

**KÖMÜR İLE ÇALIŞAN TERMİK SANTRALLERDE ENERJİ ÜRETİMİNİN
ÇEVRESEL ETKİLERİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ
YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ**

Nurcan EROĞLU ÇİFTÇİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Zerrin GÜNKAYA

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Aralık 2022

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Nurcan EROĞLU ÇİFTÇİ'nin KÖMÜR İLE ÇALIŞAN TERMİK SANTRALLERDE ENERJİ ÜRETİMİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ başlıklı çalışması 02/12/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği”nin ilgili maddeleri uyarınca, ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye (Tez danışmanı)	:	Doç. Dr. Zerrin GÜNKAYA
Üye	:	Prof.Dr. Aysun ÖZKAN
Üye	:	Prof.Dr. Gülbin ERDEN

Prof. Dr. Murat TANIŞLI

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

02/12/2022

DANIŞMAN ONAYI

Danışmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans öğrencisi Nurcan EROĞLU ÇİFTÇİ, KÖMÜR İLE ÇALIŞAN TERMİK SANTRALLERDE ENERJİ ÜRETİMİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımdan incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Zerrin GÜNKAYA

ÖZET

KÖMÜR İLE ÇALIŞAN TERMİK SANTRALLERDE ENERJİ ÜRETİMİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ

Nurcan EROĞLU ÇİFTÇİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Aralık 2022

Danışman: Doç. Dr. Zerrin GÜNKAYA

Bu çalışmada kömürle çalışan termik santrallerin çevresel etkileri yaşam döngüsü değerlendirmesi yöntemiyle belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Mevcut durum olarak pulverize subkritik kazan teknolojisi kullanılan kömür santralleri ele alınmış olup alternatif teknoloji olarak pulverize süperkritik, pulverize ultra süperkritik ve akışkan yatak kazan teknolojileri değerlendirilmiştir. Bu teknolojiler karşılaştırılarak yaşam döngüsü değerlendirmesinin kategoriler üzerinde etkisi incelenmiştir. Karşılaştırma, SimaPro 9.1 yazılımı kullanılarak ReCiPe 2016 Midpoint (H) metodu ile yapılmıştır. Karakterizasyon kategorilerinde; tatlı su ötrofikasyonu potansiyeli ve fosil kaynak tüketim potansiyeli dışında tüm etki kategorileri açısından akışkan yatak teknolojisinin pulverize sistemlere göre çevresel etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür. Pulverize sistemlerde ise çevresel etkinin subkritik sistemlerde daha fazla olduğu, süper kritik sistemlerin partikül madde oluşum potansiyeli (%8,9), ozon oluşumu karasal ekotoksitesitesi potansiyeli (%18,7) ve karasal asidifikasyon potansiyeli (%8,8) hariç tüm kategorilerde ultra süperkritik sistemlerden daha fazla etki gösterdiği görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Çevresel etki, Enerji, Kömür, Termik santral, Yaşam döngüsü değerlendirilmesi

ABSTRACT

DETERMINATION OF ENVIRONMENTAL EFFECTS OF ENERGY PRODUCTION IN COAL-FIRED THERMAL POWER PLANTS BY LIFE CYCLE ASSESSMENT METHOD

Nurcan EROĞLU ÇİFTÇİ

Department of Environmental Engineering

Programme in Environmental Sciences

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, December 2022

Supervisor: Assoc. Doç. Dr. Zerrin GÜNKAYA

In this study, the environmental impacts of coal-fired thermal power plants were determined and compared with the life-cycle assessment method. Coal power plants using pulverized subcritical boiler technology are considered as the current situation, and pulverized supercritical, pulverized ultrasupercritical and fluidized bed boiler technologies are evaluated as alternative technologies. By comparing these technologies, the effect of life cycle assessment on the categories was examined. For comparison, ReCiPe 2016 Midpoint (H) method was used using SimaPro 9.1 software. In characterization categories; It has been observed that the environmental impact of fluidized bed technology is higher than pulverized systems in terms of all impact categories except freshwater eutrophication potential and fossil resource consumption potential. On the other hand, in pulverized systems, the environmental impact is higher in subcritical systems, and ultra-critical systems are used in all categories except for particulate matter generation potential (8.9%), ozone formation terrestrial ecotoxicity potential (18.7%) and terrestrial acidification potential (8.8%). It has been observed that it has more effect than supercritical systems.

Keywords: Coal, Energy, Environmental impact, Life cycle assessment, Power plant.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışma sürecinde tecrübesi ve bilgisi ile beni yönlendiren Doç.Dr. Zerrin GÜNKAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman beni destekleyen ve yanımda olan canım aileme, bu uzun süreçte yüksek lisansımı bitirmem için beni destekleyen ve elinden geleni yapan sevgili eşim Yusuf ÇİFTÇİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Nurcan EROĞLU ÇİFTÇİ



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Nurcan EROĞLU ÇİFTÇİ

İÇİNDEKİLER

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI.....	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XII
1. GİRİŞ.....	1
2. KÖMÜRLE ÇALIŞAN TERMİK SANTRALLERDE ENERJİ ÜRETİMİ.....	2
3.YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ.....	7
3.1. LCA'nın Standardizasyonu ve Aşamaları.....	7
3.2.1. Hedef ve kapsam tanımı	7
3.2.2. Yaşam döngüsü envanter analizi.....	7
3.2.3. Yaşam döngüsü etki analizi	8
3.2.4. Yorum	11
4. KONUYLA İLGİLİ LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	12
5. MATERYAL VE METOD	22
5.1. Hedef ve Kapsam Tanımı.....	22
5.1.1. Sistemlerin tanıtımı.....	22
5.1.2. Sistem sınırları	29
5.2. Yaşam Döngüsü Envanter Analizi	29
5.3. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi	34

6.SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	39
KAYNAKÇA.....	40



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Türkiye’de bulunan termik santrallerde kullanılan kazan teknolojileri.....	3
Tablo 5.1. Kritikaltı ve kritiküstü kazanların karşılaştırılması	23
Tablo 5.2. Pulverize subkritik kazan ve pulverize süperkritik kazan sistemlerinin karşılaştırılması.....	24
Tablo 5.3. Pulverize subkritik kazan teknolojisine dair veriler	30
Tablo 5.4. Pulverize süperkritik kazan teknolojisine dair veriler	31
Tablo 5.5. Pulverize ultra süperkritik kazan teknolojisine dair veriler	32
Tablo 5.6. Akışkan yatak kazan teknolojisine dair veriler	33
Tablo 5.7. Tüm kazan teknolojilerine ait karakterizasyon sonuçları	34

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Termik santral atık ve yan ürünleri	4
Şekil 5.1. Sistem sınırı.....	29
Şekil 5.2. Kazan teknolojilerinin etki kategorileri bazında karşılaştırılması.....	35
Şekil 5.3. Monte Carlo analizi (akışkan yatak – pulverize subkritik kazan teknolojileri)	36



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AKM	: Askıda katı madde
CCS	: Karbondioksit yakalama ve depolama
C ₂ H ₄	: Etilen
CO ₂	: Karbondioksit
CO	: Karbonmonoksit
DAY	: Dolaşımli akışkan yatak
EÜAŞ	: Elektrik Üretim Anonim Şirketi
GHG	: Sera gazı
GWh	: Gigawatt saat
HCl	: Hidrojen klorür
IGCC	: Entegre gazlaştırma kombine çevrimi
HF	: Hidrojen florür
KAY	: Kabarcıklı akışkan yatak
kWh	: Kilowatt saat
K-altı	: Kritik altı
KOİ	: Kimyasal oksijen ihtiyacı
LCA	: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi
MW	: Megawatt
MWh	: Megawatt saat
NO _x	: Azot oksit
PC	: Pulverize kömür
PM ₁₀	: Partikül Madde
SK	: Süperkritik
SO _x	: Kükürt oksit

1. GİRİŞ

Günümüzde artan nüfus ve sanayileşmenin sonucu olarak elektrik enerjisine ihtiyaç da artmaktadır. Dünyada bu ihtiyacın karşılanmasında çeşitli enerji kaynakları kullanılmakta ve enerji ihtiyacının %61,3'ü fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Fosil yakıtların tercih edilme sebebi ekonomik olarak ucuz ve bulunma ağının geniş olmasıdır. Elektrik üretiminde en çok tercih edilen fosil yakıt türü kömürdür. Dünyada 2019 yılında üretilen 9.914.448 GWh elektrik enerjisi kömür kullanılan termik santrallerden üretilmiştir (http-1,2022). Ülkemizde ise 2021 yılında elektrik üretiminin % 63,1'i fosil yakıtlı santrallerden sağlanmış, hidrolik santraller %16,79 rüzgar santralleri % 9,41, güneş santralleri %3,92, jeotermal %3,27, biyokütle %1,91'li payı oluşturmuştur (EÜAŞ,2021). Ülkemizde kömür ile çalışan termik santrallerde linyit, taş kömürü ve ithal kömür kullanılmaktadır.

Kömüre dayalı termik santrallerde pulverize kömür yakma teknolojileri ve akışkan yataklı yakma teknolojisi olmak üzere iki yakma teknolojisi ön plandadır. Pulverize kömür yakma teknolojileri kendi içinde; pulverize subkritik, pulverize süperkritik ve pulverize ultra süperkritik olarak üçe ayrılmaktadır. Ülkemizde bulunan termik santrallerin büyük çoğunluğu pulverize subkritik kazan teknolojisine sahip olup oldukça sınırlı sayıda akışkan yatak kazan teknolojisi, pulverize süperkritik ve pulverize ultra süperkritik kazan teknolojisi ile çalışan santraller de bulunmaktadır.

Her üretim türünde olduğu gibi kömürle çalışan termik santrallerden enerji üretiminin de çevresel etkileri bulunmaktadır. Mevcut teknolojilerden kaynaklanan çevresel etkiler detaylı bir şekilde belirlenip, etkilerinin azaltılması için alternatif teknolojiler uygulanmalıdır. Bu çevresel etkilerin belirlenmesinde Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Life Cycle Assesment- LCA) faydalı bir yöntemdir. Bu çalışmada kömürle çalışan termik santrallerin, pulverize subkritik kazan teknolojisi, pulverize süperkritik kazan teknolojisi, pulverize ultra süperkritik kazan teknolojisi ve akışkan yatak kazan teknolojisi kullanılması durumunda çevresel etkileri LCA yöntemiyle belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır.

2. KÖMÜRLE ÇALIŞAN TERMİK SANTRALLERDE ENERJİ ÜRETİMİ

Kömür başlıca karbon, hidrojen ve oksijen gibi elementlerin bileşiminden oluşmuş ve diğer kaya tabakalarının arasında uzunca bir süre ısı, basınç ve mikrobiyolojik etkilerin sonucunda meydana gelmiştir. Kömürleşmenin birinci evresi, organik materyalin biyokimyasal bozulmasıdır ve ortamın bakterilerin yaşamasına elverişsiz derecede asidik oluşuna kadar sürer. İkinci evre metamorfizmanın özellikleri, zamana bağlı olarak basınç ve sıcaklığın değişmesidir. Kömürün kalitesi uğradığı metamorfizma ile doğru orantılı olarak değişir ve linyitten antrasite doğru oksijen ve hidrojen içeriğinin azalması, karbon içeriğinin ve alt ısı değerinin yükselmesi olarak gözlenir. Kömür, dünyada bütün ülkeler tarafından günlük hayatta yaygın olarak kullanılıyor olması, depolama ve nakliye açısından emniyetli oluşu, endüstriyel ve diğer alanlarda elektrik enerjisinin üretiminde kullanılabilir olması, ucuz maliyetli oluşu nedeniyle günümüzün önemli bir madenidir.

Dünyada kömür rezervlerinden %90'dan fazlası ABD (%27,6), Rusya Federasyonu (%18,2), Çin (%13,3), Avustralya (%8,9), Hindistan (%7), Almanya (%4,7), Ukrayna (%3,9), Kazakistan (%3,9) ve Güney Afrika Cumhuriyeti (%3,5) bulunmaktadır (Özdemir vd., 2018). Dünyada enerji ihtiyacı her geçen yıl % 4-5 oranında artmakta diğer yandan fosil yakıt rezervleri ise her geçen gün azalmaktadır. İlerleyen yıllarda kömür rezervlerinin tükeneceği ve ihtiyaçları karşılayamayacağı açık bir şekilde ortadadır. Ülkemizde termik santrallerde taş kömürleri, linyit kömürleri ve ithal kömürler kullanılmakta olup kömür tüketiminde en büyük payı ısı değerleri 1000 kCal/kg ile 3500 kCal/kg ve kül miktarları %15 ile %35 arasında değişen linyit almaktadır (Özdemir vd., 2018).

Kömürle çalışan termik santrallerde kömürün besleme türüne ve santralde ulaşılan buhar sıcaklığına göre farklı yakma teknolojileri bulunmaktadır. Kömür beslemesine göre sistemler pulverize ve akışkan yatak olarak, pulverize sistemler ise subkritik, süperkritik ve ultra süper kritik teknolojiler olarak sınıflandırılmaktadır. Ülkemizdeki termik santraller pulverize subkritik olarak işletilmekte birlikte az sayıda da akışkan yatak, pulverize süperkritik ve pulverize ultrasüperkritik teknolojisi kullanan santraller de bulunmaktadır. Ülkemizde bulunan termik santrallere ait kazan teknolojileri Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Türkiye’de bulunan termik santrallerde kullanılan kazan teknolojileri (http-3, 2022)

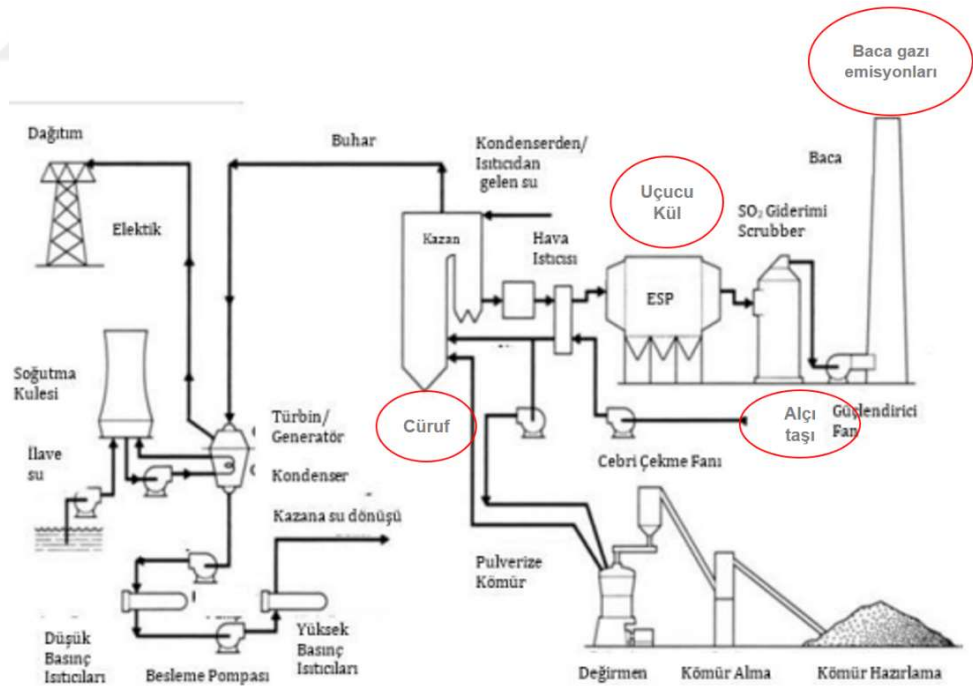
Kazan tipi	Tesis adı	Ünitelerin işletmeye alındığı dönem	Ünite sayısı ve gücü (MW)
Pulverize subkritik	Tunçbilek Termik Santrali	1956-1978	65+2x150
	Soma A Termik Santrali	1975-1958	2x22
	Seyitömer Termik Santrali	1973-1989	4x150
	Soma B Termik Santrali	1981-1993	6x165
	Yatağan Termik Santrali	1982-1993	3x210
	Afşin Elbistan A Termik Santrali	1984-1987	3x340 + 335
	Yeniköy Termik Santrali	1986-1987	2x210
	Çayırhan Termik Santrali	1987-1998	2x150+2x160
	Çatalağzı Termik Santrali	1987-1991	2x150
	Kangal Termik Santrali	1987-2000	2x150+157
	Orhaneli Termik Santrali	1992	1x210
	Kemerköy Termik Santrali	1993-1995	3x210
	Afşin Elbistan B Termik Santrali	2000-2006	4x360
	Çan 2 Termik Santrali	2018	330
	İsken-Su Gözü Termik Santrali	2004	2x605
	İzdemir Enerji Termik Santrali	2015	3x305
Pulverize süperkritik	Eren-Zetes 2 Termik Santrali	2010	2x6155
	İçdaş- Bekirli Termik Santrali	2011, 2013	2x600
	Diler Atlas Termik Santrali	2014	2x600
	Eren-Zetes 3	2016	2x700
Pulverize ultra süperkritik	Cenal Karabiga Termik Santrali	2017	2x660
Akışkan yatak	Silopi Termik Santrali	2009-2015	3x135
	Polat 1 Termik Santrali	2014	51
	Aksa Göynük Termik Santrali	2015-2016	2x135
	Tufanbeyli Termik Santrali	2016	3x150
	Yunus Emre Termik Santrali	2016	145+145
	Soma Kolin Termik Santrali	2019	2x255
	İçdaş- Biga Termik Santrali	2005 (I.ünite)	3x1005
	Eren-Zetes 1	2010	1x160
	Çolakoğlu-2 Termik Santrali	2015	2x95

Kömür yakıtlı bir termik santralde elektrik üretilebilmesi ve sistemde dolaşım için su gerekmektedir. Ayrıca suyun buhara dönüşebilmesi ve gerekli yanmanın sağlanması için kömür ve yeterli miktarda hava gerekmektedir. Termik santrallerde sistemde yumuşak su ya da saf suyun çevrimi yapılır. Çevrimde kullanılan su, ham su içindeki yabancı maddelerin çöktürülmesi ve yumuşatılması ile genel olarak magnezyum ve kalsiyum bakımından fakir olan geçici sertliği alınmış sudur. Saf su ise iyon değiştirici reçinelerden geçirilerek elde edilen sudur. Kazanlarda yanmanın gerçekleşebilmesi

kömür ve hava oranlarının yanma için uygun aralıkta olması gerekmektedir. Ayrıca yanma odasının kontrolü ve kömür parçacıklarının taşınabilmesi için fanlar yardımıyla kazanın yanma odasına hava verilmektedir.

Kömür yakıtlı bir buhar kazanında kömür öğütülerek toz haline getirilir. Daha sonra kömür hava karışımı ile kazanda yakılarak elde edilen ısı boru demetlerine aktarılırak su ısıtılır ve buhar elde edilir. Elde edilen buhar yüksek basınç türbinine gönderilir. Elde edilen buhar türbinde enerjisi ile güç ürettikten sonra tekrar kazana gönderilerek kızdırılır ve sırasıyla orta basınç türbinine daha sonra da alçak basınç türbinine gönderilir. Alçak basınç türbininde buhar tam olarak genişir ve kondensere gönderilir. Kondenserde buhar yeniden suya dönüştürülür. Buhar burada, içinde soğutma suyunun dolandığı binlerce küçük çaplı boruya temas ederek tekrar suya dönüşür. Sonra pompalarla toplanır ve yeniden ısıtma çevrimine girmesi için kazana gönderilir (Yatarkalkmaz,2020).

Termik santral çalışma süresince oluşan atık ve yan ürünler Şekil 2.1’de gösterilmektedir (Atay, 2019).



Şekil 2.1. Termik santral atık ve yan ürünleri (Atay,2019)

Termik santrallerde oluşan atıkları üç ana grupta toplamak mümkündür:

Katı Atıklar: Katı yakıtların yanmasıyla oluşan katı atıklar kül (% 80-85), curüf (% 15-20) ve ek olarak su hazırlama sırasında çıkan flokülasyon çamuru da katı olarak tanımlanır (Atay, 2019). Yakma sonucu oluşan küller çimento fabrikalarına, alçıpan üretimi yapan işletmelere, hazır beton firmalarına ve briket üretim tesislerine, yol inşaatları malzemeleri ile asfalt içerisine katkı maddesi olarak kullanılmak üzere satışı söz konusu olabilmektedir. Piyasaya satılamayan kül ve cürufur ise santral sahasında depolanmaktadır (http-4, 2022). Günlük olarak çıkan kül miktarının fazla olması geniş alanların kül depolama alanı olarak kullanılmasını gerektirmektedir. Küllerin ağır metal ve radyoaktif elementlerce kirlenmiş olma ihtimali de vardır. Bu durum, kül depolama alanlarının özenle seçilmesini, toprak ve su kaynaklarının kirlenmesini engelleyecek tedbirlerin alınmasını zorunlu kılmaktadır (http-4, 2022).

Sıvı Atıklar: Termik santrallerden çıkan sıvı atıklar, kül-cüruf çıkarıcısından taşan küllü sular, su arıtma atıkları, soğutma kulesi blöfleri ve evsel atıklardır.

Gaz Atıklar: Kömürün kazanda yanmasıyla baca gazı emisyonları özellikle de linyit kullanılan termik santrallerde ciddi önem arz eder.

Bacagazı içeriği olarak çevresel anlamda kontrol altında tutulması gereken emisyonlar aşağıda sıralanmıştır.

- **Karbondioksit ve karbonmonoksit emisyonları:** Linyit içerisinde ki yanabilen karbonun tamamı yanma prosesi boyunca karbondioksit (CO_2)' e dönüşür. Tam yanmanın olmaması CO_2 ' e dönüşmeyen yanabilen karbonun fazlalığına bağlıdır. Karbonmonoksit (CO) miktarı, üretilen CO_2 miktarı ile karşılaştırıldığında önemsizdir. Yakma prosesinin kontrolü ile CO emisyonu minimum seviyeye iner (Atay, 2019).
- **Toz emisyonları:** Kazanın yakma konfigürasyonu ve linyitin kül içeriği ile doğrudan ilgilidir. Toz emisyonlarını filtrelenebilen ve yoğunlaştırılabilen olarak kategorilere ayırabiliriz. Buhar ve $0,3 \mu\text{m}$ 'den küçük partiküller filtrenin içinden geçer (Atay 2019).
- **Kükürt oksit emisyonları:** Linyitin yakımı sonucu oluşan SO_x emisyonları linyitin yapısı ve içerdiği kükürt miktarına bağlı bir fonksiyondur (Atay, 2019).
- **Azot oksit emisyonları:** Linyit yakımı sonucu oluşan azot oksit (NO_x) emisyonları, kazan tasarımı, yakma konfigürasyonu ve hava giriş

seviyesinin bir fonksiyonudur. Kazanların çoğunda, yakma konfigürasyonundan bağımsız olarak, düşük yakma havası girişi, düşük NO_x emisyonu olarak sonuç verir. Linyit yakmalı kazanlarda, yakma havası miktarının azaltılması kül kirlenme potansiyelini etkileyebilir (Atay 2019).

- **Organik bileşikler:** Linyitin yapısında bulunan hem de tam yanmanın olmaması ile ortaya çıkan, uçucu, yarı uçucu ve yoğunlaşabilen organik bileşiklerdir. Organik emisyonlar öncelikle yanmamış buhar faz hidrokarbonların kirletici sınıfı kriteriyle sınıflandırılırlar. Bu emisyonlar, alkenleri, aldehitleri, alkoller ve benzen türevlerini içerir (Atay 2019).
- **İz metaller:** Linyitin yanarken iz metaller yayılma gösterir. Yayılan metalin miktarı, genellikle metalin kimyasal ve fiziksel özelliklerine, linyitin içeriğindeki metal yoğunluğuna, yakma koşullarına, kullanılan partikül ölçüm aletinin tipine ve partikül boyutunun bir fonksiyonu olarak toplanabilme verimine bağlıdır (Atay, 2019).

Kazandan çıkan gaz ve tozun temizlenmesi ile kazandaki çekiş koşullarının dengelenmesi baca gazı sistemi ile sağlanmaktadır. Baca gazı sistemi içerisinde elektrostatik filtreler, fanlar, azotoksit arıtma, kükürtdioksit arıtma ve bir baca bulunmaktadır. Toz tutmaya yarayan elektrostatik filtreler %95 - 99 oranında verimle çalışmakla birlikte bir termik santralin en sık arızalanan üniteleri oluşturmaktadırlar. Kömürün yanması sırasında oluşan baca gazları arıtma sisteminde sulandırılmış veya kuru kireç taşı ile temas ettirilerek havaya salınan küllerin bacadan dışarı atılması önlenmeye çalışılmaktadır.

3.YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Life Cycle Assessment, LCA), bir ürün veya hizmetin çevresel etkilerini detaylı olarak ortaya çıkarmaya yarayan niceliksel ve sistematik bir yaklaşım olarak tanımlanabilir. LCA 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. Bu bölümde LCA'nın aşamaları ve bu aşamaların nasıl uygulandığından bahsedilmiştir. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirme yöntemleri ve etki kategorilerine göre sayısal hesaplamaların yapıldığı yazılımlar hakkında bilgi verilmiştir.

3.1. LCA'nın Standardizasyonu ve Aşamaları

LCA çalışmaları ISO 14040 ve 14044 standartlarına göre yürütülür. ISO 14040 standardı, Yaşam Döngüsü Değerlendirme Prensipler ve Çerçeve adıyla ürünlerin ve sistemlerin çevresel etkilerinin değerlendirilmesi ve bu etkilerin azaltılmasını sağlamaya yönelik geliştirilen LCA yöntemini ve kullanım alanlarını tanımlamaktadır. ISO 14044 standardı ise LCA Gereksinimler ve Yönergeler adıyla LCA'nın aşamalarını tanımlayan bir kılavuz görevi görmektedir. LCA'lar hedef ve kapsam tanımı, envanter analizi, etki değerlendirmesi ve yorum olmak üzere dört aşamadan oluşur.

3.1.1. Hedef ve kapsam tanımı

Bir Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi çalışmasının ilk aşaması hedef ve kapsam tanımının yapılarak işlevsel birim ve sistem sınırlarının belirlenmesidir. Hedef tanımında çalışmanın neden yapıldığı, ulaşılmak istenen hedefler, LCA raporunun sunulacağı hedef kitle ve karşılaştırma yapılıp yapılmayacağı hakkında bilgi verilir. Kapsam tanımında ise değerlendirilecek ürün veya süreç sisteminin sınırları tanımlanır ve tüm varsayımlar detaylandırılır.

3.1.2. Yaşam döngüsü envanter analizi

Üzerinde çalışılan sistem dahilindeki tüm girdi ve çıktı envanterinin oluşturulduğu basamaktır. Oluşturulan envanter, çalışmanın hedefinin gerçekleştirilmesi için gerekli tüm verileri içermelidir. Bu veriler temel olarak enerji ve hammadde girdileri; oluşan

ürünler, yan ürünler ve atıklar; suya ve toprağa tüm deşarjlar ve tüm diğer çevresel boyutlar şeklinde sıralanabilir. Bunlar haricinde hammadde üretimleri ve işletmeye getirilme şekilleri, getirilme mesafeleri, bu süreçte tüketilen yakıt, elektrik vb. miktarları; işletmede üretilen ürünün tüketiciye ulaştırılması sürecinde gerçekleştirilen tüm operasyonlar ile temizlik süreçlerinde tüketilen kimyasal çeşitleri ile miktarları da incelenmesi gereken verilere dahil edilir. Elde edilen tüm veriler belirlenen fonksiyonel birim temelinde incelenmelidir (Uysal, 2022).

3.1.3. Yaşam döngüsü etki analizi

Çevresel etkilerin öneminin vurgulandığı, envanter analizi sonuçlarını kapsayan, sonuçların yorumlanması için gerekli bilgiyi sağlayan basamaktır. Envanterde bulunan tüm girdi ve çıktılar belirli kategorilere göre sınıflandırılır ve her kategorideki girdi ve çıktılar belirli indikatörlere modellenir. Bu basamağın zorunlu unsurları incelenecek etki kategorilerinin seçilmesi, kategori indikatörlerinin ve karakterizasyon modellerinin belirlenmesi, envanter sonuçlarının saptanması ve sınıflandırılması, kategori indikatör sonuçlarının hesaplanması (karakterizasyonu) olarak sıralanabilir. Bunun yanında bu basamağın opsiyonel unsurları ise kategori indikatör sonuçlarının normalizasyonu, sonuçların gruplandırılması ve ağırlıklandırılması ile veri kalite analizleridir (Uysal, 2022).

Bir yaşam döngüsü etki analizini gerçekleştirmek için kullanılacak farklı yöntemler bulunmaktadır. Bunlar sürekli farklı metodolojilere ait farklı gruplar tarafından araştırılıp geliştirilmiş olup CML, TRACI, ReCiPe, Eco Indicator 99, EDIP ve Impact 2002 gibi yöntemler mevcuttur.

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, ekotoksosite) 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 LCA'deki emisyon alanları arasındaki farklılıkları göz önünde bulundurmamak her zaman mümkün olmamakta ve istenmemektedir (Taşkın, 2018).

TRACI metodolojisinde etki kategorileri, neden-sonuç ilişkisi içinde modellemenin kesinliklerine ilişkin daha yüksek bir toplumsal anlaşma 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.

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 (Taşkın, 2018):

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 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

Çalışmanın amacına bağlı olarak değişmekte olup, etki kategorileri ve etki değerlendirme yöntemlerinin seçimi, çalışmanın amaç ve kapsamında verilmelidir (Taşkın 2018).

Küresel Isınma Potansiyeli

Karbon ayak izi, iklim değişikliği ve sera gazı emisyonları küresel ısınma potansiyeli kategorisi altında incelenmektedir. Fonksiyonel birim başına meydana gelen sera gazı emisyonu (CO_2 , CH_4 , N_2O vb.) miktarı olarak tanımlanmakta olup kg CO_2 ed. birimi ile ifade edilmektedir. Meydana gelen sera gazı emisyonları küresel ısınmaya sebebiyet vermektedir. Fosil yakıt kullanımı ve termal enerji tüketimi ile doğrudan bağlantılıdır (Uysal, 2022).

Asidifikasyon Potansiyeli

Çevrede asitlik etkisine ve asit yağmurlarına sebep olan emisyonların (sülfür oksitler, oksijen oksitler, amonyak vb.) ölçüsü şeklinde tanımlanmakta olup kg SO_2 ed. birimi ile ifade edilmektedir.

Ötrofikasyon Potansiyeli

Arazilerde gübre kullanımı gibi çevrede ötrofikasyona sebep olan emisyonların ölçüsü şeklinde tanımlanmaktadır. Genellikle doğrudan fosfat, nitrat, nitrojen, amonyak ve kimyasal oksijen gereksinimi yüksek madde emisyonları sonucunda oluşur ve birimi kg PO_4^{-3} eşd şeklindedir. Ötrofikasyon sonucunda sucul fauna ve florada bulunan pek çok canlı türünde toplu kayıplar gerçekleşir. Deniz su ötrofikasyonu çoğunlukla atık su arıtma sistemlerinden nitrik asit kullanımına bağlı olarak sulara nitrojen içerikli madde emisyonları olup kg N eşd birimi ile ifade edilmektedir. Temiz su ötrofikasyonu fosfor emisyonları ile atık su arıtma sistemleri ve elektrik enerjisi üretimi için gerekli maden aktiviteleri sonucu oluşan fosfor emisyonları sonucunda oluşmakta olup kg P eşd. birimi ile ifade edilmektedir.

Fotokimyasal Ozon Oluşum Potansiyeli

Fotokimyasal ozon oluşumu (kg C₂H₄ ed.) bu kategori altında incelenmektedir. Ekosistemi, insan sağlığını ve mahsülleri etkileyen reaktif maddelerin, özellikle de ozon oluşumunun ölçüsü şeklinde tanımlanmakta olup kg metan olmayan uçucu organik maddeler (kg NMVOC) birimi ile ifade edilmektedir. Özellikle ulaştırma ve üretim basamaklarına bağlı yanma tepkimeleri sonucu gerçekleşen emisyonlardır (Kim vd., 2014). Atmosferde nitrojen oksitler ve uçucu organik maddeler bulunduğunda, güneş ışığı varlığında ozon oluşumu gerçekleşir. Düşük miktarlarda ozon üretimi mahsüllerde zarara ve başta astım olmak üzere pek çok solunum rahatsızlığına sebebiyet vermektedir (Uysal, 2022).

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 değerlendirilmiştir. Bayrak (2014)'ın 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.

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.

3.1.4. Yorum

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.

4. KONUSYLA İLGİLİ LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Bu bölümde kömürle çalışan termik santrallerin ele alındığı LCA çalışmalarına yer verilmiştir.

Jung vd. (2022), bu çalışmada Kore'deki Taean kömür santralının gerçek verilerine dayanarak, ikincil veri düzeyinde LCA verilerini kullanan bir analiz modeli oluşturmuşlardır. Oluşturulan yaşam döngüsü envanterlerinden, modellenen Taean kömür santrali ilk olarak çevresel etkilerine göre değerlendirilmiştir. Taean modeline CO₂ yakalama modülü uygulanarak küresel ısınma potansiyelinin %78 oranında azaltılabileceği bulunmuştur. Bu nedenle, termik santral gibi önemli bir emisyon kaynağından CO₂ yakalama modülü uygulanmasının, 2050 Düşük Emisyonlu Kalkınma stratejisinde hedeflenen sera gazı azaltımına ulaşmak için etkili bir çözüm olduğu doğrulanmıştır. Ayrıca, CO₂ yakalama modülünün kömür santraline uygulanması için çevresel etki değerlendirilirken, hem zaman hem de ülke karakterizasyon faktörünün entegre edilmesinin önemi vurgulanmıştır. LCA metodolojisinin yardımıyla, hava kirletici kontrolü ve CO₂ yakalama modüllerinin uygulanmasının, çevresel düzenleme standartlarıyla sera gazı azaltımına ulaşmak için etkili bir çözüm olduğu doğrulanmıştır.

Tao vd. (2022), Çin'deki kömür madeninin, madencilik süreci üzerine bir LCA çalışması yapmışlardır. Arka plan verilerini sağlamak için Ecoinvent v3 veri tabanı kullanılmış ve belirsizlik bilgisine sahip orta nokta sonuçları ReCiPe Midpoint (H) yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Orta nokta sonuçlarını normalleştirdikten sonra, fosil tükenmesi en baskın çevresel etki kategorisi olarak belirlenmiş ve bunu deniz ekotoksitesitesi, tatlı su ekotoksitesitesi, iklim değişikliği, tatlı su ötrofikasyonu ve insanlar üzerine olan toksisite izlemiştir. Kömür madenciliği faaliyetlerinin; çelik, elektrik tüketiminin ve maden havalandırmasının, yukarıda belirtilen çevresel etki kategorilerine neden olan ve dikkat gösterilmesi gereken kilit süreçler olduğu gösterilmiştir. Duyarlılık analizine göre, çevresel sorunları ele almak için birincil önlemler madencilik faaliyetlerini azaltmak, kömür madenciliği ve kullanımının verimliliğini artırmak olduğu ortaya çıkmıştır.

Peng vd. (2021), bu çalışmada, ilk kez kömürle çalışan enerji üretim süreçlerinden kaynaklanan doğrudan ve dolaylı VOC emisyonlarını, LCA aracılığıyla kapsamlı bir şekilde değerlendirmişlerdir. Sonuçlar, kömür madenciliğinden, kömürle çalışan enerji üretim sistemlerinden, baca gazı temizleme sistemlerinden ve atık bertaraf sistemlerinden

kaynaklanan VOC emisyonlarının sırasıyla; $2,31E-03$ ile $1,10E-02$, $2,24E-03$ ile $1,46E-02$, $2,38E-03$ ile $2,36E-03$ ve $1,30E-05$ ile $1,33E-05$ kg/MWh olacağı belirlenmiştir. Bir bütün olarak kömürle çalışan enerji üretim sürecinden kaynaklanan yaşam döngüsü VOC emisyonları, hava kirliliği kontrol cihazlarının etkileri dikkate alınmadan $1,78E-02$ ile $9,85E-02$ kg/MWh olarak hesaplanmıştır. Hava kirliliği kontrol teknolojileri uygulanırsa bu değerin $6,95E-03$ 'ten $2,80E-02$ kg/MWh'ye düşürüleceği görülmüştür. Dolaylı emisyonlar, esas olarak kömür madenciliği ve baca gazı arıtma sisteminden kaynaklanan yaşam döngüsü VOC emisyonlarının %48,46-68,13'ünü oluşturmuştur. Makale ayrıca, temel girdi değişkenlerinin değişiminin genel VOC emisyonları üzerindeki etkisini de analiz etmiştir.

Rashedd vd. (2021), Pakistan da süperkritik kömür yakıtlı termik santralde elektrik üretiminin süreçlerini LCA yöntemi ile analiz etmişlerdir. 1 MWh elektrik üretimi fonksiyonel birim seçilmiştir. Sonuçlara göre, iklim değişikliği potansiyeli kategorisinde en yüksek etkiyi ($7,41E+02$ kg CO₂ ed.) gösterirken, en düşük etki ise stratosferik ozon incilmesi kategorisinde kaydedilmiştir ($8,27E-08$ kg CFC-11 ed.). Genel olarak, bu enerji santrali, daha temiz süper kritik enerji üretim teknolojisi, yüksek termal verimlilik, daha az CO₂ emisyonu, modern kirlilik izleme ve yönetim sistemi nedeniyle eko-ayak izini etkili bir şekilde azaltmıştır.

Rocha vd. (2021) üretilen elektriğin çevresel etkisini değerlendirmek için kömürle çalışan elektrik santrallerine exergoçevresel analiz uygulamışlardır. Buhar koşullarıyla ilgili iki farklı teknoloji hem ekserji hem de çevresel açıdan değerlendirilmiştir. Kömür bileşiminin değiştirilmesinin, ürünlerin çevresel etki oranlarını nasıl etkilediğini değerlendirerek duyarlılık analizi yapılmıştır. Santrallerin toplam ekserji verimliliği, kritik altı için %35,8 ve süper kritik için %37,8 olmak üzere önemli bir değişim göstermiş ve bu teknolojik yeterliliğin teşvik edilmesinin avantajını ortaya koymuştur. Santrallerde üretilen elektriğin çevresel etki oranları kritik altı ve kritik üstü için sırasıyla 48,26 mPts/kWh ve 45,50 mPts/kWh'dir. Süperkritik teknoloji kullanımı ile elde edilen toplam çevresel etki oranındaki azalma %5,7 olmuştur. Ayrıca, kirleticilerin oluşumunun, toplam etki oranının yaklaşık %60'ından sorumlu olan ana bileşeni olduğu ve bu nedenle, duyarlılık analizi ile görülebileceği gibi, yüksek kaliteli yakıt bileşiminin kullanılmasının gerekli olduğu gösterilmiştir. Kömürle çalışan santraller için teknolojiler ile ilgili olarak, süper kritik ve ultra süper kritik sistemlerin, yakıt kaynağının daha iyi enerji kullanımını sağlayarak çevreye zararlı etkileri en aza indirmek için çok uygun alternatiflerden

oluştugu sonucuna varılmıştır. Genel olarak kazan malzemeleri, türbinler ve borular ile ilgili daha fazla ilerlemenin sistemde daha yüksek sıcaklıklara ve basınçlara ulaşmayı mümkün kılacağı ve sonuç olarak daha yüksek verimlilik ve daha düşük çevresel etki ile sonuçlanacağını belirtmişlerdir.

Zhu vd. (2020), Çin'de kömürle çalışan termik santrallerden elektrik üretiminin yaşam döngüsü tabanlı su ayak izini değerlendirmişlerdir. 2016 yılında Çin'de kömürle çalışan elektrik üretimi ile il sanal su tüketimini ve bunun su kalitesi üzerindeki etkisini nicel olarak analiz etmek için uygulanmıştır. Sanal su akışı analizine göre, Kuzeybatı Çin, ülkedeki kömürle çalışan enerjinin ana tedarikçisidir; ancak bu bölge de su kıtlığı mevcuttur. Bu çalışmanın bulguları, Kuzeybatı Çin'de gelecekteki enerji planlamasında enerji gelişimine yönelik başlıca zorlukları ve su kaynakları sınırlamalarının dikkate alınması gerekliliğini vurgulamıştır. Gelecekteki çalışmalarda, enerji ve su geliştirme planlarının sürdürülebilirliğini sağlamak, enerji ve su kullanım gereksinimlerini aynı anda azaltmak için avantajlı enerji ve su geliştirme yolları araştırılması gerektiği vurgulanmıştır.

Dunmade vd. (2019), Güney Afrika'daki bir enerji santralinin kömür yakma sürecinin potansiyel çevresel etkileri hakkında modern bir LCA perspektifi önermişlerdir. Bu çalışmada, kömür üretimi, kömürün toz haline getirilmesi, su kullanımı ve kül yönetimi, elektrik üretimi için kömür yakma işleminde önemli noktalar olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada, küresel ısınma potansiyeli, fotokimyasal ozon oluşum potansiyeli, ötrofikasyon potansiyeli ve asidifikasyon potansiyeli olmak üzere dört etki kategorisi ele alınmıştır. Kömür prosesi, küresel ısınma için % 95, ötrofikasyon için % 4, asidifikasyon potansiyeli için % 1 ve fotokimyasal ozon oluşumu için %1'den az bir değere sahip olmuştur. Sonuç olarak, belirlenen önemli noktalarda ekolojik ayak izlerini en aza indiren bir süreç optimizasyonunun, enerji santralinde oldukça önemli olduğu belirlenmiştir. Kömür temini sürecinin çevre üzerindeki potansiyel etkilerini azaltmak için olası iyileştirmeler arasında; yakındaki kömürün tedarik edilmesi, kömürün trenle % 100 taşınması, külden değerli ürünler üretilmesi ve verimli bir su geri dönüşümü olduğu bulunmuştur. Sonuç olarak, kömür sürecinin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla değiştirilmesinin, Güney Afrika'da çevresel sürdürülebilirliği sağlayacağı ortaya konulmuştur.

Kabayo vd. (2019), Portekiz'de kilit elektrik üretim sistemleri için gerçekleştirilen LCA'nın, önemli olan olumsuz etki alanlarını vurgulamışlardır. Fosil yakıt bazlı

sistemlerin çoğu çevresel kategoride en olumsuz (yani en yüksek) etkileri ürettiği bulunmuştur. Özellikle, yakıtın yanması nedeniyle kömürün birkaç kategoride en yüksek etkiye sahip olduğu tahmin edilmiştir. Yenilenebilir sistemler genellikle daha düşük çevresel etkiler üretirken, bazı sistemler şu kategorilerde en yüksek olanı belirlemiştir: metal tükenmesi (rüzgar ve fotovoltaik); tatlı su ekotoksitesi ve insanlar üzerine olan toksite kanserojen olmayan (fotovoltaik); ve su kıtlığı ayak izi (büyük hidro) dur. Fosil tabanlı sistemlere yeni yatırımlar çevresel nedenlerden ötürü daha fazla teşvik edilmemekle birlikte, Portekiz'deki elektrik sisteminin genel sürdürülebilirliğini arttırmak için yenilenebilir tabanlı sistemlere yönelik hangi yatırımlara öncelik verilmesi gerektiği belirsizdir. Çok Kriterli Karar Analizi araçları, ilgili paydaşların farklı öncelikleri dikkate alınarak değerlendirilen çoklu göstergelerden karmaşık bilgileri toplayarak karar verme sürecine yeni bilgiler getirebileceği belirtilmiştir.

Orfanos vd. (2019), ülkede mevcut faaliyet gösteren farklı enerji üretim teknolojileri ve birbirine bağlı elektrik iletim sistemi göz önünde bulundurularak, Yunanistan elektrik şebekesinin entegre bir yaşam döngüsü değerlendirmesini sunmuşlardır. Hem üretim hem de iletim sistemlerinin enerji ve çevre değerlendirmesi SimaPro kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mevcut çalışma, çevresel olarak olumsuz ana etkilerin elektrik üretim sektörü (>%60) ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Elektrik iletiminin, üretime kıyasla %70-90 daha düşük yaşam döngüsü etkilerine sahip olduğu bulunmuştur. İletim güç kayıpları, sera gazı emisyonlarına en önemli katkıyı sağlarken, iletim hatları altyapısı ve transformatörler çok daha düşük yaşam döngüsü etkisi oluşturmuştur. Gelecekteki elektrik arzında yenilenebilir kaynakların yüksek paya sahip olacağı, önemli ölçüde daha düşük sera gazı emisyonları oluştururken, yenilenebilir enerji kaynaklarının inşaat aşamasının yoğunluğu nedeniyle birincil enerji talebinin artması beklenilmektedir.

Silva vd. (2018), Brezilya'daki bir yerüstü madeninden elde edilen kömürün yaşam döngüsüne ilişkin ilk envanter ve çevresel etki çalışmasını sunmuşlardır. Bu envanter, literatürde böyle bir bilgi bulunmadığından özellikle sera gazlarının etkisi göz önünde bulundurularak LCA çalışmalarına bir veri tabanı görevi görmek üzere geliştirilmiştir. Kömür yaşam döngüsü emisyonları, 3,29E-2kg CO₂ ed. olmakla birlikte doğrudan sera gazının %98,3'ünü oluşturmaktadır. Bu etkinin büyük kısmı, açık madencilik ve madencilik sonrası kömürün kırma ve taşıma işlemleri sonucunda açığa çıkan metan emisyonlarından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, duyarlılık analizi sonuçları, dikkate alınan

girdiler açısından motorin tüketiminin yaşam döngüsü emisyonunun en etkili parametresi olduğunu göstermiştir.

Wang, vd. (2018), tarafından kömür yakıtlı elektrik üretim teknolojisinin yaşam döngüsü değerlendirilmiş, yaşam döngüsü zincirinin kaynak tüketimi ve kirleticisi emisyonları analiz edilmiştir. Fonksiyonel birim 1 MWh güç üretimi olarak belirlenmiştir. En büyük çevresel etkiye sahip emisyonlar; CO₂, CO, SO₂, partikül madde, kimyasal oksijen ihtiyacı ve kazan külü olarak belirlenmiştir. Duman ve tozun çevresel etkiye katkı oranları %63,33 ile en yüksek düzeydedir. Çevresel etki, kömür yakıtlı elektrik üretiminin yaşam döngüsünün aşamalarında farklı çıkmıştır. Küresel ısınmanın orta nokta etki kategorisi, kömür madenciliği aşamasında ve enerji üretim aşamalarında en büyük etkiye sahipken, duman ve tozun kömür yıkama ve taşıma aşamalarında büyük etkisi olmuştur. Emisyon azaltımı için yeni tesislerdeki uygulamaların güçlendirilmesi, kirleticilerin emisyon standartlarının iyileştirilmesi ve kömürle çalışan termik santrallerde elektrik üretiminin süreç yönetiminin güçlendirilmesi, çevresel etki faktörlerinin neden olduğu çevresel yükü azaltmanın etkili yolları olduğu belirtilmiştir.

Atılgan ve Azapagic (2016), yaptıkları çalışmada ilk kez Türkiye'de elektrik sektörünün sürdürülebilirliğindeki, elektrik karışımındaki fosil gücünün payı azaltıldığında elde edilecek önemli gelişmeleri ölçmüşlerdir. Halihazırda elektrik karışımında bulunan farklı teknolojilerin çevresel, ekonomik ve sosyal etkilerini dikkate alarak Türkiye elektrik sektörünün yaşam döngüsü sürdürülebilirliğini değerlendirilmiştir. Bulgular, ülke için en sürdürülebilir elektrik seçeneklerini belirlemek ve elektrik sektöründe sürdürülebilirliği geliştirmeye yönelik politika önerilerinde bulunmak için kullanılacağı belirtilmiştir. Fonksiyonel birim Türkiye'de 1 kWh elektrik üretimi seçilmiştir. Beşikten mezara yaklaşımı uygulanmıştır. Sekiz enerji kaynağının (linyit, taş kömürü, gaz, büyük ve küçük rezervuar, rüzgar enerjisi, nehir tipi hidroelektrik ve jeotermal) çevresel etkilerini karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları linyitten gelen elektriğin en az sürdürülebilir seçenek olduğunu göstermiştir. Bunun tek istisnası, ekonomik yönün en önemli olduğu düşünülerek, bu durumda orta sıralama seçeneği haline gelmiştir. Bu nedenle, ana enerji sürücüsü enerji güvenliği ise, mevcut linyit santrallerinin sürdürülebilirlik performansı iyileştirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Yenilenebilir elektrik kaynaklarının fosil yakıtlara alternatif olarak şebekeye daha fazla nüfuz etmesi, Türkiye'nin ithal yakıtlara olan bağımlılığını azaltmak, arz güvenliğini

artırmak ve elektrik sektöründen kaynaklanan çevresel etkileri azaltmak için önemli olduğu belirtilmiştir.

Burchart-Korol vd. (2016), Polonya'da taş kömürü madenciliği faaliyetlerinin değerlendirilmesinde LCA uygulamışlardır. Yaşam döngüsü yaklaşımı ile elde edilen sonuçlar, geleneksel çevresel değerlendirmede dikkate alınan üç doğrudan çevresel yönün (yani drenaj suyu , atıkların işlenmesi ve atmosfere salınan metan emisyonları) dışında, kömür madenciliği faaliyetleriyle ilişkili en önemli çevresel etkilerin şebekeden gelen elektriğin dolaylı etkisi ile çelik ve ısı kullanımı olduğunu ortaya koymuştur. Madencilik alanı dışında meydana gelmelerine rağmen, bu elementlerle ilişkili üretim süreçleri bir kömür madeninin yaşam döngüsüne dahil edilmiş ve çevreyi büyük ölçüde etkilemiştir. Kömür madenciliği proseslerinin çevresel performansını artırmak için metan emisyonları ile elektrik, ısı ve çelik tüketiminin azaltılması gerektiği tespit edilmiştir. Kömür madenlerinde özellikle havalandırma işlemlerinden ve elektrik üretiminden kaynaklanan metan emisyonlarının azaltılmasının, sera gazı emisyonlarının azalmasına katkıda bulunabileceği tespit edilmiştir.

Dzikuć ve Piwowar (2016), Polonya'da linyit, kömür ve biyokütlenin birlikte yakma yöntemini kullanarak elektrik enerjisi üretimi ile ilgili en önemli hususları açıklamışlardır. Makalede, biyokütle birlikte yakma yöntemini kullanarak kömürden elektrik enerjisi üretiminin çevresel etkisini değerlendirmek için Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) yöntemi kullanılmıştır. Polonya'daki büyük kömür ve linyit kömürlü elektrik santrallerinden elde edilen verilerin analizi sunulmuştur. Hesaplanan çevresel etki tahminleri, çevresel hasarı sınırlandıracak çözümlere dikkat edilmesi gerektiğini göstermiştir. Kömürle birlikte biyokütlenin yanma olasılığı belirtilmiştir. Polonya'da enerji üretimi ile ilgili mevcut altyapı, düşük maliyetler söz konusu olduğunda, Polonya'nın enerji güvenliğini artırmak için nispeten ucuz olan biyokütle potansiyelinin kullanılmasını sağlayacağını belirtilmiştir. Kömürle birlikte yanan biyokütle, fosil yakıtların enerji üretiminde kullanımını azaltmanın en ekonomik yolu olduğu sonucuna varılmıştır.

Günkaya vd. (2016), bu makalede Türkiye'nin elektrik üretiminin çevresel yüklerini belirlemek için bir LCA metodolojisi uygulamasını sunmuşlardır. Örnek olay olarak 2012 ve 2023 yıllarına ait Türkiye elektrik üretim verileri kullanılmıştır. Elektrik üretimi için fonksiyonel birim 1 kWh elektrik üretimi seçilmiştir. LCA hesaplamaları CML-IA (v3.00) verileri kullanılarak yapılmış ve sonuçlar Monte Carlo simülasyon

analizine SimaPro 8.0.1 yazılımında yerleşik Monte Carlo fonksiyonuna göre yorumlanmıştır. Sonuçlar, fosil yakıt tüketiminin sadece küresel ısınmaya katkıda bulunmadığını, fakat aynı zamanda fabrika altyapısı için hammadde tüketimine bağlı olarak abiyotik tükenmenin elementel bazında da etkileri olduğunu göstermiştir. Tüm etki kategorileri dikkate alındığında hidroelektrik enerji seçeneği, elektrik üretiminde jeotermal ve güneş enerjisi seçeneklerinden sonra en düşük üçüncü seçenektir. Bununla birlikte, 2023 yılında Türkiye'nin dikkate değer toplam enerji talebinin yalnızca küçük bir kısmını (yaklaşık %1,2) karşılayacak olan jeotermal ve güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları içinde de en küçük paya sahip olacağı öngörülmüştür. Planlanan hidroelektrik enerjinin elektrik üretimine katkısı 2023 yılı sonuna kadar tüm doğal kaynakların yaklaşık %40'ı (154.000 GWh) olacağı öngörülmüştür. Sonuç olarak, jeotermal ve güneş enerjisi ülke çapında bir enerji arzı yerine yerel bir kaynak olarak değerlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Bayrak (2014), LCA yöntemi kullanılarak kömürün sahadan çıkarılıp termik santrale verilinceye kadar olan aşamalarına (madencilik, kömür hazırlama ve zenginleştirme ve taşıma) ait çevresel etkileri araştırmıştır. Bu araştırmada Türkiye'deki termik santrallere kömür veren maden sahalarından temin edilen saha verileri kullanılmıştır. Arazi kullanımı potansiyeli için erozyon direnci, mekanik filtrasyon, yeraltı suyu birikimi ve biyolojik üretim olmak üzere dört adet indikatör hesaplanmıştır. İnceleme sonucunda seçilen etki kategorileri için etki sonuçları hesaplanmıştır. Çevreye etkilerin azaltılması için madencilik uygulamalarında iyileştirmeler yapılmıştır. Bu iyileştirmelere göre iyileştirme yüzdeleri hesaplanmıştır. Bu iyileştirmeler; iş makinesi çalışma kapasitelerinin artırılması, yıkama prosesi atık suyunun susuzlaştırılması, atığın geri kazanımı, biyodizel karışımı yakıt kullanımı ve yolların sulanması gibi madencilik faaliyetlerinde uygulanabilir değişiklikleri içermektedir.

Maarten vd. (2014), gelecekteki bir akıllı şebekenin avantajlarından tam olarak yararlanmak için bir karar destek aracı sağlamak için 1 kWh üretilen elektriğin saatlik CO₂ içeriğine ilişkin net bir bilimsel arka plan sağlamışlardır. 2011 yılında Belçika elektrik üretim zinciri, hammadde çıkarımından elektrik üretimine kadar değerlendirilmiştir. Hesaplanan CO₂ içeriği yalnızca bir elektrik santralindeki elektrik üretimiyle ilgili faaliyetleri değil, aynı zamanda altyapının inşası ve yakıt tedarik zinciriyle ilgili karbon emisyonlarını da içereceğini ortaya koymuştur. Özellikle rüzgar, hidro, güneş ve nükleer gibi dönüşüm emisyonu olmayan santraller için hammadde

üretimi ve santralin inşası sırasında oluşan emisyonların dahil edilmesi büyük önem taşımıştır. Dikkate alınan hammaddeler; nükleer yanıcı, petrol, kömür, doğal gaz, biyoatık, yüksek fırın gazı ve odun seçilmiştir. Konvansiyonel fosil yakıtlar (kömür, petrol ve doğal gaz) ile ilgili olarak, ürünün tüm tedarik zinciri göz önünde bulundurulmuş ve kömürün en yüksek Küresel Isınma Potansiyeli'ne sahip olduğu ortaya konulmuştur.

Scannapieco vd. (2014), Çevresel Etki Değerlendirmeleri sırasında olduğu gibi, çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği açısından en iyi santralin seçilmesi sürecinde karar vericilere yardımcı olacak bir araç önermişlerdir. Bu prosedür aracılığıyla çevresel etkilerin değerlendirilmesi gerekmektedir. Santrallerin faaliyete geçirilmesiyle ortaya çıkabilecek bu etkiler bir LCA ile değerlendirilmiştir; ardından, karar vericilere en iyi enerji santralini seçmelerine yardımcı olacak bir araç önermek için bir AHP geliştirilmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada karar vericilerin desteklenmesi için bir araç önerilmiştir: yedi farklı enerji santralinden (kömür, petrol, gaz, nükleer, rüzgar, güneş ve hidroelektrik) LCA verilerine dayanmıştır. Önerilen prosedür farklı enerji santrallerini değerlendirmeyi, tesis yapımı ve işletme aşamalarında en çevreci olanı tespit etmeyi amaçlamıştır. Sonuç olarak, yenilenebilir yakıtlar güvenilirlik ve çevresel etkilerin azaltılması açısından daha iyi performans gösterebilir. Yenilenebilir kaynaklar daha yüksek sermaye harcamalarına yol açabilse de işletme ve bakım maliyetleriyle ilgili ekonomik faydalar karşı konulmaz olabilir. Sunulan sonuçlara dayanarak, çevreyi iyileştiren yenilenebilir yakıtların geliştirilmesine yönelik çalışmalar devam edilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

Çetinkaya vd. (2012), İzmir, Torbalı'daki bir tekstil fabrikasında kullanılan bir akışkan yataklı buhar tesisi için bir LCA çalışması gerçekleştirmiştir. Yüksek kükürt içeriğine sahip olan soma linyiti birincil yakıt olarak tüketilmiştir. LCA adımları, kömür madenciliği, kömür taşımacılığı, kömür temizliği, tesis işletmesi, kükürt gidermede kireçtaşı kullanımı, kül ve kalsiyum sülfatın toprağa verilmesi olarak belirtilmiştir. Madencilik ve düzenli depolama ekipmanları için üretim ve hizmetten çıkarma, karbondioksit eşdeğeri ve enerji tüketimi açısından değerlendirilmiştir. Değerlendirmede, kullanım ömrü 30 yıl olarak belirtilmiştir. Toplam karbondioksit eşdeğeri emisyon değerleri, başlıca kömür madenciliği, nakliye, tesis inşaatı, tesis işletmesi ve düzenli depolama kategorileri için, ömür boyu sırasıyla 12,9, 0,0011, 0,00058, 298,9 ve 0,0024 Mton olarak belirlenmiştir. Ana karbondioksit emisyon

kaynağının buhar tesisinin çalışması olduğu ve enerji kullanımı üzerinde büyük etkisi olan ana malzemelerin çelik ve beton olduğu tespit edilmiştir. Bu emisyon oksijen-yakıt yanması gibi teknolojilerle azaltılabileceği belirtilmiştir. Enerji kullanımı kömür madenciliği, kömür temizliği, nakliye, fabrika malzeme imalatı, işletme ve depolama için sırasıyla 18,2, 0,1, 5,6, 16,1, 115,9 ve 3,6 TJ olarak belirlenmiştir.

Felix ve Gheewala (2012), Tanzanya'daki Elektrik Kaynaklarına göre, 2000, 2015, 2020, 2026 ve 2030 yılları için bir yaşam döngüsü yaklaşımı kullanarak Tanzanya'daki merkezi şebekeye bağlı elektrik üretiminin çevresel değerlendirmesini sunmuşlardır. Seçili tüm bu çalışmanın sonuçları etkiler kategorilerinde mutlak yıllara dayalı elektrik üretimi, çevresel etkileri yıllar 2000, 2015, 2020, 2026 ve 2030 karşılaştırırken zamanla önemli ölçüde artmıştır. Seçilen tüm etki kategorilerindeki çevresel yükler 2000–2030 döneminde artacağı beklenmiştir. Artan hidroelektrik kullanımı, elektriğin çevre profilini iyileştirmeye yardımcı olacağı belirtilmiştir. Sonuç olarak, burada sunulan projelere kıyasla fosil yakıtlardan toplam üretim azaltılabilir. Burada modellenen tüm çevresel yükler fosil yakıtlı enerji santralleri için daha yüksek olduğundan, çevresel etki azaltılabileceği belirtilmiştir.

Cui, Hong ve Gao (2012), Çin'de yaygın olarak kullanılan veya teşvik edilen üç kömür bazlı elektrik üretim senaryosunun, yani kritik altı teknoloji (300 MW), süper kritik teknoloji (600 MW) ve ultra süper kritik teknolojinin (1000 MW) çevresel etkisini tahmin etmek için bir yaşam döngüsü değerlendirmesi yapmışlardır. Diğer senaryolarla karşılaştırıldığında, ultra-süper kritik teknoloji, kömür külünün depolama sahasına atılması nedeniyle doğal arazi kullanımı kategorisi dışında, çoğu kategoride önemli ölçüde çevresel faydalar sağlamıştır. Net kömür tüketim verimliliğini optimize etmek, kömür külünü yapı malzemesi olarak yeniden kullanmak, kükürt gidermeyi artırmak ve denitrizasyon sistemi verimliliği ve kömür alıcısından tedarikçiye karayolu taşımacılığı mesafesinin azaltılması, elektrik üretiminin genel çevresel etkisinin azaltılmasında önemli faktör olduğu belirtilmiştir.

E.Santoyo-Castelazo vd. (2011), ilk kez Meksika'da elektrik üretimine ilişkin bir LCA çalışması sunmuşlardır. Meksika'daki elektrik karışımına toplam birincil enerjiye yaklaşık %79 oranında katkıda bulunan fosil yakıtlar hakimdir; yenilenebilir enerjiler %16,5 (hidroelektrik %13,5, jeotermal %3 ve rüzgâr % 0,02) ve geri kalan % 4,8'i nükleer enerjiden kaynaklanmıştır. LCA sonuçları, 225 TWh elektriğin yaklaşık 129 milyon ton CO₂ ed. ürettiğini göstermiştir. CO₂ emisyonları toplam Küresel Isınma Potansiyeli

değerinin yaklaşık %94'ünü oluşturmuş olup sırasıyla %4,2 ve %1,2 CH₄ ve N₂O'dan gelir. Sera gazı emisyonlarının ana kaynağı fosil yakıtlı enerji santrallerinin işletilmesi (yakılması) olup, toplam Küresel Isınma Potansiyeli değerine %87 katkıda bulunmuştur. Diğer çevresel etkilerin çoğunluğu, enerji santrallerinde fosil yakıtların yanmasından kaynaklanmakta olup, ağır fuel oil en fazla katkıda bulunmuştur (% 59-97).

Odeh ve Cockerill (2008), Birleşik Krallık'taki mevcut toz haline getirilmiş kömür santrallerinden kaynaklanan yaşam döngüsü GHG emisyonlarını incelemiştir. Santralin enerji ve malzeme gereksinimlerini tahmin etmek için basit bir model geliştirilmiştir. Ön hesaplamalar, Birleşik Krallık kömür yakıtlı santrali için, yaşam döngüsü emisyonlarının, daha önceki Birleşik Krallık araştırmalarıyla karşılaştırıldığında, üretilen elektriğin 990 g CO₂ed./kWh olduğunu ortaya koymuştur. Bu emisyonların çoğu doğrudan yakıt yanmasından kaynaklanmıştır (882 g/kWh, %89), dolaylı emisyonların %60'ını oluşturan madencilik faaliyetlerinden kaynaklanan metan sızıntısı olarak belirtilmiştir. Toplamda madencilik faaliyetleri (metan sızıntısı dahil) dolaylı emisyonların %67,4'ünü oluştururken, kireçtaşı ve diğer malzeme üretimi ve nakliyesi %31,5'ini oluşturmuştur. Geliştirilen metodoloji, IGCC enerji santraline de uygulanmıştır. IGCC yaşam döngüsü emisyonlarının PC santrallerinden kaynaklanan emisyonlardan %15 daha az olduğu bulunmuştur. Ayrıca, santral parametrelerinin yaşam döngüsü emisyonları üzerindeki etkisi araştırıldığında, verimliliği %35'ten %38'e çıkarmanın emisyonları %7,6 oranında azaltılabileceği belirlenmiştir. Mevcut makale, CCS kullanıldığında, üretim sırasındaki emisyonların, yukarı akış süreçlerinden (yani kömür üretimi ve nakliye) kaynaklanan emisyonların baskın hale geldiği bir seviyeye düşmesinin ve dolayısıyla CCS'nin yaşam döngüsü verimliliğinin mümkün olabileceğini ortaya koymuştur.

Literatür çalışmalarından görüleceği üzere termik santrallerin çevresel etkilerinin LCA yöntemiyle ele alındığı çalışmalar mevcuttur. Diğer yandan, literatürde bu tez çalışmasının amacını oluşturan pulverize toz kömürlü subkritik kazan teknolojisi, pulverize süperkritik kazan, pulverize ultra süperkritik kazan teknolojisi ve akışkan yatak teknolojisinin çevresel etkilerinin karşılaştırıldığı bir çalışma yapıldığı görülmemiştir. Bu açıdan, bu tez çalışması özgün bir değer taşımaktadır.

5. MATERYAL VE METOD

Tezin bu kısmında uygulanan LCA yöntemi, ISO 14040 ve ISO 14044 ilkelerine bağlı olarak hedef ve kapsamın belirlenmesi, envanter analizi, etki değerlendirme ve yorumlama olarak dört aşamada ele alınmıştır.

5.1. Hedef ve Kapsam Tanımı

Bu LCA çalışmasının amacını kömürle çalışan termik santrallerde kullanılan mevcut pulverize toz kömürlü subkritik kazan teknolojisi ve buna alternatif olarak, pulverize süperkritik kazan, pulverize ultra süperkritik kazan teknolojisi ve akışkan yatak teknolojisinin çevresel etkilerinin karşılaştırılması oluşturmaktadır. Çalışmanın fonksiyonel birimi, 1 kWh elektrik üretimi olarak belirlenmiştir.

5.1.1. Sistemlerin tanıtımı

Kömürle çalışan termik santrallerde pulverize subkritik kazan teknolojisi, pulverize süperkritik kazan teknolojisi, pulverize ultrasüperkritik kazan teknolojisi ve akışkan yatak kazan teknolojisi gibi teknolojiler kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan kazan teknolojilerinin açıklamaları alt bölümlerde detaylı olarak açıklanmaktadır.

5.1.1.1. *Pulverize toz kömürlü kazan teknolojileri*

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 kritikaltı (K-altı) (subkritik) ve kritiküstü (süperkritik ve ultra

süperkritik) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Kritikaltı ve kritiküstü kazanların sıcaklık, basınç, güç ve verim aralıklarının karşılaştırılması Tablo 5.1’de verilmiştir.

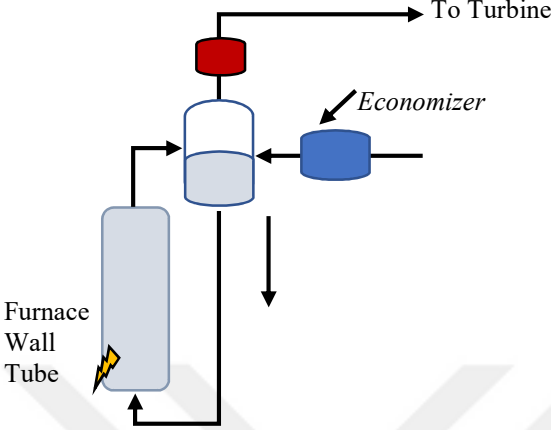
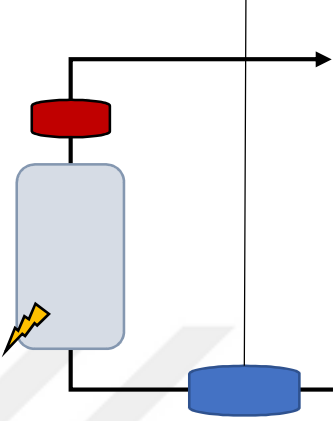
Tablo 5.1. Kritikaltı ve kritiküstü kazanların karşılaştırılması (Taşkın,2018)

Kazan tipi	Kritikaltı (K-altı)	Süperkritik (SK)	Ultra süperkritik
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

Pulverize subkritik kazan teknolojisi

Türkiye de bulunan termik santrallerin çoğunda pulverize subkritik kazan teknolojisi kullanılmaktadır. Subkritik kazanlar, 374°C'ye kadar sıcaklıklarda ve 3208 psi (suyun kritik noktası) basınçta çalışan kazanlardır. Bu kazanlar, sabit buharlaşma uç noktasına sahip bir sistem oluşturur. Bir kritik altı kazan için tipik bir örnek, tambur tipi buhar jeneratörüdür. Kazan içinde, kolonların ısıtılmasıyla sıvının doğal sirkülasyonu sağlanır. Bu yükselticiden çıkan su ve buhar karışımı daha sonra tamburda su ve buhara ayrılır. Su sirküle edilir, su alt köşelerden evaporatör girişine dönerken, buhar kızdırıcı bölmesine akar. Akışkanın doğal sirkülasyona girmesine izin verilirse, uygulama aralığı maksimum tambur basıncı olarak yaklaşık 190 bar ile sınırlıdır. Ancak sirkülasyon bir sirkülasyon pompası kullanılarak yapılırsa (cebri sirkülasyon olarak bilinir), bu aralık genişletilebilir. Bu uzama, tamburdaki buharlaşma son noktasının sabitlenmesi nedeniyle olur. Ayrıca evaporatördeki ve kızdırıcıdaki ısıtma yüzeyinin boyutunu ayarlar. Subkritik kazanın önemli bir dezavantajı, bu kazanlarda kabarcık oluşumunun meydana gelebilmesidir (http-5, 2022). Pulverize subkritik kazan ve pulverize süperkritik kazan sistemlerinin karşılaştırılması Tablo 5.2’ de gösterilmiştir.

Tablo 5.2. *Pulverize subkritik kazan ve pulverize süperkritik kazan sistemlerinin karşılaştırılması (Kömürcü, 2019)*

Kritik Altı (Sub-Critical)	Kritik Üstü (Süper-Critical) ve Ultra Kritik Üstü (Ultra-süper Critical)
Dramlı Kazan	Tek Geçişli Kazan
	
Dram vardır. • Kazan suyu dramı besler. • Kazan suyu kazan duvar borularından aşağı doğru iner ve ısınır. Isınan buhar-su tekrar drama gider. Buhar kazandan ayrılır ve kızdırıcıya gider. Kızgın buhar buradan türbine gider. • Kazandaki sirkülasyonda, duvar borularında ki su ve ısıtma tüplerindeki buhar-su karışımının arasındaki yoğunlukları farkına etki eden yer çekimi harekete sebep olur. • Termik santrallerde maksimum kapasite, dram boyutundan dolayı 600 MWe ile sınırlıdır. • Dram blöfö vardır. • Kazan maliyeti daha düşüktür.	Dram yoktur. • Besleme suyu, süper kritik basınçta doğrudan su formundan buhar formuna dönüşür. • Besleme suyu doğrudan ekonomizere girer ve buradan kazan duvar borularına geçer, kazan duvar borularında ısınan besleme suyu buhar formuna geçer ve buradan kızdırıcıya geçer. Ardından kızgın buhar türbine gider. • Kazanda İki fazlı durum meydana gelir bu yüzden drama ihtiyaç duyulmaz. • Kondensat arıtma sistemi olması zorunludur. • Tek geçişlidir. • Su kalitesi devamlı kontrol altında olmalıdır. • Su analizleri daha kapsamlıdır (toplam demir, toplam bakır) • Kazan maliyetleri çok daha yüksektir. • Kazan tasarımı kullanılan kazan boruları yüksek alaşımlı borulardır.

Pulverize süperkritik kazan teknolojisi

İncelenmiş olan makalelerde yurtdışında çoğu termik santralde süperkritik kömür yakıtlı elektrik santralleri tercih edilmektedir. Kritik altı santrallerle karşılaştırıldığında, tipik olarak daha enerji verimli ve daha çevre dostudurlar. Kritik altı üretim teknolojisine dayalı kömür yakıtlı elektrik santralleri ile karşılaştırıldığında, incelenen santral, %10-11 daha yüksek termal verimliliğe sahip süper kritik süreci kullanır. SC teknolojisi iyi gelişmiştir ve giderek daha fazla endüstriyel kömürle çalışan elektrik santrali tarafından benimsenmektedir (Tanq ve You, 2018). Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) Temiz Kömür

Merkezi, mevcut kritik altı güç ünitelerinin süper kritik veya ultra süper kritik sistemlerle değiştirilmesinin, emisyonların (CO_2) yaklaşık %23 azaltılmasının mümkün olduğunu bildirmiştir. Gerçekte, yalnızca %1 oranında artırılmış bir termal verimlilik, kömürle çalışan güç sistemlerinin daha uzun ömürlü olmasıyla yaklaşık 2,4 Mt CO_2 , 2000 ton NO_x ve SO_2 ve 500 ton PM'yi azaltabilir (Rashedd vd. 2021).

Süper kritik kazanlar 1950 yıllarının sonunda ve 1960 yıllarının başında ilk olarak Amerika da üretilmiş ve 22,11 MPA kritik basıncın üzerinde çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. Avrupa ve Asya da 1990'lı yıllardan beri süperkritik kazanları kullanmaya başlamış ve halen yaygın olarak kullanılmaktadır. Süperkritik kazanlar, sub-kritik kazanlara göre ilk maliyeti yüksek olmasına rağmen yüksek verimlilik, az yakıt tüketimi ve az emisyon değerleri göz önüne alındığında daha avantajlı olmaktadır. 1950'li yıllardaki tasarımlardan sonra 1990'lı yıllarda kritik basınç değeri 31 MPA kadar yükselmiş, fakat sıcaklık değeri 537°C olarak değiştirilmemiştir. Bu şekilde verim %40 civarlarındadır. 1990'lı yılların sonunda sıcaklık değeri de 621°C 'lere çıkarılmış ve verim %44'lere kadar yükselmiştir. Bu yapılan revizyonlarla sadece verimde artış olmamış aynı zamanda yakıt daha az tüketilmiş ve emisyon değerleri azalmıştır.

Kritik nokta, sıvı ve buhar halindeki su arasında net bir ayrım bulunmayan termodinamik bir durumdur. Su, bu duruma 22,1 MPa ve 374°C sıcaklıkta ulaşır. Su, kritik nokta ve üzerinde hemen buharlaşacak ve kızgın su buharı olacaktır. Kritik nokta sıcaklığına ulaşıldıktan sonra basınç değeri ne kadar artarsa su, sıvı hale geçmemektedir. Süper kritik nokta 24,2 MPa ve 566°C 'dir. Bu termodinamik prensibe göre çalışan santrallere süper kritik teknoloji denir. Süperkritik kömür teknolojisinin avantajları aşağıda yer almaktadır:

- Yüksek santral verimliliği sağlar.
- Kazan yapısından kaynaklı santral operasyonlarında esneklik sağlayabilir.
- Basıncın değiştirilmesi ile yük değişimleri kontrol altına alınabilir. Genel olarak termik santrallerde yük kontrolü türbin girişindeki kısma vanası ile yapılır fakat süperkritik santrallerde buhar basıncı ile ayarlama yapılabilmektedir.
- Küçük ısı değişimlerinde hızlı tepki alınır.
- Ana buhar sıcaklıkları yakıt-su oranı ile ayarlanabilir ve kontrol özelliği kolaydır (Bayram, 2020).

Pulverize ultra-süperkritik kazan teknolojisi

ASME parametrelerine göre subkritik sistem verimi % 33-37, süper kritik sistem verimi % 37-42, ultra süper kritik sistem verimi ise % 42 ve üstü olarak tanımlanmaktadır. Sadece sıcaklık ve basınç ultra süper kritik teknoloji için belirleyici değildir, en önemli olan konulardan biri de bu şartlarda çalışacak yüksek alaşımlı çelik malzemenin olmasıdır. Artan sıcaklık ve basınç, malzeme dayanımını azalttığından, montaj aşamasında yaşanan kaynak sıkıntıları ve santralin emre amadeliliği konusundaki riskleri artırmaktadır. Ultra-süperkritik kömür teknolojisinin avantajları aşağıda yer almaktadır:

- Santral veriminde % 1 oranında artış, kömür tüketiminde % 2,5 oranında azalmaya karşılık gelmektedir.
- Çevre açısından ise santral verimindeki % 1 artış, sera gazı salınımının % 2,5 oranında azalması anlamına gelmektedir. Bu hem çevresel açıdan olumludur, hem de tesisinin atık gazı arıtması için daha az kimyasal kullanılmasını sağlar.

Ultra-süperkritik kömür teknolojisinin dezavantajları aşağıda yer almaktadır:

- Malzeme mukavemetiyle ilgili daha kısa sürelerde çatlak, malzeme kopması ve aşınma gibi problemlerle karşılaşmaktadır.
- Montajda kaynak problemleri sıkça yaşanan problemlerdir ve konuyla ilgili yetişmiş personel sıkıntısı vardır.
- Sıcaklığın ve basıncın yükselmesi sadece borularda değil, bu sistem üzerinde bulunan bağlantı elemanlarında, vanalarda ve ilave elemanlarda da daha dayanıklı ve pahalı malzemelerin kullanımını gerektirmektedir.
- Tasarım ve performans çalışmaları da gelişme aşamasındadır ve iyileştirmeler için zamana ihtiyaç vardır. Süperkritik sistem bu anlamda daha da oturmuş ve kendini ispatlamış bir teknolojidir.
- Ultra-süperkritik sistemin yatırım maliyeti daha fazladır. Montajda gecikme yaşanma riski daha fazladır. Performans konusu (emre amadelik ve güvenilirlik) önemle dikkate alınmalıdır (http-6, 2022).

Ultra süperkritik kazan teknolojileri geleceğin teknolojileri olarak karşımıza çıkmaktadır. Zira, bu teknolojiye amaç, buhar parametrelerini kritik değerlerin üzerine çıkarmaktır. Bu değerler; $P_{kritik} = 221,2$ bar, $T_{kritik} = 374,15^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bu amaçla, buhar parametrelerini yükseltmek için uygulanabilecek yöntemlerden birisi yanmayı oksijenle yapmak ve zorlanmış geçişli kazanlar (Benson Kazanları) kullanmaktır.

Kazanda bir buharlaştırıcı yoktur. Çünkü buharlaşma, sıvı-gaz bölgesine uğramadan direk olarak gerçekleşmektedir. Kazanda 2 adet ekonomizer kullanılmıştır. Ekonomizerlerden bir tanesi yanma odasına yerleştirilmiştir. Buradaki amaç, kızdırıcıların yerleştirilmesi durumundaki kavrulmayı önlemektir. Kazanda 3 ara kızdırma yapılmıştır ve bunlar türbinlerden çıkan buharın sıcaklık ve basıncına yeniden yükseltmek için kullanılırlar. Oksijenle yanma sonucunda oluşan çok yüksek sıcaklıklar yanma odasının soğutulması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bunun için yanma sırasında oluşan CO₂ kazana geri beslenir. Böylelikle bir CO₂ döngüsü oluşmuş olur. Bunun dışında kömür kurutmadan gelen yanma gazları ve kazana verilen buhar da yanma odası sıcaklığını düşürücü etki yapar (Erbaş ve Rahim, 2009).

5.1.1.2. Akışkan yatak teknolojisi

Türkiye'de termik santrallerde kullanılan kömürlerin ısı değerleri 1000 kcal/kg ile 3500 kcal/kg değerleri arasında, içerdikleri kül miktarları ağırlıklı olarak % 15 ile %35 arasında değişen linyit kömürleridir (Özdemir vd., 2017). Türkiye’de düşük kaliteli linyit yakan tesisler için akışkan yataklı kazan kullanılması uygundur. 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 atmosferik akışkan yataklı yakma teknolojileri ve basınçlı akışkan yakma teknolojisi olmak üzere iki grupta incelenir:

- Atmosferik akışkan yataklı yakma teknolojileri

Kabarcıklı akışkan yatak (KAY) 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.

Dolaşımli akışkan yatak (DAY) teknolojisi ;

AYK içinde hava hızının yukarıya doğru arttırılması 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.

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

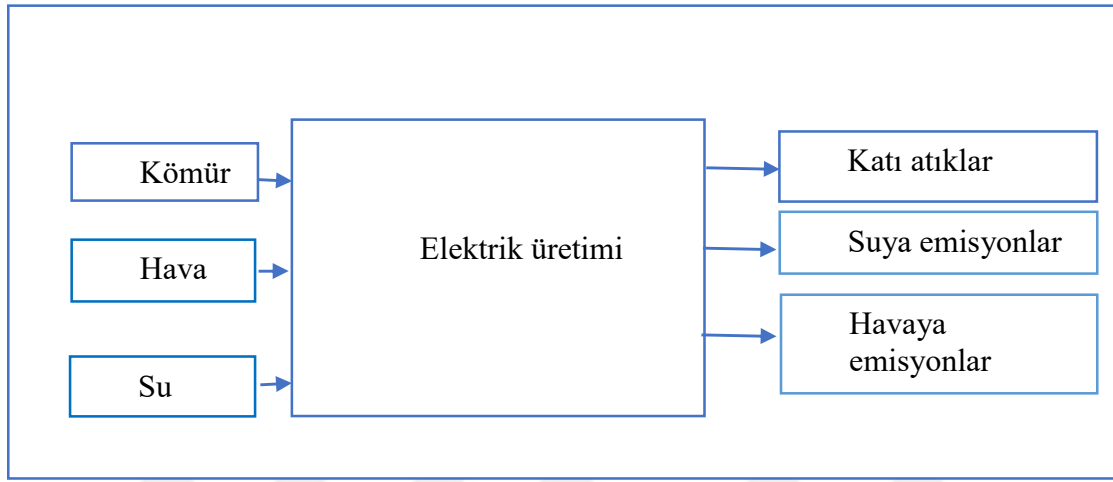
AYK'da genelde yüksek kül içerikli kömür kullanılır. Bunlar arasında santral boyutunda başarıyla uygulanmış ve kullanımı giderek yaygınlaşan tip, DAY teknolojisidir (Taşkın, 2018).

- Basınçlı akışkan yataklı yakma teknolojisi

Basınçlı akışkan yataklı kazanlarda kömür, 5 atm ile 20 atm aralığında bir basınç altında yandığı için buhar üretiminin yanı sıra, gaz türbinlerine beslenebilecek basınca sahip yanma gazı elde edilir. Proses buharı ve buhar türbinlerinden, elektrik eldesine ek olarak, gaz türbininden de elektrik elde ediliyor olması basınçlı sistemleri atmosferik 26 çalışan akışkan yataklara göre daha verimli kılar. Ancak basınçlı sistemlerde sıcak gazın temizlenmesi çok önemli bir noktadır ki, eğer kazanı terk eden sıcak gaz, siklonlar ve filtreler aracılığıyla parçacıklardan iyice arındırılmazsa ve korozyona yol açan gazlar bulunduruyorsa, gaz türbininin kanatlarının zarar görmesi kaçınılmazdır. Bu sebeple, sıcak gazların temizlenmesi üzerine yapılan araştırmalar, verimi yüksek bu tesisleri sorunsuzca uygulanabilir kılmak adına büyük önem teşkil etmektedir. Basınç altında reaksiyonların gerçekleşiyor olması yanmaya olumlu etki ederken kükürt tutma verimini de arttırır. Hem kabarcıklı hem de dolaşımli sistemler basınçlı olarak tasarlanabilse de daha yaygın olan kabarcıklı akışkan yatakların 100 MWe kapasiteli basınçlı uygulamaları mevcuttur. Basınçlı dolaşımli akışkan yataklar ise geliştirme amacıyla kurulmuş 130 MWe gücünü bulan üniteler üzerinde yapılan çalışmalarla uygulamaya geçirilmeye çalışılmaktadır (Abacıoğlu, 2012).

5.1.2. Sistem sınırları

Sistem elektrik üretim süreci ve buna bağlı çevresel etkilerin belirlenmesiyle sonlanır. Beşikten kapıya yaklaşımı yöntemi uygulanmıştır. Sistem sınırları elektrik üretimi için girdi olarak kömür, hava ve su tüketimini içerir. Elektrik üretiminin çıktıları olarak katı atıklar, suya emisyonlar ve havaya emisyonlar yer alır.



Şekil 5.1. Sistem sınırı

5.2. Yaşam Döngüsü Envanter Analizi

Karşılaştırmada ele alınan pulverize subkritik kazan teknolojisi, pulverize süperkritik kazan teknolojisi, pulverize ultra süperkritik kazan teknolojisi ve akışkan yatak teknolojisine ait veriler sırasıyla Tablo 5.3, Tablo 5.4, Tablo 5.5 ve Tablo 5.6’te verilmiştir. Tabloların ham verileri ise EK’te sunulmuştur.

Tablo 5.3. *Pulverize subkritik kazan teknolojisine dair veriler (fb: 1kWh)*

Girdiler	Miktar
Kömür tüketimi (kg) (liniyit)	1,07 ^a
Soğutma suyu tüketimi (m ³)	0,00082 ^b
Proses suyu tüketimi (m ³)	0,0014 ^b
Çıktılar	Miktar
Atıksu oluşumu (m ³)	0,00064 ^c
Atıksudaki kirletici parametreler ^m (mg)	
Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)	19,32 ^c
Askıda katı madde (AKM)	64,40 ^c
Yağ ve gres	6,44 ^c
Toplam siyanür	0,32 ^c
Atmosferik emisyonlar	
SO ₂ (g)	3,61 ^d
NO _x (g)	3,3 ^e
PM10 (g)	0,33 ^f
CO (g)	0,095 ^g
CO ₂ (kg)	1,05
HCl (mg)	7,1 ⁱ
HF (mg)	3,07 ⁱ
Uçucu kül (kg)	0,28 ^j
Cüruf (kg)	0,061 ^k
^a http-8, http-9, http-13, Cui vd., 2012 ve Günkaya vd., 2016 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
^b http-8 değeri kullanılmıştır;	
^c http-12 değeri kullanılmıştır;	
^d http-7, Ersoy, Ö. 2014, http-10, Dölek, E. 2007, http-12, Cui vd., 2012, Koornnef vd.,2008 ve Mengshu vd., 2022 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
^e http-7, Ersoy, Ö. 2014, http-10, Dölek, E. 2007, http-12, Cui vd., 2012, Günkaya vd., 2016, Koornnef vd.,2008 ve Mengshu vd., 2022 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
^f http-7 ve Dölek, E. 2007 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
^g http-7, Ö. 2014 ve http-10 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
^h Cui vd., 2012, Günkaya vd., 2016, Koornnef vd.,2008 ve Mengshu., vd, 2022 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
ⁱ Ersoy, Ö. 2014 ve http-8 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
^j http-8, http-9, http-13 ve Cui vd., 2012 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
^k http-8, http-9 ve http-13 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
^m Termik santraller için atıksu deşarj limitleri Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği ,KOİ 30 mg/L, SSM 100 mg/L, Yağ ve Gres 10 mg/L, Toplam Siyanür 0,5 mg/L, sıcaklıkta 35 °C (http-19, 2022).	

Tablo 5.4. Pulverize süperkritik kazan teknolojisine dair veriler (fb: 1kWh)

Girdiler	Miktar
Kömür tüketimi (kg) (linyit)	0,38 ^a
Soğutma suyu tüketimi (m ³)	0,00166 ^b
Proses suyu tüketimi (m ³)	0,00166 ^c
Çıktılar	Miktar
Atıksu oluşumu (m ³)	0,00012 ^d
Atıksudaki kirletici parametreler ^m (mg)	
Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)	3,87 ^d
Askıda katı madde (AKM)	12,9 ^d
Yağ ve gres	1,29 ^d
Toplam siyanür	0,064 ^d
Atmosferik emisyonlar	
SO ₂ (g)	0,44 ^e
NO _x (g)	0,56 ^f
PM10 (g)	0,18 ^g
CO (g)	0,053 ^f
CO ₂ (kg)	0,70 ^h
HCl (mg)	0,56 ⁱ
HF (mg)	0,21 ^j
Uçucu kül (kg)	0,07 ^k
Cüruf (kg)	0,00001 ^l
^a Rasheed vd., 2021, Cui vd., 2012 ve Tang ve You 2018 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
^b Rasheed vd., 2021 değeri kullanılmıştır; (Toplam tüketilen su miktarının yarısı soğutma suyu olarak kullanılmıştır.)	
^c Rasheed vd., 2021 değeri kullanılmıştır; (Toplam tüketilen su miktarının yarısı proses suyu olarak kullanılmıştır.)	
^d Cui vd., 2012 ve Tang ve You 2018 değeri kullanılmıştır; (Tang ve You 2018de su tüketimi değeri atıksu miktarı olarak alınmıştır.)	
^e Rasheed vd., 2021, Cui vd., 2012 ve Tang ve You 2018 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
^f Rasheed vd., 2021 ve Tang ve You 2018 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
^g Cui vd., 2012 ve Tang ve You 2018 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
^h Rasheed vd., 2021, Cui vd., 2012 ve Tang ve You 2018 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
ⁱ Veri eksikliğinden dolayı süper kritik ve ultra süper kritik teknolojilerdeki HF verilerinden bir yaklaşımda bulunarak hesaplama yapılmıştır.	
^j Tang ve You 2018 değeri kullanılmıştır;	
^k Rasheed vd., 2021 değeri kullanılmıştır;	
^l Rasheed vd., 2021 değeri kullanılmıştır.	
^m Termik santraller için atıksu deşarj limitleri Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği ,KOİ 30 mg/L, SSM 100 mg/L, Yağ ve Gres 10 mg/L, Toplam Siyanür 0,5 mg/L, sıcaklıkta 35 °C (http-19, 2022).	

Tablo 5.5. *Pulverize ultra süperkritik kazan teknolojisine dair veriler (fb: 1kWh)*

Girdiler	Miktar
Kömür tüketimi (kg) (liniyit)	0,29 ^a
Soğutma suyu tüketimi (m ³)	0,235 ^b
Proses suyu tüketimi (m ³)	0,0062 ^b
Çıktılar	Miktar
Atıksu oluşumu (m ³)	0,0000257 ^c
Atıksudaki kirletici parametreler ^m (mg)	
Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)	0,771 ^c
Askıda katı madde (AKM)	2,57 ^c
Yağ ve gres	0,257 ^c
Toplam siyanür	0,01285 ^c
Atmosferik emisyonlar	
SO ₂ (g)	0,5 ^d
NO _x (g)	1,8 ^d
PM10 (g)	0,0531 ^e
CO (g)	0,53 ^f
CO ₂ (kg)	0,61 ^d
HCl (mg)	7,68 ^g
HF (mg)	2,9 ^h
Uçucu kül (kg)	0,040 ^c
Cüruf (kg)	0,0089 ^c
^a Cui vd., 2012., http-14 ve Koornnef vd.,2008 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
^b http-14 değeri kullanılmıştır;	
^c Cui vd., 2012 değeri kullanılmıştır;	
^d SO ₂ , ve NO _x , emisyonu; Cui., vd., 2012 ve Koornnef vd.,2008 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
^e http-14 değeri kullanılmıştır;	
^f Cui., vd., 2012 değeri kullanılmıştır;	
^d Cui., vd., 2012 ve Koornnef vd.,2008 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
^g Koornnef vd.,2008 değeri kullanılmıştır.	
^h http-14 ve Koornnef vd.,2008 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
^c http-14 değeri kullanılmıştır.	
^m Termik santraller için atıksu deşarj limitleri Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği ,KOİ 30 mg/L, SSM 100 mg/L, Yağ ve Gres 10 mg/L, Toplam Siyanür 0,5 mg/L, sıcaklıkta 35 °C (http-19, 2022).	

Tablo 5.6. Akışkan yatak kazan teknolojisine dair veriler (fb: 1kWh)

Girdiler	Miktar
Kömür tüketimi (kg) (liniyit)	1,05 ^a
Soğutma suyu tüketimi (m ³)	0,0020 ^b
Proses suyu tüketimi (m ³)	0,00065 ^b
Çıktılar	Miktar
Atıksu oluşumu (m ³)	0,00046 ^b
Atıksudaki kirletici parametreler ^m (mg)	
Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)	13,83 ^b
Askıda katı madde (AKM)	46,10 ^b
Yağ ve gres	4,6 ^b
Toplam siyanür	0,23 ^b
Atmosferik emisyonlar	
SO ₂ (g)	5,1 ^c
NO _x (g)	3,9 ^c
PM10 (g)	0,59 ^d
CO (g)	1,6 ^c
CO ₂ (kg)	1,25 ^c
HCl (mg)	470 ^f
HF (mg)	70 ^g
Uçucu kül (kg)	0,28 ^h
Cüruf (kg)	0,45 ^h
^a http-20, http-16 ve http-21 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
^b http-18 değeri kullanılmıştır;	
^c http-15, http-16 ve Mengshu., vd, 2022 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
^d http-14 değeri kullanılmıştır;	
^e Mengshu., vd, 2022 ve Whitaker ., vd 2012 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
^f http-15, http-16 ve http-18 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
^g http-16 ve http-18 değerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır;	
^h http-17 ve http-18 değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.	
^m Termik santraller için atıksu deşarj limitleri Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği ,KOİ 30 mg/L, SSM 100 mg/L, Yağ ve Gres 10 mg/L, Toplam Siyanür 0,5 mg/L, sıcaklıkta 35 °C (http-19, 2022).	

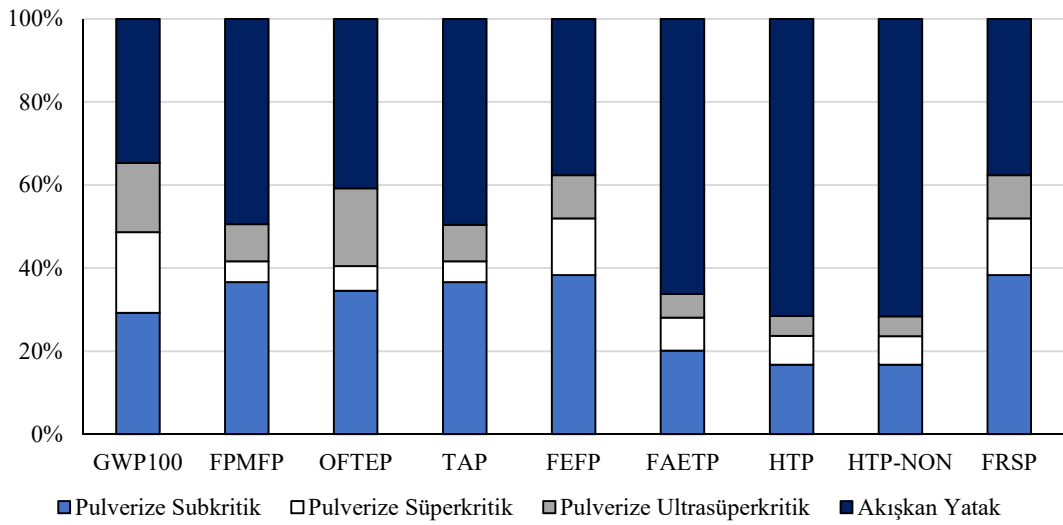
5.3. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi

LCA hesaplamaları, lisanslı SimaPro 9.1 yazılımı kullanılarak karakterizasyon aşaması için ReCiPe 2016 Midpoint (H) metodu kullanılmış ve sonuçlar Tablo 5.6'da verilmiştir. Bu tabloda yöntemde bulunan tüm etki kategorileri gösterilmektedir. Şekil 5.3'de ise kazan teknolojileri seçili etki kategorileri bazında yüzdesel olarak karşılaştırılmıştır. Bu grafiğe bakıldığında tatlı su ötrofikasyonu potansiyeli (%37,7) ve fosil kaynak tüketim potansiyeli (%37,6) dışında tüm etki kategorileri açısından akışkan yatak teknolojisinin pulverize sistemlere göre çevresel etkisinin daha fazla olduğunu görülmüştür. Pulverize sistemlerde ise çevresel etkinin subkritik sistemlerde daha fazla olduğu, süper kritik sistemlerin partikül madde oluşum potansiyeli (% 8,9), ozon oluşumu karasal ekosistem potansiyeli (%18,7) ve karasal asidifikasyon potansiyeli (%8,8) hariç tüm kategoryelerde ultra süperkritik sistemlerden daha fazla etki gösterdiği görülmüştür.

Tablo 5.7. Tüm kazan teknolojilerine ait karakterizasyon sonuçları

Etki Kategorileri	Birim	Pulverize Subkritik	Pulverize Süperkritik	Pulverize Ultra süperkritik	Akışkan Yatak
Küresel Isınma	kg CO ₂ ed.	1,07	0,71	0,61	1,27
Stratosferik Ozon İncelmesi	kg CFC-11 ed.	4,96E-09	1,77E-09	1,36E-09	4,87E-09
İyonlaştırıcı Radyasyon	kBq Co-60 ed.	5,52E-04	1,96E-04	1,51E-04	5,41E-04
Ozon Oluşumu, İnsan Sağlığı	kg NO _x ed.	3,34E-03	5,73E-04	1,81E-03	3,93E-03
Partikül Madde Oluşumu	kg PM 2,5 ed.	1,43E-03	1,96E-04	3,48E-04	1,93E-03
Ozon Oluşumu, Karasal Ekosistem	kg NO _x ed.	3,34E-03	5,73E-04	1,81E-03	3,94E-03
Karasal Asidifikasyon	kg SO ₂ ed.	4,84E-03	6,59E-04	1,16E-03	6,55E-03
Tatlı Su Ötrofikasyonu	kg P ed.	2,59E-04	9,21E-05	7,03E-05	2,55E-04
Tuzlu Su Ötrofikasyonu	kg N ed.	1,90E-06	6,76E-07	5,16E-07	1,87E-06
Karasal Ekotoksitite	kg 1,4-DCB	7,61E-03	2,71E-03	2,08E-03	7,47E-03
Tatlı Su Ekotoksitesitesi	kg 1,4-DCB	3,22E-04	1,27E-04	9,11E-05	1,06E-03
Tuzlu Su Ekotoksitesitesi	kg 1,4-DCB	4,58E-04	1,81E-04	1,30E-04	1,51E-03
İnsanlar Üzerine Olan	kg 1,4-DCB	8,41E-03	3,45E-03	2,42E-03	3,59E-02

Toksisite(Kanser ojen)						
İnsanlar Üzerine Olan Toksisite(Kanser ojen Olmayan)	kg 1,4-DCB	0,2306	0,0946	0,0663		0,9878
Arazi Kullanımı	m ² a crop ed.	8,98E-04	3,19E-04	2,43E-04		8,81E-04
Maden Kaynak Tüketimi	kg Cu ed.	4,49E-06	1,60E-06	1,22E-06		4,40E-06
Fosil Kaynak Tüketimi	kg oil ed.	0,2387	0,0848	0,06472		0,2343
Su Tüketimi	m ³	0,08411	0,0308	0,02903		0,08293

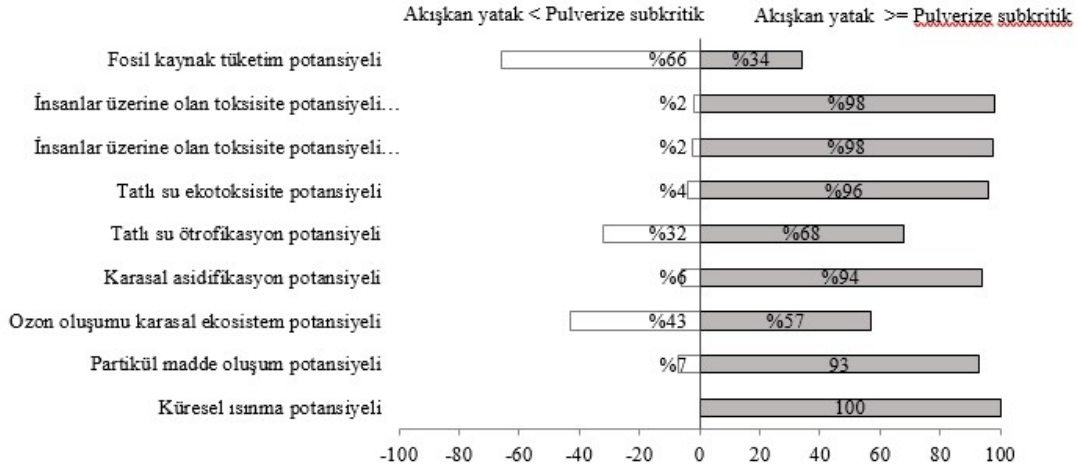


Şekil 5.2. Kazan teknolojilerinin etki kategorileri bazında karşılaştırılması

(GWP100;küresel ısınma potansiyeli, FPMFP; partikül madde potansiyeli, OFTEP;ozon oluşumu, karasal ekosistem potansiyeli, TAP; karasal asidifikasyon potansiyeli, FEFP; tatlı su ötrofikasyonu potansiyeli, FAETP; tatlı su ekotoksisite potansiyeli, HTP; insanlar üzerine olan toksisite potansiyeli (kanserojen), HTP-NON;insanlar üzerine olan toksisite potansiyeli (kanserojen olmayan), FRSP;fosil kaynak tüketimi potansiyeli)

Pulverize subkritik ve akışkan yatak kazan teknolojileri arasındaki LCA karşılaştırmalarındaki belirsizlikleri tahmin etmek için Monte Carlo simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Monte Carlo simülasyon analizi (SimaPro 9.1 yazılımında bulunan Monte Carlo fonksiyonu ile), %95 güven aralığında $\alpha = 0.05$ anlamlılık düzeyinde 1000 sabit çalıştırma gerçekleştirilmiştir. Monte Carlo analizi sonuçları Şekil 5.4’de verilmiş olup grafik değerleri sol tarafta akışkan yatak teknolojisinin karakterizasyon sonuçlarının pulverize subkritik kazan teknolojisinin sonuçlarından düşük olma, sağ tarafta ise yüksek olma olasılık değerlerini göstermektedir. Bu grafiğe göre; akışkan yatak kazan teknolojisi

fosil kaynak tüketim potansiyeli, ozon oluşumu karasal ekosistem potansiyeli ve tatlı su ötrofikasyonu potansiyeli dışında tüm göstergelerde yüksek oranda (%93'ün üzerinde) pulverize subkritik kazan teknolojisiinden daha yüksek çevresel etki göstermektedir.



Şekil 5.3. Monte Carlo analizi (akışkan yatak – pulverize subkritik kazan teknolojileri)

GWP100 etkisi termik santrallerde kömürün yanmasıyla havaya salınan CO₂ emisyonlarından kaynaklanmaktadır. Yapılan analizlerde küresel ısınmaya en fazla neden olan faktörün tüm kazan teknolojilerinde CO₂ emisyonları (%98-%99) olduğu saptanmıştır. Küresel ısınmaya en fazla etki eden kazan teknolojileri akışkan yatak ve pulverize subkritik kazan teknolojisi olmuştur. Süperkritik ve ultra süperkritik kazan teknolojisi ise diğer teknolojilere göre daha az etki etmiş olup bu durum süperkritik ve ultra süperkritik kazan teknolojilerinde kömür tüketiminin daha az olmasına bağlıdır.

FPMFP etkisi termik santrallerde kömürün yanmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan analizlerde partikül madde oluşum potansiyeline tüm kazan teknolojilerinde en fazla SO₂ ve NO neden olmuştur. Pulverize subkritik kazan teknolojisi için bu değer %73,8 SO₂ ve %25,5 ile NO olmuştur. Pulverize süperkritik kazan teknolojisi için %66,8 SO₂ ve %32,14 NO olmuştur. Pulverize ultra süperkritik kazan teknolojisi için %65 SO₂ ve %34,2 NO olmuştur. Akışkan yatak kazan teknolojisi için ise %77 SO₂ ve %22,36 NO olmuştur. Pulverize subkritik ve akışkan yatak kazan teknolojisi için SO₂ ve NO giderim sistemlerinin veriminin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

OFTEP etkisi kömürün yanmasından ve kömürün en fazla tüketildiği kazan teknolojisine bağlı olarak açıklanmaktadır. Yapılan analizlerde ozon oluşumu, karasal

ekosistem etki potansiyeline tüm kazan teknolojilerinde ağırlıklı olarak NO_x emisyonları neden olmuştur. NO_x emisyonlarının bu etkideki payının sırasıyla pulverize subkritik için %99,4, pulverize süperkritik için %98,8, pulverize ultra süperkritik için %99,7 ve akışkan yatak için %99,5 olduğu belirlenmiştir.

TAP etkisi kömürün yanmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan analizlerde için karasal asidifikasyona neden olan faktörler SO₂ ve NO_x olmuştur. Bu emisyonların yüzde değerleri pulverize subkritik için %75 SO₂ ve %24,6 NO_x, pulverize süperkritik için %68 SO₂ ve %30,9 NO_x, pulverize ultra süperkritik için %66,7 SO₂ ve %33, NO_x ve akışkan yatak için %78 SO₂ ve %21,5 NO_x olarak hesaplanmıştır.

FEFP etkisi kömür külünün bertarafından ve kömür madenciliği atıklarından kaynaklanmaktadır. Yapılan analizlerde tüm kazan teknolojilerinde tatlı su ötrofikasyonuna en fazla neden olan faktör fosfat olmuştur (%100).

FAETP etkisine külün depolanması sebep olmaktadır. Yapılan analizlerde pulverize subkritik kazan teknolojisi için tatlı su ekotoksitesine en fazla neden olan faktörler %34,6 arsenik, %27,12 krom VI, %20,75 çinko ve %5,73 oranında nikel olmuştur. Pulverize süperkritik kazan teknolojisinde bu etkiye en fazla neden olan faktörler; arsenik (%36,16), krom VI (%28,2) ve çinko (%18,71) oranında olmuştur. Pulverize ultra süperkritik kazan teknolojisinde en fazla neden olan faktörleri %78,22 oranında krom VI ve %35,2 oranında arsenik oluşturmuştur. Akışkan yatak kazan teknolojisinde ise %45 arsenik, %35,15 krom VI ve %6,21 oranında çinko en fazla neden olan faktörler olmuştur. Bu emisyonlar, esas olarak termik santrallerde kömür külü (linyit) bertarafından ve kömür madenciliği atıklarından kaynaklanmaktadır.

HTP etkisi termik santrallerde kömür külü (linyit) bertarafı ve kömür madenciliğinden çıkan atıklar sorumludur. Bu etkiye külün depolanması sebep olmaktadır. Yapılan analizlerde tüm kazan teknolojisinde kanserojen etkisine en fazla neden olan faktör %89 ile krom VI ve %11 ile arsenik olmuştur. Baca gazı SO₂, NO_x, CO ve PM (duman ve toz vb.) salımı nedeniyle sağlık tehlikesi kategorisinde kömüre dayalı enerji üretiminin etkileri analiz edilmiştir. Sağlık tehlikeleri sırasıyla; PM > NO_x, > SO₂, > CO (Rasheed vd., 2021).

HTP-NON etkisine külün depolanması sebep olmaktadır. Yapılan analizlerde pulverize subkritik kazan teknolojisi için kanserojen etkiye en fazla neden olan faktör %98,5 ile arsenik olmuştur. Sırasıyla; pulverize süperkritik %98,6, pulverize ultra süperkritik %98,6 ve akışkan yatak kazan teknolojisi için %98,9 olmuştur.

FRSP etkisine tüketilen linyit sebep olmaktadır. Yapılan analizlerde tüm kazan teknolojilerinde fosil kaynak tüketimine etkisi en fazla neden olan faktör %98 ile kömür tüketimi olmuştur. Sırasıyla; pulverize süperkritik %98,9, pulverize ultra süperkritik %98,9 ve akışkan yatak kazan teknolojisi için %98,9 olmuştur. Santralin veriminin yüksek olması kömür tüketim miktarını azaltır.



6.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu LCA çalışmasının amacını kömürle çalışan termik santrallerde kullanılan mevcut pulverize toz kömürlü subkritik kazan teknolojisi ve buna alternatif olarak, pulverize süperkritik kazan, pulverize ultra süperkritik kazan teknolojisi ve akışkan yatak teknolojisinin çevresel etkilerinin karşılaştırılması oluşturmuştur. Tezde elde edilen sonuçlara göre; termik santrallerde yüksek verim, çevresel etkinin azalmasını sağlamaktadır. Pulverize ultra süperkritik kazan teknolojisinin verimlilik seviyesi en yüksek olan kazan teknolojisidir. Bu açıdan, çevresel etkinin en az olduğu kazan teknolojisi pulverize ultra süperkritik kazan teknolojisi. Bu kazan teknolojisini, pulverize süperkritik kazan teknolojisi takip etmiştir. Ülkemizde ultra süperkritik kazan teknolojisine ait bir adet termik santral bulunmakta olup yeni termik santral projelerinde ultra süperkritik kazan teknolojisinin uygulanması çevresel açıdan anlamlı olacaktır.

Bu çalışmada yalnızca termik santrallerden kaynaklanan çevresel etkiler incelenmiş olup teknik ve ekonomik açıdan değerlendirme yapılmamıştır. Termik santral projelerinde uygulanacak olan teknolojilerin seçiminde, çevresel değerlendirmeyle birlikte teknik ve ekonomik kriterlerin de yer aldığı çok ölçütlü karar destek yöntemlerinin kullanılması ile bütünsel bir yaklaşım sağlanabilir.

Bu çalışmanın, gelecekte enerji sürdürülebilirliği için yapılacak olan termik santrallerde çevresel etkilerin belirlenmesi konusunda enerji politikalarının belirlenmesine yardımcı olacağı düşünülmektedir. Ülkemizde enerji üretiminin yaşam döngüsü değerlendirmesi yöntemiyle çevresel etkilerin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalar sınırlı sayıda olup bundan sonraki çalışmalara yol gösterici bir kaynak olarak kullanılabilecektir.

KAYNAKÇA

- Abacıoğlu, M.(2012). Mevcut Bir Termik Santralde Pülverize Kazanın Akışkan Yataklı Kazana Dönüşümünün İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Atay, B.(2019). Termik Santrallerin Çevreye Negatif Etkisi Ve Alınabilecek Önlemlerin Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Atılğan, B. and Azapagic, A.(2016). An integrated life cycle sustainability assessment of electricity generation in Turkey. Energy Policy, 93, 168-186.
- Bartan, A. (2017). Kömürle Çalışan Termik Santraller İçin Çevresel Etki İndeksinin Geliştirilmesi. Doktora Tezi. Ankara: Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bayrak, F.(2014). Elektrik Üretiminde Kullanılan Linyitin Madencilik Aşamasına Ait Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi.Yüksek Lisans Tezi. Ankara:Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bayram, B.(2020). Süperkritik Bir Santralde Enerji ve Ekserji Analizi. Yüksek Lisans Tezi.Zonguldak: Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Burchart-Korol, D., Fugiel, A., Czaplicka-Kolarz, K., Turek,M.(2016). Model Of Environmental Life Cycle Assessment For Coal Mining Operations. Science of The Total Environment, 562, 61-72.
- Cui, X., Hong, J. and Gao,M. (2012). Environmental Impact Assessment Of Three Coal-Based Electricity Generation Scenarios In China. Energy, 45(1), 952-959.
- Çetinkaya, E., Rosen, M.A. and Dinçer,İ.(2012). Life cycleassessment of a fluidized bed system for steam production. Energy Conversion and Management, 63, 225-232.
- Dölek, E.(2007). Comparison Of Iscst3 And Aermom Air Dispersion Models: Case Study Of Cayırhan Thermal Power Plant. Yüksek Lisans Tezi. Ankara: Middle East Technical University, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences.

- Dunmade, I., Madushele, N., Adedeji, P.A., Akinlabi, E.S. (2019). A Streamlined Life Cycle Assessment Of A Coal-Fired Power Plant: The South African Case Study. *Environmental Science and Pollution Research* volume, 26, 18484–18492.
- Dzikuć, M. and Piwowski, A. (2016). Ecological and economic aspects of electric energy production using the biomass co-firing method: The case of Poland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 816-862.
- Erbaş, O. ve Rahim, M.A. (2009). Düşük Kaliteli Linyitlerin Ultra Süper Kritik Kazanlarda Yakıt Olarak Kullanılması. *Fen Bilimleri Dergisi*, 18, 1302-3055.
- Ercan, Ö., Dinçer, F., Sarı, D., Ceylan, Ö., Dinçer, F.K. (2020). Determination of PM10 and deposited dust dispersion on the settlement areas from Aksa Göynük coal (lignite) fueled thermal power plant. *Atmospheric Pollution Research*, 11(12), 2126-2132.
- Ersoy, Ö. (2014). Yatağan Termik Santrali Etki Alanında Hava Kirliliği Açısından Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Ankara: Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Felix, M. and Gheewala, S.H. (2012). Environmental Assessment Of Electricity Production In Tanzania. *Energy For Sustainable Development*, 16, 439-447.
- Günkaya, Z., Özdemir, A., Özkan, A., Banar, M. (2016). Environmental Performance of Electricity Generation Based on Resources: A Life Cycle Assessment Case Study in Turkey. *Sustainability*. 8(11), 1097.
- Herrmann, I.T. and Moltesen, D. (2015). Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? – a comparative assessment of SimaPro and GaBi. *Journal of Cleaner Production*, 86, 163-169.
- http-1, <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity> Erişim Tarihi: 06.05.2022
- http-2, <https://www.euas.gov.tr/yillik-raporlar> Erişim Tarihi: 15.09.2022
- http-3, https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/TEG-2020_8.2_K%C3%B6m%C3%BCr%20Santralleri%20Orhan%20Ayta%C3%A7.pdf

- http-4, <https://akra.media/Haber/HaberDetay/100087/termik-santrallerin-cevresel-etkileri-ve-tedbirler> Erişim Tarihi:08.09.2022
- http-5, <https://tr.strephonsays.com/subcritical-and-vs-supercritical-boiler-14374> Erişim Tarihi:11.10.2022
- http-6, https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/Sayfa159%20%C3%B6ncesi_0.pdf Erişim Tarihi: 05.09.2022
- http-7, https://webdosya.csb.gov.tr/db/kutahya/menu/temiz-hava-eylem-plani-2020-2024_20210223101957.pdf Erişim Tarihi:02.07.2022
- https-8, https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/kutahya_-cdr2020-20220105124313.pdf Erişim Tarihi:08.05.2022
- http-9, https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/mugla_-cdr2020-20220201160023.pdf Erişim Tarihi:15.06.2022
- http-10, https://www.cmo.org.tr/resimler/ekler/027bdd941585254_ek.pdf Erişim Tarihi:05.01.2022
- http-11, https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/2020_ankara--cdr-20210728144247.pdf Erişim Tarihi:12.04.2022
- http-12, <http://eced.csb.gov.tr/ced/jsp/ek1/3972> Erişim Tarihi: 05.03.2022
- http-13, https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/canakkale_-cdr2020-20211110114745.pdf Erişim Tarihi:22.06.2022
- http-14, <http://eced.csb.gov.tr/ced/jsp/ek1/3989#> Erişim Tarihi:10.09.2022
- http-15, https://www.banktrack.org/download/tufanebeyli_coal_power_project_description/tufanbeyli_ptd_tr.pdf Erişim Tarihi:09.10.2022
- http-16, <https://www.stgm.org.tr/sites/default/files/2020-09/sirnak-silopi-termik-santrali-santrala-yakit-saglayan-asfaltit-sahasi-ve-kirectasi-sahalari-kapasite-artisi-projesi-ced-raporu.pdf> Erişim Tarihi:09.09.2022
- http-17, https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/s-rnak_-cdr2020-20220225095334.pdf Erişim Tarihi:24.06.2022

http-18, <http://eced.csb.gov.tr/ced/jsp/ek1/8979#> Erişim Tarihi:23.09.2022

http-19,

<https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=7221&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>

https-20,

https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/adana_2020_-cdr-20211206082506.pdf Erişim Tarihi:10.10.2022

http-21,

https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/man-sa_2019_cevre_durum_raporu-20201117201719.pdf Erişim Tarihi:15.09.2022

Jung, H., Ryoo, S.G. and Kang, Y.T. (2022). Life cycle environmental impact assessment of Taean coal power plant with CO₂ capture module. Journal of Cleaner Production, 357, Energy Conversion and Management, 63, 131663.

Kabayo, J., Marques, P., Garcia, R., Freire, F. (2019). Life-Cycle Sustainability Assessment Of Key Electricity Generation Systems In Portugal. Energy, 176, 131-142.

Keleş, Y. (2019). Yeni Geliştirilen Karbon Dioksit Tutan Organik Sıvıların Absorpsiyon Ve Ultrasonik Desorpsiyon Performanslarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Ankara: Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kömürcü, A. (2019). Düşük Kaliteli Linyit Yakıtlı Akışkan Yataklı Termik Santral Tasarımı Ve Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Kütahya: Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kumari, S. and Bera, S. (2022). A decision analysis model for reducing carbon emission from coal-fired power plants and its compensatory units. Journal of Environmental Management, 301, 113829.

Messagie, M., Mertens, J., Oliveira, L., Rangaraju S., Sanfelix J., Coosemans, T., Mierlo, J.V., Macharis C. (2014). The hourly life cycle carbon footprint of electricity generation in Belgium, bringing a temporal resolution in life cycle assessment. Applied Energy, 134, 469-476.

Odeh, N.A. and Cockerill, T.C. (2008), Life cycle analysis of UK coal-fired power plants. Energy Conversion and Management, 49, 212-220.

- Özdemir,T. (2015). Kömür Yakıtlı Bir Termik Santralin Sistem Modellemesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü.
- Özdemir, M.T., Menlik,T., Variyenli,H.L., Sevin, L.(2017). Bir Termik Santralin Performans Analizi ve Rehabilitasyon Metotları, 20, 971-978.
- Peng, Y., Yang, Q., Wang, L., Wang, S., Li, J., Zhang, X., Zhang, S., Zhao, H., Zhang, B., Wang, C., Bartocci, P., Fantozzi, F. (2021). VOC emissions of coal-fired power plants in China based on life cycle assessment method. Fuel, 292, 120325.
- Rashed, R., Javed, H., Rizwan, A., Sharif, F., Yasar,A.,Tabinda, A., Ahmad,S., Wang, Y., Su,Y.(2021). Life cycle assessment of a cleaner supercritical coal-fired power plant. Journal of Cleaner Production, 279, 123869.
- Rocha, D.H.D., Siqueira, D.S. and Silva, R.J. (2021). Exergoenvironmental analysis for evaluating coal-fired power plants.Energy, 233, 121169.
- Santoyo-Castelazo, E., Gujba,H. and Azapagic,A.(2011). Life Cycle Assessment Of Electricity Generation In Mexico. Energy, 36, 1488-1499.
- Scannapieco, D., Naddeo, V. and Belgiorno, V.(2014). Sustainable power plants A support tool for the analysis. Land Use Policy, 36, 478-484.
- Silva, M.G., Muniz, A.R.C. and Hoffmann,R.(2018). Impact Of Greenhouse Gases On Surface Coal Mining In Brazil. Journal of Cleaner Production, 193, 206-216.
- Tang, Y. and You, F. (2018). Life cycle environmental and economic analysis of pulverized coal oxy-fuel combustion combining with calcium looping process or chemical looping air separation.Journal of Cleaner Production, 181, 271-292 .
- Tao, M., Cheng, W., Nie, K., Zhang, X., Cao, W. (2022). Life cycle assessment of underground coal mining in China. Science of the Total Environment, 805, 150231.
- Taşkın, E.(2018). Linyit Yakıtlı Pilot Termik Santral İçin Baca Gazı Emisyon Azaltma Seçeneklerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi. Yüksek Lisans Tezi. Ankara:Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Türkmen, B., Deveci, A., and Sağlam, Ç. (2020). Environmental sustainability of electricity generation: Case study of lignite combustion. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 40(2), 1-9.
- Orfanos, N., Mitzelos, D., Sagani, A. and Dedoussis, V. (2019). Life-Cycle Environmental Performance Assessment Of Electricity Generation And Transmission Systems In Greece. *Renewable Energy*, 139, 1447-1462.
- Uysal, İ.G. (2022). İzmir Tulum Peyniri Üretiminde Yaşam Döngüsü Analizi İle Çevresel Etkilerin Sürdürülebilirlik Kapsamında İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İzmir: Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yatarkalkmaz, M.M. (2020). Termik Santrallerde Kullanılan Kömürün Kurutma Tekniklerinin Araştırılması. Doktora Tezi. Ankara: Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Zhu, Y., Jiang, S., Zhao, Y., Li, H., He, G., Li, L. (2020). Life-cycle-based water footprint assessment of coal-fired power generation in China *Journal of Cleaner Production*, 254, 120098.
- Wang, J., Wang, R., Zhu, Y., Li, J. (2018). Life Cycle Assessment And Environmental Cost Accounting Of Coal-Fired Power Generation in China, *Energy Policy*, 115, 374-384.
- Whitaker, M., Heath, G.A., O'Donoghue, P., Vorum, M. (2012). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Coal-Fired Electricity Generation. *Journal of Industrial Ecology*, 16(1), 53-72.

ER

Tablo E.1. *Pulverize subkritik kazan teknolojisi kullanılan termik santrallere ait veriler*

Seyitömer Termik Santrali	Tunçbilek Termik Santrali	Yatağan Termik Santrali	Yeniköy Termik Santrali	Kemerköy Termik Santrali
--	--	--	--	---

Tablo E.1. *Pulverize subkritik kazan teknolojisi kullanılan termik santrallere ait veriler*

Girdiler	Seyitömer Termik Santrali	Tunçbilek Termik Santrali	Yatağan Termik Santrali	Yeniköy Termik Santrali	Kemerköy Termik Santrali	Çayırhan Termik Santrali	Çan 2 Termik Santrali	Cui vd., 2012*	Günkaya vd., 2016*	Koornnef vd., 2008*	Mengshu vd.,2022*
Kömür tüketimi (kg) (linyit)	294.425	12.255	584.333	413.016,32	635.580,37	-	181.677,85	6,60E-01	1,43	4,47E-01	4,24E-01
Soğutma suyu tüketimi (m³)	353	-	-	-	-	-	8000	8,47E-05	9,60E-02	-	-
Proses suyu tüketimi (m³)	609	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Çıktılar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Atıksu oluşumu (m³)	-	-	-	-	-	-	147	8,40E-02	2,50E-01	-	-
Elektrik üretimi (kWh)	3.768.632.000	1.605.433.428	4.070.830.000	3.278.140.000	3.517.950.000	1.934.703.990	1.999.547.000	-	-	-	-
Atmosferik emisyonlar (kg)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SO ₂	3.489,16	969,40	1169,6	1303,42	1706,4	443,01	280	1,60E-03	4,10E-02	1,40E-03	6,00E-03
NO _x	1.217,69	339,15	1320,6	591,13	1345,3	891,03	280	8,00E-03	3,00E-03	1,90E-03	4,00E-03
PM10	127,51	35,38	91,3	954,36	-	109	-	2,00E-05	-	1,61E-03	-
CO	85,15	23,74	38,43	10,70	14,47	-	280	1,04E-03	-	-	2,75E-03
CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	8,00E-01	8,19E-01	1,05	1,56
HCl	-	-	4,3	1,57	3,24	-	-	-	-	1,41E-05	-
HF	-	-	1,26	1,05	1,47	-	-	-	-	1,20E-05	-
Uçucu kül (kg)	77.287	-	146.083	93.566,44	0,362	21.711,07	77.179,11	2,64E-01	2,90E-04	-	-
Cüruf (kg)	25.762,10	5.017	29.216,7	23.391,6	0,090	54.278,08	14.975,5	-	-	-	-

*Fonksiyonel birime dönüştürülmüş verilerdir.

Tablo E.2. *Pulverize süperkritik kazan teknolojisi kullanılan termik santrallere ait veriler*

Girdiler	Rasheed vd., 2021*	Cui vd., 2012*	Tang ve You 2018*
Kömür tüketimi (kg) (liniyit)	3,70E-01	4,50E-01	3,20E-01
Soğutma suyu tüketimi (m ³)	1,66	8,00E-02	9,20E-05
Proses suyu tüketimi (m ³)	1,66	8,00E-02	-
Çıktılar	-	-	-
Atıksu oluşumu (m ³)	3,30	1,60E-01	9,20E-05
Atmosferik emisyonlar (kg)	-	-	-
SO ₂	7,50E-04	3,00E-04	2,70E-04
NO _x	4,00E-04	5,40E-03	7,00E-04
PM10	1,20E-04	8,00E-05	2,40E-04
CO	4,70E-05	9,50E-04	5,90E-05
CO ₂	5,30E-01	7,30E-01	8,61E-01
HCl	-	-	-
HF	-	-	2,13E-07
Uçucu kül (kg)	7,00E-02	3,10E-02	9,00E-03
Cüruf (kg)	1,00E-05	4,50E-01	-
*Fonksiyonel birime dönüştürülmüş verilerdir.			

Tablo E.3. *Pulverize ultra süperkritik kazan teknolojisi kullanılan termik santrallere ait veriler*

Girdiler	Cenal Karabiga Termik Santrali	Cui vd., 2012*	Koornef vd., 2008*
Kömür tüketimi (kg) (liniyit)	368.150,68	2,20E-01	3,40E-01
Soğutma suyu tüketimi (m ³)	263000	1,22E-05	-
Proses suyu tüketimi (m ³)	7000	1,22E-05	-
Çıktılar	-	-	-
Atıksu oluşumu (m ³)	-	2,57E-05	-
Elektrik üretimi (kWh)	9.773.589.700	-	-
Atmosferik emisyonlar (kg)	-	-	-
SO ₂	400,07	1,32E-03	7,10E-04
NO _x	400,07	2,47E-03	1,03E-03
PM10	60,01	1,10E-04	1,18E-03
CO	-	5,30E-04	-
CO ₂	-	4,10E-01	8,05E-01
HCl	200,039	-	7,68E-06
HF	5,001	-	1,38E-06
Uçucu kül (kg)	45000	-	-
Cüruf (kg)	10000	-	-

* Fonksiyonel birime dönüştürülmüş verilerdir.

Tablo E.4. Akışkan yatak kazan teknolojisi kullanılan termik santrallere ait veriler

Girdiler	Tufanbeyli Termik Santrali	Silopi Termik Santrali	Soma Kolin Termik Santrali	Mengshu vd., 2022*	Whitaker vd., 2012*
Kömür tüketimi (kg) (liniyit)	734656,4	143.881	357984,0	4,40E-01	-
Soğutma suyu tüketimi (m ³)	275	-	742	-	-
Proses suyu tüketimi (m ³)	85	-	243,32	-	-
Çıktılar	-	-	-	-	-
Atıksu oluşumu (m ³)	90	-	168	-	-
Elektrik üretimi (kWh)	3.448.719.000	2.222.875.310	3.236.289.680	-	-
Atmosferik emisyonlar (kg)	-	-	-	-	-
SO ₂	1848	1486,7	257,2	4,90E-03	-
NO _x	1386	1189,4	257,2	3,50E-03	-
PM10		148,7			-
CO	462	297,3	257,2	2,47E-03	-
CO ₂	-	-	-	1,44	1,07
HCl	186	148,7	128,76	-	-
HF	3,6	22,33	19,3	-	-
Uçucu kül (kg)	47,5	41,94	150080	-	-
Cüruf (kg)	-	17.962,10	73920	-	-

*Fonksiyonel birime dönüştürülmüş verilerdir.

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0001-8769-9261

Adı Soyadı: Nurcan EROĞLU ÇİFTÇİ

Yabancı Dil: İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2016, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü
- 2017-2021, Çevre Mühendisi, Merkez Çevre Danışmanlık Mühendislik İş Sağlığı ve Güvenliği Hizmetleri