöntem ise kül taşıyıcıları ile silolara, buradan da su veya Baca Gazı Desülfürizasyon (BGD) Tesisi atığı olan jips ile mikserlerde karıştırılarak bantlar yardımıyla kül barajına gönderimidir.

Kazan altına dökülen cüruflar, kazan altı teknesinde su ile ıslatılıp soğutulduktan sonra bantlar yardımıyla kül barajına depolanmaktadır.

4.2.4. Türbin ve Yardımcıları

Türbinler dönme hareketiyle çalışan hareketli ve sabit kanatlardan meydana gelen ve ısı enerjisini önce kinetik enerjiye sonra mekanik enerjiye dönüştüren makinelerdir.

Bir türbin; yüksek basınç, orta basınç ve alçak basınç olmak üzere üç kademedен oluşmaktadır. Yüksek basınç ve orta basınç türbinleri aynı rotor üzerinde bulunur. Bunların yanında alçak basınç türbini ve hidrojen soğutmalı jeneratör yer alır. Rotorlar birbirine kaplinler vasıtasıyla bağlanır.

4.2.5. Elektrik Sistemleri

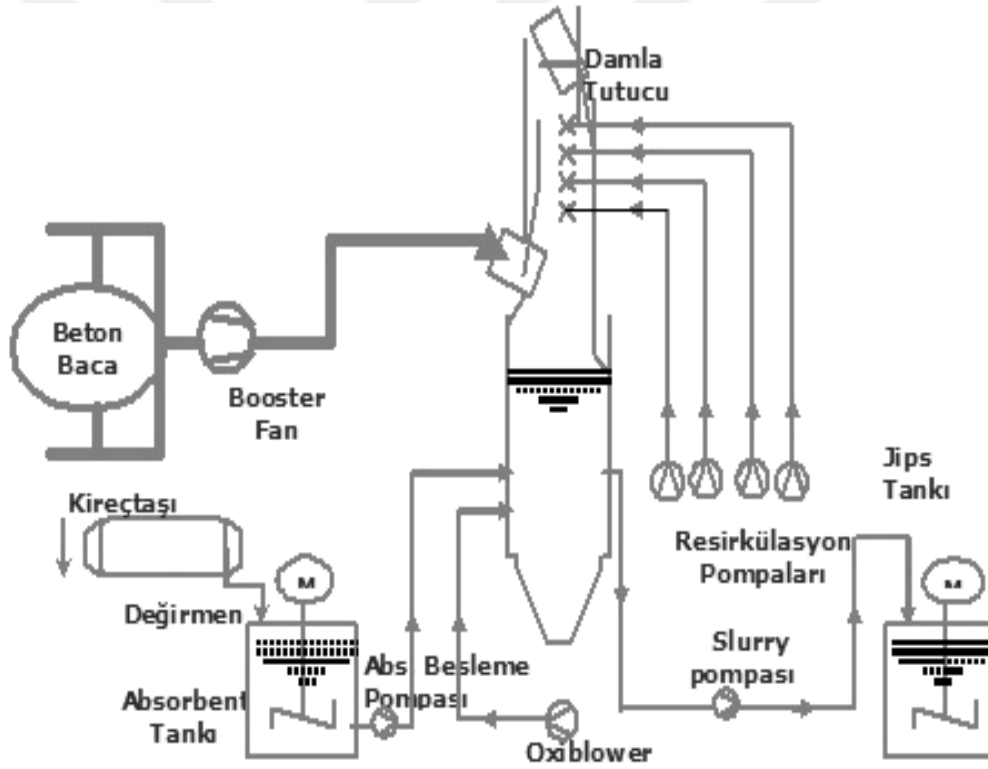
Alternatörün (jeneratör) stator ve rotor olmak üzere iki ana parkası vardır. Stator, gövdeyi oluşturan sabit kısımdır. Rotor ise hareketlidir ve türbin tarafından döndürülür. Rotor sargılı olup, bu sargılara ikaz dinamosu tarafından doğru akım verilir ve rotorda manyetik alan meydana gelir. Rotor döndüğü için döner manyetik alan oluşur. Statorda ise çevreye eşit aralıkta yerleştirilmiş üç ayrı sargı bulunur. Döner manyetik alan içerisinde bulunan bu sargılar üzerinde üç fazlı, 15 kV elektrik akımı meydana gelir.

Trafolar: Alternatörde üretilen elektrik akımının bir miktarı iç ihtiyaç trafosu vasıtasıyla santral iç ihtiyacında kullanılır. Geriye kalanı da enterkonnekte sisteme verilmek üzere ana trafoya oradan da şalt sahasına gönderilir.

Şalt Sahası: Santrallerde üretilen enerjinin enterkonnekte sisteme verilebilmesi için şalt tesisleri kurulmuştur. Şalt tesislerinde baralar, kesiciler ve ayırıcılar bulunur. Ayırıcılar yüksüz elektrik hattını, kesiciler ise yüklü elektrik hattını açıp kapamaya yarar. 400kV'luk şalt sahasında iki ana bara ve bir transfer bara olmak üzere üç adet bara vardır.

4.2.6. Baca Gazı Desülfürizasyon (BGD) Ünitesi

BGD Tesisi üç ana bölümden oluşmaktadır: Kireçtaşı hazırlama ünitesi, yıkayıcı kule, jips atma ve susuzlaştırma ünitesi.



Şekil 4.3. Baca Gazı Desülfürizasyon Tesisi Akış Şeması

- **Kireçtaşı Hazırlama Ünitesi**

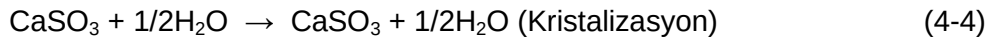
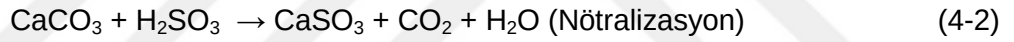
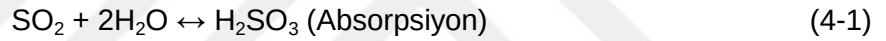
Proses için gerekli olan ve minimum %90 CaCO_3 içeren kireçtaşı; patlatma, kırma ve eleme ile 0-60 mm boyutuna getirilir ve santral kireçtaşı stok sahasına kamyonlarla taşınır.

Kireçtaşı yükleme yerinden bant konveyörlerle alınan kireçtaşı, bilyeli ıslak değirmenlerde öğütülerek 63 mikronun altındaki tanecikler absorban besleme tanklarına aktarılır. Absorban, bu tanklardan pompalar yardımıyla yıkayıcı kuleye (scrubber) basılır. Absorbanın yıkayıcı kuleye transfer miktarı kule içerisindeki çözeltinin yoğunluk ve pH değerlerinin izlenmesi sonucunda belirlenir.

- **Yıkayıcı Kuleler**

Yıkayıcı kuleler, çelikten imal edilen ve içi lastik kaplama olan yapılardır. Yıkayıcı kule içerisinde jips ve kireçtaşı çözeltisi vardır. Elektrostatik filtreden çıkan gaz, beton baca öncesindeki damper vasıtası ile yıkayıcı kule içerisine girer. Resirkülasyon pompaları yıkayıcı kule tabanından aldıkları jips ve kireçtaşı çamurunu, püskürtücüler vasıtasıyla yukarıdan aşağıya püskürtür.

Yıkayıcı kuleye giren gaz yukarı doğru çıkarken püskürtülen çözelti ile karşılaşır ve sırasıyla reaksiyon mekanizmaları verilmiş olan absorpsiyon, nötralizasyon, oksidasyon ve kristalizasyon aşamalarından geçerek arıtılmış olur:



Özetle reaksiyon mekanizması şu şekildedir:



Oksidasyon kademesi için gerekli olan hava, üfleyiciler ile yıkayıcı kuleye basılır. Temizlenen gaz yıkayıcı kulenin ıslak baca kabul edilen bölümün altında bulunan damla tutuculardan (mist eliminatör) geçerken su, taneciklerin %99,9'unu bırakır.

- **Jips Atma ve Susuzlaştırma**

Yıkayıcı kulede oluşan jips, çamur pompaları yardımıyla hidrosiklonlarla ayrılarak stok tanklarına basılır. Tesiste isteğe bağlı olarak vakumlu belt filtrelerde nemi alınıp bant konveyör yoluyla veya hidrolik olarak sistemden uzaklaştırılır. Jips için

bir başka yöntem de, jips tanklarından mikserlere basılarak kül ile karışımı sağlanıp bant konveyörlerle sistemden uzaklaştırılmasıdır.

4.3. Emisyonlar ile İlgili Türk Çevre Mevzuatı Çerçevesinde Değerlendirme

Termik santrallerin bilinen en yüksek kirlilik sebebi emisyonlardır. Bu sebeple genel olarak termik santrallerin emisyon kontrolü hususunda Çevre Mevzuatı'nın ilgili yönetmelikleri kapsamında değerlendirilmesi yapılmıştır.

03.07.2009 tarih ve 27277 sayılı Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (SKHKKY), sanayi ve enerji üretim tesislerinin faaliyeti sonucu atmosfere yayılan hava kirliliği seviyelerine sınırlamalar getirmiş, kirlетici kaynakları ve çevresindeki hava kirliliğinin ölçüm ve denetimini zorunlu kılmıştır.

SKHKKY'de verilen tesis tanımlarına bakılacak olursa;

- **Mevcut Tesis:** EK-5.A.1 (Birinci Grup Tesisler: Yakma Tesisleri, Büyük Yakma Tesisleri) kapsamındaki tesisler için; 08/06/2010 tarihinden önce, diğer tesisler için ise 03/07/2009 tarihinden önce kurulmuş veya Çevresel Etki Değerlendirmesi mevzuatına göre kurulması uygun bulunan tesisleri,
- **Yeni Tesis:** Mevcut tesisler dışında kalan tesisleri ifade etmektedir.

SKHKKY'ye göre katı yakıt kullanılan yeni tesislerin işletilmesi için baca gazında %6 hacimsel oksijen (O₂) esas alınarak belirlenen emisyon sınırları Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği EK-5.A.1.3.1. Katı Yakıtlı Yeni Tesis Emisyon Sınır Değerleri Tablosu

Yakıt türü	Yakıt Isıl Gücü	Emisyon Sınır Değerleri (mg/Nm ³)			
		Toz	SO ₂	NO ₂ (NO ve NO ₂)	CO
Katı yakıt	50 MW ≤ Yakıt ısııl gücü < 100 MW	50	850	400	150
	Yakıt ısııl gücü ≥ 100 MW	30	200	200	200

Yönetmelikte, yeni tesislerde SO₂ parametresi için Çizelge 4.1'de belirtilen değerlerin, kullanılan katı yakıttaki yüksek kükürt içeriği nedeniyle önlemler alınarak arıtma tesisi kurulmasına rağmen sağlanamadığı durumlarda;

- Isıl gücü 100 MW ile 300 MW arasında olan tesisler için 300 mg/Nm³ SO₂ emisyon sınır değeri aşılmaması veya en az % 92 oranında kükürt giderme sağlanması,

- Isıl gücü 300 MW ve üzerinde olan tesisler için 400 mg/Nm³ SO₂ emisyon sınır değerinin aşılmaması ve en az % 95 oranında kükürt giderme sağlanması

gerektiği belirtilmektedir.

Katı yakıt kullanılan mevcut tesislerde ise, SKHKKY'ye göre baca gazında %6 hacimsel oksijen (O₂) esas alınarak belirlenen emisyon sınır değerleri Çizelge 4.2.'de verilmiştir. Yönetmelik ekinde, Çizelge 4.2.'de verilen EK-5.A.1.4.1 sınır değerlerinin 08/06/2019 tarihinde yürürlüğe gireceği belirtilmektedir.

Çizelge 4.2. Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği EK-5.A.1.4.1. Katı Yakıtlı Mevcut Tesis Emisyon Sınır Değerleri Tablosu

Yakıt türü	Yakıt Isıl Gücü	Emisyon Sınır Değerleri (mg/Nm ³)			
		Toz	SO ₂	NO ₂ (NO ve NO ₂)	CO
Katı yakıt	50 MW ≤ Yakıt ısıl gücü < 100MW	100	2000	600	200
	100 MW ≤ Yakıt ısıl gücü < 500 MW		2000-400 (lineer azalma)		
	Yakıt ısıl gücü ≥ 500 MW	50	400	200	

SKHKKY'de, anma ısıl gücü 50 MW ve üzeri olan katı yakıtlı yakma tesisleri için, EK-5.A.1'deki hüküm ve sınır değerlere uyma zorunluluğu olmaması durumunda uyulması gereken sınır değerler de belirlenmiştir. Baca gazında % 6 hacimsel oksijen (O₂) esas alınarak belirlenen emisyon sınırları Çizelge 4.3.'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği EK-5.A.3.1. Katı Yakıtlı Mevcut Tesis Emisyon Sınır Değerleri

Yakıt türü	Yakıt Isıl Gücü	Emisyon Sınır Değerleri (mg/Nm ³)			
		Toz	SO ₂	NO ₂ (NO ve NO ₂)	CO
Katı yakıt	Yakıt ısıl gücü = 50 MW	150	2000	800	200
	50 MW < Yakıt ısıl gücü < 100 MW	100			
	100 MW ≤ Yakıt ısıl gücü < 300 MW	100	1300		
	Yakıt ısıl gücü ≥ 300 MW		1000		

Pilot tesisin toplam ısıl gücü 1.711,936 MW olup, SKHKKY'ye göre "ısıl gücü 50 MW veya daha fazla olan, yalnızca enerji üretimi için inşa edilen katı yakıtlı yakma tesisi" olarak değerlendirilmektedir. Ulusal olarak belirlenen emisyon sınır

değerlerine bakıldığında 2019 yılına kadar emisyonlarının zorunlu olarak düşürülmesi gereken tesisler arasındadır. Bu durum, mevcut tesise yönelik teknolojik çözümler üretilmesini, büyük ölçekli değişiklik veya iyileştirme çalışmalarının yapılmasına gereksinim oluşturmaktadır.

4.4. Termik Santrallerde İyileştirme Gereksinimleri

Termik santrallerde iyileştirme kavramı daha çok verim kaybını önlemeye yönelik olmakla birlikte, iyileştirmeye yönelik gereksinimleri doğuran teknik ve çevre mevzuatına dayalı durumlar aşağıda açıklamalarıyla verilmiştir.

Teknik gereksinimler: Termik santrallerde üretim kapasitesine etki eden etmenlerin tespit edilmesi için verim analizleri yapılmaktadır. Termik santrallerin yüksek sıcaklık-yüksek basınç altında çalışan sistemler olmaları ve kesintisiz elektrik üretimin hedeflenmesi sebebiyle zamana bağlı deformasyonlar ve bunların üretim ve santrallerin ömrüne olan etkileri incelenmektedir. İyileştirmeye yönelik teknik sebepler için; yıllara bağlı üretim kayıplarının oluşması durumu örnek verilebilir. Termik santralde kazan, jeneratör, elektrostatik filtre gibi ekipmanların performans testleri yapılarak işletme verileri ile karşılaştırmalı analizinin yapılması gerekmektedir. İyileştirme kapsamı belirlenirken verimi azaltan, santralin devre dışı olmasına ve çevre kirliliğine yol açan ekipmanların tespit edilmesi önem taşımaktadır [33].

Çevre Mevzuatı: Mevzuat ve ilgili yönetmelikler gereği termik santrallerde kullanılan suyun deşarj parametreleri altında tutulması, mümkünse tekrar kullanımını sağlayacak teknolojilerin sisteme entegre edilmesi, baca gazı emisyonlarının sınır değerlerin altında tutulmasını sağlayan arıtma yöntemlerinin uygulanması, prosten kaynaklanan atıklara ilişkin yeniden kazanma (uçucu kül ve alçı taşının yan ürün olarak satışı gibi) ve ya düzenli depolama seçeneklerinin tespit edilmesi gibi durumlar örnek verilebilir.

Bunlar haricinde ekonomik sebepler ve şebeke gerekleri de iyileştirme gereksinimine neden olabilmektedir.

Santrallerin tasarımı gereği yakılabilecek kömürün kalori aralığı belli olup, maden ocağına bağlı olarak beslenecek kömürün, tesisin tasarım kriterlerinden düşük kaloride temini durumunda kömürün yanması sonucu yüksek miktarda SO₂ ve NO_x oluşumu söz konusu olmaktadır. Tam verimde çalıştırılan BGD üniteleri

içinde malzeme taşlaşması, resirkülasyon problemlerinin yaşanması ve temizlik gereksiniminin sıklaşması, tesisin randımanlı çalışmasına engel olmaktadır. Ayrıca kazanlarda meydana gelen çeşitli arızalar da devre dışı olma ve devreye girme sayılarında artışa sebep olmaktadır.

Bu durumlar, santraller için hem verim kaybını önleme hem de Çevre Mevzuatı'na uyumluluğu sağlama açısından büyük ölçekli değişiklik veya daha küçük ölçeli olarak iyileştirilmesine ilişkin çalışmalar ve gerekli yatırım çalışmalarının yapılmasını zorunlu kılmaktadır.

4.5. Bölüm Sonucu

Bu bölümde, pilot tesise ilişkin genel bilgiler, emisyonlara ilişkin Çevre Mevzuatı gereğince değerlendirmesi ve tesisin bölümleri anlatılmıştır.

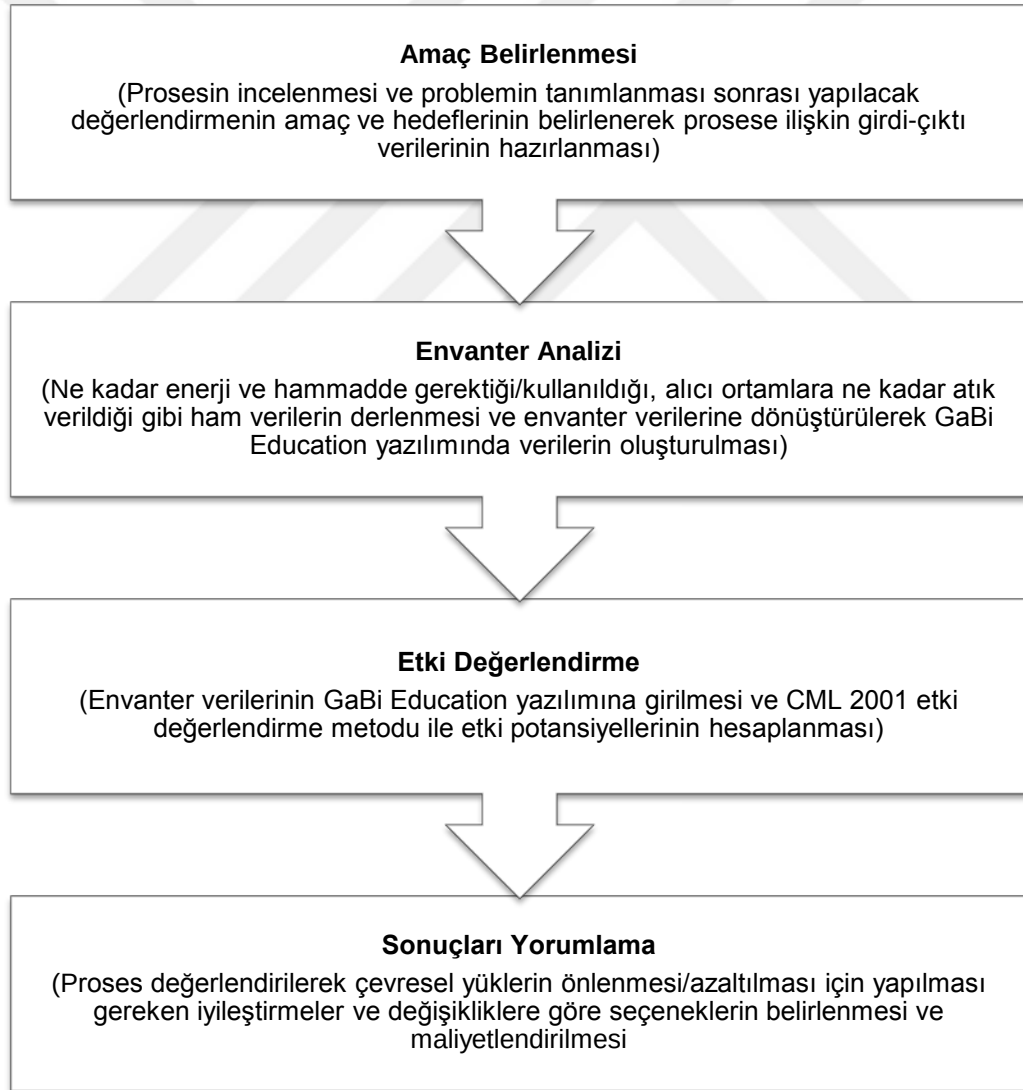
Toplam 620 MW elektrik üretilen tesisin 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu'nun Geçici 8. Maddesi hükmünce değerlendirildiği, bu kapsamda çevre mevzuatına uyumuna yönelik yatırımların gerçekleştirilmesi ve çevre mevzuatı açısından gerekli izinlerin tamamlanması amacıyla 31/12/2019 tarihine kadar süre tanındığı belirtilmiştir.

Termik santrallerde genel olarak hangi sebeplerle iyileştirme çalışmalarının yapılması gerektiği, karşılaşılan teknik sorunların hem verim kaybını önleme hem de Çevre Mevzuatı'na uyumluluğu sağlamada iyileştirme çalışmalarının yapılmasını zorunlu kıldığı vurgulanmıştır.

5. METODOLOJİ VE KULLANILAN VERİLER

Tez çalışmasında Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) yöntemi kullanılmış olup, Bölüm 3.2.'de detaylı olarak açıklanan dört aşama gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada yapılan YDD çalışmasının aşamaları ve çalışmada aşamaların nasıl uygulandığı Şekil 5.1'de gösterilmektedir.

Bölüm 5.1.'de birinci aşama olan amaç ve kapsam tanımı yapılmıştır. Bölüm 5.2.'de ikinci aşama olan envanter analizi sunulmuştur. Üçüncü aşama olan etki değerlendirme ve dördüncü aşama olan yorumlama 6. Bölüm'de, belirlenen iyileştirme seçeneklerinin maliyetlendirilmesine ilişkin bilgiler ise 7. Bölümde verilecektir.



Şekil 5.1. YDD Çalışmasının Aşamaları

5.1. YDD Amaç ve Kapsam Tanımı

1. Bölüm’de belirtildiği üzere bu tez çalışmasının ana amacı, linyit kömüründen elektrik üretimi yapan pilot tesisin çevresel etki potansiyellerinin hesaplanması ve tesisten alıcı ortama verilen baca gazı emisyon miktarlarının, oluşturulan iyileştirme seçeneklerinin çevresel etki potansiyelleri üzerinde ne gibi değişikliklere sebep olduğunun incelenmesidir. Bu tez çalışması kapsamında 6 etki kategorisi değerlendirilmiştir:

- Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)
- Asidifikasyon Potansiyeli (AP)
- Ötrofikasyon Potansiyeli (ÖP)
- Fosil Yakıtlar için Abiyotik Bozundurma Potansiyeli (ABPfosil)
- İnsan Toksisite Potansiyeli (İTP)
- Fotokimyasal Ozon Oluşturma Potansiyeli (FOOP)

İşlevsel birim 1 kWh elektrik olarak seçilmiştir.

Pilot tesisin yapımı 80’li yıllara dayanmakta olup, hesaplanmış ömrünü tamamlama süresi ve yıkımına ilişkin bilgi bulunmamaktadır. Bu nedenle tesisin; yapımı, ömrünün sonunda devreden çıkarılması, sökümü ve yıkımı, elektrik dağıtımı ve proses atıklarının düzenli depolanması aşamaları sistem sınırının dışında bırakılmıştır.

5.2. Yaşam Döngüsü Envanter Analizi

Yaşam Döngüsü Envanteri (YDE) hazırlanırken, sistemin girdi ve çıktılarının derlenmesi ve sayısallaştırılması bu aşamada gerçekleştirilmiştir. Elektrik üretim aşamasında kullanılan doğal kaynak, yakıt ve kimyasallarına ilişkin veriler düzenlenerek Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Linyit kömürü;

Tesiste kullanılan kömürünün kalorisi, temin edildiği kömür havzalarına göre değişkenlik göstermektedir. Santralde yıllık ortalama 5-5,5 milyon ton kömür yakılmakta olup, tesiste yakılabilecek kömürün ortalama alt ısı değeri 2000 – 2400 kcal/kg’dır. Linyit kömürü için envanter oluşturulurken GaBi yazılımı verileri içinde bulunan, 2016 yılı içinde pilot tesiste kullanılan linyit kömürüne en yakın özelliklere sahip olan Yunanistan linyit kömürü değeri kullanılmıştır.

Çizelge 5.1. 2016 Yılı Toplam Ham Verileri

Veriler	Malzeme Adı	Miktar (Ham Veri)	Birim
Elektrik Üretimi İçin Kullanılan Ana Yakıt ve Ek Yakıt Miktarları	Linyit Kömürü	5.397.627	ton
	Fuel-oil	34.014	ton
	Motorin	1.164	ton
BGD Ünitelerinde Kullanılan Malzeme Miktarı	Kireçtaşı	603.366	ton
Elektrik	Elektrik (İç Tüketim)	651.360.460	kWh
	Elektrik (Üretim)	3.115.212.540	kWh
Tüm Tesis İçin Temin Edilen Su Miktarı	Göl suyu	15.999.720	m ³
Su Hazırlama Ünitesinde Kullanılan Kimyasallar	Sönmüş toz kireç	2.699.330	kg
	Sodyum hidroksit	1.653.788	kg
	Sülfürik asit	1.338.486	kg
	Demir (III) klorür	894.997	kg
	Klor	103.410	kg
	Sodyum hipoklorit	2.775	kg
	Hidroklorik asit	400	kg
	Amonyak	9.200	kg
Proses Sonucu Oluşan Atık ve Atıksu Miktarları	Uçucu kül*	1.733.607	ton
	Cüruf	433.402	ton
	Jips (BGD Çamuru)	1.066.723	ton

Fuel-oil ve motorin;

Sistemde devreye alma sırasında kullanılmakta olan ek yakıtlardır. Kullanılan fuel-oilin kükürt oranı 1'den küçüktür. Devreye almada ortalama 20 ton fuel-oil, 5 ton motorin yakılmaktadır. Genel durumdan farklı olarak, sistem arızaları sebebiyle fazla sayıda devreye alma gerçekleşmesi durumunda fuel-oil ve motorin ham verileri yüksek olmaktadır. Bu çalışmada GaBi Education yazılımında bulunan standart ağır fuel-oil ve motorin verileri kullanılmıştır.

Kireçtaşı;

Baca gazı desülfürizasyon sisteminde SO₂ tutucu olarak kullanılır. Pilot tesiste kullanılan kireçtaşının kalsiyum karbonat içeriği ortalama %90'dır.. Kireçtaşı yıkayıcı kulelerde kullanılmak üzere kireç sütü tanklarında su ile karıştırılarak hazırlanır ve desülfürizasyon ünitelerine beslenir.

Göl suyu;

Soğutma suyu, kazan suyu, baca gazı desülfürizasyon tesisinde kullanılan su gibi tesisin işletilmesinin yanı sıra tesiste temizlik, banyo-tuvalet vb. yerlerde kullanılmak üzere çekilen sudur. Çalışmada kullanılan su miktarı, gölden çekilen suyun izlendiği sayaçlardaki 2016 yılı sayaç değerleri toplamı olarak ele alınmıştır.

Klor;

Gölden çekilen suda bakteri oluşumunu önlemek amacıyla kullanılır. Ana soğutma suyu ve ham suda diğer arıtma işlemleri öncesi verilir.

Sönmüş toz kireç ve demir (III) klorür;

Suyun geçici sertliğini giderme aşamasında kullanılmaktadır.

Sülfürik asit ve sodyum hidroksit;

Geçici sertliği giderilen suyun demineralize havuzlarında kalıcı sertliğinin giderilmesi için kullanılmaktadır.

Hidroklorik asit;

Reçinelerin yıkanmasında kullanılır. Rejenerasyon ile (+) ve (-) iyon yüklenen reçinelerin nötr hale getirilmesinde önemlidir.

Sodyum hipoklorit ve amonyak;

Sistem içerisinde kullanılan suyun korozyon yaratmasını önlemek gibi koruma amaçlı pH ayarlamasında kullanılır.

Uçucu kül;

Kazanda yanma atığı olarak meydana gelen uçucu kül, her kazan için mevcutta bulunan elektrostatik filtrelerde tutulmaktadır. Oluşan uçucu külün yaklaşık %30'u kül işleme tesislerine satılmakta, geri kalanı ise diğer proses atıkları ile birlikte santrale ait kül barajında depolanmaktadır. Bu çalışmada proses atıkları, elektrik üretim aşamasının çıktıları olarak dahil edilmiştir. Düzenli depolama aşaması, çalışmanın kapsamına alınmamıştır.

Cüruf;

Kazanda yanma atığı olarak meydana gelen ve uçucu külden farklı olarak kazan altına dökülen cüruf, kazan altı teknelerinde su ile ıslatılıp soğutulduktan sonra bantlar yardımıyla kül barajına gönderilen proses atıklarındandır.

Jips;

BGD Ünitelerine gelen gazın, yıkayıcı kulelerin içinde kireç sütü ile reaksiyonu sonucu oluşan proses atığıdır. BGD Üniteleri içerisinde resirkülasyon pompaları yıkayıcı kule tabanından aldıkları jips ve kireçtaşı çamurunu püskürtücüler

(nozzles) vasıtasıyla yukarıdan aşağıya doğru püskürtür. Yıkayıcı kuleye giren gaz yukarı doğru çıkarken püskürtülen kireç sütü ile yıkanır ve gaz arıtılmış olur. Arıtma sonucu oluşan jips, çamur pompaları yardımıyla hidrosiklonlarla ayrılarak stok tanklarına basılır.

Arıtma çamuru;

Tanımlanan arıtma çamuru, suyun fiziksel olarak arıtılması sonucu oluşan çamurdur. Kül ıslatma ve yayma hatlarında su ile sürüklenerek kül barajında depolanmaktadır.

Tesisin işletilmesi sırasında oluşan atık sular için ise kül barajında ve kül barajına atık taşıyan kül bantlarında kullanılan kazan altı suları gibi tespit edilebilir miktarlar ile buharlaşmayla kaybedilen soğutma suyu gibi ortalama veriler yer almıştır.

Emisyon miktarları, akredite bir çevre laboratuvarının 2016 yılında tesisin dört adet baca gazı desülfürizasyon tesisi bacaları çıkışında yaptığı “Emisyon Teyit Ölçümü Raporu”ndan alınmış olup, Çizelge 5.2’de verilmiştir. Emisyon envanteri oluşturulurken, tesisin dört ünitesinin ayrı ayrı 2016 yılı çalışma saatleri üzerinden yıllık toplam emisyon miktarı hesaplanmıştır.

Çizelge 5.2. 2016 Yılı Emisyon Verileri

PARAMETRE	1. ÜNİTE	2. ÜNİTE	3. ÜNİTE	4. ÜNİTE
Gaz debisi (m ³ /saat)	832276	1057452	986010	876738
Toz emisyonu (kg/saat)	3,837	5,603	5,903	6,16
CO emisyonu (kg/saat)	0,914	1,254	13,469	12,228
SO ₂ emisyonu (kg/saat)	202,497	252,94	247,194	228,55
NO emisyonu (kg/saat)	102,772	141,73	67,743	61,747
NO ₂ emisyonu (kg/saat)	165,823	228,757	109,404	99,701
Florür emisyonu (kg/saat)	0,031	0,08	0,014	0,013
Klorür emisyonu (kg/saat)	0,158	0,35	0,139	0,123
As emisyonu (g/saat)	1,3016	1,083	0,9607	0,8768
Hg emisyonu (g/saat)	0,0696	0,1067	0,0497	0,044
Cd emisyonu (g/saat)	0,078	0,1345	0,1818	0,1538
Co emisyonu (g/saat)	0,3588	0,6793	0,6062	0,5127
Pb emisyonu (g/saat)	0,3775	0,4932	0,6062	1,5501
Tl emisyonu (g/saat)	0,78	2,4442	3,0314	2,5641
Cr emisyonu (g/saat)	69,7772	72,2495	34,661	14,405
Ni emisyonu (g/saat)	69,1061	64,2531	14,019	7,5692

GaBi yazılımında NO miktarı, NO_x miktarı olarak girilmiştir. Bunun bir sebebi, yanan linyitteki azotun tamamen azotoksitlere dönüştüğü ve %90-95 civarının NO, gerisinin tamamının NO₂ olduğunun kabul edilebilmesidir. Bir diğer sebebi ise GaBi yazılımında NO_x'un bölünmesinden dolayı, seçilen belirli modellere göre fotokimyasal ozon oluşturma potansiyeli (FOOP) için negatif değer ortaya çıkabileceği belirtilmiş [29] ve yazılıma NO ve NO₂ şeklinde veri girişi yapıldığında bu emisyonların pozitif etkisi varmış gibi eksi FOOP değeri elde edilmiştir. NO_x olarak yazılıma giriş yapıldığında ise artı FOOP değeri elde edilmiştir.

Baca gazı emisyonlarının konsantrasyonları yakılan kömür ve baca gazı arıtımında kullanılan kireçtaşı özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Ortalama sıcaklığı 60-65 °C ve hızı 20-25 m/sn olan gazda, emisyon ölçümleri esnasında görülen %6 referans oksijene göre emisyon konsantrasyonları Çizelge 5.3'te verilmiştir. Tesis, SKHKKY EK-5.A.3.1. katı yakıtlı mevcut tesis emisyon sınır değerlerine tabi olup, bunlar 100 mg/Nm³ toz, 1000 mg/Nm³ SO₂ ve 800 mg/Nm³ NO_x'dir.

Çizelge 5.3. Tesisin Ortalama Emisyon Konsantrasyonları

PARAMETRELER	ORTALAMA
Gaz sıcaklığı	60,625 °C
Gaz hızı	20,75 m/sn
Gaz debisi	371724,75 Nm ³ /sa
Toz konsantrasyonu	17,56 (mg/Nm ³ , %6 ref. O ₂)
CO konsantrasyonu	22,4875 (mg/Nm ³ , %6 ref. O ₂)
SO ₂ konsantrasyonu	765,9025 (mg/Nm ³ , %6 ref. O ₂)
NO konsantrasyonu	308,9025 (mg/Nm ³ , %6 ref. O ₂)
NO ₂ konsantrasyonu	498,5925 (mg/Nm ³ , %6 ref. O ₂)
Florür konsantrasyonu	0,065 (mg/Nm ³ , %6 ref. O ₂)
Klorür konsantrasyonu	0,435 (mg/Nm ³ , %6 ref. O ₂)
As konsantrasyonu	0,002875 mg/Nm ³
Hg konsantrasyonu	0,000173 mg/Nm ³
Cd konsantrasyonu	0,0003 mg/Nm ³
Co konsantrasyonu	0,001375 mg/Nm ³
Pb konsantrasyonu	0,002075 mg/Nm ³
Tl konsantrasyonu	0,00565 mg/Nm ³
Cr konsantrasyonu	0,126375 mg/Nm ³
Ni konsantrasyonu	0,1009 mg/Nm ³

Kazanların devreye alınması sırasında fuel-oil ve motorin yakılmasından kaynaklanan emisyonların miktar ve konsantrasyonunun belirlenmesine ilişkin işletme tarafından yapılan stokiometrik hesaplamalarla elde edilen emisyon verileri Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. İlk Ateşleme Sırasında Fuel-Oil ve Motorinin Yanması Sonucu Oluşan Emisyon Verileri

EMİSYONLAR	FUEL-OİL YANMASI SONUCU		MOTORİN YANMASI SONUCU	
	Miktar (kg)	Konsantrasyon (mg/Nm ³)	Miktar (kg)	Konsantrasyon (mg/Nm ³)
Toz	18,970	25,290	1,362	1,820
Karbonmonoksit	13,550	18,070	3,410	4,550
Kükürtdioksit	452,280	603,040	96,725	128,970
Azotoksitler	127,362	169,820	16,347	21,800

5.3. Baca Gazı Emisyonlarını Azaltmaya Yönelik İyileştirme Seçenekleri ve Seçeneklere İlişkin Hesaplamalar

08/06/2019 tarihinden itibaren yürürlüğe girecek olan SKHKKY EK-5.A.1.4.1 katı yakıtlı mevcut tesis emisyon sınır değerlerine tabi olacak tesisin emisyon sınır değerleri; 100 mg/Nm³ toz, 400 mg/Nm³ SO₂ ve 600 mg/Nm³ NO_x olacaktır. 6446 Sayılı Elektrik Piyasası Kanunu Geçici 8. Maddesine göre çevre mevzuatına uyumuna yönelik yatırımların gerçekleştirilmesi ve çevre mevzuatı açısından gerekli izinlerin tamamlanması amacıyla 31/12/2019 tarihine kadar süre tanınmaktadır. Mevcut durumda, herhangi bir iyileştirme veya değişiklik yapılmadan yeni SO₂ emisyon sınır değerinin sağlanması mümkün olmayıp, SO₂ konsantrasyonunun baca çıkışlarında en az %50 azaltılması gerekmektedir. Bu çalışmada belirlenen seçenekler; tesisin çevre mevzuatına uyumlu hale getirilmesi durumunda mevcut durum ile arasındaki çevresel etki potansiyellerinin sayısal farklılığının karşılaştırılması amacıyla oluşturulmuştur. Belirlenen seçenekler aşağıda verilmiştir.

1. Seçenek: Mevcut baca gazı desülfürizasyon ünitelerinin iyileştirilerek SO₂ emisyonu konsantrasyonunun %50 azaltılması,

2. Seçenek: Mevcut baca gazı desülfürizasyon sistemi öncesi kuru sorbent enjeksiyonu prosesinin eklenmesi ile SO₂ emisyonu konsantrasyonunun %50 azaltılması,

3. Seçenek: Mevcut yakma sistemi yerine akışkan yatak teknolojisinin adaptasyonu.

5.3.1. Mevcut Baca Gazı Desülfürizasyon Ünitelerinin İyileştirilmesi (1. Seçenek)

Termik santrallerde her yıkayıcı kuleden önce partikül yükünü azaltmak amacıyla elektrostatik filtre, torba filtre, siklon filtre veya bunlardan birkaçı bulunması, sistemdeki resirkülasyon pompaları veya bağlantı hatlarının çabuk dolmasını önlemekte ve SO_x tutma verimini arttırmaktadır [34]. Mevcut tesisin elektrostatik filtreleri yüksek verimde çalışsa da, SO₂ emisyonu miktarının azaltılması için BGD Ünitelerinde yapılabilecek çeşitli iyileştirmeler mevcuttur. Yıkayıcı kulelerde bulunan püskürtücü sistemlerinin tasarımında değişiklik yapılması ve yıkayıcı kule içinde resirkülasyon oranının iyileştirilmesi ile SO₂ emisyon miktarı azaltılabilmektedir.

Yıkama (scrubbing) süspansiyonun dağılımının iyileştirilmesi: Yıkayıcı kule içerisindeki püskürtücü sisteminin gelen kirli gazı tamamen kaplayacak şekilde aç ve sayısının düzenlenmiş olması gerekmektedir. Püskürtücü seçimi ve tasarımı için dikkat edilmesi gereken bazı parametreler bulunmaktadır. Bunlar:

- *Damlacık çapı:* Damlacık çapının azalması verimi artırırken enerji sarfiyatını arttırmaktadır,
- *Spreyleme geometrisi:* Püskürtücüler çeşitli geometrilerde spreyleme yapabilmektedirler.
- *Tıkanma riski:* En az tıkanma riski teşkil edecek ve temizliği kolay olan püskürtücüler tercih edilmelidir,
- *Enerji sarfiyatı:* Püskürtücü seçimi, tertiplendirilmesi ve borulamalar, pompalama gücü olabildiğince düşük tutulacak şekilde yapılmalıdır,
- *Püskürtücü dizilimi:* Her tarafa eşit püskürtme yapılabilecek şekilde püskürtücü dizilimi yapmak filtrasyon verimi açısından önemlidir [34].

Her üniteye bulunan mevcut püskürtücülerin yerine daha yüksek performanslı püskürtücülerin farklı püskürtme yönleri belirlenerek ve püskürtücü sayısı artırılarak yerleştirilmesi ile yıkayıcı kuleye gelen SO₂ emisyonunun yıkanmadan/arıtılmadan baca çıkışına ulaşmasının önlenmesi söz konusudur.

Bunların belirlenebilmesi için öncelikle kullanılacak sıvı miktarı tespit edilmelidir [34].

Resirkülasyon oranının iyileştirilmesi: Resirkülasyon pompalarının basma yükseklikleri genelde tasarıma bağlı olarak seçilmektedir. Absorbsiyon tankında çökmek üzere olan sülfid ve sülfattan oluşan çamuru sistemden uzaklaştırmak için çamur pompaları kullanılmaktadır [34]. Her ünite de bulunan eski resirkülasyon pompalarının emicilerinin ve basınç bağlantılarının ayarlanarak resirkülasyon oranının iyileştirilebilmesi söz konusudur.

Tesisin mevcut baca gazı desülfürizasyon ünitelerinde, baca gazındaki SO₂ konsantrasyonunun %50 azaltılması durumunda her ünite için SO₂ kütleli debisi hesaplanmıştır. Hesaplamalarda her ünite için 2016 yılında ölçülen baca gazı çıkış debileri kullanılmıştır.

$$m_{SO_2} = C_{SO_2} * Q \quad (5-1)$$

m_{SO_2} : SO₂ kütleli debisi (kg/saat)

C_{SO_2} : İstenen SO₂ konsantrasyonu (mg/Nm³)

Q : Gaz debisi (Nm³/saat)

$$C_{SO_2} = \text{Mevcut ortalama SO}_2 \text{ konsantrasyonu (mg/Nm}^3\text{)} * \%50 \quad (5-2)$$

$$C_{SO_2} = 765,9025 * 0,5 = 382,95 \text{ mg/Nm}^3$$

Her ünite için bilinen gaz debilerine göre yapılan hesaplamalar aşağıda verilmiştir.

1. Ünite için;

$$Q_1 \text{ (1. Ünite gaz debisi)} = 324272 \text{ Nm}^3/\text{saat}$$

$$C_{SO_2} * Q_1 = 382,95 \text{ (mg/Nm}^3\text{)} * 324272 \text{ (Nm}^3/\text{saat)} * 10^{-6}$$

$$1. \text{ Ünite SO}_2 \text{ miktarı} = \mathbf{124,179 \text{ kg/saat}}$$

2. Ünite için;

$$Q_2 \text{ (2. Ünite gaz debisi)} = 428431 \text{ Nm}^3/\text{saat}$$

$$C_{SO_2} * Q_2 = 382,95 \text{ (mg/Nm}^3\text{)} * 428431 \text{ (Nm}^3/\text{saat)} * 10^{-6}$$

$$2. \text{ Ünite SO}_2 \text{ miktarı} = \mathbf{164,068 \text{ kg/saat}}$$

3. Ünite için;

$$Q_3 \text{ (3. Ünite gaz debisi)} = 384831 \text{ Nm}^3/\text{saat}$$

$$C_{SO_2} * Q_3 = 382,95 \text{ (mg/Nm}^3\text{)} * 384831 \text{ (Nm}^3/\text{saat)} * 10^{-6}$$

$$3. \text{ Ünite SO}_2 \text{ miktarı} = \mathbf{147,371 \text{ kg/saat}}$$

4. Ünite için;

$$Q_4 \text{ (4. Ünite gaz debisi)} = 349365 \text{ Nm}^3/\text{saat}$$

$$C_{SO_2} * Q_4 = 382,95 \text{ (mg/Nm}^3\text{)} * 349365 \text{ (Nm}^3/\text{saat)} * 10^{-6}$$

$$4. \text{ Ünite SO}_2 \text{ miktarı} = \mathbf{133,789 \text{ kg/saat}}$$

Bu hesaplamalara göre, sistemin iyileştirilerek baca gazında SO₂ miktarının %50 azaltılması sağlanması ve bacalardan sene boyunca ortalama hesaplanan kütleli debilerde SO₂ verilmesi durumunda yıllık SO₂ miktarları Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.5. 1. Seçenek İçin Üniteler Bazında Hesaplanan Yıllık SO₂ Miktarları

ÜNİTELER	SO ₂ (TON/YIL)*
1. ÜNİTE	957,42
2. ÜNİTE	1.267,75
3. ÜNİTE	1.130,04
4. ÜNİTE	998,60
TOPLAM	4.353,82

*Yıllık miktarlar, her tesisin 2016 yılı fiili çalışma saatlerine göre hesaplanmıştır.

Ünitelerde püskürtücü sayısının artırılmasıyla birlikte, kullanılan kireçtaşı ve su miktarında artış olabileceği öngörülmektedir. Bu durum, oluşan jips miktarında da artışa sebep olacaktır.

1 kmol kalsiyum karbonat ve kükürtdioksit;

$$m_{CaCO_3} = 40+12+(3*16) = 100 \text{ kg}$$

$$m_{SO_2} = 32+(2*16) = 64 \text{ kg}$$

Q_A: Tesisin mevcut durumunda tüm ünitelerden alıcı ortama verilen yıllık toplam SO₂ kütleli debisi

Q_B: 1. Seçenek için hesaplanan, iyileştirme sonucu alıcı ortama verilecek yıllık toplam SO₂ kütleli debisi

Q_C: Artırılacak olan yıllık toplam SO₂ kütleli debisi

$$Q_C = Q_A - Q_B \quad (5-3)$$

$$Q_A = 7.137,588 \text{ ton/yıl}$$

$$Q_B = 4.353,815 \text{ ton/yıl}$$

$$Q_c = Q_A - Q_B = 2.783,773 \text{ ton/yıl}$$

Kullanılacak Kireçtaşı Miktarı:

Mevcut durumda kullanılan yıllık kireçtaşı miktarına iyileştirme için eklenecek miktarın hesaplaması için Denklem (5-4) kullanılmıştır. Çayırhan havzasından çıkarılan ve mevcut BGD ünitelerinde kullanılan kireçtaşının CaCO_3 içeriği ortalama %90 olup, hesaplama bu şekilde dahil edilmiştir.

$$m = \frac{Q * m_{\text{CaCO}_3}}{m_{\text{SO}_2}} \quad (5-4)$$

$$m_i = \frac{2.783,773 \left(\frac{\text{ton}}{\text{yıl}}\right) * 100}{\frac{64}{0,9}} = 4.832,939 \text{ ton/yıl}$$

Mevcut durumda kullanılan yıllık kireçtaşı miktarı ile iyileştirme için eklenecek kireçtaşı miktarının toplamı, yıllık gereken kireçtaşı miktarını verir.

$$m_1 = m + m_i \quad (5-5)$$

$$m: 603.366 \text{ ton/yıl}$$

$$m_1 = m + m_i = \mathbf{608.199 \text{ ton/yıl}}$$

Kullanılacak Su Miktarı:

Ünitelerde kullanılacak su miktarı, kullanılacak kireçtaşı miktarına göre Denklem (5-6) ile hesaplanmıştır.

$$s = \frac{m * m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{CaCO}_3}} \quad (5-6)$$

$$s_1 = \frac{608.199 \left(\frac{\text{ton}}{\text{yıl}}\right) * 36}{100} = \mathbf{218.951,640 \text{ ton/yıl}}$$

Oluşacak Jips Miktarı:

Baca gazı desülfürizasyonu sonucu oluşan 1 kmol jips:

$$m_{\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}} = 40 + 32 + (4 \cdot 16) + 2(2 \cdot 1 + 16) = 172 \text{ kg}$$

1. Seçeneğe göre kullanılacak kireçtaşı miktarına göre oluşacak yıllık toplam jips miktarı Denklem (5-7) ile hesaplanmıştır.

$$j = \frac{m * m_{CaSO_4.2H_2O}}{m_{CaCO_3}} \quad (5-7)$$

$$j_1 = \frac{608.199 \left(\frac{\text{ton}}{\text{yıl}}\right) * 172}{100} = 1.046.102,28 \text{ ton/yıl}$$

Hesaplamalar sonucu elde edilen veriler Çizelge 5.6'da sunulmuştur.

Çizelge 5.6. 1.Seçenek İçin Hesaplanan Malzeme Miktarları

Veriler	Malzeme Adı	Miktar (Ham Veri)	Birim (Yıllık)
BGD Ünitelerinde Kullanılacak Malzeme Miktarı	Kireçtaşı	608.199	ton
BGD Ünitelerinde Kullanılacak Su Miktarı	Göl suyu	218.951,640	m ³
Proses Sonucu Oluşan Atık Miktarı	Jips	1.046.102,28	ton

5.3.2. Mevcut Baca Gazı Desülfürizasyon Sistemi Öncesi Kuru Sorbent Enjeksiyonu Prosesinin Eklenmesi (2. Seçenek)

Dünya genelinde kullanılan sistemlerin %80'inin ıslak tip, %10'unun yarı kuru tip ve %2'sinin de kuru tip baca gazı desülfürizasyon prosesi olduğunu göz önünde bulundurarak, mevcut ıslak tip sisteme ek olarak kuru sorbent enjeksiyonu prosesinin dâhil edilmesi 2. Seçenek olarak belirlenmiştir.

Kuru sorbent enjeksiyonu; düşük sermaye maliyeti, düşük kurulum ayak izi, kullanım kolaylığı ve yakıt değişikliklerinde esnekliği nedeniyle önemli bir SO₂ azaltma teknolojisi olarak ortaya çıkmıştır. Bu teknoloji, HCl ve SO₂ için yüksek giderim oranları elde edebilmekte olup, Avrupa'daki birçok atık yakma tesisine ve ABD'deki kömürle çalışan enerji santrallerine uygulanmaktadır [50].

Kireç sütünden farklı olarak kullanılan sorbent kurudur ve bir sıvıdan ziyade daha çok toz gibi davranır. Baca gazı akışına (kazana, ekonomizere ya da kanala) kuru sorbent enjekte edilir ve reaktörün içerisinde yeniden aktive olması sağlanır. Baca gazı içindeki kükürt ile reaksiyon sonucu uçucu kül ve kuru maddeler ortaya çıkar. Toz filtrelerinde toplanan kuru maddelerin bir kısmı arıtma için kullanılan sorbentin bulunduğu tanka tekrar gönderilir. Bunun yapılmasındaki amaç kül içerisindeki alkaliniteden yararlanmaktır [8].

Sistemde genellikle dört farklı madde (CaCO_3 , Ca(OH)_2 , sodyum bikarbonat ve trona) sorbent olarak kullanılmaktadır. Bu maddelere ilişkin özellikler Çizelge 5.7’de verilmiştir [36].

Çizelge 5.7. Sorbent Türlerinin Temel Özellikleri [36].

Sorbent Türü	CaCO_3 (Kireçtaşı)	Ca(OH)_2 (Kalsiyum hidroksit)	NaHCO_3 (Sodyum Bikarbonat)	$\text{Na}_3\text{H(CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Trona)
Yöntem	Kazan sorbent enjeksiyonu	Kazan ve kanal sorbent enjeksiyonu	Kanal sorbent enjeksiyonu	Kanal sorbent enjeksiyonu
Verim, %	10-20	30-50	80-95	80-90
Tanecik boyutu, μm	10	5	20-40	20-40
Çalışma sıcaklığı, $^\circ\text{C}$	750-1250	300-650	150-200	150-200

Yöntem olarak kanala kuru sorbent enjeksiyonu ile kükürt giderme sistemlerinin uygulamalarında %80 kükürt giderme verimine ulaşılabildiği bilinmektedir [36].

Hangi sorbentten kullanılacağını, hangi yöntemle ve ne kadar uygulanacağını, ne kadar atık oluşacağını hesaplanabilmesi için baca gazı gaz debilerinin, gaz sıcaklıklarının ve BGD giriş SO_2 miktarının bilinmesi gerekmektedir.

Çayırhan Termik Santrali BGD ünitelerinin SO_2 giriş konsantrasyonu tasarım değerleri 1. ve 2. üniteler için 17.580 mg/Nm^3 , 3. ve 4. üniteler için 19.800 mg/Nm^3 tür. BGD ünitelerinin mevcut şekilde kullanılması halinde %50 daha az SO_2 ’nin alıcı ortama verilebilmesi için, baca gazında BGD ünitelerine girmeden SO_2 arıtımının sağlanması gerekmektedir.

Tüm BGD ünitelerinde çıkış SO_2 konsantrasyonunun 400 mg/Nm^3 ’ten küçük olması istenmektedir. BGD ünitelerinin ortalama %95 SO_2 giderim verimine sahip olduğu bilinmekte olup, buna göre BGD giriş SO_2 konsantrasyonu ortalama 8.000 mg/Nm^3 olmalıdır.

Bu durumda 1. ve 2. Ünitelerin her biri için;

$$C_{1-2} = (17.580 - 8.000) \text{ mg/Nm}^3 = \mathbf{9.580 \text{ mg/Nm}^3 \text{ SO}_2}$$

3. ve 4. ünitelerin her biri için;

$$C_{3-4} = (19.800 - 8.000) \text{ mg/Nm}^3 = \mathbf{11.800 \text{ mg/Nm}^3 \text{ SO}_2}$$

giderimi, BGD öncesi gerçekleşmelidir.

BGD Öncesi Arıtılacak SO₂ Miktarı:

Her ünite için bilinen gaz debilerine göre yapılan hesaplamalar aşağıda verilmiştir.

1. Ünite için;

$$Q_1 \text{ (1. Ünite gaz debisi)} = 324272 \text{ Nm}^3/\text{saat}$$

$$C_{1-2} * Q_1 = 9.580 \text{ (mg/Nm}^3\text{)} * 324272 \text{ (Nm}^3/\text{saat)} * 10^{-6}$$

$$1. \text{ Ünite giriş SO}_2 \text{ miktarı} = \mathbf{3.106,526 \text{ kg/saat}}$$

2. Ünite için;

$$Q_2 \text{ (2. Ünite gaz debisi)} = 428431 \text{ Nm}^3/\text{saat}$$

$$C_{1-2} * Q_2 = 9.580 \text{ (mg/Nm}^3\text{)} * 428431 \text{ (Nm}^3/\text{saat)} * 10^{-6}$$

$$2. \text{ Ünite giriş SO}_2 \text{ miktarı} = \mathbf{4.104,369 \text{ kg/saat}}$$

3. Ünite için;

$$Q_3 \text{ (3. Ünite gaz debisi)} = 384831 \text{ Nm}^3/\text{saat}$$

$$C_{3-4} * Q_3 = 11.800 \text{ (mg/Nm}^3\text{)} * 384831 \text{ (Nm}^3/\text{saat)} * 10^{-6}$$

$$3. \text{ Ünite SO}_2 \text{ giriş miktarı} = \mathbf{4.541,006 \text{ kg/saat}}$$

4. Ünite için;

$$Q_4 \text{ (4. Ünite gaz debisi)} = 349365 \text{ Nm}^3/\text{saat}$$

$$C_{3-4} * Q_4 = 11.800 \text{ (mg/Nm}^3\text{)} * 349365 \text{ (Nm}^3/\text{saat)} * 10^{-6}$$

$$4. \text{ Ünite giriş SO}_2 \text{ miktarı} = \mathbf{4.122,507 \text{ kg/saat}}$$

Electric Power Research Institute öncülüğünde kurulan pilot ünitelerde (22 MW ve 100 MW'lık) yapılan testlerde sodyum bikarbonatın %80 kükürt giderim verimiyle en yüksek verime sahip olduğu, ancak tronanın aynı stokiyometrik oranda %67 kükürt giderme verimine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra sodyum bikarbonatın reaktivitesinin daha yüksek olmasından dolayı stokiyometrik oran arttığında SO₂ giderme verimleri birbirine yaklaştığı belirtilmektedir [36].

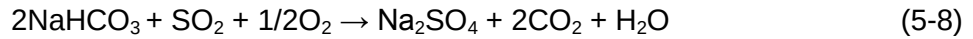
Tesiste elektrostatik filtre kanallarında yapılan çalışmalarda 1. ve 2. ünitelerde gaz sıcaklıkları 180-210°C arası, 3.ve 4. ünitelerde 160-180°C arası ölçülmüştür. Buna göre sorbent olarak sodyum bikarbonat seçilmiş olup, kullanımının avantaj ve dezavantajları Çizelge 5.8'de sunulmuştur.

Çizelge 5.8. Sodyum Bikarbonat Kullanımının Avantaj ve Dezavantajları [36].

SODYUM BİKARBONAT (NaHCO ₃)	
Avantajlar	- Yüksek kükürt giderme verimi, - NO_x gibi diğer zararlı gaz emisyonlarını da düşürmesi, - Korozyon, birikme, tıkanma gibi etkilerinin olmaması.
Dezavantajlar	- Yüksek maliyet, - Ürün tedarikinde fazla alternatif olmaması

Kullanılacak Sorbent Miktarı:

Sodyum bikarbonat (SBC) ile kükürt giderme için reaksiyon mekanizması:



Buna göre ünitelere göre gereken SBC miktarları hesaplanmıştır. Beypazarı havzasında minimum %99,1 içerikli NaHCO₃ bulunmakta olup [37], hesaplamada NaHCO₃ içeriği %99,1 olarak dahil edilmiştir. Malzemenin tümünün reaksiyona girdiği varsayılmıştır.

Sodyum bikarbonat ve sodyum sülfatın molekül kütleleri;

$$m_{\text{NaHCO}_3} = 23 + 1 + 12 + (3 \cdot 16) = 84 \text{ kg}$$

$$m_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = 23 + 32 + (4 \cdot 16) = 119 \text{ kg}$$

Kullanılacak SBC miktarları Denklem (5-9) ile hesaplanmış olup; 1. ünite için $m_{2,1}$, 2. ünite için $m_{2,2}$, 3. ünite için $m_{2,3}$ ve 4. ünite için $m_{2,4}$ olarak adlandırılmıştır.

$$m_{2,\text{ünite}} = \frac{(2 \cdot m_{\text{NaHCO}_3}) \cdot \text{SO}_2 \text{ giriş miktarı}}{m_{\text{SO}_2}} \quad (5-9)$$

$$m_{2,1} = \frac{(2 \cdot 84) \cdot 3.106,526 \left(\frac{\text{kg}}{\text{saat}}\right)}{64 \cdot 0,991} = 8.228,689 \text{ kg/saat}$$

$$m_{2,2} = \frac{(2 \cdot 84) \cdot 4.104,369 \left(\frac{\text{kg}}{\text{saat}}\right)}{64 \cdot 0,991} = 10.871,815 \text{ kg/saat}$$

$$m_{2,3} = \frac{(2 \cdot 84) \cdot 4.541,006 \left(\frac{\text{kg}}{\text{saat}}\right)}{64 \cdot 0,991} = 12.028,395 \text{ kg/saat}$$

$$m_{2,4} = \frac{(2 \cdot 84) \cdot 4.122,507 \left(\frac{\text{kg}}{\text{saat}}\right)}{64 \cdot 0,991} = 10.919,860 \text{ kg/saat}$$

Buna göre hesaplamalar sonucu elde edilen ünitelerde kullanılması gereken yıllık sodyum bikarbonat miktarları Çizelge 5.9'da sunulmuştur.

Çizelge 5.9. 2. Seçenek İçin Üniteler Bazında Hesaplanan Yıllık NaHCO₃ Miktarları

ÜNİTELER	NaHCO ₃ (TON/YIL)*
1. ÜNİTE	63.443,194
2. ÜNİTE	84.006,517
3. ÜNİTE	92.233,737
4. ÜNİTE	81.505,833
TOPLAM	321.189,28

*Yıllık miktarlar, her tesisin 2016 yılı fiili çalışma saatlerine göre hesaplanmıştır.

Oluşacak yıllık sodyum sülfat miktarı “ns” şeklinde ifade edilmiştir.

$$ns = \frac{m_{Na_2SO_4} * \text{toplam NaHCO}_3 \text{ miktarı}}{(2 * m_{NaHCO_3})} \quad (5-10)$$

$$ns = \frac{(119) * 321.189,28 \left(\frac{\text{ton}}{\text{yıl}}\right)}{2 * 84} = 227.509,07 \text{ ton/yıl}$$

Kanala kuru püskürtme prosesi uygulamasında reaksiyona giren veya girmeyen SBC'nin tamamının elektrostatik filtrelerle ne kadar ek yük getireceği ve ek toz yükünü elektrostatik filtrelerin kaldırıp kaldıramayacağı belirlenmeli ve kontrol edilmelidir. İhtiyaç görüldüğü takdirde elektrostatik filtrelerin kapasitesi arttırılmalı veya ilave bir filtre eklenmelidir [36].

Kuru sorbent enjeksiyonu ile SO₂ arıtımı ile birlikte reaksiyon mekanizmasına göre oluşacak CO₂ emisyon miktarı e_{CO2} şeklinde ifade edilmiştir.

$$e_{CO_2} = \frac{m_{CO_2} * \text{toplam NaHCO}_3 \text{ miktarı}}{m_{NaHCO_3}} \quad (5-11)$$

$$e_{CO_2} = \frac{(44) * 321.189,28 \left(\frac{\text{ton}}{\text{yıl}}\right)}{84} = 168.242 \text{ ton CO}_2 / \text{yıl}$$

BGD Ünitelerinden Alıcı Ortama Verilecek SO₂ Miktarı:

Kuru sorbent enjeksiyonu sonrası yıkayıcı kulelere gelen baca gazında 8000 mg/Nm³ SO₂'nin kalacağı varsayılmış olup, 400 mg/Nm³ SO₂ konsantrasyonu sınır

değerini sağlaması için en az 7600 mg/Nm³ SO₂ gideriminin gerçekleşmesi gerekmektedir. Her bir BGD ünitesinde baca gazından 7700 mg/Nm³ SO₂ giderimi sonucu alıcı ortama verilecek SO₂ miktarları Çizelge 5.10'da sunulmuştur.

Çizelge 5.10. 2. Seçenek İçin Üniteler Bazında Hesaplanan Yıllık SO₂ Miktarları

ÜNİTELER	Arıtılan SO ₂ (TON/YIL)*	Alıcı Ortama Verilen SO ₂ (TON/YIL)*
1. ÜNİTE	19,25	808,08
2. ÜNİTE	25,49	892,07
3. ÜNİTE	22,72	985,62
4. ÜNİTE	20,08	726,11
TOPLAM	87,54	3.411,89

*Yıllık miktarlar, her tesisin 2016 yılı fiili çalışma saatlerine göre hesaplanmıştır.

Kullanılacak Kireçtaşı Miktarı:

BGD ünitelerinin her birinde 7700 mg/Nm³ SO₂ gideriminde gerekli olan kireçtaşı miktarı için CaCO₃ içeriği ortalama %90 olarak hesaplamaya dâhil edilmiştir.

$$m_2 = \frac{87.542,59 \left(\frac{\text{ton}}{\text{yıl}}\right) * 100}{\frac{64}{0,9}} = 151.982,639 \text{ ton/yıl}$$

Kullanılacak Su Miktarı:

Ünitelerde kullanılacak su miktarı, kullanılacak kireçtaşı miktarına göre hesaplanmıştır.

$$s_2 = \frac{151.982,639 \left(\frac{\text{ton}}{\text{yıl}}\right) * 36}{100} = 54.713,75 \text{ ton/yıl}$$

Oluşacak Jips Miktarı:

2. Seçenekte kullanılacak kireçtaşı miktarına göre oluşacak yıllık toplam jips miktarı hesaplanmıştır.

$$j_2 = \frac{151.982,639 \left(\frac{\text{ton}}{\text{yıl}}\right) * 172}{100} = 1.519,821 \text{ ton/yıl}$$

Elde edilen ve Çizelge 5.11'de sunulan veriler, oluşacak kimyasal tepkimenin tam gerçekleşmesine göre hesaplanmıştır.

Çizelge 5.11. 2.Seçenek İçin Hesaplanan Malzeme ve Emisyon Verileri

Veriler	Malzeme Adı	Miktar (Ham Veri)	Birim (Yıllık)
KSE'de Kullanılacak Malzeme Miktarı	Sodyum Bikarbonat	321.189,28	ton
KSE Sonrası Oluşacak Atık	Sodyum Sülfat	227.509,07	ton
KSE Sonrası Oluşacak Emisyon	Karbondioksit	168.242,00	ton
BGD Ünitelerinde Kullanılacak Malzeme Miktarı	Kireçtaşı	151.982,639	ton
BGD Ünitelerinde Kullanılacak Su Miktarı	Göl suyu	54.713,750	m ³
Proses Sonucu Oluşan Atık Miktarı	Jips	1.519.821	kg

Mevcut BGD ünitesi öncesi KSE prosesinin uygulanabilmesi için, tesise aşağıdaki birimlerin eklenmesi gerekecektir:

- Sorbent depolama silosu,
- Sorbent besleyici,
- Silo ve sorbent verilecek gaz kanalı arası sorbent besleme hatları,
- Sorbent enjeksiyon lansları,
- Hava kompresörü ve fanlar,
- Reaksiyon tankı [36].

Bu birimlerin, tesisin yerleşim alanına ve tesiste kullanılacak olan sodyum bikarbonatın kullanım miktarına göre boyutlandırılması önem taşıyacaktır.

5.3.3. Mevcut Yakma Sistemi Yerine Akışkan Yatak Teknolojisinin Adaptasyonu (3. Seçenek)

Tasarımların ve işletme verilerinin teknik ve ekonomik karşılaştırmalı analizleri, pulverize kömür yakma kazanlarında ve yüksek güçteki dolaşımli akışkan yataklı kazanlarda üretilen enerji maliyetinin oldukça benzer olduğunu ortaya koymuştur. Birbirlerine diğer birçok parametrede de uyan bu teknolojilerin hangisinin kullanılması gerektiği, gerçek işletme koşullarına ve yatırımcı gereksinimlerine bağlıdır [38].

3. Seçenek olarak elektrik üretimi için mevcut pulverize kömür yakma kazanı yerine akışkan yataklı kazan kullanılması seçilmiştir. Bunun sebebi, akışkan yataklı kazanlarda yanma sonucu ortaya çıkan SO₂'nin yanma esnasında yatağa kireçtaşı ekleyerek büyük ölçüde tutulabilmesi ve BGD tesislerine gerek kalmadan emisyon sınır değerlerini sağlamasıdır. Ayrıca, mevcut santrallerin AYY teknolojisine adaptasyonuna ilişkin çalışmalar genellikle devre dışı kalmayı bekleyen santraller için önerilmektedir.

Bu çalışmada, sadece teorik olarak tüketilecek kömür ve kireçtaşı miktarı ile oluşacak proses atıkları ve emisyon miktarlarının hesabı yapılmıştır.

Sistemde kullanılacak olan linyitin, TÜRKAK'tan akredite bir laboratuvara yaptırılmış olan kuru bazda kömür analiz sonuçları Çizelge 5.12 'de verilmiştir.

Çizelge 5.12. Sistemde Kullanılacak Linyitin Analizi

Kısa Analiz		Elementel Analiz	
Nem (%)	25,57	Karbon (%)	27,62
Uçucu Madde (%)	27,69	Hidrojen (%)	1,79
Sabit Karbon (%)	16,74	Kükürt (%)	3,70
Kül (%)	55,77	Azot (%)	1,89
Alt Isıl Değer (kcal/kg)	2411	Oksijen (%)	9,25

Kullanılacak Yakıt Miktarı:

Pülverize kömür yakma sistemlerinde verim (η), sistemin kritik altı ya da kritiküstü olmasına göre %30-50 arasında değişmektedir. AYY teknolojisi bulunan Çan Termik Santrali'nde genel verimi (η) % 42'dir [39]. Bu çalışmada $\eta = 0,42$ alınmıştır. Ünitelerin yıllık yakıt miktarları için 330gün*24saat çalışacakları varsayılmıştır.

$$\eta = \frac{P \text{ (MW)}}{(\text{Yakıt Miktarı (M}_Y\text{)} * \text{Alt Isıl Değer (H}_U\text{)})} \quad (5-12)$$

$$M_Y = \frac{P}{\eta * H_U} \quad (5-13)$$

$$1 \text{ kcal} = 4,1868 \text{ kJ}$$

$$M_Y = \frac{P \text{ (MW)} * 3600 \left(\frac{\text{saniye}}{\text{saat}}\right)}{\eta * H_U \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}\right) * 4,1868 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kcal}}\right)}$$

$$M_{Y1} = \frac{300 \text{ (MW)} * 3600 \left(\frac{\text{saniye}}{\text{saat}}\right)}{0,42 * 2411 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}\right) * 4,1868 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kcal}}\right)} = 255,851 \text{ ton/saat}$$

$$M_{Y1} = 2.026.339,92 \text{ ton/yıl}$$

$$M_{Y2} = \frac{320 \text{ (MW)} * 3600 \left(\frac{\text{saniye}}{\text{saat}}\right)}{0,42 * 2411 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}\right) * 4,1868 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kcal}}\right)} = 271,721 \text{ ton/saat}$$

$$M_{Y2} = 2.152.030,32 \text{ ton/yıl}$$

$$M_{Y\text{Toplam}} = M_{Y1} + M_{Y2} = 4.178.370,24 \text{ ton/yıl}$$

Toplam Baca Gazı Miktarı:

Birim kg kömür başına; gereken teorik hava miktarı (V_{HT}), teorik yanma şartlarında yanma gazı (V_{GT}), gereken gerçek hava miktarı (V_H), oluşan yanma gazı (V_G) ve toplam yakma havası (V_{H0}), aşağıdaki denklemlerle [40] hesaplanarak toplam baca gazı miktarı (V_{G0}) bulunmuştur.

Gereken teorik hava miktarı:

$$V_{HT} = \frac{((8,89 * C) + 26,7 * (H - (\frac{O}{8}))) + (3,34 * S))}{100} \quad (5-14)$$

$$V_{HT} = \frac{((8,89 * 27,62) + 26,7 * (1,79 - (\frac{9,25}{8}))) + (3,34 * 3,7))}{100} = 2,746 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

Teorik yanma şartlarında yanma gazı:

$$V_{GT} = \frac{((8,968 * C) + 21,3 * (H - (\frac{O}{8}))) + (3,34 * S) + 1,244 * (W + (9 * H))}{100} \quad (5-15)$$

$$V_{GT} = 3,252 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

Hava fazlalık katsayısı (λ), gerçek hava miktarının (V_H) teorik hava miktarına (V_{HT}) olan oranıdır. Pülverize kömür yakma kazanları için 1,25-1,35 arasında değişen hava fazlalık katsayısı [36], bir akışkan yatak tasarımında 1,15 olarak kabul edilmiş olup [31], bu çalışmada da $\lambda = 1,15$ alınmıştır.

$$\lambda = \frac{V_H}{V_{HT}} \quad (5-16)$$

Buna göre gerçek hava miktarı:

$$V_H = V_{HT} * 1,15 = 3,158 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

Oluşan yanma gazı miktarı:

$$V_G = V_{GT} + (\lambda - 1) * V_{HT} \quad (5-17)$$

$$V_G = 3,252 + (1,15 - 1) * 2,746 = 3,664 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

Normal şartlar altında (1 bar basınç, $t=0$) toplam yakma havası Denklem (5-18) ile iki ünite için ayrı hesaplanmıştır:

$$V_{H0} = M_Y * V_H \quad (5-18)$$

$$V_{H01} = M_{Y1} * V_H = 6.399.979,985 \text{ Nm}^3/\text{ton}$$

$$V_{H02} = M_{Y2} * V_H = 6.796.959,798 \text{ Nm}^3/\text{ton}$$

Toplam baca gazı miktarı:

$$V_{G0} = M_Y * V_G \quad (5-18)$$

$$V_{G01} = M_{Y1} * V_G = 7.424.154,29 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$V_{G02} = M_{Y2} * V_G = 7.884.661,88 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

Akışkan yataklı kazanda yanma sıcaklığı için optimum sıcaklık 850°C olup [9], bu sıcaklıkta ısı NOx oluşumu en düşük seviyeye inmektedir. $t = 850^\circ\text{C}$ için baca gazı miktarı:

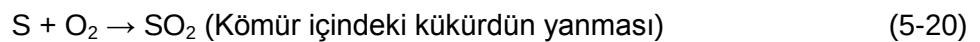
$$V_{Gt} = V_{G0} \left(\frac{273 + t}{273} \right) \quad (5-19)$$

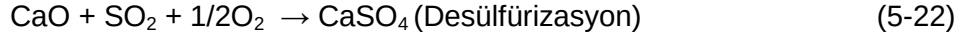
$$V_{Gt1} = V_{G01} \left(\frac{273+850}{273} \right) = 30.539.652,98 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$V_{Gt2} = V_{G02} \left(\frac{273+850}{273} \right) = 32.433.975,43 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

Oluşacak Kükürtdioksit Miktarı:

Yanma sırasında kömür içeriğindeki bir miktar CaO sayesinde bir miktar kükürt tutulabilmekte, ancak CaO miktarı kükürt miktarına göre genelde çok az bulunduğundan yeterli olmamaktadır [41]. Bu nedenle sisteme kireçtaşı beslenmekte ve beslenen kireçtaşı kükürt giderme işlemini aşağıdaki reaksiyonlarla gerçekleştirmektedir.





Kömür içindeki kükürdün tam yanması sonucu oluşacak SO₂ miktarı için:

$$e_s = 4.178.370,24 \text{ (ton/yıl)} * 0,037 = 154.599,7 \text{ ton S/yıl}$$

$$e_{\text{SO}_2} = (154.599,7 * 64) / 32 = 309.199,4 \text{ ton SO}_2/\text{yıl}$$

Alıcı Ortama Verilecek SO₂ Miktarı:

Oluşacak SO₂ miktarının %90'ının AYK içinde giderileceği kabul edilmiştir. Bu durumda %10'u alıcı ortama verilecektir.

$$g_{\text{SO}_2} = 309.199,4 \text{ ton} * 0,1 = \mathbf{3.919,94 \text{ ton SO}_2/\text{yıl}}$$

Kullanılacak Kireçtaşı Miktarı:

SO₂ ile tepkimeye girerek kalsiyum sülfat oluşturacak kalsiyum oksit'in molekül kütlesi:

$$m_{\text{CaO}} = 40+16 = 56 \text{ kg}$$

Yıllık CaO ve buna bağlı olarak kireçtaşı miktarı hesaplanmıştır. Kullanılacak kireç taşı %90 CaCO₃ içeriğine sahiptir.

$$(309.199,4 * 56) / 64 = 270.549,47 \text{ ton CaO/yıl}$$

$$m_3 = \frac{270.549,47 \left(\frac{\text{ton}}{\text{yıl}}\right) * 100}{\frac{56}{0,9}} = \mathbf{536.804,5 \text{ ton/yıl}}$$

Kırıcıdan yakıcıya beslenen yakıt ve kireç taşı parçacıklarının küçük tanecik boyutu ve yüksek gaz hızları sebebiyle, kazan içerisinde yatak ve serbest bölge ayırımı yapılamaz. Dolaşımli akışkan yatakta kireç taşı boyutu daha küçük olduğu için birim ağırlık başına kireç taşı yüzeyinin artması kükürt dioksit – kireç taşı tepkimesini de hızlandırmaktadır. Bu da gereken kireç taşı miktarını düşürmektedir [41].

Oluşacak Karbondioksit Miktarı:

Kalsinasyon sonucu oluşacak CO₂ miktarı:

$$e_{CO_2} = \frac{(44) * 536.804,5 \left(\frac{\text{ton}}{\text{yıl}}\right)}{100} = 236.193,98 \text{ ton CO}_2 / \text{yıl}$$

Oluşacak Azotoksitlerin Miktarı:

Kömürün yanması sonucu termal NO, anlık NO ve yakıta bağlı NO oluşumu olduğu bilinmektedir. Termal NO reaksiyon mekanizması:



Anlık NO, yakıt içinde bulunan karbon ve hidrokarbon bileşiklerinin N₂ ile reaksiyonu sonucu oluşur. Reaksiyon mekanizması:



Yakıt içindeki azot HCN'ye, HCN de NH ve NH₂'ye dönüşür ve oksijenle reaksiyonları sonucu yakıta bağlı NO oluşur.



Yanan linyitteki azotun tamamen azotoksitlere dönüştüğü ve %90-95 civarının NO, gerisinin tamamının NO₂ olduğu kabul edilebildiği, AYK'da NO_x azaltmak için en yaygın kullanılan yol kademeli yanma olup, kademeli yanma ile NO_x azaltma tekniğinin SO₂ emisyon kontrolü tekniği ile karşılıklı olarak etkilendiği ve NO_x emisyonu oluşumunun karmaşık mekanizmalar içerdiği belirtilmektedir [9].

NO ve NO₂ miktarları için; tesisin mevcut durumda yaktığı kömüre göre yıllık NO_x miktarları ile 3. Seçenekte kullanılacak kömür miktarı oranlanmıştır.

Oluşacak Kül Miktarı:

Ünitelerden kaynaklanacak toplam kül miktarı:

$$m_{k\ddot{u}l} = 4.178.370,24 \text{ (ton/yıl)} * 0,5577 = \mathbf{2.330.277,08 \text{ ton/yıl}}$$

Hesaplamalar sonucu elde edilen malzeme ve emisyon verileri Çizelge 5.13'te sunulmuştur.

Çizelge 5.13. 3.Seçenek İçin Hesaplanan Malzeme ve Emisyon Verileri

Veriler	Malzeme Adı	Miktar (Ham Veri)	Birim (Yıllık)
Kullanılacak Yakıt Miktarı	Linyit Kömürü	4.178.370,24	ton
Oluşacak Baca Gazı Miktarı	Baca Gazı	62.973.628,42	m ³
Yanma Sonucu Alıcı Ortama Verilecek Emisyonlar	Kükürtdioksit	3.919,94	ton
	Karbondioksit	236.193,98	ton
	Azotdioksit	3.583,505	ton
	Azotmonoksit	2.220,041	ton
Yakma Ünitelerinde Kullanılacak Malzeme Miktarı	Kireçtaşı	536.804,5	ton
Proses Sonucu Oluşan Atık Miktarı	Kül	2.330.277,08	kg

5.4. Bölüm Sonucu

Bu bölümde, tez çalışmasının yöntemine esas yapılan YDD çalışmasının aşamaları ve çalışmada aşamaların nasıl uygulandığı şematik olarak gösterilerek; Bölüm 5.1.'de birinci aşama olan amaç ve kapsam tanımı ve Bölüm 5.2.'de ikinci aşama olan envanter analizi yapılmıştır.

Envanter verilerine ilişkin ayrıntılı açıklamalar yapılarak, mevcut soruna yönelik iyileştirme seçenekleri belirlenmiş ve bu seçenekler için malzeme ve emisyon hesaplamaları yapılmıştır.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölüm dört kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda mevcut tesise ait 2016 yılı için farklı raporlardan derlenen verilerle oluşturulan yaşam döngüsü envanter tabloları ile GaBi yazılımında yer alan veritabanlarında karşılık gelen malzeme adları sunulmuştur. İkinci kısımda mevcut tesise ait Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirme (YDED) sonuçları verilmiştir. Üçüncü kısımda mevcut tesise ait Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirme (YDED) sonuçları ile literatürdeki linyit yakıtlı santrallere ait sonuçlar ve GaBi yazılımında bulunan linyitten elektrik üretimine ait farklı ülkelerin değerleri ile karşılaştırma sonuçları paylaşılmıştır. Dördüncü kısımda linyit yakıtlı santrallerin en büyük çevresel problemleri olan KIP ve AP'nin azaltılmasına yönelik belirlenen üç seçeneğin GaBi yazılımı ile bu problemleri ne düzeyde iyileştirdiğine dair araştırma sonuçları paylaşılmıştır.

6.1. Tesise Ait 2016 Yılı İçin Yaşam Döngüsü Envanterleri (YDE'ler)

Yöntem kısmında, genel hatlarıyla açıklanan tesisin elektrik üretimi prosesine ait malzeme ve enerji envanteri Çizelge 6.1'de, prosesten kaynaklı atık ve atıksu envanteri Çizelge 6.2'de, emisyon envanteri ise Çizelge 6.3'te, GaBi'de halihazırda yer alan veritabanında eşleştirilen adları ile birlikte sunulmuştur.

2016 yılında tesiste toplam 5.3 milyon ton linyit kömürü kullanılmıştır. Bununla birlikte, devreye alma esnasında kullanılan fuel-oil ve motorinin yıllık miktarları 34 ton ve 1,2 tondur.

Brüt elektrik üretimi, net elektrik üretimi ile iç tüketim miktarı toplamıdır. Bu çalışmada elektrik girdisi olarak iç tüketim miktarı, çıktı olarak net üretim miktarı alınmıştır.

Göl suyu miktarı yıl içerisinde tesisin birçok bölümünde kullanılmak üzere çekilen 16 milyon m³tür. Çekilen suyun tamamı klorlama işleminden geçmekte, ancak saflaştırma işleminden geçmemektedir. Su saflaştırma ünitesinde kullanılan kimyasal verileri derlenmiştir.

2016 yılına ilişkin prosesten kaynaklı oluşan su ve atıksu miktarları ile 2016 yılı içinde akredite bir çevre laboratuvarı tarafından pilot tesiste yapılmış olan "Emisyon Teyit Ölçümü" sonucu raporlanan saatlik emisyon değerlerinin, tesisin yıllık çalışma saatlerine dayalı hesaplanan miktarları kullanılmıştır.

Çizelge 6.1. 2016 Yılı Malzeme ve Enerji Envanteri

Malzeme Adı	GaBi'de Yer Alan Veritabanında Eşleştirilen Malzeme Adı	Miktar (Ham Veri)	Birim	Fonksiyonel Birim Başına Düşen Miktar (Envanter)	Birim
Linyit Kömürü	Lignite Greece	5.397.627	ton	1,73E+00	kg/kWh
Fuel-oil	Heavy fuel oil (2.5 wt.% S)	34.014	ton	1,09E-02	kg/kWh
Motorin	Diesel	1.164	ton	3,74E-04	kg/kWh
Kireçtaşı	Limestone (calcium carbonate)	603.366	ton	1,94E-01	kg/kWh
Elektrik (İç Tüketim)	Electricity from lignite	651.360.460	kWh	2,09E-01	kWh
Elektrik (Üretim)	Electricity, lignite, at power plant	3.115.212.540	kWh	1,00E+00	kWh
Göl suyu	Water (lake water)	15.999.720	m ³	5,14E-03	kg/kWh
Sönmüş toz kireç	Hydrated lime dry slaked	2.699.330	kg	8,66E-04	kg/kWh
Sodyum hidroksit	Sodium hydroxide (100%; caustic soda)	1.653.788	kg	5,31E-04	kg/kWh
Sülfürik asit	Sulphuric acid (100%)	1.338.486	kg	4,30E-04	kg/kWh
Demir (III) klorür	Ferric chloride	894.997	kg	2,87E-04	kg/kWh
Klor	Chlorine	103.410	kg	3,32E-05	kg/kWh
Sodyum hipoklorit	Sodium hypochlorite	2.775	kg	8,91E-07	kg/kWh
Hidroklorik asit	Hydrochloric acid (32%)	400	kg	1,28E-07	kg/kWh
Amonyak	Ammonia	9.200	kg	2,95E-06	kg/kWh

Çizelge 6.2. 2016 Yılı Prosesten Kaynaklı Oluşan Atık ve Atıksu Envanteri

Malzeme Adı	GaBi'de Yer Alan Veritabanında Eşleştirilen Malzeme Adı	Miktar (Ham Veri)	Birim	Fonksiyonel Birim Başına Düşen Miktar (Envanter)	Birim
Jips	Desulphurisation slag	1.066.723,000	ton	3,42E-01	kg/kWh
Uçucu kül	Fly ash (unspecified)	468.212,580	ton	1,50E-01	kg/kWh
Uçucu kül	Disposal, lignite ash, 0% water, to opencast refill	1.265.394,420	ton	4,06E-01	kg/kWh
Cüruf	Slags and ashes	433.402,000	ton	1,39E-01	kg/kWh
Atıksu ve Su Buharı	Water (waste water, untreated)	15.058.150,000	ton	4,83E-03	kg/kWh

Çizelge 6.3. Tesisin Baca Gazı Emisyon Envanteri

Emisyon Adı	GaBi'de Yer Alan Veritabanında Eşleştirilen Malzeme Adı	Miktar (Ham Veri*)	Birim	Fonksiyonel Birim Başına Düşen Miktar (Envanter)	Birim
Baca gazı	Flue gas	28.692.476.676,000	m3	1,10E+00	kg/kWh
Arsenik	Arsenic	32.314,760	gr	1,04E-08	kg/kWh
Kadmiyum	Cadmium	4.182,667	gr	1,34E-09	kg/kWh
Karbondioksit (CO ₂)**	Carbon dioxide	5.624.078,000	ton	1,81E+00	kg/kWh
Karbonmonoksit (CO)**	Carbon monoxide	232.393,482	kg	7,46E-05	kg/kWh
Klorür	Chloride (unspecified)	5.906,554	kg	1,90E-06	kg/kWh
Krom	Chromium	1.469.553,567	gr	4,72E-07	kg/kWh
Kobalt	Cobalt	16.490,434	gr	5,29E-09	kg/kWh
Toz (PM10)**	Dust (PM10)	192.929,932	kg	6,19E-05	kg/kWh
Florür	Fluoride	1.061,554	kg	3,41E-07	kg/kWh
Kurşun	Lead	22.939,769	gr	7,36E-09	kg/kWh
Cıva	Mercury	2.070,603	gr	6,65E-10	kg/kWh
Nikel	Nickel	1.193.285,936	gr	3,83E-07	kg/kWh
Azotoksitler (NO _x)**	Nitrogen oxides	191.566,85	kg		kg/kWh
Azotdioksit (NO ₂)	Nitrogen dioxide	4.629.178,805	kg	1,49E-03	kg/kWh
Azotmonoksit (NO)	Nitrogen monoxide	2.867.852,762	kg	9,21E-04	kg/kWh
Sülfürdioksit (SO ₂)**	Sulphur dioxide	7.117.100,042	kg	2,28E-03	kg/kWh
Talyum	Thallium	67.283,351	gr	2,16E-08	kg/kWh

* Emisyon miktarları tesisin 2016 yılı fiili çalışma saatlerine göre hesaplanmıştır.

** 2016 yılı fuel-oil ve motorin yanması sonucu oluşan emisyonlar dahil edilmiştir.

6.2. Tesisin Mevcut Durumuna Ait Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirme (YDED) Sonuçları

Mevcut tesisin GaBi Education yazılımında halihazırda bulunan CML 2001 (2016 sürümü), TRACI 2.1 (2012 sürümü) ve ReCiPe 1.08 (2012 sürümü) YDED metotları ile elde edilen etki sonuçları Çizelge 6.4, Çizelge 6.5, Çizelge 6.6 ve Çizelge 6.7'de sunulmuştur.

Çizelge 6.4. CML Yöntemi ile Yapılan Hesaplamalara Ait Etki Değerlendirme Sonuçları

CML 2001 (Jan. 2016)	Sonuçlar	Birim
Etki Kategorileri		
Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)	1,81E+00	kg CO ₂ -Eşd.
Asidifikasyon Potansiyeli (AP)	3,98E-03	kg SO ₂ -Eşd.
Ötrofikasyon Potansiyeli (ÖP)	3,21E-04	kg Fosfat Eşd.
Fosil Kaynaklar için Abiyotik Bozundurma Potansiyeli (ABPfosil)	1,16E+01	MJ
İnsan Toksisite Potansiyeli (İTP)	3,02E-02	kg DCB-Eşd.
Fotokimyasal Ozon Oluşturma Potansiyeli (FOOP)	1,81E-04	kg Eten-Eşd.

Çizelge 6.5. TRACI Yöntemi ile Yapılan Hesaplamalara Ait Etki Değerlendirme Sonuçları

TRACI 2.1	Sonuçlar	Birim
Etki Kategorileri		
Küresel Isınma - Hava	1,81E+00	kg CO ₂ -Eşd
Asidifikasyon - Hava	4,02E-03	kg H+mol Eşd.
Ötrofikasyon	1,10E-04	kg N-Eşd.
İnsan Sağlığı Kriteri - Hava	1,72E-04	kg PM ₁₀ -Eşd.
Duman Oluşumu - Hava	4,94E-02	kg O ₃ -Eşd.

Çizelge 6.6. ReCiPe Yöntemi ile Yapılan Orta Nokta Seviyesinde Etki Değerlendirme Sonuçları

ReCiPe 1.08 Midpoint	Sonuçlar	Birim
Etki Kategorileri		
İklim Değişikliği	1,81E+00	kg CO ₂ -Eşd.
Karasal Asidifikasyon	3,67E-03	kg SO ₂ -Eşd.
Fosil Tüketimi	2,76E-01	kg Petrol Eşd.
Partikül Madde Oluşumu	1,06E-03	kg PM ₁₀ -Eşd.
Fotokimyasal Oksidan Oluşumu	2,66E-03	kg NMVOC
Su Tüketimi	5,21E-06	m ³

Çizelge 6.7. ReCiPe Yöntemi ile Yapılan Son Nokta Seviyesinde Etki Değerlendirme Sonuçları

ReCiPe 1.08 Endpoint	Sonuçlar	Birim
Etki Kategorileri		
İklim Değişikliği (İnsan Sağlığı)	2,53E-06	DALY
İklim Değişikliği (Ekosistem)	1,43E-08	canlı türü.yıl
Karasal Asidifikasyon	2,13E-11	canlı türü.yıl
Fosil Tüketimi	4,56E-02	Dolar (\$)
Partikül Madde Oluşumu	2,77E-07	DALY
Fotokimyasal Oksidan Oluşumu	1,04E-10	DALY

6.3. Etki Kategorilerine Ait Sonuçların Literatürdeki Sonuçlar ve GaBi Yazılımında Bulunan YDED Sonuçları ile Karşılaştırılması

Bu tez çalışmasında pilot tesisin 1 kWh elektrik üretimi için elde edilen etki değerlendirme sonuçları, literatürdeki benzer çalışmalar ve GaBi yazılımında bulunan linyitten elektrik üretimine ait farklı ülkelerin etki değerlendirme sonuçları ile karşılaştırılmıştır. CML 2001'in ortalama Avrupa karakterizasyon faktörleri, dünyada ve Avrupa'da mevcut en iyi uygulama olarak önerilmekte olup, karşılaştırmalar CML 2001 YDED metoduna göre yapılmıştır.

KIP üzerine ayrıca değerlendirme yapılacak olursa, iklim değişimi üzerine çok çeşitli çalışmalar mevcuttur. Elektrik üretimine ilişkin yapılan çalışmaların KIP sonuçları ile karşılaştırma Çizelge 6.8'de verilmiştir.

Çizelge 6.8. Tez Çalışmasında Elde Edilen Etki Değerlendirme Sonuçlarının Literatürdeki Çalışma Sonuçları ile Karşılaştırılması (CML Etki Değerlendirme Yöntemi)

Çalışma		KIP (kg CO ₂ -Eşd.)
Tez Çalışması		1,81
Atılğan ve Azapagic, 2014 [15]		1,06
Zhou vd., 2012 [18]		0,87
Turconi, 2013 [42]		0,8 - 1,30
Hondo, 2005 [43]		0,97
Gaete-Morales vd., 2018 [44]		1,04
Garcia vd., 2014 [45]		0,99 - 1,02
Asdrubali vd., 2014 [46]		0,75 – 1,05
Theodosiou vd., 2014 [47]		2,31
Rakotoson ve Praene, 2017 [48]	Mayotte	0,92
	Martinique	0,88
	Guadalupe	0,84

Elektrik üretim teknolojileri genelinde yapılan çalışmalarda genellikle üzerinde durulan çevresel etki kategorisi KIP'dir. Buna ilişkin yapılan çalışmalarda fosil yakıtlı santraller ile yenilenebilir enerji santrallerinin karşılaştırılması dikkat çekmektedir. Turconi vd.(2013) sera gazı, NO_x ve SO₂ emisyon verileri aralıklarını belirlemek için taşkömürü, linyit, doğalgaz, petrol, nükleer, biyokütle, hidroelektrik, güneş fotovoltaik (PV) ve rüzgara dayalı elektrik üretiminin YDD'sini içeren 167 çalışmanın verilerine dayanarak yaptıkları bir incelemenin sonucunda, sera gazı emisyonlarının bir sistemin veya teknolojinin çevresel performansını tek bir göstergesi olarak kullanılamayacağını göstermiştir [42]. Bu çalışmada belirlenen linyite dayalı KIP sonucu karşılaştırmaya dâhil edilmiştir.

Rakotoson ve Praene (2017)'nin çalışmasında, Fransa'nın çeşitli bölgeleri için bulunan KIP değerlerinin diğer bölgelere oranla yüksek olmasının, bu bölgelerdeki fosil yakıt kaynaklarının büyük oranda kullanılması olduğu vurgulanmıştır. Yenilenebilir enerji kullanımının yoğun olduğu Corsica ve Guyana bölgelerinde ise sırasıyla 0,505 ve 0,373 kg CO₂/kWh olduğu belirtilmiştir [48].

Bu tez çalışmasında, sera gazı miktarının hesaplamasında kullanılan ek yakıtlar ve baca gazı arıtma için kullanılan kireçtaşı miktarı da kömür kullanımı dolayısıyla oluşan CO₂ miktarına dâhil edilmiştir. Bulunan KIP'nin, yakılan kömürün düşük kalorili ve yüksek nem içerikli olması ve yıl içerisinde ek yakıtların normalden fazla kullanılması kaynaklı olarak literatürdeki çalışmalara göre yüksek olduğu söylenebilir. KIP için karşılaştırılan çalışmaların çoğu taş kömürü kullanılan termik santrallere ait veriler olup, kullanılan yakma ve arıtma teknolojileri hakkında sınırlı bilgi verilmiştir.

Atılğan ve Azapagic (2014)'in CML 2001 etki değerlendirme yöntemi ile yaptığı linyit kömürü, taşkömürü ve doğal gaz yakıtlı santraller için gerçekleştirdiği tüm aşamaları içeren yaşam döngüsü değerlendirme çalışmasının elektrik üretimi aşaması ile karşılaştırıldığında Çizelge 6.9'da görüldüğü gibi bu tez çalışmasında elde edilen AP değeri, diğer çalışmada elde edilen değerden düşüktür.

Çizelge 6.9. Tez Çalışmasında Elde Edilen Etki Değerlendirme Sonuçlarının Literatürdeki Çalışma Sonuçları ile Karşılaştırılması (CML Etki Değerlendirme Yöntemi)

Etki Kategorileri	Birim	Tez Çalışması	Atılğan ve Azapagic*, 2014	Zhou vd.**, 2012	Gaete-Morales vd., 2018
AP	gr SO ₂ -Eşd.	3,98	9,39	1,24	6,07
ÖP	gr Fosfat-Eşd.	0,32	1,78	0,06	1,91
ABPfosil	MJ	11,60	-	-	10,34
İTP	gr DCB-Eşd.	30,20	529,34	0,835	394
FOOP	gr Eten-Eşd.	0,18	0,48	0,0575	0,298

*Makale kapsam olarak tüm aşamaları içermektedir. Karşılaştırma amaçlı elektrik üretim aşaması sonuçları alınmıştır.

**Makalede, bu tez çalışması kapsamında incelenen teknoloji ile eşleşen pulverize kömür yakma teknolojisi elektrik üretimi aşaması sonuçları alınmıştır.

Tez çalışmasında AP 3,98 gr SO₂ eşdeğeri ve FOOP 0,18 gr Eten eşdeğeri; Atılğan ve Azapagic (2014)'in çalışmasında ise AP 9,39 g SO₂ eşdeğeri ve FOOP 0,48 gr Eten eşdeğeri bulunmuştur. Literatürdeki çalışmada, verileri kullanılan tesislerin bir kısmında desülfürizasyon eksikliğinin söz konusu olduğu ve AP'ye %87 ile en büyük sebep olan aşamanın linyitin yanması olduğu belirtilmiştir. Ayrıca

FOOP üzerine en büyük ana etkinin de linyitin yanması sonucu oluşan SO₂, NO_x ve CO emisyonları olduğu vurgulanmıştır. Sonuç olarak, literatürdeki çalışmaya göre bu tez çalışmasında elde edilen AP ve FOOP sonuçları daha düşüktür.

Tez çalışmasında ÖP 0,32 gr Fosfat eşdeğeri bulunmuştur. Atılgan ve Azapagic (2014)'in çalışmasında linyitten elektrik üretiminin tüm YDD için ÖP 11,9 gr Fosfat eşdeğeri bulunmuş ve bu etkinin yaklaşık %85'inin madencilik aşamasında meydana gelen fosfatların temiz suya karışmasından kaynaklandığı çalışmada belirtilmiştir. %25'lik kısmı, yani kWh başına 1,78 gr Fosfat eşdeğeri, santrallerde elektrik üretimi için yanma, tesis yapımı ve tesis ömrünün sonunda sökme işlemlerinden kaynaklanmıştır. Tez çalışmasında sadece elektrik üretimi için yanma aşaması için değerlendirme yapılmış olup, ÖP değeri literatürdeki çalışmaya göre daha düşüktür.

İTP için ise literatürdeki çalışmada 1393 gr DCB eşdeğeri bulunmuş olup, toplam İTP değerinin %62'sinin madencilik aşamasından olduğu belirtilmiştir. İTP'ye baca gazı emisyonu içerisinde bulunan ağır metallerin (krom, arsenik, nikel vd.) etkisi bulunmakta olup, tez çalışması için seçilen pilot tesisin emisyon ölçümlerinde belirlenen miktarlar düşüktür.

Zhou vd.(2012)'nin dört farklı sistemi 1 MW elektrik üretimi için aşamalar halinde yaptığı YDD çalışmasının, elektrik üretim prosesini içeren üçüncü aşaması için AP değeri 1,24 kg SO₂ eşdeğeri, tüm aşamalar toplamı ise 1,41 kg SO₂ eşdeğeri bulunmuştur. Çalışmada kazanlarda kullanılan kömür ile ilgili bilgi verilmemiş olup, sisteme entegre olarak baca gazı desülfürizasyon ve denitrifikasyon teknolojilerinin kullanıldığı veya Çin'in 50.000 milyon ton üzeri kanıtlanmış kömür rezervinin 5500-7700 kcal arası olan antrasit veya bitümlü kömür olduğu göz önünde bulundurulursa, yüksek kalorili kömür kullanıldığı ve buna bağlı olarak AP değerinin düşük çıktığı tahmin edilebilir.

Zhou vd.(2012)'nin çalışmasında kritikaltı kazan teknolojisi ile 1 MW elektrik üretimi için 0,06 kg fosfat eşdeğeri bulunmuştur. Tez çalışmasında hesaplanan ÖP değeri ile karşılaştırıldığında bu değer oldukça düşüktür. Sonuçlar; ağır metaller, partikül madde, VOC gibi zararlı gazların emisyon içindeki düzeyleri ve net üretim verimliliği ile ters bağıntılı olmasıyla ilintilidir. Yakılan kömür özellikleri sebebiyle ÖP değerinin tez çalışmasında yüksek olduğu tahmin edilmektedir.

Gaete-Morales vd.(2018)'nin çalışmasında, Şili'deki farklı kaynaklardan elektrik üretimlerinin yaşam döngüsü değerdendirme yapılmıştır. Karşılaştırılan veriler pulverize kömür teknolojisi ile kömür kullanımı sonucu bulunan potansiyel çevresel etkilerdir. Bu etkilerin çoğunlukla yakıtın yanması dolayısıyla oluştuğu belirtilmektedir [44].

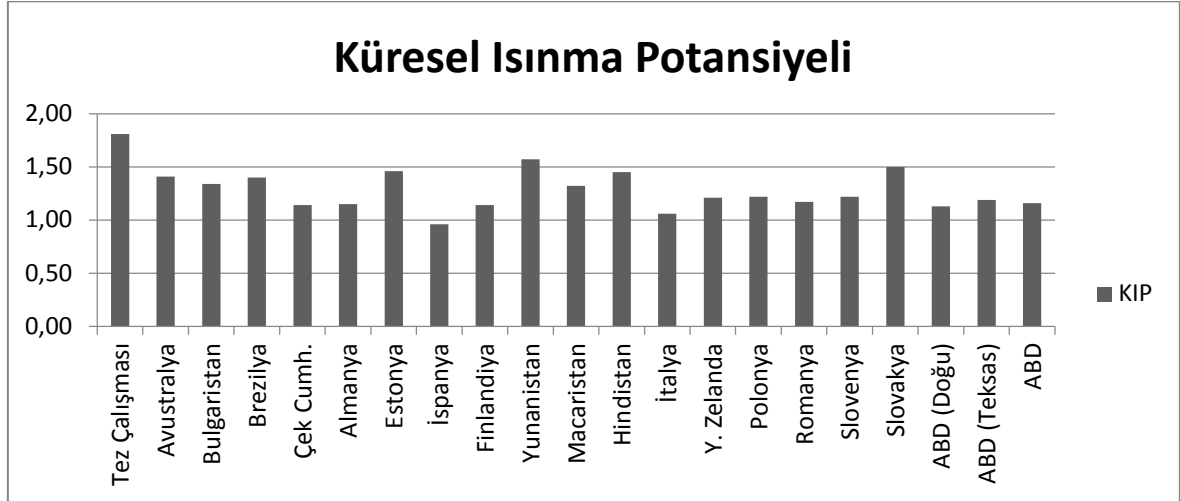
Tez çalışmasında elde edilen etki değerdendirme sonuçlarının GaBi yazılımının veritabanında CML 2001 (2010 sürümü) YDED yöntemi ile farklı 18 ülkeye ait linyit kullanımı ile elektrik üretimi için etki değerdendirme sonuçları bulunmaktadır. Seçilen etki kategorilerine göre GaBi yazılımında bulunan sonuçlar ile tez çalışmasında CML 2001 ile elde edilen sonuçlar izelge 6.10'da sunulmuştur.



Çizelge 6.10. Tez Çalışmasında Elde Edilen Etki Değerlendirme Sonuçlarının GaBi Yazılımında Bulunan 18 Ülkenin Etki Değerlendirme Sonuçlarının Karşılaştırılması (CML 2001 Yöntemi – 2010 Sürümü)

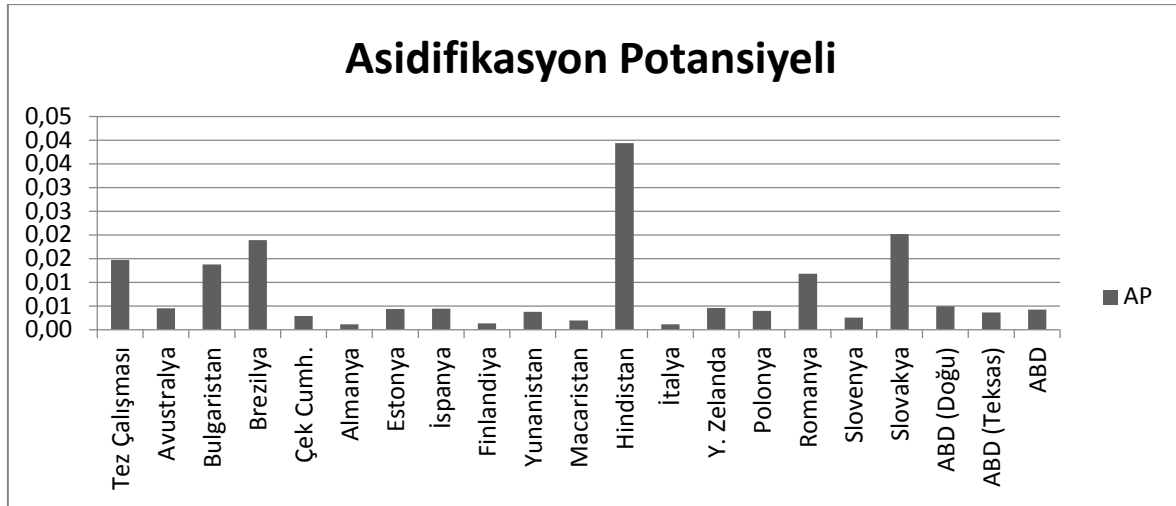
Etki Kategorileri	KIP (kg CO ₂ -Eşd.)	AP (kg SO ₂ -Eşd.)	ÖP (kg Fosfat-Eşd.)	ABPfosil (MJ)	İTP (kg DCB-Eşd.)	FOOP (kg Eten-Eşd.)
Tez Çalışması	1,81E+00	1,47E-02	3,12E-03	1,16E+01	5,43E-02	3,51E-04
Avustralya	1,41E+00	4,52E-03	2,72E-04	1,42E+01	3,63E-01	2,35E-04
Bulgaristan	1,34E+00	1,38E-02	3,29E-04	1,24E+01	3,91E-02	6,28E-04
Brezilya	1,40E+00	1,89E-02	6,65E-04	1,39E+01	2,84E-01	8,57E-04
Çek Cumh.	1,14E+00	2,87E-03	2,16E-04	1,12E+01	2,35E-02	2,29E-04
Almanya	1,15E+00	1,13E-03	1,53E-04	1,01E+01	2,92E-02	7,25E-05
Estonya	1,46E+00	4,37E-03	3,40E-04	1,39E+01	8,85E-02	2,36E-04
İspanya	9,59E-01	4,44E-03	2,50E-04	9,46E+00	3,18E-02	2,13E-04
Finlandiya	1,14E+00	1,33E-03	1,27E-04	1,00E+01	3,21E-02	8,44E-05
Yunanistan	1,57E+00	3,80E-03	2,05E-04	1,18E+01	7,04E-02	2,24E-04
Macaristan	1,32E+00	1,97E-03	2,90E-04	1,12E+01	2,31E-02	2,00E-04
Hindistan	1,45E+00	3,94E-02	5,00E-04	1,35E+01	2,94E-01	1,68E-03
İtalya	1,06E+00	1,15E-03	1,48E-04	1,03E+01	3,00E-02	7,43E-05
Y. Zelanda	1,21E+00	4,59E-03	2,94E-04	1,21E+01	3,22E-01	2,32E-04
Polonya	1,22E+00	3,99E-03	2,45E-04	1,08E+01	3,55E-02	2,66E-04
Romanya	1,17E+00	1,18E-02	3,12E-04	1,15E+01	6,60E-02	5,46E-04
Slovenya	1,22E+00	2,54E-03	2,86E-04	1,13E+01	2,78E-02	1,56E-04
Slovakya	1,50E+00	2,02E-02	3,34E-04	1,32E+01	4,69E-02	9,69E-04
ABD (Doğu)	1,13E+00	4,90E-03	2,41E-04	1,13E+01	4,43E-02	2,31E-04
ABD (Teksas)	1,19E+00	3,65E-03	1,55E-04	1,19E+01	3,60E-02	1,76E-04
ABD	1,16E+00	4,24E-03	1,96E-04	1,16E+01	3,56E-02	2,02E-04

En yüksek KIP değeri bu tez çalışmasının KIP değeri olup, bir sonraki en yüksek değer 1,57 kg CO₂ eşdeğeri ile Yunanistan'a aittir. En düşük sonuç ise 0,959 kg CO₂ eşdeğeri ile İspanya'nın KIP'sidir (Şekil 6.1). Tez çalışmasında GaBi yazılımında linyit kömürü verisi olarak en yakın değerlere sahip olması sebebiyle Yunanistan kömürü seçilmiştir. KIP değerlerinin yakın çıkmasının, benzer özellikte kömür kullanımına bağlı sera gazı emisyonlarının da yakın miktarda olmasından kaynaklandığı söylenebilir.



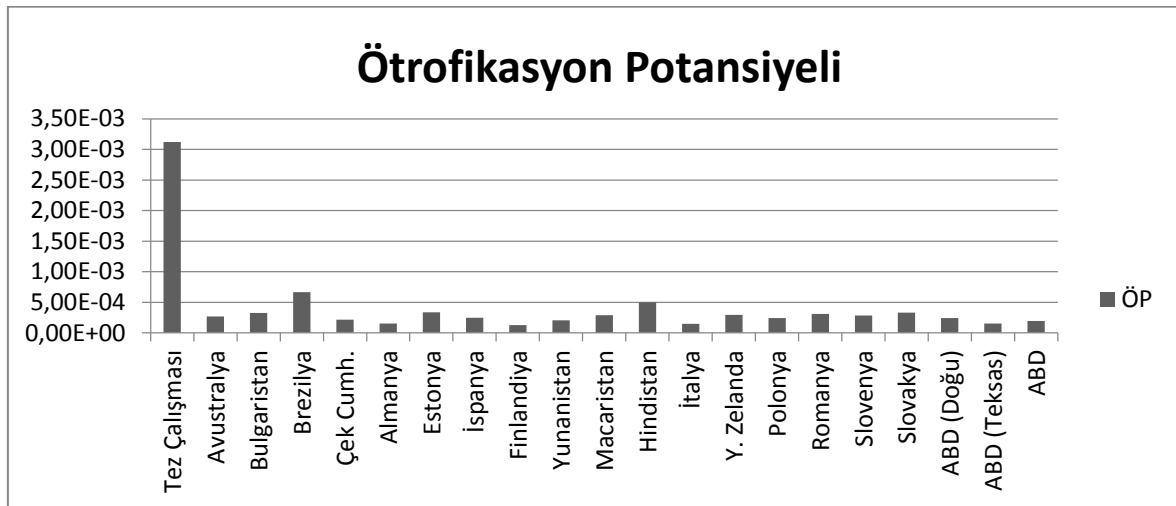
Şekil 6.1. Tez Çalışmasında Elde Edilen KIP Sonucu ile 18 Ülkeye Ait Linyit YDE Sonucunun KIP Etki Kategorisi için Karşılaştırması (CML 2001 Yöntemi)

18 ülke için GaBi yazılımında bulunan linyit kömüründen elektrik üretimi verilerine dayanarak yapılan YDD etki kategorilerinden AP sonuçlarına bakıldığında, en yüksek sonuç 39,4 kg SO₂ eşdeğeri ile Hindistan'a aittir (Şekil 6.2). Yaklaşık 100.000 milyon ton kanıtlanmış kömür rezervi bulunan Hindistan'ın rezervinin %95'i antrasit ve bitümlü kömürdür [2]. Yüksek kalorili ve düşük nem içerikli olan antrasit ve bitümlü kömürün yanması sonucu AP'nin çok daha düşük çıkması beklenir. Ancak yakma prosesi haricinde, bölgedeki mevcut toprağın kimyasal özelliklerine dayalı (sanayileşmenin yoğun olması sonucu atmosferde azot oksitlerin, amonyak ve SO₂ konsantrasyonlarının artması ve asitleştirici bu kirleticilerin toprakta birikmesi, topraktaki hidrojen katyonu konsantrasyonundaki artış ile ilişkili olarak) sonuçların diğer ülkelere ve bu çalışma sonucuna göre çok daha yüksek çıktığı tahmin edilmektedir.



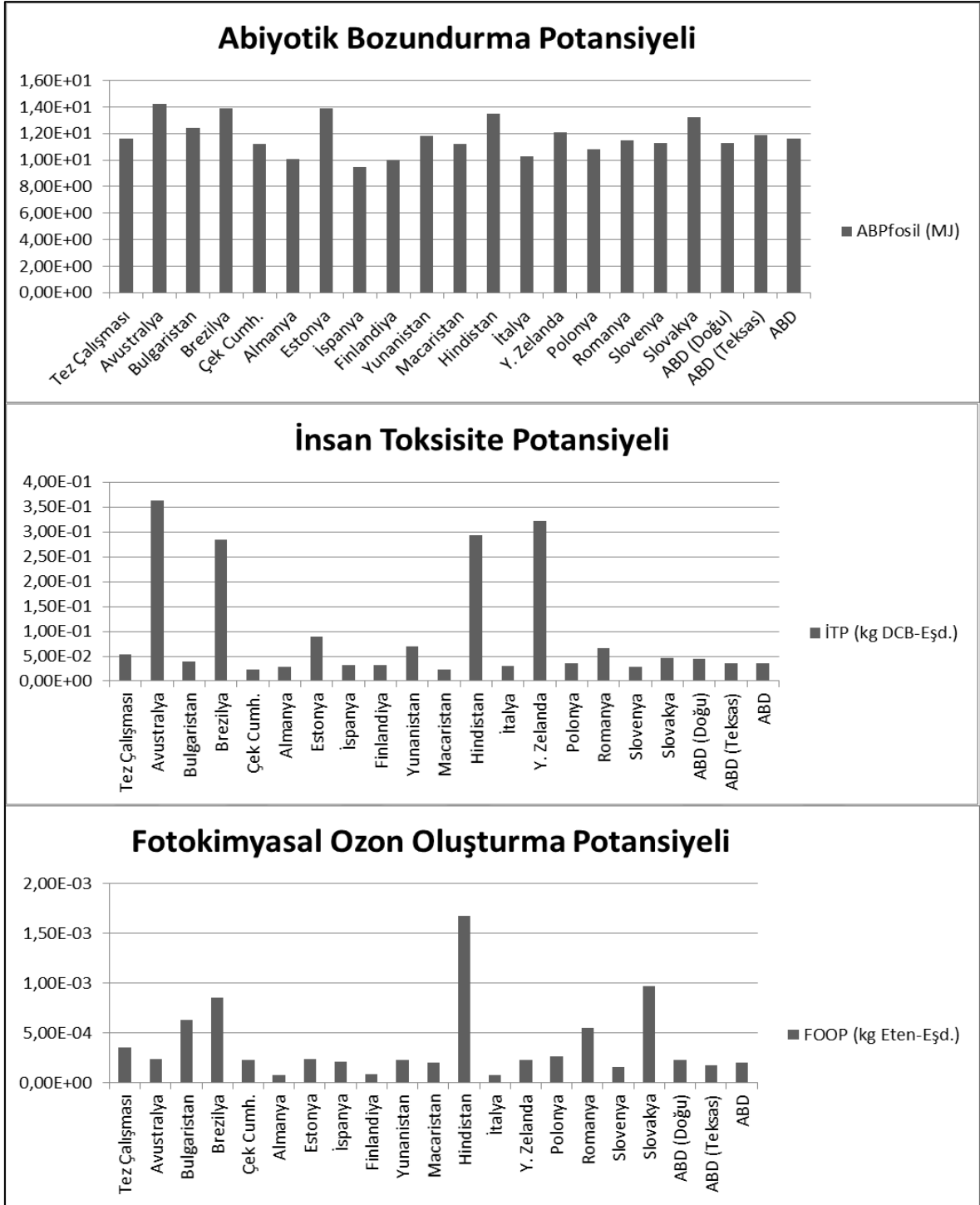
Şekil 6.2. Tez Çalışmasında Elde Edilen AP Sonucu ile 18 Ülkeye Ait Linyit YDE Sonucunun AP Etki Kategorisi için Karşılaştırması (CML 2001 Yöntemi)

Tez çalışmasında elde edilen ÖP ile diğer ülkelere ait ÖP değerleri karşılaştırıldığında en yüksek ÖP değeri tez çalışmasına aittir (Şekil 6.3). Amonyak, nitratlar, azot oksitler ve fosforun havaya veya suya olan emisyonlarının ötrofikasyon üzerinde etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Mevcut sistemde kullanılan su miktarının fazla olması ve saf su eldesi için kimyasal kullanımı verileri sebebiyle ÖP değerinin yüksek çıktığı düşünülmektedir.



Şekil 6.3. Tez Çalışmasında Elde Edilen ÖP Sonucu ile 18 Ülkeye Ait Linyit YDE Sonucunun ÖP Etki Kategorisi için Karşılaştırması (CML 2001 Yöntemi)

ABP, İTP ve FOOP değerlerinin karşılaştırmalı tabloları Şekil 6.4'te sunulmuştur.



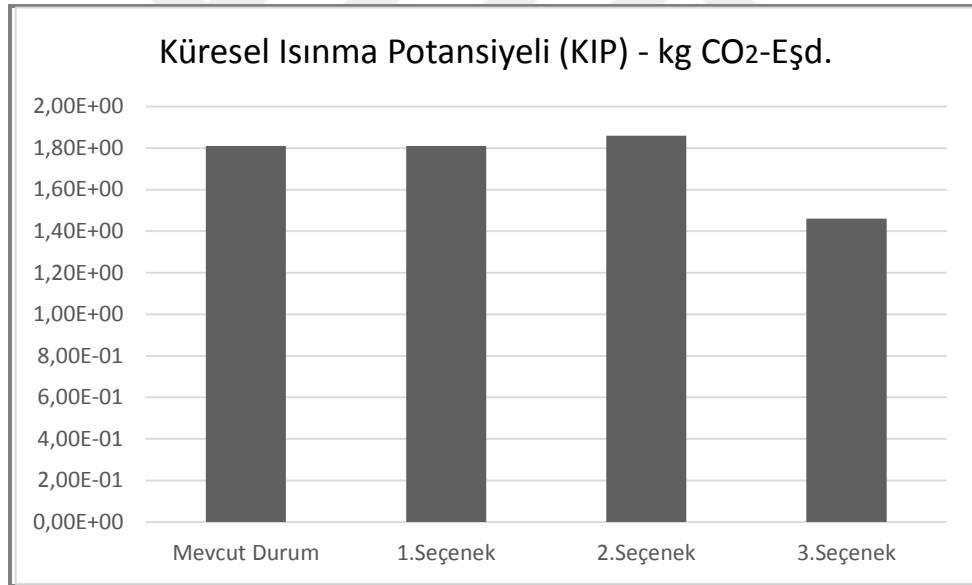
Şekil 6.4. Tez Çalışmasında Elde Edilen ABP, İTP ve FOOP Sonuçları ile 18 Ülkenin ABP, İTP ve FOOP Sonuçlarının Karşılaştırması (CML 2001 Yöntemi).

6.4. Belirlenen Baca Gazı Emisyon Azaltma Seçeneklerine İlişkin İyileştirme Sonuçları

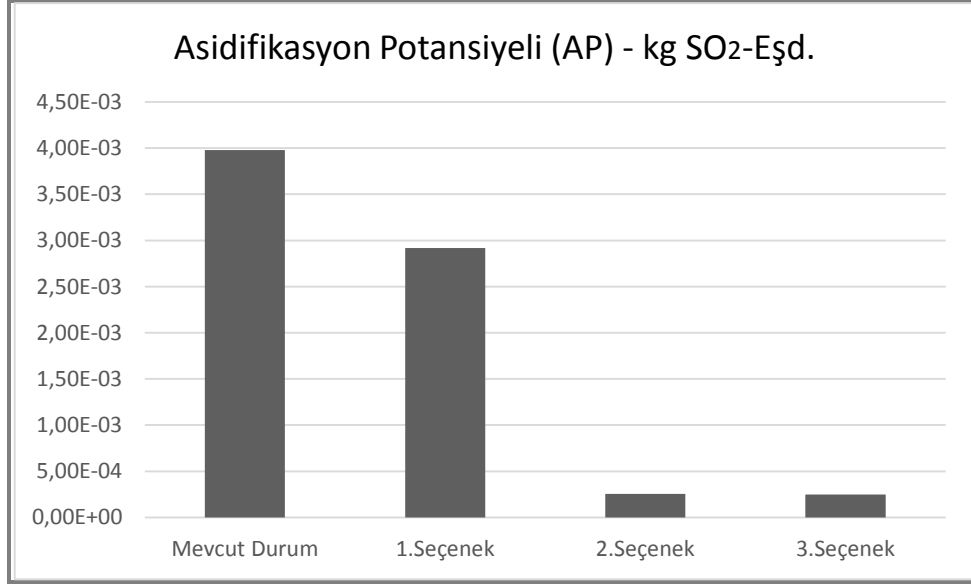
Bölüm 5.3'te detaylı şekilde açıklandığı gibi baca gazı emisyon azaltma için üç iyileştirme seçeneği sunulmuş ve bu seçeneklerin CML 2001 (2016 Sürümü) ile elde edilen etki değerlendirme sonuçları karşılaştırmalı olarak Şekil 6.5'te verilmiştir.

Üç seçeneğe göre, seçilen çevresel etkileri iyileştirme düzeylerinin ne kadar olduğu hesaplanmıştır. Bu iyileştirme seçeneklerine ilişkin sonuçların karşılaştırıldığı grafikler bu bölümde verilmiştir.

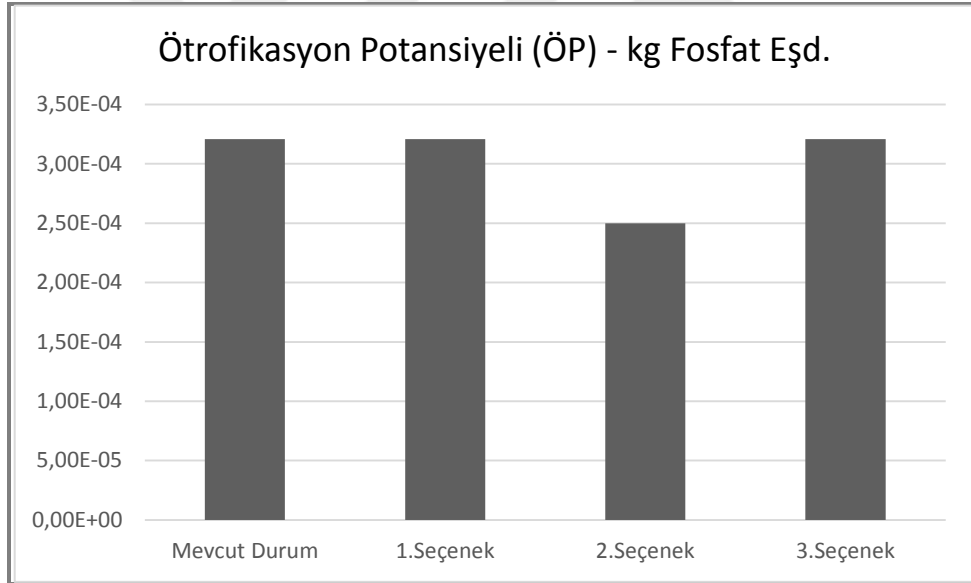
Tez çalışmasında elde edilen pilot tesisin potansiyel çevresel etkilerinin sonucu ile iyileştirme seçeneklerinin potansiyel çevresel etki sonuçlarının karşılaştırmaları; KIP için Şekil 6.5'te, AP için Şekil 6.6'da, ÖP için Şekil 6.7'de, ABPfosil için Şekil 6.8'de, İTP için Şekil 6.9'da ve FOOP için Şekil 6.10'da sunulmuştur.



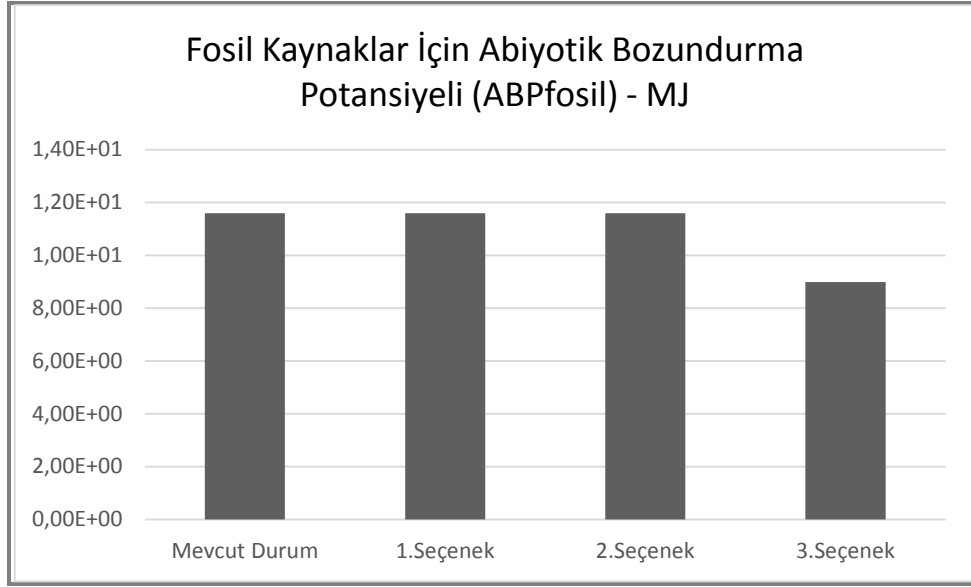
Şekil 6.5. Tez Çalışmasında Elde Edilen Pilot Tesisin KIP Sonucu ile İyileştirme Seçeneklerinin KIP Sonuçlarının Karşılaştırması (CML 2001 Yöntemi)



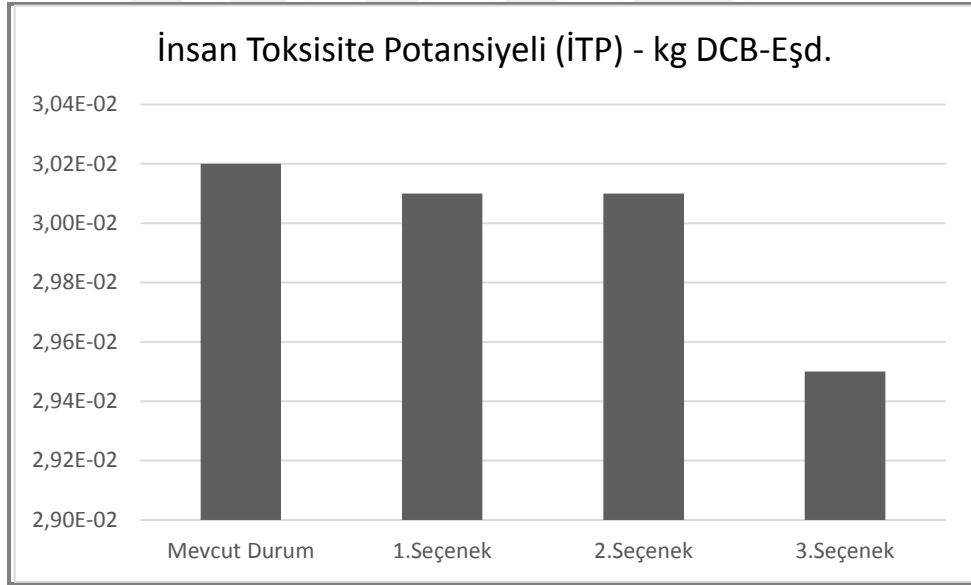
Şekil 6.6. Tez Çalışmasında Elde Edilen Pilot Tesisin AP Sonucu ile İyileştirme Seçeneklerinin AP Sonuçlarının Karşılaştırması (CML 2001 Yöntemi)



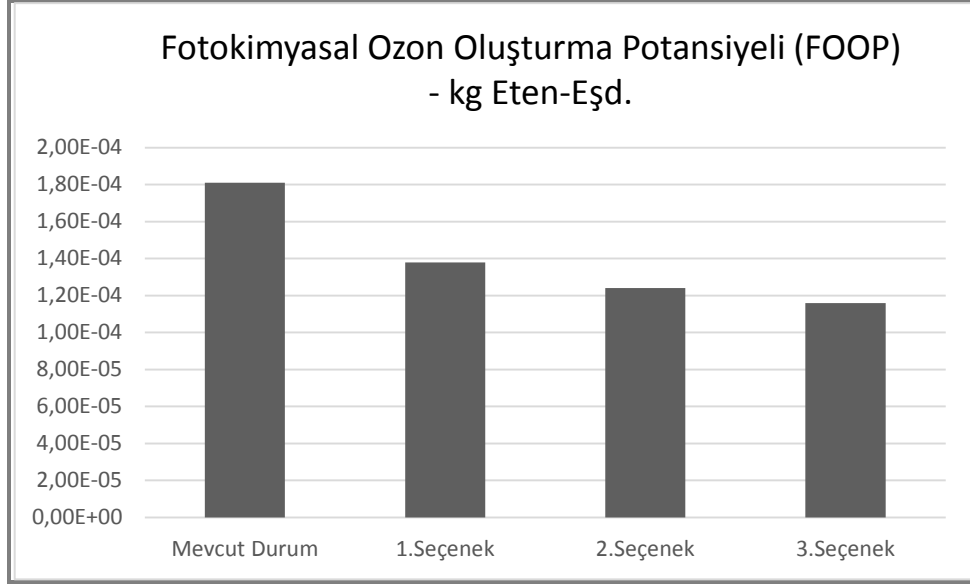
Şekil 6.7. Tez Çalışmasında Elde Edilen Pilot Tesisin ÖP Sonucu ile İyileştirme Seçeneklerinin ÖP Sonuçlarının Karşılaştırması (CML 2001 Yöntemi)



Şekil 6.8. Tez Çalışmasında Elde Edilen Pilot Tesisin ABP Sonucu ile İyileştirme Seçeneklerinin ABP Sonuçlarının Karşılaştırması (CML 2001 Yöntemi)



Şekil 6.9. Tez Çalışmasında Elde Edilen Pilot Tesisin İTP Sonucu ile İyileştirme Seçeneklerinin İTP Sonuçlarının Karşılaştırması (CML 2001 Yöntemi)



Şekil 6.10. Tez Çalışmasında Elde Edilen Pilot Tesisin FOOP Sonucu ile İyileştirme Seçeneklerinin FOOP Sonuçlarının Karşılaştırması (CML 2001 Yöntemi)

6.4.1. Mevcut Baca Gazı Desülfürizasyon Ünitelerinin İyileştirilmesi Durumunda Elde Edilen İyileştirme Sonuçları (1. Seçenek)

1. Seçenek olarak belirlenen “Mevcut Baca Gazı Desülfürizasyon Ünitelerinin İyileştirilmesi” için etki kategorilerine göre elde edilen iyileştirme miktarları ve yüzdeleri Çizelge 6.12’de sunulmaktadır.

Çizelge 6.11. 1. Seçenek için Etki Kategorileri Bazında Elde Edilen İyileştirme Yüzdeleri

Etki Kategorileri	Birim	Mevcut Durum	İyileştirme Sonrası (1.Senaryo)	İyileştirme Yüzdesi (%)
KIP	kg CO ₂ -Eşd.	1,81E+00	1,81E+00	0
AP	kg SO ₂ -Eşd.	3,98E-03	2,92E-03	27
ÖP	kg Fosfat Eşd.	3,21E-04	3,21E-04	0
ABPfosil	MJ	1,16E+01	1,16E+01	0
İTP	kg DCB-Eşd.	3,02E-02	3,01E-02	0
FOOP	kg Eten-Eşd.	1,81E-04	1,38E-04	24

Mevcut baca gazı desülfürizasyon ünitelerinin iyileştirilerek SO₂ emisyonu konsantrasyonunun %50 azaltılması durumunda kireçtaşı kullanım miktarının artması ile sera gazı emisyonu miktarında %3 artış olmuştur. Seçilen etki değerlendirme yöntemleri bu miktarı ihmal etmiş ve belirlenen seçeneğin KIP üzerine etkisi olmamıştır.

Mevcut baca gazı desülfürizasyon ünitelerinin iyileştirilmesi seçeneği ile AP'de %27 ve FOOP'de %24 iyileştirme sağlamıştır.

6.4.2. Mevcut Baca Gazı Desülfürizasyon Sistemi Öncesi Kuru Sorbent Enjeksiyonu Prosesinin Eklenmesi Durumunda Elde Edilen İyileştirme Sonuçları (2. Seçenek)

Bölüm 5.3.2'de hesaplamaları yapılan 2. Seçenek "Mevcut Baca Gazı Desülfürizasyon Sistemi Öncesi Kuru Sorbent Enjeksiyonu Prosesi Uygulanması" için etki değerlendirme sonuçları Çizelge 6.13'te sunulmaktadır.

Çizelge 6.12. 2. Seçenek için Etki Kategorileri Bazında Elde Edilen İyileştirme Yüzdeleri

Etki Kategorileri	Birim	Mevcut Durum	İyileştirme Sonrası (2.Senaryo)	İyileştirme Yüzdesi (%)
KIP	kg CO ₂ -Eşd.	1,81E+00	1,86E+00	-3
AP	kg SO ₂ -Eşd.	3,98E-03	2,56E-04	94
ÖP	kg Fosfat Eşd.	3,21E-04	2,50E-04	22
ABPfosil	MJ	1,16E+01	1,16E+01	0
İTP	kg DCB-Eşd.	3,02E-02	3,01E-02	0
FOOP	kg Eten-Eşd.	1,81E-04	1,24E-04	31

Kuru sorbent olarak seçilen sodyum bikarbonatın kullanımı dolayısıyla sera gazı emisyonu miktarı artmıştır. Buna göre KIP'da %3 artış olmuştur. Ancak, SO₂ miktarının azaltılması için kuru sorbent enjeksiyonu prosesine bağlı olarak BGD ünitelerinde kullanılan kireçtaşı ve su miktarı azalmıştır. Buna göre AP'de %94, ÖP'de %22 ve FOOP'de %31 iyileştirme sağlanmıştır.

6.4.3. Mevcut Yakma Sistemi Yerine Akışkan Yatak Teknolojisinin Adaptasyonu Durumunda Elde Edilen İyileştirme Sonuçları (3. Seçenek)

3. Seçenek olan ve Bölüm 5.3.3'te hesaplamaları yapılan "Tesisin Mevcut Yakma Kazanları Yerine Akışkan Yataklı Kazanların Kullanılması" için etki değerlendirme sonuçları Çizelge 6.14'te sunulmaktadır.

Çizelge 6.13. 3. Seçenek için Etki Kategorileri Bazında Elde Edilen İyileştirme Yüzdeleri

Etki Kategorileri	Birim	Mevcut Durum	İyileştirme Sonrası (3.Senaryo)	İyileştirme Yüzdesi (%)
KIP	kg CO ₂ -Eşd.	1,81E+00	1,46E+00	19
AP	kg SO ₂ -Eşd.	3,98E-03	2,47E-04	94
ÖP	kg Fosfat Eşd.	3,21E-04	3,21E-04	0
ABPfosil	MJ	1,16E+01	8,99E+00	23
İTP	kg DCB-Eşd.	3,02E-02	2,95E-02	2
FOOP	kg Eten-Eşd.	1,81E-04	1,16E-04	36

ABP, kullanılan yakıt miktarına bağlıdır. Teorik olarak hesaplamaları yapılan 3. Seçenekte, akışkan yataklı kazan kullanımı durumunda aynı miktar elektrik üretimi için kullanılacak kömür miktarının %23 azalacağı bulunmuştur. Buna göre, ABP'de %23 iyileştirme sağlanmıştır. Bununla birlikte, kullanılan yakıt miktarına bağlı olarak oluşan sera gazı emisyonu miktarı azalmış ve KIP'de %19 iyileştirme sağlanmıştır.

Diğer seçeneklerde olduğu gibi bu seçenekte de baca gazında SO₂ miktarının azalması ve kömürün tam yanmasına bağlı olarak NO_x miktarının azalması söz konusudur. Buna göre; AP'de %94, İTP'de %2 ve FOOP'de %36 iyileştirme sağlanmıştır.

6.6. Bölüm Sonucu

Bu bölümde, bir pilot tesisin elektrik üretim aşamasına ait Yaşam Döngüsü Envanteri (YDE) sunulmuştur. Envanter verileri GaBi Education yazılımına aktarılarak tez çalışması için seçilen altı etki kategorisi (KIP, AP, ÖP, ABPfosil, İTP ve FOOP) için GaBi Education yazılımı içindeki CML 2001 Etki Değerlendirme Yöntemi ile etki değerlendirme sonuçları elde edilmiştir.

Literatürdeki benzer çalışmalar ile GaBi yazılımında bulunan linyitten elektrik üretimi için elde edilen etki değerlendirme sonuçları, tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Genel olarak, tez çalışması kapsamında mevcut tesisin KIP değerinin yüksek olduğu görülmüştür. AP ve ÖP değerlerinin de ülkeler bazında karşılaştırılması ile diğer ülkelerin değerlerine göre oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Mevcut tesisin baca gazı SO₂ emisyonunu azaltmaya yönelik üç iyileştirme seçeneği belirlenmiştir. Bunlar; mevcut baca gazı desülfürizasyon ünitelerinin

iyileştirilerek SO₂ emisyonu miktarının %50 azaltılması (1. Seçenek), mevcut baca gazı desülfürizasyon sistemi öncesi kuru sorbent enjeksiyonu prosesinin eklenmesi (2. Seçenek) ve mevcut yakma sistemi yerine akışkan yatak teknolojisinin adaptasyonudur (3. Seçenek). Bu seçenekler için CML 2001 Etki Değerlendirme Yöntemi ile etki değerlendirme sonuçları elde edilmiş ve seçilen etki kategorileri üzerine iyileştirme oranları hesaplanmıştır. Beklenen bir sonuç olarak üç seçenekte de en yüksek iyileştirme oranı AP'de sağlanmıştır.



7. İYİLEŞTİRME SEÇENEKLERİ İÇİN MALİYETLENDİRME

Mevcut sistemin iyileştirilmesine yönelik belirlenen ve bu seçeneklerin uygulanması durumunda kullanılacak malzeme ve oluşacak emisyon verileri hesaplanan üç seçeneğin, uygulanmaları durumunda fayda-maliyet analizlerinin yapılması önem taşımaktadır. Bir enerji santrali kurulum/iyileştirme (yatırım) maliyeti ile işletme maliyeti arasında fark vardır. Kurulumu pahalı olan tesisler işletilme açısından daha ucuz olma eğiliminde ve tam tersi şekilde de olabilir [49].

Bu bölümde yatırım ve işletme maliyetlerinin hesaplanması hakkında bilgi verilmiş ve tez çalışmasında belirlenen iyileştirme seçeneklerini için olası giderler ve literatürde verilen kWsaat başına maliyetleri sunulmuştur.

7.1. Yatırım Maliyetleri

Bir tesis için yatırım maliyeti hesaplamasında detaylı proses akım şemasının hazırlanması, kütle denge hesaplamalarının yapılması, ekipman listesi ve su, elektrik, yakıt gibi proses sarfiyatlarının çıkartılması olmak üzere gerekli dört aşama mevcuttur [50]. Bu dört aşamaya bağlı olarak ekipmanların kapasiteleri belirlenmeli ve satın alma fiyatları tespit edilmelidir. Satın alma fiyatının tespitinde, ön maliyet tahmini yapılmasına olanak sağlayan çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Desülfürizasyon yöntemleri arasında ekonomik açıdan karşılaştırma yapmak amacıyla yatırım maliyetlerinin hesaplanmasında Gutrie tarafından geliştirilen “Modül Maliyet Yöntemi” kullanılan bir çalışmada [50], “Ekipman fiyatlarının toplamının bir fonksiyonu olarak direk (kontrol sistemi, elektrik tesisatı, satış vergisi, boru donanımı, nakliye, temel ve destek üniteleri, ekipman, çevre düzenleme, gaz kanalları izolasyonu, binalar, hava besleme, boya) ve endirek (mühendislik, müteahhitlik vergileri, kurma ve arazi, işletmeye alma, performans testi, beklenmedik giderler) maliyetler de hesaplanarak ilk yatırım maliyeti hesaplanır.” denmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında belirlenen iyileştirme seçenekleri için yatırım maliyetleri, literatürde bulunan yatırım maliyetlerinin yanı sıra, sahada yapılacak fizibilite çalışmaları ve tasarıma uygun olarak hesaplanmalıdır.

7.2. İşletme Maliyetleri

Enerji santralleri için işletme maliyeti; yakıt, işçilik ve bakım maliyetlerini içerir. Sabit olan sermaye maliyetlerinin aksine tesisin toplam işletme maliyeti, tesisin ne kadar elektrik üreteceğine bağlıdır. Her MWh elektrik enerjisini üretmek için gerekli işletme maliyeti “marjinal maliyet” olarak adlandırılır. Yakıt maliyetleri, fosil yakıtlı enerji santralleri için operasyonun toplam maliyeti üzerinde çok etkilidir. Fosil yakıtlarla çalışan jeneratörler, temel yakıt fiyatındaki değişimlere karşı son derece hassas olan işletme maliyetlerini sahip olma eğilimindedir. Yenilenebilir yakıtlar için yakıt maliyeti genellikle bulunmamakta ya da ücretsizdir. Nükleer santraller için yakıt maliyetleri ise çok düşüktür. Bu tür enerji santralleri için, işgücü ve bakım maliyetleri toplam işletme maliyetlerine üzerinde etkilidir [49].

7.3. İyileştirme Seçenekleri İçin Giderler ve Maliyetler

Bu tez çalışması kapsamında belirlenen iyileştirme seçeneklerinin hayata geçirilmesi için ihtiyaç duyulacak giderler genel hatlarıyla Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. İyileştirme Seçenekleri İçin İhtiyaç Duyulacak Giderler

GİDERLER		1. Seçenek	2. Seçenek	3. Seçenek
Projelendirme ve Mühendislik Giderleri		Belirlenen sistemlere göre yapılacak tüm tasarım, fizibilite vb. çalışmalar		
Sistem Yatırım Giderleri		Püskürtücüler Resirkülasyon pompaları Çamur pompaları Jips silosu Jips aktarım hatları	Sorbent depolama silosu Sorbent besleyiciler Sorbent besleme hatları Sorbent enjeksiyon lansları Hava kompresörü ve fan grupları Kontrol odası Reaksiyon tankı Toz tutucu sistem*	Hava dağıtım sistemi Hava ön ısıtıcı Akışkanlaşacak tanecikler** Kömür ve kireçtaşı dağıtım sistemleri*** Yatak üst ısıtıcı Siklonlar
İşletme Giderleri	Yakıt	Kireçtaşı gideri	Sodyum bikarbonat gideri	Kireçtaşı gideri Akışkanlaşacak tanecik gideri
	İşçilik	Tesis işletme gideri	Tesis işletme gideri	Tesis işletme gideri
	Bakım	Sistem bakım gideri	Sistem bakım gideri	Sistem bakım gideri

*Tesisin mevcut elektrostatik filtrelerinin kapasiteleri yetersiz kalması halinde eklenmelidir.

**Bu tanecikler başlangıçta kül, kum veya kireçtaşı olabilir.

***Silolar, ara bunkerler, püskürtücüler vb. elemanlar bu gruba girmektedir.

1. Seçenekte mevcut tesisin baca gazı desülfürizasyon ünitelerinin iyileştirilmesi ile baca gazı SO₂ emisyonu konsantrasyonunun %50 azaltılması için belirlenen iyileştirmeler; 1) her ünitenin mevcut püskürtücülerinin sökülerek, yerine daha yüksek performanslı püskürtücülerin farklı püskürtme yönleri belirlenerek ve püskürtücü sayısı artırılarak yerleştirilmesi ile yıkayıcı kuleye gelen SO₂'nin emisyonun yıkanmadan/arıtılmadan baca çıkışına ulaşmasının önlenmesi ve 2) ünitelerdeki eski resirkülasyon pompalarının emicilerinin ve basınç bağlantılarının ayarlanarak resirkülasyon oranının iyileştirilmesini içermektedir. Bu aşamaların tam verimde çalışması ve baca gazındaki SO₂ konsantrasyonunun %50 azaltılması durumu için hesaplama yapılmıştır.

1. Seçeneğin uygulanması durumunda; projelendirme aşamasında püskürtücü sayıları ve yönleri, resirkülasyon ve çamur pompaları gibi net üretimi etkileyecek ekipmanların elektrik tüketim verileri belirlenmelidir. Püskürtücülerin işletilmesi sırasında karşılaşılan en yaygın sorun tıkanmadır. Tıkanmanın anlaşılabilmesi için püskürtme geometrisini izlemek veya sıvı sarfiyatı ve baca çıkış sıcaklığına bakılarak tıkanma olup olmadığını, iyileştirme sonrasında da sıklıkla kontrol etmek gerekmektedir. Tıkanmanın önüne geçmek için püskürtücülerin sık aralıklarla temizlenmesi, yıkama sıvısının yeterince filtrelenmesi veya çözeltinin seyrekleştirilmesi sistemin tam verimde sürekli çalışmasını sağlayacaktır. Dolayısıyla operasyonel maliyeti insan gücü ve sıvı alımı gereksinimlerinden oluşmaktadır. Baca içerisinde oluşacak jipsin atılmasını sağlayan çamur pompalarında genel problemlerden biri yüksek katı yoğunluğundan dolayı tıkanma olayıdır. Bunun önüne geçmek için deşarj edilen çamurun katı konsantrasyonunun %15'ten fazla olmaması önerilmektedir. Aksi takdirde çamur pompalarının performansının olumsuz yönde etkilenmesi ve bakım-onarım faaliyetleri dolayısıyla baca gazı ünitesinin uzun süreli duruşlarına sebebiyet vermesi ve operasyonel maliyetin yükselmesi durumu söz konusudur. Ayrıca her iki durumda da korozyon potansiyeli yüksek olduğu için pompaların yüksek korozyona dayanıklı olmaları gerekmektedir. Atığın sistemden dışarı alınması için yüksek korozyona dayanıklı malzemeden pompaların ve bağlantı hatlarının seçilerek yenilenmesi gerekebilir. Bu durum yatırım maliyetini arttırıcı olacaktır.

Kireçtaşı ile yıkama yönteminin yatırım maliyeti esas olarak baca gazının hacim akışı tarafından etkilenmektedir. İşletme maliyetleri, yıllık tam yük çalışma saatlerinden ve ayrılacak kükürtdioksit kütle akışından ve baca gazları akış hızından etkilenir. Islak tip BGD olan kireçtaşı ile yıkama teknolojisinin yatırım ve işletme maliyetleri 191–316 US \$ / kW ve 0,78–1,56 US cent / kWh'dir [52].

2. Seçenek olan “baca gazı desülfürizasyon sistemi öncesi kuru sorbent enjeksiyonu prosesinin eklenmesi” durumunda tesise eklenmesi gerekecek sistem elemanları Çizelge 8.1’de sunulmuştur. Bu seçeneğin uygulanması halinde eklenecek elemanların elektrik tüketim verileri, bu elemanların tesisin yerleşim alanına ve tesiste kullanılacak olan sodyum bikarbonatın kullanım miktarına göre boyutlandırılması önem taşıyacaktır. Ayrıca sodyum bikarbonatın kullanımının SO₂ azaltmaya yönelik etkisinin olumlu yönde olmasına karşın, yıllık maliyetinin yüksek olacağı tahmin edilmektedir. Bu durum, bu seçeneğin uygulanması konusunu olumsuz yönde etkileyecektir.

Kuru tip yıkama teknolojilerinin yatırım maliyeti, esas olarak baca gazlarının hacmine ve ayrıca sprey emicinin ve enjeksiyon sistemlerinin tipine ve düzenine bağlıdır. Farklı işlem varyantları, yani ana toz tutucu tipi ve emicideki akış şekli, geniş bir yelpazede yatırım getirebilmektedir. İşletme maliyetleri esas olarak yıllık tam yük çalışma saatlerine, kükürt dioksit konsantrasyonuna ve işlem değişkenine bağlıdır. Kuru tip yıkama teknolojisinin yatırım ve işletme maliyetleri, 125–216 US \$ / kW ve 0,59–0,70 US cent / kWh arasında değişmektedir. Sorbent enjeksiyon sistemleri, nispeten düşük yatırım ve işletme maliyetleri, kolay montaj, kolay çalıştırma ve bakım, atık bulamaç taşıma, kompakt ekipmana bağlı kurulum alanı gereklilikleri ve atık su arıtımı olmaması gibi çeşitli avantajlar sunar [52].

Mevcut pulverize kömür yakma kazanı yerine akışkan yataklı kazan kullanılması 3. Seçenek olarak belirlenmiştir. Genellikle devre dışı kalmayı bekleyen santraller için önerilen AYY teknolojisinde yanma sonucu ortaya çıkan SO₂’nin, yanma esnasında yatağa kireçtaşı ekleyerek büyük ölçüde tutulabilmesi ve BGD tesislerine gerek kalmadan emisyon sınır değerlerini sağlaması, bu seçeneğin belirlenmesinde etkili olmuştur. Yeni kurulan termik santrallerde daha az baca gazı emisyonuna sahip olması nedeniyle öncelikli olarak tercih edilmektedir. AYY teknolojisinin Türk linyitlerine uygulanması konusunda çalışmalar oldukça yaygındır.

Kapasitesi 150 MW'tan daha büyük olan AYY teknolojilerinden DAY yatırım maliyetleri 850-1150 US \$ / kW civarındadır. Bu fiyat benzer kapasitedeki PK teknolojilerine göre yüksektir (800-1000 US \$ / kW). İşletme ve bakım maliyetleri de 30-45 US \$ / kW-Yıl arasında değişmektedir [51].

Bu seçeneğin seçilmesi durumu, beklenildiği üzere potansiyel çevresel etkileri azaltma hususunda mevcut tesiste radikal değişiklikler yapılmasını gerektirmektedir. Kömür özelinde deneysel çalışmaların yapılarak yanma veriminin ve yatak içerisinde kullanılacak tanecik miktarının ve tam verimde SO₂ tutulumunu gerçekleştirecek kireçtaşı tanecik boyutunun belirlenmesi seçeneğin uygulanmasında büyük önem taşımaktadır.

Sistemlere ilişkin literatürde bulunan yatırım ve işletme maliyetleri Çizelge 7.2'de sunulmuştur.

Çizelge 7.2. Farklı Teknolojilere Göre Yatırım ve İşletme Maliyetleri

TEKNOLOJİ	YATIRIM MALİYETİ (US \$ / kW)	İŞLETME MALİYETİ (US cent / kWh)
BGD	191 – 316	0,78 - 1,56
KSE	125 – 219	0,59 - 0,70
DAY	850 – 1150	9,09 - 13,64

Maliyetler incelendiğinde AYY teknolojisinin oldukça yüksek yatırım ve işletme maliyetleri olduğu görülmeye karşın elektrik üretimi ve baca gazı azaltımının bir arada olduğuna, diğer sistemlerin sadece SO₂ emisyonu azaltım seçeneklerini içerdiğine dikkat edilmelidir. Akışkan yatak teknolojisinin, ülkemizin linyit kömürü yapısına uyarlanması hususunda uygulamalar bu açıdan oldukça önem taşımaktadır.

7.4. Bölüm Sonucu

Bu bölümde enerji santralleri için yatırım ve işletme maliyetlerinin neleri kapsadığına ilişkin bilgi verilmiştir. Bu tez çalışmasında mevcut sistemin iyileştirilmesine yönelik belirlenen seçenekler için yatırım ve işletme giderleri genel hatlarıyla belirlenmiş ve literatürdeki kW başına yatırım ve işletme maliyetleri sunulmuştur.. Bu seçeneklerden herhangi birinin uygulanması durumunda fayda-maliyet analizlerinin yapılmasının önem taşıdığı vurgulanmıştır. Her seçeneğe göre özel durumlar hakkında bilgi verilmiştir.

8. GENEL SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında elde edilen genel sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Türkiye’de hâlihazırda termik santrallere ilişkin Yaşam Döngüsü Değerlendirme çalışması yapılmamıştır. Bu çalışmada pilot termik santralin elektrik üretim prosesinin çevresel etkileri yaşam döngüsü perspektifinden incelenerek değerlendirilmiş ve bilinen en büyük problemlerden biri olan baca gazı SO₂ emisyonunu azaltmaya yönelik iyileştirme seçenekleri belirlenerek bu seçeneklerin uygulanması durumunda potansiyel çevresel etkilerdeki azaltma düzeyi sayısal olarak elde edilmiştir. Linyit kömüründen elektrik üreten pilot bir termik santralin elektrik üretimi aşamasının çevreye etkileri konusunda işletme verileri ve 2016 yılına ait çeşitli raporlardaki veriler kullanılmıştır.

Tez kapsamında GaBi Education yazılımı içinde bulunan Etki Değerlendirme Metotları ile etkiler mevcut durum için belirlenmiştir.

YDD envanter verilerinin GaBi Education programına aktarılması ile elde edilen tüm sistemde seçilen etki kategorilerine göre elde edilen sonuçlar Çizelge 7.1’de sunulmuştur.

Çizelge 8.1. Tüm Sistem İçin Seçilen Etki Kategorilerine Göre Elde Edilen Sonuçlar

CML 2001 (Jan. 2016)	Sonuçlar	Birim
Etki Kategorileri		
Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)	1,81E+00	kg CO ₂ -Eşd.
Asidifikasyon Potansiyeli (AP)	3,98E-03	kg SO ₂ -Eşd.
Ötrofikasyon Potansiyeli (ÖP)	3,21E-04	kg Fosfat Eşd.
Fosil Kaynaklar için Abiyotik Bozundurma Potansiyeli (ABPfosil)	1,16E+01	MJ
İnsan Toksisite Potansiyeli (İTP)	3,02E-02	kg DCB-Eşd.
Fotokimyasal Ozon Oluşturma Potansiyeli (FOOP)	1,81E-04	kg Eten-Eşd.

Envanter verilerinin daha kısa zaman dilimlerine göre (haftalık, aylık vb.) düzenlenmesi durumunda 1 kW elektriğin üretilmesi için gereken girdilerin miktarında bu zaman dilimlerinin her biri için değişiklik göstermesi muhtemeldir. Termik santrallerde kullanılan yakıt özelliklerinin her zaman aynı olamayacağı, santrallerin belirli bir kalori aralığında kömürün yakılmasına göre tasarlandığı göz önünde bulundurulmalıdır. Buna bağlı olarak daha kısa zaman aralıklarında değerlendirme yapıldığında yakıt özellikleri, sistem gereksinimi olarak oluşabilecek

su tüketimindeki artışlar veya boru patlakları gibi üretime ara verilmesine neden olan arızalar sebebiyle sistem girdi-çıkışlarındaki değişikliklere paralel olarak haftalık, aylık vb. daha kısa periyotlarda inceleme yapıldığında farklı potansiyel çevresel etki sonuçlarına ulaşılabilir.

Mevcut sistemin iyileştirilmesine yönelik üç seçenek belirlenmiştir. Bu seçeneklerin uygulanması durumunda emisyonların nasıl değişeceği ve ne tür bir malzeme olduğu hesaplanarak bu üç yeni duruma ait YDE (Yaşam Döngüsü Envanteri)'leri oluşturulmuştur. Mevcut durum ile belirlenen üç seçeneğin CML yöntemi ile etki değerlendirme sonuçları Çizelge 8.2'de özet halinde sunulmuştur. TRACI yöntemi ile etki değerlendirme sonuçları Çizelge 8.3'te ve ReCiPe yöntemi ile etki değerlendirme sonuçları Çizelge 8.4'te özet halinde sunulmuştur. Sonuçların değerlendirilmesi ve yorumlanması için literatürde daha yaygın olarak kullanılan CML yöntemi sonuçları temel alınmıştır.

Sistem analizi sonuçlarına göre; 1. Seçenek olan “baca gazı desülfürizasyon ünitelerinin iyileştirilmesi ile baca gazı SO₂ emisyonu konsantrasyonunun %50 azaltılması” AP'de %27 ve FOOP'de %24 azaltma sağlamıştır.

2. Seçenek olan “baca gazı desülfürizasyon sistemi öncesi kuru sorbent enjeksiyonu prosesinin eklenmesi” ile AP'de %94, ÖP'de %22 ve FOOP'de %31 azaltım belirlenirken, KIP'ta kuru sorbent olarak sodyum bikarbonat kullanımına bağlı olarak %3 artış olacağı tespit edilmiştir.

3. Seçenek olan “kritikaltı pulverize kömür yakma sistemi yerine akışkan yatak teknolojisinin adaptasyonu” ile mevcut tesise eşdeğer üretim kapasitesine sahip, 300 MW ve 320 MW olmak üzere iki adet akışkan yataklı kazan için tam kapasite çalışma durumunda yakılan linyit miktarının azalmasına bağlı olarak ABP'de %23 ve KIP'de %19, emisyon değerlerinin düşüşü sonucu AP'de %94, İTP'de %2 ve FOOP'de %36 azaltım sağlanmıştır.

Karşılaştırmalı sonuçlara göre YDD çalışmasında en iyi sonuçların 3. Seçeneğe ait olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 8.2. Mevcut Durum ve Seçenekler İçin Seçilen Etki Kategorilerine Göre Elde Edilen Sonuçlar (CML 2001-2016)

Etki Kategorileri	Birim	Mevcut Durum	1.Seçenek	2.Seçenek	3.Seçenek
Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)	kg CO ₂ -Eşd.	1,81E+00	1,81E+00	1,86E+00	1,46E+00
Asidifikasyon Potansiyeli (AP)	kg SO ₂ -Eşd.	3,98E-03	2,92E-03	2,56E-04	2,47E-04
Ötrofikasyon Potansiyeli (ÖP)	kg Fosfat Eşd.	3,21E-04	3,21E-04	2,50E-04	3,21E-04
Fosil Kaynaklar İçin Abiyotik Bozundurma Potansiyeli (ABPfosil)	MJ	1,16E+01	1,16E+01	1,16E+01	8,99E+00
İnsan Toksisite Potansiyeli (İTP)	kg DCB-Eşd.	3,02E-02	3,01E-02	3,01E-02	2,95E-02
Fotokimyasal Ozon Yaratma Potansiyeli (FOYP)	kg Eten-Eşd.	1,81E-04	1,38E-04	1,24E-04	1,16E-04

Çizelge 8.3. Mevcut Durum ve Seçenekler İçin Seçilen Etki Kategorilerine Göre Elde Edilen Sonuçlar (TRACI 2.1)

Etki Kategorileri	Birim	Mevcut Durum	1.Seçenek	2.Seçenek	3.Seçenek
Küresel Isınma - Hava	kg CO ₂ -Eşd	1,81E+00	1,81E+00	1,86E+00	1,46E+00
Asidifikasyon - Hava	kg H+mol Eşd.	4,02E-03	3,13E-03	2,83E-03	2,61E-03
Ötrofikasyon Potansiyeli	kg N-Eşd.	1,10E-04	1,10E-04	1,10E-04	8,53E-05
İnsan Sağlığı Kriteri - Hava	kg PM10-Eşd.	1,72E-04	1,18E-04	9,92E-05	1,05E-04
Duman Oluşumu - Hava	kg O ₃ -Eşd.	4,94E-02	4,94E-02	3,85E-02	4,94E-02

Çizelge 8.4. Mevcut Durum ve Seçenekler İçin Seçilen Etki Kategorilerine Göre Elde Edilen Sonuçlar (ReCiPe 1.08 Orta Nokta – Son Nokta)

ReCiPe 1.08 Midpoint	Birim	Mevcut Durum	1.Seçenek	2.Seçenek	3.Seçenek	ReCiPe 1.08 Endpoint	Birim	Mevcut Durum	1.Seçenek	2.Seçenek	3.Seçenek
Etki Kategorileri						Etki Kategorileri					
İklim Değişimi	kg CO ₂ -Eşd.	1,81E+00	1,81E+00	1,86E+00	1,46E+00	İklim Değişimi (İnsan Sağlığı)	DALY	2,53E-06	2,53E-06	2,60E-06	2,04E-06
Karasal Asidifikasyon	kg SO ₂ -Eşd.	3,67E-03	2,78E-03	2,48E-03	2,34E-03	İklim Değişimi (Ekosistem)	canlı türü.yıl	1,43E-08	1,43E-08	1,47E-08	1,16E-08
Fosil Tüketimi	kg Petrol Eşd.	2,76E-01	2,76E-01	2,76E-01	2,14E-01	Karasal Asidifikasyon	canlı türü.yıl	2,13E-11	1,62E-11	1,44E-11	1,36E-11
Partikül Madde Oluşumu	kg PM10-Eşd.	1,06E-03	8,86E-04	8,26E-04	7,37E-04	Fosil Tüketimi	Dolar (\$)	4,56E-02	4,56E-02	4,55E-02	3,53E-02
Fotokimyasal Oksidan Oluşumu	kg NMVOC	2,66E-03	2,59E-03	2,57E-03	2,03E-03	Partikül Madde Oluşumu	DALY	2,77E-07	2,30E-07	2,15E-07	1,92E-07
Su Tüketimi	m ³	5,21E-06	5,14E-06	4,49E-06	4,51E-06	Fotokimyasal Oksidan Oluşumu	DALY	1,04E-10	1,01E-10	1,00E-10	7,92E-11

7. Bölüm’de iyileştirme seçeneklerine göre maliyetler incelendiğinde AYY teknolojisinin oldukça yüksek yatırım ve işletme maliyetleri olduğu, ancak elektrik üretimi ve baca gazı azaltımı bir arada yapılmaktadır. Diğer iyileştirmeler sadece SO₂ emisyonu azaltım seçeneklerini içermektedir.

Akışkan yatak teknolojisinin, ülkemizin linyit kömürü yapısına uyarlanması hususunda uygulamalar bu açıdan oldukça önem taşımaktadır. Linyit kömürünün, rezerv miktarı ve yerli yakıt olması nedeniyle ülkemizde önemli bir yeri vardır. Linyit kömürü kullanımının diğer fosil yakıtlar içerisinde devamlı ve güvenilir rolünü sürdürebilmesi için potansiyel çevresel etkilerinin azaltılması ve bu tez kapsamında belirlenen ve diğer olası iyileştirme alternatiflerine geçişinin sağlanması için ilgili politika ve programların geliştirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] EÜAŞ, 2017, *Elektrik Üretim Sektör Raporu 2016*, http://www.euas.gov.tr/Documents/sektor_raporlari/EUAS-Sektor_Raporu2016.pdf - Erişim Tarihi: **28.06.2017**
- [2] BP, 2017, *Statistical Review of World Energy*, <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf> - Erişim Tarihi: **24.06.2017**
- [3] IEA, 2016, *World Energy Outlook 2016*, <http://www.iea.org/newsroom/news/2016/november/world-energy-outlook-2016.html> - Erişim Tarihi: **28.06.2017**
- [4] Enerji Atlası, Kömür ve Linyit Yakıtlı Termik Santraller, <http://www.enerjiatlası.com/komur/> - Erişim Tarihi: **28.06.2017**
- [5] TTK, *Taşkömürü Sektör Raporu 2016*, <http://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2F1%2FDocuments%2FSekt%C3%B6r%20Raporu%2FTTK%202015%20Sekt%C3%B6r%20Raporu.pdf> - Erişim Tarihi: **03.10.2016**
- [6] Global Energy Observatory, *Current List of Coal Power Plants*, <http://globalenergyobservatory.org/list.php?db=PowerPlants&type=Coal> - Erişim Tarihi: **30.06.2017**
- [7] Selçuk, N., *Temiz Kömür Yakma Teknolojileri ve Süperkritik Buhar Santralleri*, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara, **2012**.
- [8] Nas, B., *Termik Santrallerde Su Kullanımı ve Atıksu Oluşumu*, Selçuk Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Arıtılmış Atıksuların Yeniden Kullanımı Sanayi Sektörleri Uygulama Kılavuzları, Sayfa 141-154, Konya, 2018.
- [9] Selçuk, N., *Akışkan Yataklı Yakma Sistemleri*, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara, 1999.
- [10] TÜBİTAK, TTGV, *Enerji Üretiminde Verimliliği Arttırma ve Çevreyi Korumaya Yönelik İleri Teknolojiler Alt Grup Raporu*, <http://www.inovasyon.org/pdf/euva.bolum5.3.pdf> - Erişim Tarihi: **31.01.2018**
- [11] European Comission, *Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants*, July **2006**.
- [12] The Worldbank Group, ESMAP, *Turkey Energy and Environment Review Synthesis Report*, December **2003**.
- [13] Gagnon, L., Bélanger, C., Uchiyama, Y., *Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001*, Energy Policy, Canada, **2002**.

- [14] Santoyo-Castelazo, E., Gujba, H., Azapagic, A., *Life cycle assessment of electricity generation in Mexico*, Energy Journal, School of Chemical Engineering and Analytical Science, U.K., **2011**.
- [15] Atılğan, B., Azapagic, A., *Life cycle environmental impacts of electricity from fossil fuels in Turkey*, Journal of Cleaner Production, UK, **2014**.
- [16] Brizmohun, R., Ramjeawon, T., Azapagic, A., *Life cycle assessment of electricity generation in Mauritius*, Journal of Cleaner Production, Mauritius, **2014**.
- [17] Akber, M.Z., Thaheem, M.J., Arshad, H., *Life cycle sustainability assessment of electricity generation in Pakistan: Policy regime for a sustainable energy mix*, Energy Policy, Pakistan, **2017**.
- [18] Zhou, Z., Liang, X., Wang, Z., Huang, Z., Zhou, J., Cen, K., *Up-to-date life cycle assessment and comparison study of clean coal power generation technologies in China*, Journal of Cleaner Production, China, **2012**.
- [19] Mbohwa, C., *Life Cycle Assessment of a Coal-fired Old Thermal Power Plant*, Proceedings of the World Congress on Engineering 2013 Vol. I, WCE 2013, London, U.K., July 3 - 5, **2013**.
- [20] Odeh, N.A., Cockerill, T.T., *Life cycle analysis of U.K. coal fired power plants*, Energy Conversion and Management, Pages 212–220, U.K., **2008**.
- [21] Feng, C., Gao, X., Tang, Y., Zhang, Y., *Comparative life cycle environmental assessment of flue gas desulphurization technologies in China*, Journal of Cleaner Production, China, **2013**.
- [22] Zhou, Q., Koiwanit, J., Piewkhaow, L., Manuilova, A., Chan, C.W., Wilson, M., Tontiwachwuthikul, P., *A comparative of life cycle assessment of post-combustion, pre-combustion and oxy-fuel CO₂ capture*, Energy Procedia, Canada **2014**.
- [23] Sampattagul, S., Kato, S., Kiatsiriroat, T., Widiyanto, A., *Life Cycle Analytical Tools and Externalities of the Flue Gas Desulphurization System in Thailand*, Chiang Mai University Journal of Natural Sciences, Thailand, **2005**.
- [24] Tang, L., Yokoyama, T., Kubota, H., Shimota, A., *Life cycle assessment of a pulverized coal-fired power plant with CCS technology in Japan*, Energy Procedia, Japan, **2014**.
- [25] ISO 14040:2006, *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*, **2016**.
- [26] Bayrak, F., *Elektrik Üretiminde Kullanılan Linyitin Madencilik Aşamasına Ait Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi*, Hacettepe Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans Tezi, Ankara, **2014**.
- [27] Mammadov, A., Cılız, N., *Yaşam Döngüsü Analizi: Tanımı, Amacı, Sürdürülebilirlik Kavramları ile İlişkisi ve Sanayideki Yeri*, T.C. Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı “Kalkınmada Anahtar Verimlilik” Dergisi, Eylül **2017**.

- [28] Cousineau, L., *Greenhouse Gas Definition*, <http://www.climate-change-guide.com/> - Erişim Tarihi: **05.05.2018**
- [29] PE International, *GaBi Database and Modelling Principles 2013*, Germany, 2013.
- [30] Karakaya, E., *Paris Anlaşması: İçeriği Ve Türkiye Üzerine Bir Değerlendirme*, Adnan Menderes Üniversitesi Sürdürülebilir Üretim ve Tüketim Derneği, <http://www.sut-d.org/wp-content/uploads/2015/12/sut-d-paris-anlasmasi.pdf> - Erişim Tarihi: **05.05.2018**
- [31] Yüksel, H., *Computer-Based Environmental Management - Life Cycle Impact Assessment Categories*, Hacettepe Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Ankara, 2014.
- [32] Klöpffer, W., Grahl, B., *Life Cycle Assessment (LCA) A Guide to Best Practice*, Wiley-VCH, Germany, **2014**.
- [33] Özdemir, M.B., Menlik, T., Variyenli, H.İ., Sevin, L., *Bir Termik Santralin Performans Analizi ve Rehabilitasyon Metotları*, Politeknik Dergisi 20 (4) : Sayfa 971-978., **2017**.
- [34] Yeşil, Ç., *Kireç Bazlı Islak Baca Gazı Desülfürizasyon Sistemleri (Wet Scrubber)*, Barış Teknolojik Tesisat Sistemleri San. ve Tic. Ltd. Şti., <http://www.barismuhendislik.com.tr/pdf/baca-gazi-desulfurizasyon-filtre-sistemleri.pdf> - Erişim Tarihi: 03.09.2018
- [35] Kong, Y., Davidson, H., *Dry sorbent injection of sodium sorbents for SO₂, HCl and mercury mitigation*, Proceedings of the 18th North American Waste-to-Energy Conference NAWTEC 18, Orlando, Florida, USA, May 11-13, **2010**.
- [36] Çay, M.S., *Kömür Yakıtlı Termik Santrallarda Baca Gazı Kanalına Kuru Sorbent Enjeksiyonu İle Kükürt Giderme Sisteminin İncelenmesi*, Hitit Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans Tezi, Çorum, **2013**.
- [37] Eti Soda ve Eti Maden İşletmeleri, *Teknik Tür Sodyum Bikarbonat Ürün Özellikleri Dokümanı*, 1-3, Beypazarı, **2017**.
- [38] Oka, S.N., *Fluidized Bed Combustion*, Laboratory for Thermal Engineering and Energy Institute VINCA, Belgrade, Serbia and Montenegro, **2004**.
- [39] MMO, *Akışkan Yatak Prosesi ve 2X160 MW Akışkan Yataklı 18 Mart Çan Termik Santrali*, Sunum, https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/gonderi_dosya_ekleri/b81c4484ebf263f_ek.pdf - Erişim Tarihi: **17.05.2018**
- [40] Onat, A., Onat, M., Gül, M.Z., *Akışkan Yataklı Kazan Tasarımı ve İmalatı*, 3. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Ankara, **2003**.

- [41] Dölger, S., *Akışkan Yataklı Kömür Yakma Sistemlerinde Otomatik Kontrol Tasarım ve Uygulaması*, Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans Tezi, Ankara, **2007**.
- [42] Turconi, R., Boldrin, A., Astrup, T., *Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations*, Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, Denmark, **2013**.
- [43] Hondo, H., *Life Cycle GHG emissions analysis of power generation systems: Japanese case*, Energy Volume 30, Pages 2042–2056, Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan, **2005**.
- [44] Gaete-Morales, C., Gallego-Schmid, A., Stamford, L., Azapagic, A., *Assessing the environmental sustainability of electricity generation in Chile*, Science of the Total Environment Volume 636, Pages 1155–1170, **2018**.
- [45] Garcia, R., Marques, P., Freire, F., *Life-cycle assessment of electricity in Portugal*, Applied Energy Volume 134, Pages 563–572, ADAI-LAETA, Department of Mechanical Engineering, University of Coimbra, Portugal, **2014**.
- [46] Asdrubali F., Baldinelli, G., D'Alessandro, F., Scrucca, F., *Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: Review and results harmonization*, Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 42, Pages 1113–1122, Università degli Studi di Perugia, Department of Engineering, Perugia, Italy, **2015**.
- [47] Theodosiou, G., Koroneos, C., Stylos, N., *Environmental impacts of the Greek electricity generation sector*, Sustainable Energy Technologies and Assessments Volume 5, Pages 19–27, Unit of Environmental Science and Technology, School of Chemical Engineering, Athens, Greece, **2014**.
- [48] Rakotoson, V., Praene, J.P., *A life cycle assessment approach to the electricity generation of French overseas territories*, Journal of Cleaner Production Volume 168, Pages 755-763, Laboratory of Physics and Mathematical Engineering for the Study of Energy, Environment and Building, Tampon – Reunion, France, **2017**.
- [49] Blumsack, S., *“Basic economics of power generation, transmission and distribution”*, Energy Market, Policy and Regulation Course, PennState College Department of Energy and Mineral Engineering, <https://www.e-education.psu.edu/eme801/node/530> - Erişim Tarihi: **13.08.2018**
- [50] Çift, B.D., Okutan, H., *“Baca gazı desülfürizasyon proseslerinin ekonomik ve teknik analizi”*, İtü Dergisi / Mühendislik, Cilt:9, Sayı:4, 85-96, İstanbul, **2010**.
- [51] Rahim, M.A., Gündüz, D., *“Dolaşım Akışkan Yataklı Bir Isıl – Güç Çevrim Santralinin Simülasyonu ve Duyarlılık Analizi”*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Tasarım ve Teknoloji GU J Sci Part:C 1(2):37-47, Ankara, **2013**.

- [52] Poulikkas, A., "Review of Design, Operating, and Financial Considerations in Flue Gas Desulfurization Systems", *Energy Technology & Policy: An Open Access Journal*, Department of Electrical Engineering, Cyprus University of Technology, Limassol, Cyprus, **2015**.



ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: Ekin TAŞKIN

Doğum Yeri: Mersin

Medeni Hali: Bekar

E-posta: ekintaskin@hotmail.com

Adresi: Feyzullah Mah. Mimar Sinan Cad. No: 29/4 Maltepe / İSTANBUL

Eğitim

Lise: Maltepe Anadolu Lisesi / İSTANBUL

Lisans: Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans:

Doktora: -

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce, İyi

Almanca, Başlangıç

Portekizce, Başlangıç

İş Deneyimi

Park Termik Elektrik San. ve Tic. A.Ş. (2012 – devam)

Deneyim Alanları

Enerji ve Madencilik, Çevre İzin ve Lisans Çalışmaları

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
NÜFUS ETÜTLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
NÜFUS ETÜTLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 07/09/2018

Tez Başlığı / Konusu: Linyit Yakıtlı Pilot Termik Santral İçin Baca Gazı Emisyon Azaltma Seçeneklerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler ve d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 105 sayfalık kısmına ilişkin, 07/09/2018 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 9 'dur.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Nüfus Etütleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Adı Soyadı: Ekin TAŞKIN
Öğrenci No: N14127109
Anabilim Dalı: Çevre Mühendisliği
Programı: Çevre Mühendisliği
Statüsü: ☒ Y.Lisans ☐ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

Tarih ve İmza

07.09.2018

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Dr. Öğr. Üyesi Hatice ŞENGÜL

(Unvan, Ad Soyad, İmza)