



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



SÜRDÜRÜLEBİLİR KÖMÜR MADENCİLİĞİ
ÜZERİNE YAŞAM DÖNGÜSÜ
DEĞERLENDİRMESİ

Mustafa Emre ÖZCAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

HAZİRAN-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mustafa Emre ÖZCAN tarafından hazırlanan “Sürdürülebilir Kömür Madenciliği Üzerine Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi” adlı tez çalışması 30/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
Necmettin Erbakan Üniversitesi

.....

Danışman

Prof. Dr. Vildan ÖNEN
Konya Teknik Üniversitesi

.....

Üye

Doç.Dr. Merve KALEM
Konya Teknik Üniversitesi

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Mustafa Emre ÖZCAN

30.06.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SÜRDÜRÜLEBİLİR KÖMÜR MADENCİLİĞİ ÜZERİNE YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

Mustafa Emre ÖZCAN

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Vildan ÖNEN

2025, 86 Sayfa

**Jüri
Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
Prof. Dr. Vildan ÖNEN
Doç. Dr. Merve KALEM**

Bu tez çalışmasında, Türkiye Kömür İşletmeleri'ne (TKİ) ait toplam 10 kömür sahasında yürütülen madencilik faaliyetlerinin çevresel etkileri, yaşam döngüsü analizi (YDA) metodolojisi kullanılarak değerlendirilmiştir. Söz konusu sahalardan 9'u açık ocak, 1'i ise yer altı işletme yöntemine sahiptir. Sahalar, Ege (3 saha), Marmara (3 saha), İç Anadolu (3 saha) ve Doğu Anadolu (1 saha) bölgelerinde konumlanmıştır. Kömürün çıkarımından termik santrale sevk edilmesine kadar olan süreç, SimaPro yazılımı aracılığıyla ISO 14040 ve ISO 14044 standartları doğrultusunda modellenmiş; ReCiPe etki değerlendirme yöntemiyle süreçlerin çevresel yükleri kapsamlı bir şekilde ortaya konmuştur.

YDA kapsamında enerji tüketimi, sera gazı emisyonları, asidifikasyon potansiyeli, insan sağlığına etkileri, su kullanımı ve ekotoksisite gibi çevresel etki kategorileri dahil olmak üzere 17 ayrı kategori değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, kömür madenciliği faaliyetlerinin özellikle iklim değişikliği ve fosil kaynak tüketimi açısından yüksek çevresel baskı yarattığını ortaya koymuştur. Bu doğrultuda, çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik üç iyileştirme senaryosu geliştirilmiştir: Üzerinde madencilik faaliyeti bulunmayan sahalarda güneş enerji santrali (GES) kurulumu için değerlendirilmesi, dizel yakıtla çalışan iş makinelerinin elektrik tahrikli sistemlerle değiştirilmesi ve iş makinelerinde dizel yerine biyodizel kullanılması.

Senaryolar, mevcut duruma kıyasla potansiyel çevresel etkilerde ne ölçüde iyileştirme sağlanabileceğini göstermek amacıyla ayrı ayrı modellenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bulgular, her üç senaryonun da çevresel performansı iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymakta; bu bağlamda çalışma, Türkiye'de kömür madenciliği süreçlerinin sürdürülebilirlik perspektifinden yeniden yapılandırılması için önemli girdiler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kömür Madenciliği, Linyit, SimaPro, Yaşam Döngüsü Analizi

ABSTRACT

MS THESIS

LIFE CYCLE ASSESMENT ON SUSTAINABLE COAL MINING

Mustafa Emre ÖZCAN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mining Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Vildan ÖNEN

2025, 86 Pages

**Jury
Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
Prof. Dr. Vildan ÖNEN
Doç. Dr. Merve KALEM**

In this thesis, the environmental impacts of mining activities carried out in a total of 10 coal fields operated by the Turkish Coal Enterprises (TKİ) were evaluated using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology. Of these sites, nine are operated by open-pit mining and one by underground mining. The sites are geographically distributed across the Aegean (3 sites), Marmara (3 sites), Central Anatolia (3 sites), and Eastern Anatolia (1 site) regions. The entire process, from coal extraction to its delivery to thermal power plants, was modeled using the SimaPro software in accordance with ISO 14040 and ISO 14044 standards. Environmental burdens were comprehensively identified through the ReCiPe impact assessment method.

Within the scope of LCA, 17 environmental impact categories were evaluated, including energy consumption, greenhouse gas emissions, acidification potential, human health effects, water use, and ecotoxicity. The analysis results revealed that coal mining operations exert particularly high environmental pressure in terms of climate change and fossil resource depletion. Accordingly, three improvement scenarios were developed to mitigate environmental impacts: the utilization of inactive mining sites for solar power plant (SPP) installations, the replacement of diesel-powered heavy machinery with electric drive systems, and the substitution of diesel with biodiesel in mining equipment.

Each scenario was individually modeled and compared to the current situation in order to assess their potential for environmental improvement. The findings demonstrate that all three scenarios have the potential to enhance environmental performance. In this context, the study provides valuable input for the restructuring of coal mining processes in Turkey from a sustainability perspective.

Keywords: Coal Mining, Lignite, SimaPro, Life Cycle Analyzes

ÖNSÖZ

Tez süreci boyunca bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, her aşamada yapıcı katkılarda bulunan değerli tez danışmanım Prof. Dr. Vildan ÖNEN'e en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Akademik hayatım boyunca yanımda olan, bu çalışmayı gerçekleştirebilmem için sabırları ve anlayışlarıyla bana güç veren eşime ve oğullarıma sonsuz teşekkürler.

Mustafa Emre ÖZCAN
KONYA-2025



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Önemi	3
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Kömür Üretimi.....	5
2.1.1. Üretim Öncesi Arama Faaliyetleri	7
2.1.2. Açık Ocak Madenciliği	8
2.1.3. Yeraltı Madenciliği	9
2.2. Yaşam Döngüsü Analizi	9
2.2.1. Yaşam Döngüsü Envanteri	14
2.2.2. Yaşam Döngüsü Etki Analizi (YDEA).....	16
2.2.2.1. Yaşam Döngüsü Etki Analizi Yöntemleri	17
2.2.3. Yaşam Döngüsü Etki Kategorileri.....	18
2.2.4. Yaşam Döngüsü Analizi Yazılımları.....	26
2.2.5. Madencilik Sektörüne Yönelik Yaşam Döngüsü Çalışmaları	27
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	31
3.1. Materyal	31
3.2. Yöntem.....	35
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	39
4.1. Araştırma Bulguları	39
4.2. Tartışma	50
5. İYİLEŞTİRME SENARYOLARI.....	56
5.1. Üzerinde Faaliyet Bulunmayan Sahalara GES Kurulması Senaryosu.....	56
5.2. Dizel İş Makinalarının Elektrik Tahrikli Sisteme Çevrilmesi Senaryosu.....	64
5.3. İş Makinalarında Dizel Yerine Biyodizel Kullanımı Senaryosu	70
6. SONUÇ	76
6.1. Sonuçlar	76
6.2. Öneriler	79
KAYNAKLAR	81

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

DCB	: Dikoloro Benzen
KWh	: Kilowatt hour
MWh	: Megawatt/Saat
NM VOC	: Non-Methane Volatile Organic Compounds
NO _x	: Azotoksitler
PM ₁₀	: Particulate Matter blow 10nm
kBq U235	: Kilo Becquerel Uranium 235

Kısaltmalar

AMD	: Asit Maden Drenajı
ANFO	: Ammonium Nitrate Fuel Oil
BMİDÇS	: Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
CFC	: Cloro Floro Carbon
CML	: Centrum voor Milieukunde Leiden
DADEK	: Doğal Arazi Dönüşümü Etki Kategorisi
DALY	: Disability Adjusted Life Year
DEEK	: Denizel Ekotoksisite Etki Kategorisi
DÖEK	: Denizsel Ötrifikasyon Etki Kategorisi
EDIP	: Environmental Design of Industrial Products
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
EŞD	: Eşdeğeri
FKTEK	: Fosil Kaynakların Azalması Etki Kategorisi
FOOEK	: Fotokimyasal Ozon Oluşumu Etki Kategorisi
GES	: Güneş Enerjisi Santrali
GWP	: Global Warming Potential
İDEK	: İklim Değişikliği Etki Kategorisi
İPCC	: Intergovernmental Panel On Climate Change
İREK	: İyonize Radyasyon Etki Kategorisi
İSO	: International Standartisation Organisation
İTEK	: İnsan Toksisitesi Etki Kategorisi
KA EK	: Karasal Asitlenme Etki Kategorisi
KAİ EK	: Kentsel Arazi İşgali Etki Kategorisi
KE EK	: Karasal Ekotoksisite Etki Kategorisi
NİOSH	: National Institute for Occupational Safety and Health
OTİP	: Ozon Tabakası İncelmesi Etki Kategorisi
OSHA	: Occupational Safety and Health Administration
PMO EK	: Partikül Madde Oluşumu Etki Kategorisi
REPA	: Resource and Environmental Profile Analysis
SETAC	: Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SKA EK	: Su Kaynaklarının Azalması Etki Kategorisi
TAİ EK	: Tarımsal Arazi İşgali Etki Kategorisi
TKİ	: Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu
TRACI	: Tools for the Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts
TSÖTK	: Tatlı Su Ötrifikasyonu Etki Kategorisi
TTK	: Türkiye Taşkömürü Kurumu

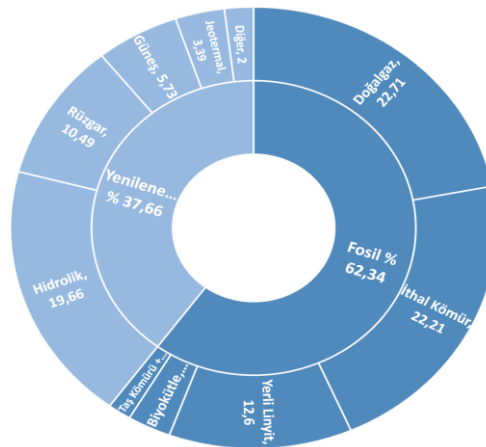
TSEK	: Temiz Su Ekotoksitesitesi Etki Kategorisi
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
UNEP	: United Nations Environmental Programme
UNDP	: United Nations Development Programme
USEPA	: United States Environmental Protection Agency
YDA	: Yaşam Döngüsü Analizi
YDD	: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi
YDEA	: Yaşam Döngüsü Etki Analizi
YDE	: Yaşam Döngüsü Envanteri
YDY	: Yaşam Döngüsü Yönetimi



1. GİRİŞ

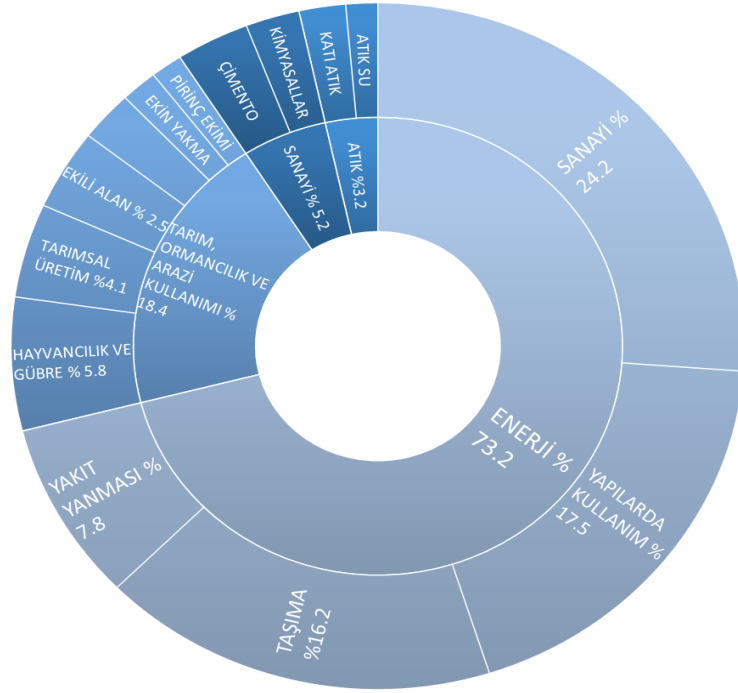
Kömür, 2023 yılında, dünya birincil enerji tüketiminde %26,5'lik payla petrolden sonra ikinci sırada yer almıştır. Dünya elektrik üretiminde ise %35,1'lik payla ilk sırada yer almıştır. The Energy Institute verilerine göre, 2023 yılında küresel ölçekte 9,1 milyar ton kömür üretilmiş ve bu miktar tüm zamanların en yüksek üretim seviyesini temsil etmiştir. Bu üretimin %51,8'lik kısmı ile 4,7 milyar tonu Çin tarafından gerçekleştirilmiştir. Enerji arzında önemli bir konuma sahip olan kömür, Türkiye'de de benzer şekilde yoğun biçimde kullanılmaktadır (The Energy Institute, 2024). Türkiye'nin toplam kömür rezervi yaklaşık 22 milyar ton olup; bu miktarın %93,3'ü linyit ve asfaltit (20,53 milyar ton), %6,7'si ise taş kömürü (1,52 milyar ton) rezervlerinden oluşmaktadır. Ayrıca, Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü kayıtlarına bakıldığında, 2023 yılında ülkemizde 83,2 milyon ton kömür üretimine karşılık 100,3 milyon ton kömür tüketimi gerçekleşmiştir. Üretim ile tüketimin arasındaki fark, ithal edilen kömürün kullanımından kaynaklanmaktadır (MAPEG, 2023).

Enerji arz güvenliğinin sağlanabilmesi amacıyla, dünyada ve ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım öncelik olarak değerlendirilse de bu alternatif kaynaklar, fosil yakıtlar gibi süreklilik ve istikrar sağlamamaktadır. Bu durum, değişen mevsimsel koşullar nedeniyle enerji üretiminde sürekli dalgalanmalara neden olmaktadır. Ülkemizde, 2023 yılında yerli kömüre dayalı santrallerden 46.168.574 MWh, ithal kömüre dayalı santrallerden ise 72.123.040 MWh olmak üzere kömüre dayalı santrallerden toplam 118.291.615 MWh elektrik üretilmiştir. 2023 yılında kömüre dayalı santrallerden üretilen elektriğin toplam elektrik üretimi içindeki payı %34,81 olurken, yerli kömürün payı ise %12,6 olmuştur (ETKB, 2024).



Şekil 1.1. 2023 Yılında Üretilen Elektriğin Sektörlere Dağılımı (ETKB, 2024)

Kömür üretimi ve tüketiminin dünya çapında giderek artması, enerji sektöründeki birincil tüketim hammadde olması, güvenilir ve sürekli olması sebebiyle tercih edilen bu fosil yakıt temiz olarak kullanılabileceği gibi, küresel emisyonların da başlıca kaynağı durumdadır. 2023 Sera Gazı Emisyon Envanteri Raporu'na göre, Türkiye'nin 2021 yılı toplam sera gazı emisyonu 564,4 Mt CO₂ eşdeğeri olarak gerçekleşmiştir. Buna göre, 2020 yılında 524,00 Mt CO₂ eşdeğer olan toplam sera gazı emisyonları bir önceki yıla göre yüzde 7,7 artış göstermiştir (TÜİK, 2023).



Şekil 1.2. Sektörlere Göre Sera Gazı Emisyon Dağılımı (Ritche, 2020)

Toplam sera gazı emisyonlarında 2021 yılında CO₂ eşdeğeri olarak en büyük payı %73,2 ile enerji kaynaklı emisyonlar alırken bunu sırasıyla, %18,4 ile tarım, ormancılık ve arazi kullanımı ve %5,2 ile sanayi faaliyetleri takip etmiştir. Yüzde 73,2 ile sera gazı emisyonlarının da %43'ünün fosil yakıtlı santraller vasıtasıyla salındığı bilinmektedir (Ritche, 2020).

Sera gazı emisyonlarının azaltılması başta olmak üzere diğer çevresel kirliliklerin de önlenmesi amacıyla, Ülkemizin tarafı olduğu Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS), Kyoto protokolü, Paris İklim Anlaşması ve AB Yeşil Mutabakatı gibi sözleşmeler bulunmaktadır. Anılan iklim esaslı sözleşmelere rağmen, küresel sera gazı emisyonları artmaya devam etmektedir ve 2023'te 53 milyar metrik ton karbondioksit eşdeğeri (Gt CO₂-eşd) ile yeni bir zirveye ulaşmıştır. Elektrik sektörü, yıllık yaklaşık 15 Gt CO₂-eşd emisyonuyla insan

faaliyetlerinden kaynaklanan en büyük sera gazı emisyonu kaynağıdır (Statista, 2023). İklim anlaşmalarının ortada bulunduğu hedef ise 2050 yılına kadar küresel ısınmanın önlenmesi ve sera gazı emisyonlarını azaltmak amacıyla sıfır emisyon hedeflerine ulaşmaktır.

1.1. Çalışmanın Önemi

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın yayımladığı 2024-2028 Stratejik Planı ile 2053 yılı net sıfır karbon emisyonu hedefi doğrultusunda, sürdürülebilir enerji temini amacıyla kömürün kullanımının daha çevreci olarak değerlendirilmesi gerektiği belirtilen Stratejik Plan doğrultusunda, aşağıdaki hedefler önceliklendirilmiştir.

- Yerli kömür ve temiz kömür teknolojileri geliştirilerek ekonomik değeri yüksek ürün eldesine yönelik Ar-Ge faaliyetlerinin sürdürülmesi,
- Kömür zenginleştirme yöntemleri kullanılarak yerli kömürün termik santrallerde kullanım imkânlarının artırılması,
- Yerli kömür rezervlerimizin kömür zenginleştirme teknolojileri kullanılarak elektrik üretiminde etkin şekilde değerlendirilmesi,
- Çevresel etki ve verimlilik açısından iyileştirmeler sağlanarak yerli kömür üretiminin artırılması,
- İthal kömür maliyetlerinin artması ve doğal gazda büyük ölçüde dışa bağımlı olunması sebebiyle yerli kömür üretiminin artırılması,
- Arz güvenliğini sağlayıcı ve cari açığı azaltıcı rolü nedeniyle yerli kömür üretiminin artırılması,
- Üzerinde faaliyet bulunmayan sahaların ve büyük kömür havzalarının ekonomiye kazandırılması,
- Yerli kömür üretimini destekleyici yeni finansman modellerinin geliştirilmesi.

Bu tez çalışması, yukarıda belirtilen stratejik hedeflerle uyumlu şekilde, başlıca yerli enerji kaynağımız olan kömürün çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir şekilde üretilmesine yönelik yaşam döngüsü analizi gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Özellikle linyitin madencilik aşamasındaki çevresel etkilerinin, saha verilerine dayalı olarak nicel biçimde ortaya konulması hedeflenmiştir. Böylece madencilik faaliyetlerinin çevresel yük içindeki payının doğru ve güvenilir bir şekilde belirlenmesi sağlanmıştır.

Çalışmanın özgün katkısı, Türkiye'de mevcut linyit üretim sahalarının yaşam döngüsü analizi kapsamında değerlendirilmesi ve bu sayede geleceğe dönük çevresel iyileştirme senaryolarının belirlenmesidir. Ayrıca elde edilen bulgular, politika yapıcılar ve endüstri paydaşları için karar destek verisi niteliği taşımaktadır. İlgili etki kategorileri kapsamında geliştirilen iyileştirme önerileriyle yalnızca sera gazı emisyonlarının azaltılması değil; aynı zamanda ekotoksisite, asitlenme, partikül madde oluşumu, ötrifikasyon ve arazi kullanımı gibi çoklu çevresel etkiler üzerinde de pozitif katkılar sağlanması hedeflenmektedir.

Küresel ölçekte madencilik sektörüne özgü birçok çevresel veri tabanı bulunmasına karşın, Türkiye özelinde benzer bir yapının henüz oluşturulmamış olması önemli bir eksikliktir. Bu durum, sürdürülebilir kaynak yönetimi ve çevresel etki analizlerinin doğruluğu açısından ciddi bir engel teşkil etmektedir. Bu nedenle, ulusal düzeyde kapsamlı ve güncel veriler içeren bir çevresel veri bankasının kurulması hem kamu hem de özel sektör açısından stratejik bir gerekliliktir. Söz konusu veri altyapısı, planlanan iyileştirme senaryoları çerçevesinde karar alma süreçlerine rehberlik edebilecek potansiyele sahiptir.

Literatür incelemesi sonucunda, Türkiye özelinde gerçekleştirilen yaşam döngüsü değerlendirme çalışmalarının çoğunlukla enerji üretim sistemleri, atık yönetimi ve yapı malzemeleri gibi sektörlere odaklandığı görülmektedir. Madencilik faaliyetlerine yönelik yaşam döngüsü analizleri ise hem sayıca az hem de metodolojik kapsam bakımından sınırlıdır (Bayrak, 2014; Erkayoğlu ve Demirel, 2011). Özellikle kömür madenciliği özelinde, çoklu saha karşılaştırmalı, saha verisi tabanlı ve ReCiPe gibi gelişmiş etki değerlendirme yöntemlerini içeren çalışmalara literatürde nadiren rastlanmaktadır.

Bu amaçla, tez çalışmasının ilk aşamasında Türkiye'de bulunan 9 adet açık ocak ve 1 adet yeraltı ocağı olmak üzere toplam 10 kömür madeninin yalnızca madencilik aşamasını kapsayan yaşam döngüsü analizi gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise, çevresel etkileri azaltmaya yönelik üç farklı senaryo değerlendirilmiştir: Üretim dışı kalan veya madencilik faaliyeti bulunmayan sahaların güneş enerji santrali (GES) kurulumuna uygunluğunun değerlendirilmesi, fosil yakıtlı iş makinelerinin elektrik tahrikli sistemlerle ikamesi ve iş makinalarında dizel yerine biyodizel kullanımının değerlendirilmesi. Bu yönüyle çalışma, yalnızca değerlendirme değil, karar destek ve strateji geliştirme işlevi de görmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kömür Üretimi

Kömür, başta enerji üretimi olmak üzere sanayi, ısınma ve kimya sektörlerinde yaygın şekilde kullanılan, jeolojik süreçler sonucu oluşmuş fosil bir enerji kaynağıdır. Milyonlarca yıl boyunca organik materyallerin ısı, basınç ve mikrobiyal süreçlerle dönüşmesi sonucunda meydana gelen kömür, içerdiği karbon miktarına bağlı olarak farklı kalite sınıflarına ayrılır: turba, linyit, taş kömürü (bitümlü kömür), yarı antrasit ve antrasit. Bu sınıflandırma, kömürün kalori değeri, uçucu madde oranı ve kül miktarı gibi özelliklerine göre yapılmaktadır (Speight, 2013).

Türkiye, kömür rezervleri açısından dünya ortalamasının altında karbon yoğunluklarına sahip linyit ağırlıklı bir yapıya sahiptir. TMMOB verilerine göre Türkiye'de yaklaşık 20 milyar tonluk linyit rezervi bulunmaktadır. Bu kaynakların büyük kısmı düşük kaliteli ve yüksek nem/kükürt içeriğine sahiptir. Yerli kömür politikaları çerçevesinde, bu kaynakların enerji üretiminde kullanımı teşvik edilmekle birlikte, özellikle düşük kalorili kömürlerin çevresel etkileri ciddi bir tartışma konusudur (TMMOB, 2020). Kömürün çıkarılması, taşınması ve yakılması süreçlerinde oluşan sera gazları, toz, asidik gazlar ve ağır metaller gibi emisyonlar; hava, su ve toprak kirliliğine neden olmaktadır. Bu süreç kömürün beşikten mezara kadar olan yolu olarak tanımlanırken; kömürün çıkarılmasından, zenginleştirme işlemlerine kadar olan madencilik süreci ise beşikten kapıya kadar olan yolu tanımlamaktadır (Şekil 2.1). Bu yönüyle kömür hem enerji kaynağı hem de çevresel etki potansiyeli açısından çift yönlü değerlendirilmesi gereken bir hammadde.

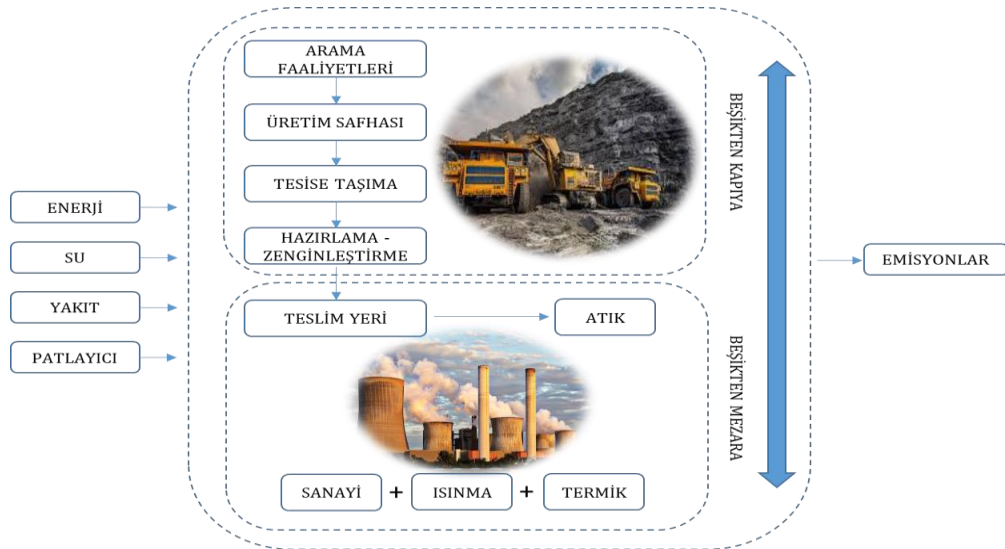
Kömür madenciliği, yalnızca enerji üretimi için gerekli hammaddenin sağlandığı bir süreç değil, aynı zamanda önemli çevresel yüklerin kaynağı olan bir üretim faaliyetidir. Özellikle açık ocak işletmeciliği yöntemlerinde doğrudan arazi bozulumu, yüzey suyu drenajının değişmesi ve toz emisyonları gibi etkiler gözlemlenirken; yer altı işletmelerinde metan salımı, yeraltı suyu kirlenmesi ve çökmeler gibi riskler söz konusudur (Özdoğan ve Kılıç, 2020).

Kömür madenciliği, kömür rezervlerinin yer altından veya yer üstünden çıkarılması sürecini ifade eden, teknik, ekonomik ve çevresel yönleri bulunan kapsamlı bir üretim faaliyetidir. Bu süreç genel olarak iki ana yöntemle yürütülmektedir: açık ocak işletmeciliği ve yer altı işletmeciliği. Açık ocak yöntemi, rezervin yüzeye yakın

olduğu durumlarda tercih edilirken; derinlerde bulunan damarlar için yer altı yöntemi uygulanmaktadır. Açık ocak madenciliği daha düşük maliyetli işletmesi ve yüksek verimli üretim yapılmasına olanak sağlamasına rağmen, yerüstü topografyasının bozulması, çökmeler ve toz emisyonları gibi çevresel etkileri mevcuttur. Yer altı madenciliğinde ise havalandırma, tahkimat, gaz kontrolü gibi teknik unsurlar daha karmaşıktır ve iş güvenliği riskleri yüksektir.

Türkiye’de kömür madenciliği hem linyit hem de taş kömürü üretimi bazı yürütülmektedir. Linyit yatakları genellikle açık ocak yöntemiyle çıkarılırken (örneğin Afşin-Elbistan, Soma), taş kömürü genellikle yer altı madenciliği ile üretilmektedir (özellikle Zonguldak havzası). Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) ve Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK), bu üretimlerin büyük kısmını gerçekleştirmektedir. Türkiye’de 2023 yılı itibarıyla yaklaşık 80 milyon ton linyit üretimi gerçekleştirilmiş olup, bunun %85’i açık ocaklardan sağlanmıştır (MTA, 2023). Ancak bu üretim sürecinde kullanılan enerji, su, patlayıcı madde ve iş makineleri gibi girdiler, sürecin çevresel etkilerini artırmaktadır.

Madencilik faaliyetleri yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda sosyal ve çevresel boyutlarıyla da ele alınmalıdır. Süreç boyunca ortaya çıkan atık kayaçlar, asidik maden drenajı, sera gazı emisyonları ve partikül maddeler çevre sağlığını tehdit etmektedir. Bu nedenle, kömür madenciliğinde çevresel etki değerlendirme (ÇED) süreçlerinin yanı sıra, yaşam döngüsü analizi gibi sistematik yöntemlerin kullanımı giderek artmaktadır. Kömür madenciliğinin sürdürülebilirlik ilkelerine uygun biçimde planlanması hem doğal kaynakların korunması hem de toplumsal kabul açısından kritik bir gerekliliktir.



Şekil 2.1. Kömür Üretim Faaliyetleri Akış Şeması

2.1.1. Üretim Öncesi Arama Faaliyetleri

Bir kömür yatağının ortaya konması için yapılacak ilk çalışma, arama faaliyetlerinin başlamasıdır. Kömür yataklarının haritalardan incelenmesi, jeolojik çalışmalar, hava fotoğrafları, haritalama, jeofizik ve jeokimya gibi yöntemler maden arama çalışmalarının temelini oluşturmaktadır. Projenin hayata geçmesi için ilk adımı oluşturan arama faaliyetleri üretim aşaması dahil olmak üzere ilerleyen süreçte de cevher yatağı hakkında daha hassas ve kesin bilgilere ulaşmak amacıyla devam etmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmaların ve analizlerin düzenli, hassas ve hatasız yapılması doğru sonuçların alınmasının yanı sıra işletme aşamasında da kilit kararların alınmasında etkileyicidir.

Planlama aşamasında, madenin üretim kapasitesi, alansal büyüklük ve uygulanacak teknolojiye göre bir hazırlık süreci öngörülür. Bu süreçte madenin üretime başlaması için tüm alanlar çalışmaya hazır hale getirilmekte ve bu süreç belirtilen kriterlere göre 1 yıla kadar sürebilmektedir. Maden içi yollar, pasa ve/veya atık alanları, idari ve yardımcı binalar, cevher hazırlama ve/veya zenginleştirme tesisleri gibi yapıların inşaat ve kurulumu bu aşamada gerçekleştirilmektedir. Tüm proje ünitelerinin inşası öncesinde belirlenen kalınlıktaki bitkisel toprak alınarak rehabilitasyon faaliyetlerinde kullanılmak üzere belirlenen bir alanda depolanmaktadır. Aynı zamanda bu işlem proje ilerleme aşamasına bağlı olarak yeni kurulacak veya aktif kullanım alanı genişleyen ünitelerde arazi hazırlama kapsamında üretime paralel bir şekilde de yürütülebilmektedir.

Maden üretiminin yapılacağı madencilik yöntemi yeraltı olması durumunda üretim-termin planlarına uygun olarak cevhere ulaşım sağlayacak kuyu, galeri gibi yeraltına giriş yapıları inşa edilmektedir. Bu yapılar delme-patlatma veya özel kazı yöntemleri ile uygulanmakta olup yeraltında gerçekleşmektedir. Cevher üretiminin başlayabilmesi için tahkimat yapıları, havalandırma, insan ve malzeme taşıma yolları gibi planlama aşamasında belirlenmiş tüm yeraltı üniteleri hazırlık sürecinde oluşturulur.

Açık ocak madenciliğinde ise yine üretim-termin planına bağlı kalarak eğer mevcutsa öncelikle çalışma alanının yüzeyindeki bitkisel toprak alınmaktadır. Daha çok kalker, bazalt, mermer gibi oluşumlarda karşılaşılan cevher yatağının hemen yüzeyde oluşması durumunda doğrudan maden üretimine başlanabilmektedir. Cevher yatağının daha derinde olması durumunda ise önce pasa olarak adlandırılan ekonomik olmayan

kayanın, kayacın yapısına göre delme-patlatma veya sökme-kazıma yöntemiyle kamyonlara yüklenerek pasa depolama alanına taşınması işlemi gerçekleştirilir. Pasa üretimi, cevher üretimi ile eş zamanlı olarak da gerçekleştirilebilir. Bu durum ekonomik değerlendirmelere göre üretim-termin planında belirlenebilir (ÇSGB, 2011).

2.1.2. Açık Ocak Madenciliği

Sanayileşen Dünyamızda enerji ve hammaddeye olan gereksinim gün geçtikçe artmaktadır. Yer kabuğunda doğal olarak oluşan ve bulunan enerji ve hammadde kaynaklarına ulaşmayı sağlayan yöntemlerden biri de açık ocak madenciliğidir. Genel olarak açık ocak faaliyetleri, maden üzerindeki toprak örtü tabakasının patlatma gerekli olması durumunda patlatma yapılarak kazı yükleme faaliyetleri ile kaldırılması (dekapaj) ve madenin üretilmesi faaliyetlerinden oluşmaktadır. Madene ulaşabilmek için mecburen madenin üzerini örten örtü tabakasının kazma, yükleme ve taşıma yoluyla kaldırılması gerekmektedir. Açık ocak madenciliğinde temel olarak döner kepçeli kazı sistemi, dragline, ekskavatör- kamyon kazı sistemi ve kombine sistemler kullanılmakta olup bir örneği şekil 2.2’de yer almaktadır.



Şekil 2.2. Açık Ocak Kömür Madenciliği (TKİa, 2025)

Dünya madencilik faaliyetlerinin yaklaşık olarak %70’i açık işletme madenciliği metotlarıyla gerçekleştirilmektedir (Li ve Ding, 2024). Açık ocak madenciliği; çalışmaların ilk yıllarında yüksek sermaye yatırımı gerektirmesi, çevre problemleri, döküm alanı bulunması, iklim şartlarından etkilenmesine karşın yüksek verimlilik, düşük maliyetler, emniyetli iş koşulları nedenleriyle ve ayrıca madenlerde özellikle kömürde daha ince kömür damarlarında dahi topuk vs. bırakmadan mümkün olduğu kadar cevher

kaybına meydan verilmeden madenin neredeyse bütününün üretilmesi açısından yeraltı madencilğine göre daha avantajlı yönleri bulunmaktadır. Gelişen teknoloji ve maden makinaları ile gün geçtikçe yüzeysel madencilik yerini daha derinlere inilerek üretim yapabilen maden işletmelerine bırakmıştır (TKİA, 2025).

2.1.3. Yeraltı Madencilği

Yeraltı Madencilği açık ocak madencilğinin teknik veya ekonomik olarak elvermediği durumlarda tercih edilen bir yöntemdir. Ancak, başta kömür olmak üzere birçok madende açık ocak ile üretilebilecek rezervler azalmakta olduğundan yeraltı madencilği her geçen gün önem kazanmaktadır. Türkiye’de uygulanan yeraltı kömür madencilği metotları; klasik yöntem, yarı mekanize yöntem ve tam mekanize yöntem olarak sürdürülmektedir. Klasik yöntemde, daha çok insan gücünün kullanıldığı diğer yöntemlere göre daha ilkel ve genellikle ahşap tahkimat malzemelerinin kullanıldığı üretim yöntemidir. Yarı mekanize sistemde ise iş gücüne dayalı üretim sisteminde bazı aşamaların makine ile yapıldığı, hidrolik ve pnömatik sistemler ile kazma işlemlerinin yürütüldüğü ve çelik ve hidrolik tahkimat sistemlerinin kullanıldığı yöntemdir. Tam mekanize sistemler ise tüm üretim sürecinin makinelerle gerçekleştirildiği, yükleme ve nakliyenin bantlar ve konveyörler ile yapıldığı, kömür kazısının tamburlu kesicilerle yapılıp yürüyen çelik tahkimat sistemlerinin kullanıldığı yöntemdir.



Şekil 2.3. Tam Mekanize Yeraltı Madencilği (Rudar, 2022)

2.2. Yaşam Döngüsü Analizi

Yaşam döngüsü analizi, bir ürün, süreç veya hizmetin çevresel etkilerini yaşamının tüm evreleri boyunca sistematik ve bütüncül bir şekilde değerlendiren bir metodolojidir. Analiz süreci, hammaddelerin çıkarılması, üretim, dağıtım, kullanım ve

nihai bertaraf gibi aşamaları içeren "beşikten mezara" yaklaşımını esas alır (ISO 14040:2006). YDA, yalnızca çevresel etkilerin nicelmesini değil, aynı zamanda bu etkilerin kaynak kullanımına, enerji tüketimine ve emisyonlara olan katkılarını da ortaya koyarak sürdürülebilir üretim ve tüketim stratejilerinin oluşturulmasına bilimsel bir temel sağlar.

Bu kapsamda YDA; iklim değişikliği, stratosferik ozon tabakasının incelmesi, ötrofikasyon, asidifikasyon, insan ve ekosistem toksisitesi gibi çok sayıda çevresel etki kategorisini dikkate alır (Tok, 2015). Bu etki kategorileri, özellikle ReCiPe, CML ve TRACI gibi etki değerlendirme yöntemleri aracılığıyla nicel olarak ifade edilebilmekte ve çevresel yüklerin hangi süreç ve girdilerden kaynaklandığı detaylı biçimde analiz edilebilmektedir.

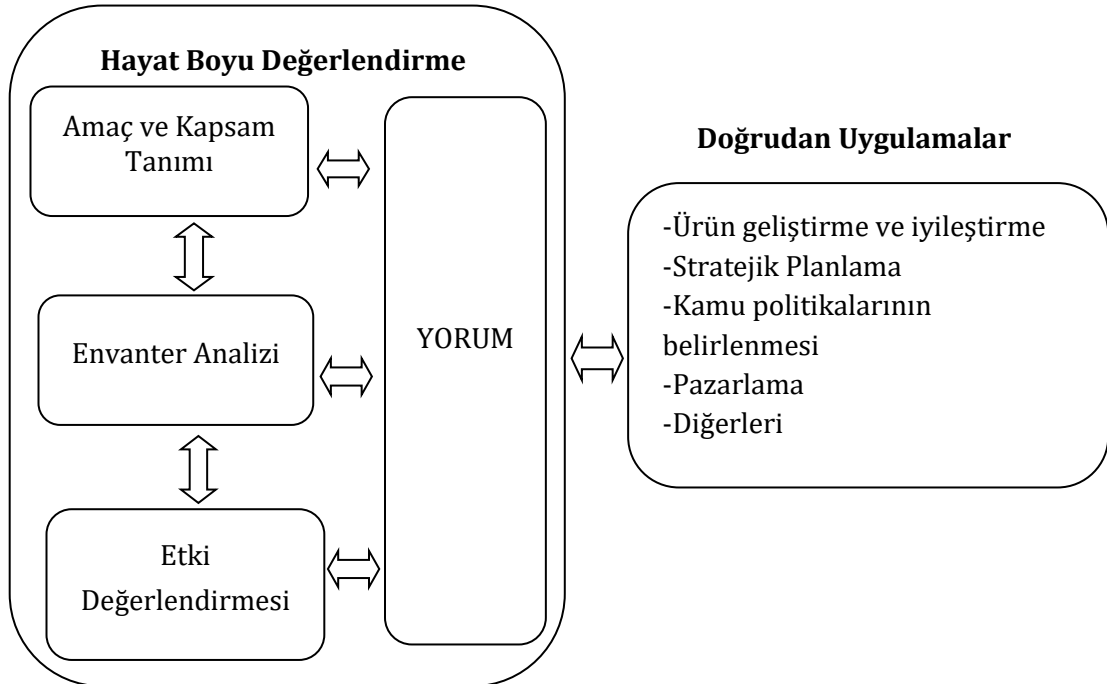
Son yıllarda yapılan çalışmalar, YDA'nın özellikle enerji, atık yönetimi, inşaat ve madencilik sektörlerinde giderek daha fazla kullanıldığını göstermektedir. Örneğin Finnveden ve diğ. (2009), YDA'nın karar verme süreçlerinde stratejik bir araç haline geldiğini ve çevresel politika üretiminde bilimsel geçerlilik sağladığını vurgulamıştır. Aynı şekilde Hauschild ve Huijbregts (2015), YDA'nın yalnızca çevresel etkilerin hesaplanmasıyla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda sistem sınırlarının doğru belirlenmesi ve veri kalitesinin artırılması yoluyla analiz sonuçlarının güvenilirliğinin güçlendirilebileceğini ortaya koymuşlardır. Dolayısıyla, yaşam döngüsü analizleri yalnızca akademik çalışmalar için değil, aynı zamanda endüstriyel üretim süreçlerinin çevresel sürdürülebilirlik açısından optimize edilmesi bakımından da kritik öneme sahiptir.



Şekil 2.4. Kullanımdan Bertarafa YDA Süreci (ISO, 14040)

YDA'da bir ürünün veya prosesin yaşam aşamalarında ortaya çıkan tüm etkiler ele alınır. Bu nedenle YDA'lar, olası iki seçeneğin karşılıklı ilişkilerini değerlendirmede de kullanılabilir. Örneğin, floresan ve akkor lambaların karşılaştırılmasında sadece enerji kullanım etkisi ele alınırsa, floresan lamba daha az enerji harcadığı için avantajlı konumda olacaktır. Buna rağmen, kontrol faktörü zehirli atık üretimi olduğu durumda floresan lamba zehirli civa içerdiği için akkor lamba daha avantajlı olacaktır. Bu durumda YDA sistemi, tüm çevresel etkilerin dikkate alınmasını sağlamak ve hangi ürünün kullanılacağına dair karar verme prosesine yardımcı olmaktadır (Bishop, 2000).

YDA, ayrıca Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu (International Organization for Standardization - ISO) tarafından standartlaştırılmıştır. ISO 14040'tan uyarlanan yaşam döngüsü değerlendirme çerçevesi Şekil 2.5'te gösterilmiştir (ISO 14040, 2006). Bu çalışmada ISO 14040 ve tamamlayıcı nitelikteki ISO 14044 standartları doğrultusunda yapılandırılmış bir YDA metodolojisi benimsenmiştir. Böylece elde edilen sonuçların uluslararası karşılaştırılabilirliği sağlanmakta, şeffaflık ve bilimsel geçerlilik düzeyi artırılmaktadır. Ayrıca, standarda uygunluk sayesinde çevresel etkilerin sistematik bir şekilde belirlenmesi, değerlendirilmesi ve karar vericilere sunulması mümkün olmaktadır. Bu bağlamda, çalışma kapsamında kullanılan veri setleri, sınır tanımlamaları ve etki kategorileri ISO standartlarına uygun olarak belirlenmiş ve raporlanmıştır.



Şekil 2.5. Yaşam döngüsü değerlendirme çerçevesi (ISO 14040, 2006)

Yaşam döngüsü değerlendirmesine yönelik çalışmalar ilk olarak 1960’larda başlamıştır. Hammadde ve enerji kaynaklarının azalması sebebiyle kısıtlamaların getirilmesi çalışmaların başlamasındaki ana etken olmuştur. 1960’ların sonlarına doğru, artan dünya popülasyonuna bağlı olarak sınırlı hammadde ve enerji gereksinimleri üzerine öngörülerde bulunularak bazı modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiş ve bu çalışmalar “The Limits to Growth” ve “A Blue Print for Survival” da yayımlanmıştır (Goldsmith ve diğ., 1972; Meadows ve diğ., 1972). 1963 yılında ise ilk kez Harold Smith, Dünya Enerji Konferansı’nda kimyasal ara ürünlerin ve kümülatif enerji gereksinimlerine yönelik miktarları hesapladığını bildirmiştir (Curran, 2006).

Bunu takiben, 1969 yılında Coca-Cola şirketi, farklı içecek kutularının kaynak tüketimi ve diğer çevresel etkilerini analiz etmek için bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, en düşük çevresel etkiye sahip kutuyu belirlemek için kullanılan hammaddelerin, yakıt miktarının ve üretimden kaynaklanan çevresel yüklerin nicelleştirilmesine odaklanılmıştır (Hunt ve Franklin, 1996).

1970’lerin başlarında Avrupa ve Amerika’daki diğer firmalar tarafından da benzer şekilde YDA’nın tamamlayıcısı olan YDD (Yaşam Döngüsü Değerlendirme) çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Amerika’da, bu süreç “REPA” (Resource and Environmental Profile Analysis- Kaynak ve Çevresel Profil Analizi) olarak Avrupa’da ise “ekolojik denge” olarak tanımlanmıştır (Kılıç, 2017). O yıllarda, belirli endüstriyel veriler mevcut olmadığı için kaynakların çoğu, hükümet belgeleri veya teknik belgeler gibi kamuya açık kaynaklardan elde edilmiştir. 1970 ve 1975 yılları arasında yaklaşık 15 REPA gerçekleştirilmiş ve çalışmaların yürütülmesi için bir standart ve metodoloji geliştirilmiştir. Bu metodoloji, ABD Çevre Koruma Ajansı (USEPA) ve endüstriyel uzmanlar tarafından incelenmiştir (Curran, 2006).

Bu çalışmaların çoğunda petrol krizi sebebiyle enerji kullanımına odaklanılmıştır. 1980’lerin başında çevresel kaygılar tehlikeli ve evsel atık yönetimi konularına kaymıştır. 1990’ların başında ise, YDD çalışmaları envanter analizinin ötesine geçerek etki değerlendirmesine (YDEA) doğru ilerlemiştir. İlerleyen yıllarda SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry-Çevresel Toksikoloji ve Kimya Derneği) ve USEPA (U. S. Environmental Protection Agency- Amerika Birleşik Devletleri Çevresel Koruma Ajansı), yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmalarını daha üst seviyelere taşımak amacıyla bu çalışmalara destek olmuşlardır (Hunt ve Franklin, 1996).

Zamanla çevre kuruluşları tarafından YDA metodolojisini standartlaştırılması konusunda baskılar artmış ve bunun bir sonucu olarak 1997-2002 yılları arasında Uluslararası Standartlar Örgütü (ISO) 14000 serisini yayınlamıştır (Curran, 2006). 2006 yılında ISO 14000 Çevre Yönetim Sisteminin bir parçası olan ISO 14040:2006 ve 14044:2006 yayımlanarak YDA standart hale getirilmiştir (Kılıç, 2017). 2002 yılında, Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP), Çevresel Toksikoloji ve Kimya Derneği (SETAC) ile Yaşam Döngüsü Girişimi'ni başlatmak amacıyla uluslararası bir ortaklık başlatmıştır. Bu girişim, yaşam döngüsü yönetimi (YDY), yaşam döngüsü envanteri (YDE) ve yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (YDED) olmak üzere üç programdan oluşmaktadır. Programlar, yaşam döngüsü düşüncesini uygulamayı ve daha iyi veriler ve göstergeler aracılığıyla destekleyici araçları geliştirmeyi amaçlamaktadır (Curran, 2006).

Yaşam Döngüsü Analizi 1990'lı yılların başından bu yana karar verme süreçlerinde giderek daha çok başvurulmuş ve sürekli geliştirilen bir yöntemdir. Yaşam döngüsü analizi ürün sistemlerinin çevresel yönleri ve etkilerini analiz etmek için ISO 14040 ve 14044 uluslararası standartları tarafından tanımlanan bir yöntemdir. ISO 14040 (1997) uluslararası standardı giriş bölümünde yaşam döngüsü analizi şöyle açıklanmaktadır:

“YDA, hammadde alımından üretime, kullanıma ve imhaya kadar bir ürünün ömrü boyunca (yani beşikten mezara) çevresel boyutlarını ve potansiyel etkilerini inceler. Dikkate alınması gereken genel çevresel etki kategorileri, kaynak kullanımı, insan sağlığı ve ekolojik sonuçları içerir.”

YDA yaklaşımı, bir ürün veya hizmetin bütün yaşam döngülerini ve aralarındaki ilişkileri bütünsel olarak değerlendirmektedir. Bu sayede değerlendirilen ürün veya hizmetin "beşikten mezara" sürecinde oluşabilecek çeşitli çevresel etkileri kümülatif olarak sunulmaktadır. Alışlagelmiş çevresel etki değerlendirme araçlarının dikkate almadığı ham madde tedariki, nakliye ve nihai bertaraf gibi aşamaları da dikkate almaktadır. Bir süreç veya ürünün yaşam döngüsü boyunca oluşabilecek olası çevre etkilerini kapsadığından değerlendirilen çevre etkilerini bütün boyutlarıyla yansıtmaktadır. Yaşam döngüsü analizi tarafından yapılabilecek kapsamlı değerlendirme, ilgili ürün veya süreçte yapılacak değişikliklerin çevresel etkisinin farklı senaryolar için karşılaştırmasını ve ilgili karar alma sürecine yansıtılmasını da sağlamaktadır (Klopffer ve Grahl, 2014).

Yaşam döngüsü analiz metodolojisi, ürün veya hizmetin tedarik sürecini, kullanılacak olan enerji, su, ihtiyaç olunan tüm girdiler ve kaynakların kullanımını ayrıca kullanımdan sonra ortaya çıkan çevreye verilen emisyonların elde edilmesi ile oluşturulacak verilerin toplanması ve tümünün incelenmesi ile ilgilidir. Yaşam döngüsü analizi metodolojisi dört aşamadan oluşmaktadır:

- Amaç ve kapsam: Araştırmanın hedefi, kapsamı, sınırları ve gelişim düzeyi tanımlanmaktadır.
- Envanter analizi: Bu adımda sistemdeki su, enerji, malzeme kullanımı ve ilgili çevre emisyonları belirlenmektedir.
- Etki değerlendirmesi: Envanter analiz basamağında belirlenen enerji, su, malzeme kullanımı ve çevre emisyonlarının insan sağlığı ve çevre değerleri üzerindeki potansiyel etkileri değerlendirilmektedir.
- Yorumlama: Envanter analizi ve etki analizi aşamaları sonuçları değerlendirilir ve mukayese edilenler arasından arzu edilen bir ürün, süreç veya hizmet seçilir. Bu seçimle ilgili kararlar ve belirsizlikler yaşam döngüsü analizinde açıkça belirtilmiştir.

Yaşam döngüsü analizi araştırması, yaşam döngüsünün aşamasına bağlı olarak beşikten mezara, beşikten kapıya, beşikten beşiğe ve kapıdan kapıya kategorize edilebilir.

- “Beşikten Mezara”, bir ürün veya sürecin tüm yaşam döngüsünü içine alan, hammadde temininden atık bertarafına kadar tüm süreçleri kapsayan analitik çalışmaları için kullanılan tanımdır.
- “Beşikten Kapıya” bir ürün veya sürecin hammadde tedariğinden fabrikadan ürün çıkışına kadar yaşam döngüsünün bir bölümünü kapsamaktadır.
- Beşikten mezara yaklaşımının son yaşam döngüsü olan ömrünün sonunda atıkların geri dönüştürülmesine gelince buna “Beşikten Beşiğe” yaklaşım denilmektedir.
- “Kapıdan Kapıya”, bir ürünün yaşam döngüsü veya sürecindeki tek bir aşamayı ele alan bir yaklaşımdır (Demirer, 2011).

2.2.1. Yaşam Döngüsü Envanteri

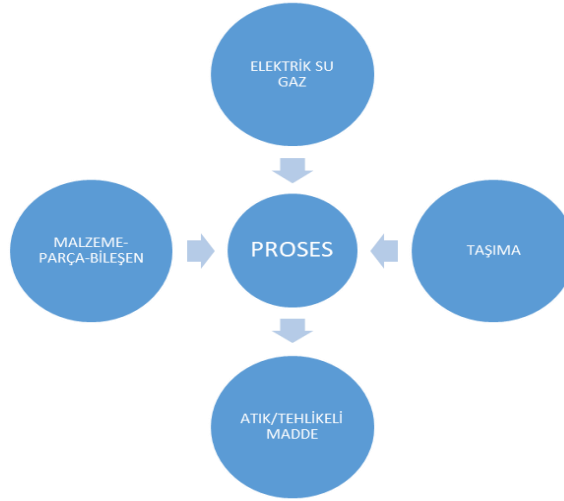
Yaşam döngüsü envanteri, bir ürün veya faaliyetin hayatı boyunca hammadde, enerji, atıklar gibi girdileri ve çevresel etkilerini (örneğin, hava ve su kirliliği) ölçen ve analiz eden bir süreçtir. Bu süreç, ürün veya faaliyetin tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini belirlemek için kullanılmaktadır.

Yaşam döngüsü analizinin envanter aşamasında ilgili tüm bilgiler toplanır ve düzenlenir. Yaşam döngüsü envanteri olmadan karşılaştırılabilir çevresel etkileri veya bunların potansiyel değişikliklerini belirlemek mümkün olmayacaktır. Toplanan bilgilerin gizliliği ve doğruluk düzeyi, yaşam döngüsü analizi çalışmasının diğer etaplarının doğruluğunu ve sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Yaşam döngüsü envanterinin analizleri birkaç farklı şekilde kullanılabilir. Örnekler arasında ürün veya süreçlerin mukayese edilmesi ve malzeme seçiminde çevresel faktörlerin dikkate alınması yer almaktadır. Ek olarak envanter analizleri, hükümetlerin kaynak kullanımını ve çevresel emisyonlarla ilgili politikalarının oluşumuna ve mevzuat geliştirilmesine yardımcı olmaktadır. Envanter analizi sonucunda, tüketilen enerji ve malzeme ile çevreye salınan kirlenimleri içeren bir liste yapılmalıdır. Bu liste yaşam döngüsü aşamasına, ortama veya sürece göre kategorize edilmelidir (Curran, 2006). Yaşam döngüsü envanterinin üç adımı vardır:

- Değerlendirilecek sürecin akış şeması
- Veri toplama planının geliştirilmesi
- Veri toplama

Akış Şemasının Oluşturulması

Akış şeması, bir sürecin veya sistemin girdilerini ve çıktılarını gösteren bir şemadır. Sistem ya da sistem sınırları, her YDA çalışması için farklıdır. YDEA çalışmalarının sınırları, amaç ve uygulama aşamalarında belirlenmelidir. Bu sınır, akış şemasında sistem sınırları olarak kullanılmaktadır. Sistem içindeki süreçler de değerlendirilir ve aralarındaki ilişkiler analiz edilerek sistem için gerekli tüm girdi ve çıktıların bir yaşam döngüsü resmi elde edilmektedir. Belirli bir sistem sınırı içindeki çeşitli süreçlerin örnek bir akış diyagramı Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Genel Birim Prosesi (Curran, 2006)

Veri Toplama Planı Oluşturulması

Yaşam döngüsünün değerlendirmesi için gereken bilginin niteliği ve miktarı amaç ve kapsam aşamasında belirlenmelidir. Yaşam döngüsü değerlendirmesi için veri toplamaya başlamadan önce bir veri toplama planı oluşturmak, verilerin istenen düzeyde kaliteli ve doğruluğunun beklentileri karşılamasını sağlamaktadır.

Veri Toplama

Veri toplama aşaması araştırma, tesis ziyaretleri veya uzmanlar ile yapılan doğrudan görüşmelerin bir bileşiminden oluşabilir veya mevcut ticari bir yaşam döngüsü analizi yazılım paketi alınabilmektedir. Ancak veri kalitesi ve yerel/bölgesel koşullar dikkate alınmalıdır. Alternatif olarak veri toplamada gereken zaman ve kaynakları azaltmak için yöreye özgü olmayan veriler kullanılabilmektedir. Ancak bu tür verilerin kaynağı ve varsayımları bilinmemektedir, bu da şeffaflığı tehlikeye atabilmektedir. Yaşam döngüsü analizi çalışmasında çıktılar kamu ile paylaşılacaksa bu yöntem uygun olmayabilir.

2.2.2. Yaşam Döngüsü Etki Analizi (YDEA)

Yaşam döngüsü aşamalarından biri olan etki analizi, veri toplama yani envanter oluşturma aşamasından bir sonraki aşamadır. ISO (Uluslararası Standardizasyon Örgütü), Yaşam Döngüsü Etki Analizi ISO 14002-1:2019 adlı bir etki analizi standardı geliştirmiştir. Böylece, yaşam döngüsü etki analizinin ilk üç zorunlu adımı şu şekilde açıklanmaktadır: etki kategorisinin seçimi, sınıflandırma ve karakterizasyon. ISO standardında bu üçünün dışında veri değerlendirme adımı zorunlu olup diğer adımlar

isteğe bağlı bırakılmıştır. Etki kategorileri insan sağlığı, çevresel emisyonlar ve doğal kaynakların tükenmesi olarak tanımlanabilir. Sınıflandırmanın amacı YDEA sonuçlarını organize etmek ve ilgili etki kategorileri ile eşleştirmektir. Bu aşamalar veri toplama sürecinden sonra tekrar gözden geçirilir. Yaşam döngüsü etki analizinin en çok kullanılan adımları ise şu şekildedir (Arvanitoyannis, 2008):

- Etki kategorizasyonun belirlenmesi – İlgili çevresel etkilerin kategorilerinin tanımlanması (örneğin, küresel ısınma, asidifikasyon, karasal zehirlilik vb.)
- Sınıflandırma – YDEA sonuçlarının etki kategorizasyonları ile eşleştirilmesi (örneğin, tüm CO₂ emisyonlarını, küresel ısınmaya katkılarını gösterecek şekilde sınıflandırma)
- Modelleme – Bilimsel karakterizasyon faktörleri kullanılarak her bir etki kategorizasyonunun modellenmesi (örneğin, karbondioksitin ve metanın küresel ısınmaya olası etkilerinin modellenmesi)
- Normalizasyon: Karşılaştırılabilir potansiyel etkileri açıklamak (örneğin, CO₂ ve CH₄'ün küresel ısınmaya olan etkilerini karşılaştırmak)
- Gruplandırma – Göstergelerin sınıflandırılması ve sıralanışı (örneğin, göstergelerin yerel, bölgesel ve küresel bazda sınıflandırılması)
- Ağırlıklandırma – En önemli potansiyel etkilerin vurgulanması
- YDEA sonuçlarının değerlendirilmesi ve raporlanması

Etki analizi sonuçlarının değerlendirilmesi ve raporlandırılması aşamasında seçilen her kategori için hesaplanan etki potansiyellerinin doğruluğu kanıtlanır. Verilerin doğruluğu ve hassasiyeti, YDEA çalışmasının amacı ve kapsamı bölümüne uyumlu olmak zorundadır. Raporlama sırasında analizlerde kullanılan metotlar detaylı olarak belirtilmeli, çalışılan sistem sınırlarıyla birlikte tarif edilmeli ve kullanılan tüm varsayımlar bildirilmelidir (Curran, 2006).

2.2.2.1. Yaşam Döngüsü Etki Analizi Yöntemleri

Yaşam döngüsü etki analizini gerçekleştirmek için örnek olarak aşağıda açıklaması yapılan CML, TRACI, ReCiPe, Eco Indicator 99, EDIP ve Impact 2002 gibi farklı 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 (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 YDA'daki emisyon alanları arasındaki farklılıkları göz önünde bulundurmak her zaman mümkün olmamakta ve istenmemektedir (Taşkın, 2018).

TRACI metodolojisinde etki kategorileri, neden-sonuç ilişkisi içinde modellemenin kesinliklerine ilişkin daha yüksek bir toplumsal kabul edilebilirlik düzeyi bulunmakla beraber, orta nokta seviyesinde tanımlanmıştır. Asidifikasyon, duman oluşumu, ötrofikasyon, kanser riski, insan sağlığı kriteri gibi etki kategorilerinde yapılan araştırmalar, ABD ve Kanada koşullarına uygun girdi verilerini kullanarak özellikle ABD koşullarına yönelik olarak geliştirilmiştir (Polat, 2024).

ReCiPe yöntemi ise, 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 CO₂ eşdeğeri olarak ifade edilirken, son nokta seviyesinde etki değerlendirmede ekosistem ve insan sağlığı olarak ikiye ayrılmaktadır. Ekosistem üzerine değerlendirmede birim “canlı tür.yıl”, insan sağlığı üzerine değerlendirmede ise DALY (Disability Adjusted Life Year), yani “işlev kaybına uyarlanmış yaşam yılı” şeklindedir (Polat, 2024).

2.2.3. Yaşam Döngüsü Etki Kategorileri

Yaşam döngüsü analizi çalışmaları kapsamında, envanter verilerinin girilmesi ve etki analizi yönteminin seçilmesi sonrası seçilen yazılım artık işlem yapmaya hazır olacaktır. İşlem sonuçlarının daha hassas olması için hangi verilerle işlem yapılıyorsa o verilere uygun etki analizi yöntemi seçmek gerekmektedir. Örnek olarak iklim değişikliği çalışması yapılmak isteniyorsa, tam sonuç almak için “S” yani son nokta sonuçlarını almaya yarayan EPS 2000 veya Eco-Indicator 99 yöntemini seçmek gerekmektedir. Genel olarak tüm etki yöntemleri doğruluğu tartışılır derecede de olsa her etki kategorisinde değerler verebilmektedir (Yılmaz, 2023). ISO 14044, 14040 ve 14048 kapsamında en çok kullanılan etki kategorileri ise Şekil 2.7’de sunulmaktadır.



Şekil 2.7. Yaşam Döngüsü Etki Kategorilerinin Şematik Gösterimi

Bu çalışma kapsamında kullanılan etki analizi yöntemi ReCiPe'nin Midpoint (H) (orta nokta) içerisinde barındırdığı kategorilerine göre açıklamaları aşağıda yer almaktadır.

İklim Değişikliği Etki Kategorisi (İDEK)

İnsan faaliyetlerinin atmosferdeki sera gazları emisyonlarına yol açarak küresel iklim sisteminde meydana getirdiği değişiklikleri değerlendiren bir etki kategorisidir. Bu kategori, sera gazlarının atmosferde birikmesi sonucu sıcaklık artışı, hava koşullarındaki değişim ve ekstrem hava olaylarının sıklığındaki artışı analiz eder. Sera gazları arasında karbondioksit (CO_2), metan (CH_4), azot oksitleri (N_2O) ve florlu gazlar (F-gazlar) yer alır. Bu gazlar, güneş ışığının yeryüzüne ulaşmasını engelleyen ve Dünya'nın yüzeyine hapsolmesini sağlayan bir "örtü" oluşturur, böylece gezegenin sıcaklığında artışa neden olur. Bu süreç "küresel ısınma" olarak da bilinir. İklim değişikliği, deniz seviyelerinin yükselmesi, ekosistemlerin bozulması, tarımsal üretimin olumsuz etkilenmesi, su kaynaklarının azalması, gıda güvenliği risklerinin artması ve

sağlık sorunlarının yaygınlaşması gibi geniş çaplı çevresel ve toplumsal sonuçlara yol açar.

Bu yöntem ile yapılan yaşam döngüsü analizlerinde, iklim değişikliği etki kategorisi, genellikle CO₂ eşdeğeri cinsinden hesaplanır. Bu, farklı sera gazlarının küresel ısınma potansiyelini (Global Warming Potential, GWP) göz önünde bulundurarak, her bir gazın atmosferdeki etkisini karbondioksit emisyonları cinsinden normalize eder. Örneğin, metan (CH₄) gazı, CO₂'ye göre 25 kat daha güçlü bir sera gazıdır ve bu nedenle belirli bir miktar metan emisyonu, daha fazla CO₂ eşdeğeri olarak değerlendirilir. Bu dönüşümde IPCC'nin (Intergovernmental Panel on Climate Change-Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli) güncel olarak yayımladığı dönüşüm kriterleri baz alınır. İklim değişikliği, uzun vadeli ekosistem değişikliklerine, biyolojik çeşitliliğin kaybına, denizel asidifikasyonuna ve insan sağlığına zarar verebilir (Goedkoop ve diğ., 2009).

İnsan Toksisitesi Etki Kategorisi (İTEK)

Çevresel kirleticilerin insan sağlığına olabilecek potansiyel zararlarını inceleyen bir etki kategorisidir. Bu kategori, insanların kimyasal maddelere, metaller, organik bileşikler veya diğer toksik kirleticilere maruz kalmasının, doğrudan ya da dolaylı olarak sağlık üzerinde yaratabileceği zararı değerlendirir. İnsan toksisitesine yol açan kirleticiler, kg 1,4-diklorobenzen eşdeğeri cinsinden hesaplanır. İnsan toksisitesi, kimyasal maddelerin solunum yoluyla, deri teması veya besin zinciri üzerinden insanlara ulaşarak çeşitli sağlık sorunlarına, kanser, nörolojik hastalıklar, genetik bozukluklar ve diğer kronik hastalıkların ortaya çıkmasına yol açabileceğini ifade eder. Kömür madenciliği gibi faaliyetlerde kullanılan tehlikeli kimyasallar, ağır metaller (kurşun, arsenik, cıva) ve asidik maden drenajları gibi kirlilik kaynakları, çevresel toksisiteyi artırır ve dolaylı olarak halk sağlığı üzerinde uzun vadeli olumsuz etkiler yaratabilir (Goedkoop ve diğ., 2009).

Fotokimyasal Ozon Oluşumu Etki Kategorisi (FOOEK)

Atmosferde güneş ışığı altında uçucu organik bileşikler ve azot oksitlerin (NO_x) reaksiyona girerek troposferik ozon (O₃) üretmesiyle oluşan çevresel bir problemdir. Bu etki kategorisi genellikle kg Non-Methane Volatile Organic Compounds (NMVOC) eşdeğeri cinsinden ifade edilir. Troposferik ozon, stratosferdeki faydalı ozondan farklı

olarak, yer yüzeyine yakın seviyelerde bulunan ve insan sağlığı, tarım ürünleri, ormanlar ve genel ekosistem üzerinde toksik etkiler yaratabilen zararlı bir kirleticidir. Fotokimyasal ozon, özellikle solunum yolu hastalıklarını tetikleyebilir ve hava kalitesini düşürür. Madencilik faaliyetleri kapsamında kullanılan dizel motorlu iş makineleri, patlayıcılar ve nakliye süreçlerinde salınan emisyonlar bu kategoriye önemli katkı sağlar. Ayrıca kömürün taşınması ve işlenmesi sırasında açığa çıkan uçucu organikler de bu etkiyi artırabilir (Goedkoop diğ., 2009).

Karasal Asitleşme Etki Kategorisi (KA EK)

Atmosferik kirleticilerin (özellikle kükürt dioksit- SO_2 , azot oksitler- NO_x ve amonyak- NH_3) çevreye salınımı sonucunda toprağın pH dengesinin bozulması ve asidik hale gelmesi ile oluşan çevresel zararları değerlendirmeye yöneliktir. Bu kategori genellikle kg SO_2 eşdeğeri cinsinden ifade edilir. Asitleşme, toprakta bulunan besin maddelerinin (örneğin kalsiyum, magnezyum) çözünerek uzaklaşmasına, toksik elementlerin (özellikle alüminyum) çözünürlüğünün artmasına ve mikroorganizma faaliyetlerinin bozulmasına neden olur. Bu durum, bitki gelişimi, orman sağlığı ve toprak verimliliği üzerinde uzun vadeli olumsuz etkiler yaratır. Kömür madenciliği faaliyetlerinde kullanılan patlayıcılar ve dizel makinelerin egzoz gazları ile enerji üretimi süreçlerinden kaynaklanan emisyonlar, karasal asitleşmeye katkı sağlayan başlıca kaynaklardır (Goedkoop diğ., 2009).

Tatlı Su Ekotoksitesitesi Etki Kategorisi (TSE EK)

Kimyasal maddelerin tatlı su ekosistemlerine verdiği potansiyel toksik zararları değerlendirmeye yönelik bir ölçüttür. Bu kategori, özellikle göller, nehirler ve akarsular gibi iç su kaynaklarında yaşayan mikroorganizmalar, omurgasızlar, balıklar ve diğer sucul canlılar üzerinde zararlı etkiler oluşturabilecek kirleticilerin yaşam döngüsü boyunca çevreye salınımını analiz eder. Bu kategori kg 1,4-diklorobenzen eşdeğeri cinsinden ifade edilir. Kömür madenciliği süreçleri sırasında oluşan asidik maden drenajı, yıkama suları ve kimyasal atıkların yüzeysel veya yeraltı su kaynaklarına karışması, bu kategoriye önemli katkılarda bulunur (Goedkoop ve diğ., 2009).

Deniz Ekotoksitesitesi Etki Kategorisi (DEEK)

Sucul ortamlarda yaşayan canlılar üzerinde toksik etkiler yaratabilecek kimyasal maddelerin deniz ortamına salınımını değerlendirir. Bu kategori, özellikle ağır metaller (örneğin cıva, kadmiyum, kurşun), pestisitler, endüstriyel kimyasallar ve petrol türevleri gibi toksik bileşenlerin deniz ekosistemine ulaşması durumunda, planktonlardan balıklara kadar uzanan geniş bir canlı yelpazesi üzerindeki potansiyel zararlarını analiz eder. ReCiPe Midpoint (H) yöntemiyle değerlendirme yapılırken birim olarak kg 1,4-diklorobenzen eşdeğeri (kg 1,4-DCB) kullanılır. Deniz ekotoksitesitesi; kimyasalların toksisite düzeyi, kalıcılığı ve biyoakümülyasyon potansiyeline bağlı olarak değişiklik gösterir. Özellikle kömür madenciliği faaliyetleri sonucunda açığa çıkan asidik maden drenajı, ağır metal içeren sızıntılar ve yıkama atıklarının deniz veya nehir sistemlerine karışması, denizel ekosistemler üzerinde ciddi toksik etkilere neden olabilir (Goedkoop ve diğ., 2009).

Partikül Madde Oluşumu Etki Kategorisi (PMOEK)

Atmosferde ince parçacıkların (özellikle PM₁₀ ve PM_{2.5}) oluşumu ve bunun insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini değerlendiren bir yaşam döngüsü değerlendirmesi etki kategorisidir. Bu ince partiküller, doğrudan emisyonlar yoluyla ya da sülfür dioksit (SO₂), azot oksitler (NO_x) ve amonyak (NH₃) gibi gazların atmosferde kimyasal reaksiyonlara girerek ikincil partikül oluşturmasıyla meydana gelir. Bu etki kg PM₁₀ eşdeğeri cinsinden ifade edilir. Partikül maddeler, solunum sistemi üzerinde ciddi sağlık etkileri yaratmakta; astım, bronşit, akciğer fonksiyonlarının azalması ve erken ölümlere neden olabilmektedir. Özellikle kömür madenciliği ve kömür yakıtlı enerji üretimi süreçlerinde yüksek miktarda partikül madde oluşmakta hem çalışan sağlığı hem de çevre açısından risk oluşturmaktadır. Bu nedenle, partikül madde oluşumu etki kategorisi, enerji ve madencilik sektörlerinde çevresel performansın değerlendirilmesinde kritik bir gösterge olarak öne çıkar (Goedkoop ve diğ., 2009).

Ozon Tabakası Tükenmesi Etki Kategorisi (OTTEK)

Atmosferin stratosferik katmanında bulunan ozon gazının incilmesiyle bağlantılı çevresel etkileri değerlendiren bir yaşam döngüsü değerlendirmesi etki kategorisidir. Ozon tabakası, Güneş'ten gelen zararlı ultraviyole (UV-B) ışınlarını filtreleyerek yeryüzündeki canlı yaşamını korur. Ancak, özellikle kloroflorokarbonlar (CFC'ler),

halonlar ve bazı soğutucu gazlar gibi insan kaynaklı kimyasallar atmosferde ozon moleküllerini parçalayarak bu koruyucu tabakanın incelmesine neden olur. Bu etki kategorisi kg CFC-11 eşdeğeri birimiyle ifade edilir. Ozon tabakasının incelməsi, insanlarda cilt kanseri ve bağışıklık sistemi baskılanması gibi sağlık sorunlarının yanı sıra, tarımsal ürünlerde verim kaybı, deniz ekosistemlerinde planktonların zarar görmesi gibi ciddi çevresel sonuçlar doğurabilir. Endüstriyel faaliyetler, özellikle soğutma sistemleri, bazı çözücülerin kullanımı ve belirli yanma süreçleri bu tür emisyonların başlıca kaynaklarıdır. Kömür madenciliği doğrudan bu etki kategorisine yüksek düzeyde katkı sunmasa da kullanılan ekipmanların bakımında veya enerji üretimi süreçlerinde kullanılan ozon inceltici kimyasallar nedeniyle dolaylı etkiler oluşturabilir (Goedkoop ve diğ., 2009).

Karasal Ekotoksiste Etki Kategorisi (KEEK)

Çevreye yayılan toksik kimyasalların toprakta yaşayan organizmalar üzerindeki zararlı etkilerini değerlendiren bir yaşam döngüsü değerlendirmesi etki kategorisidir. Bu kategori, özellikle ağır metaller (örneğin kadmiyum, kurşun, cıva), tarımsal ilaçlar (pestisitler, herbisitler) ve endüstriyel atıkların toprağa karışması sonucu, toprak ekosisteminde yaşayan mikroorganizmalar, solucanlar, böcekler ve bitkiler gibi canlılar üzerinde neden olduğu toksik etkileri kapsar. Bu kategori kg 1,4-diklorobenzen (1,4-DCB) eşdeğeri ile ifade edilir. Bu maddeler, toprak organizmalarının biyolojik işlevlerini bozarak, besin döngülerinin, toprak verimliliğinin ve bitki örtüsünün sürdürülebilirliğini tehdit edebilir. Kömür madenciliği faaliyetlerinde ortaya çıkan toprak kirlenmesi, özellikle maden atıkları ve asitli drenaj suları aracılığıyla gerçekleşmekte ve bu etki kategorisinde önemli çevresel yükler oluşturmaktadır. Karasal ekotoksiste, ekosistem sağlığı açısından kritik olduğundan, sürdürülebilir madencilik stratejilerinin belirlenmesinde önemli bir göstergedir (Goedkoop ve diğ., 2009).

Tatlı Su Ekotoksitesi Etki Kategorisi (TSEK)

Kimyasal maddelerin nehir, göl ve diğer tatlı su sistemlerinde yaşayan sucul organizmalar üzerindeki toksik etkilerini değerlendiren bir yaşam döngüsü değerlendirmesi etki kategorisidir. Bu kategori, endüstriyel atıklar, tarımsal kimyasallar (örneğin pestisitler), ağır metaller ve asidik drenaj gibi maddelerin su ekosistemlerine

yayılmasıyla oluşan çevresel zararları kapsar. Bu etki kategorisi kg 1,4-diklorobenzen (1,4-DCB) eşdeğeri birimi ile ölçülür. Bu tür toksik maddeler, planktonlar, balıklar, su bitkileri gibi organizmaların büyüme, üreme ve hayatta kalma oranlarını azaltarak ekosistem dengesini bozabilir. Kömür madenciliği faaliyetlerinden kaynaklanan atık su deşarjları ve maden atıklarının yüzey ve yeraltı su kaynaklarına karışması, tatlı su ekotoksitesine neden olan başlıca unsurlardandır (Goedkoop ve diğ., 2009).

Tarım Arazisi İşgali Etki Kategorisi (TAİEK)

Doğal veya ekolojik olarak değerli alanların tarım faaliyetleri için dönüştürülmesinin çevresel etkilerini değerlendirir. Bu kategori, tarım arazisi için kullanılan alanların doğa üzerindeki etkilerini, özellikle habitat kaybı, biyolojik çeşitlilik kaybı ve ekosistem hizmetlerinin azalması gibi olumsuz sonuçları ele alır. Bu etkiyi m²xyıl cinsinden hesaplanır. Kömür madenciliği faaliyetleri, özellikle açık ocak madenciliği ile geniş alanların kullanılmasına ve bu alanların tarım arazisi olarak dönüştürülmesine yol açabilir, bu da gıda üretimi kapasitesini olumsuz etkileyebilir (Goedkoop ve diğ., 2009).

Kentsel Arazi İşgali Etki Kategorisi (KAİEK)

Doğal veya tarımsal alanların şehirleşme süreçleriyle yerleşim alanlarına dönüştürülmesinin çevresel etkilerini değerlendirir. Bu kategori, kentleşmenin ekosistem hizmetlerine, biyolojik çeşitliliğe ve doğal habitatlara etkisini inceler. Kentsel alanların genişlemesi, özellikle ormanlar, çayır alanları veya tarım arazilerinin yok olmasıyla sonuçlanabilir ve bu da doğal çevreyi bozar. Kentsel arazi işgali m²xyıl cinsinden hesaplanır. Kömür madenciliği gibi büyük ölçekli sanayi faaliyetleri, yerleşim alanlarının kurulması için arazilerin işgal edilmesine neden olabilir, bu da uzun vadede su döngüsünü, hava kalitesini ve biyolojik çeşitliliği olumsuz etkileyebilir (Goedkoop ve diğ., 2009).

Doğal Arazi Dönüşümü Etki Kategorisi (DADEK)

Doğal ekosistemlerin insan faaliyetleri nedeniyle dönüştürülmesi ve bu dönüşümün çevresel etkilerini değerlendiren bir kategoridir. Bu etki, ormanların, çayırların, sulak alanların veya diğer doğal habitatların tarım, sanayi veya kentsel gelişim için kullanılmak üzere dönüştürülmesi ile ortaya çıkar. Bu dönüşümün etkisi

m²xyl cinsinden ölçülür ve bu süreçte kaybolan doğal alanların çevresel değeri hesaplanır. Kömür madenciliği gibi büyük ölçekli faaliyetler, doğal arazilerin yok olmasına ve ekosistemlerin bozulmasına yol açabilir. Doğal alan dönüşümü, habitat kaybı, biyolojik çeşitlilik kaybı, su kaynaklarının tükenmesi ve karbon emiliminin azalması gibi ciddi çevresel sorunlara neden olabilir (Goedkoop ve diğ., 2009).

Su Kaynaklarının Azalması Etki Kategorisi (SKAEK)

Bir bölgedeki su kaynaklarının, özellikle yer altı ve yer üstü su rezervlerinin, aşırı kullanım veya kirlenme sonucu tükenmesi ile ilgili çevresel etkileri değerlendirir. Bu kategori, suyun aşırı çekilmesi nedeniyle su ekosistemlerinin bozulmasını, su kaynaklarının kalitesinin düşmesini ve yerel su temini için kullanılan kaynakların tükenmesini inceler. Su azalması, m³ su cinsinden değerlendirilir. Kömür madenciliği gibi endüstriyel faaliyetler, özellikle yer altı su kaynaklarını aşırı şekilde kullanabilir ve su kirliliğine yol açabilir, bu da ekosistemler ve tarımsal üretim için büyük bir tehdit oluşturur. Su azalması, aynı zamanda suyun kıt olduğu bölgelerde sosyal sorunlara, gıda üretiminde zorluklara ve yerel toplulukların yaşam standartlarının düşmesine neden olabilir (Goedkoop ve diğ., 2009).

Fosil Yakıtların Tükenmesi Etki Kategorisi (FKTEK)

Fosil yakıt kaynaklarının aşırı kullanımının ve tükenmesinin çevresel etkilerini değerlendiren bir kategoridir. Bu kategori, kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların tükenmesi sürecini inceleyerek, bu kaynakların ne kadar süreyle kullanılabilir olduğuna dair bilgi sağlar. ReCiPe Midpoint (H) yöntemi, fosil yakıtların tükenmesini MJ (megajül) cinsinden ölçer. Fosil yakıtların aşırı kullanımı, doğal kaynakların tükenmesine yol açmakla kalmaz, aynı zamanda enerji üretim süreçlerinde sera gazı salınımının artmasına ve çevresel kirlenmeye de neden olabilir. Kömür madenciliği gibi faaliyetler, fosil yakıtların çıkarılması ve kullanılmasıyla bu tükenme sürecini hızlandırır. Fosil kaynaklarının tükenmesi, enerji arz güvenliğini tehdit edebilir ve uzun vadede yenilenebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesi gerekliliğini artırabilir (Goedkoop ve diğ., 2009).

İyonlaştırıcı Radyasyon Etki Kategorisi (İREK)

Atomları veya molekülleri iyonize edebilecek kadar enerjik radyasyonun çevresel etkilerini değerlendiren bir kategoridir. İyonlaştırıcı radyasyon, alfa, beta ve gama ışınları gibi yüksek enerjili parçacıklar tarafından yayılır ve canlı organizmalar üzerinde biyolojik zararlara yol açabilir. ReCiPe Midpoint (H) yöntemi, bu radyasyonun etkilerini genellikle kümülatif doz (Sv) cinsinden ölçer. Kömür madenciliği gibi endüstriyel faaliyetlerde, özellikle yer altı madenciliği sırasında doğal radon gazlarının serbest kalması sonucu iyonlaştırıcı radyasyon yayılabilir. Bu tür radyasyon maruziyeti, kanser ve genetik bozukluklar gibi sağlık sorunlarına neden olabilir. Aynı zamanda ekosistemler üzerinde de uzun vadeli etkiler yaratabilir (Goedkoop ve diğ., 2009).

Tatlı Su Ötrifikasyonu Etki Kategorisi (TSÖTK)

Tatlı su ekosistemlerinde besin maddelerinin, özellikle de fosfor ve azot bileşiklerinin aşırı birikimi sonucu fitoplankton ve alglerin aşırı çoğalmasına yol açan bir çevresel etkidir. Bu durum, çözünmüş oksijen seviyelerinin azalmasına, su kalitesinin düşmesine ve ekosistem dengesinin bozulmasına neden olur. Tarımsal gübre kullanımı, evsel ve endüstriyel atıksular ile maden atıklarının kontrolsüz deşarjı ötrifikasyonun başlıca nedenleridir. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi kapsamında, bu etki kategorisi sucul ortamların sağlığı açısından değerlendirilir ve genellikle kg P (fosfor eşdeğeri) birimiyle ifade edilir. Bu değer, sistemin çevresel etkisini, sucul ekosistemlerde ötrifikasyona neden olan fosfor yükü üzerinden hesaplar (Goedkoop ve diğ., 2009).

2.2.4. Yaşam Döngüsü Analizi Yazılımları

YDA yazılımları ile ilgili Silva ve arkadaşlarının yürütmüş olduğu bir çalışmada, 2018 yılına kadar süregelen YDA ile ilgili Web Of Science (WOS) veritabanında bulunan makalelerde yapmış oldukları inceleme sonucunda; SimaPro yazılımı kullanılarak 511 çalışma, GaBi yazılımı ile 158 çalışma ve Umberto yazılımı ile 55 çalışma yapıldığı sonucuna varmıştır. Ayrıca son 10 yılın ortalamalarına göre SimaPro yazılımı ile gerçekleştirilen çalışmaların her yıl ortalama %26,3 oranında arttığı belirlenmiştir (Silva ve diğ., 2019).

2025 yılı için “Yaşam Döngüsü” anahtar kelimesi ile YÖK’ün Ulusal Tez Merkezi üzerinden tezler arasında gerçekleştirilen taramada toplamda 169 adet

çalışmanın YDA yazılımlarından; SimaPro, Gabi ve OpenLCA kullanılarak Türkiye’deki sektör verileri ile gerçekleştirildiği sonucuna ulaşılmıştır. Tablo 2.1’de kullanılan yazılımlar oransal olarak gösterilmektedir. Bu sonuca göre Türkiye’de gerçekleştirilen YDA çalışmalarında SimaPro’nun yüksek oranda (%54) kullanıldığı görülmektedir.

Tablo 2.1. YÖK Tez Sayfası Tarama Sonucuna Göre “Yaşam Döngüsü” Konulu Çalışmalarda Kullanılan Yazılımlar ve Yüzdesel Oranları

Yazılım Adı	Çalışma Sayısı	Yüzde Oranı
SimaPro	92	%54
GaBi	60	%36
OpenLCA	17	%10

Diğer bir örnekte ise, 2019 yılında yayımlanan bir sistematik incelemede, madencilik ve mineral işleme operasyonları üzerine gerçekleştirilen 29 YDA çalışmasını analiz edilmiş olup bu çalışmaların %66’sında SimaPro yazılımının tercih edildiği belirtilmiştir. Aynı incelemede, analiz edilen çalışmaların %28 ‘inin kömür, %21 ‘inin agrega ve %14’ünün bakır cevherleri üzerine odaklandığı görülmektedir (Segura-Salazar ve diğ., 2019).

2.2.5. Madencilik Sektörüne Yönelik Yaşam Döngüsü Çalışmaları

Ülkemiz özelinde yaşam döngüsü konusunda yapılmış çalışmaları değerlendirebilmek amacıyla, 2025 yılında “Yaşam Döngüsü” anahtar kelimesi ile YÖK’ün Ulusal Tez Merkezi üzerinden tezler arasında tarama yapılmış ve toplamda 169 adet çalışmanın YDA yazılımlarından; SimaPro, Gabi ve OpenLCA kullanılarak Türkiye’deki sektör verileri ile gerçekleştirildiği önceki bölümde belirtilmişti. Yapılan tarama sonucu elde edilen “yaşam döngüsü” konulu akademik çalışmalar, içeriklerinde yer alan sektör bilgisine göre ayrıca gruplandırılmıştır. Bu gruplandırmanın ifade edildiği Tablo 2.2’de yer alan bilgilere göre, ülkemizde de küresel ölçekte olduğu gibi daha çok sanayi sektörü ve atık yönetimi sektörü ile ilgili YDA çalışmaları yapılmaktadır. Madencilik ile ilgili çalışmalar ise sadece 2 adet olup tüm çalışmalara oranı %2 seviyesinde kalmıştır.

Tablo 2.2. “Yaşam Döngüsü” Konulu Akademik Çalışmaların Gruplandırılması

	Yapı/İnşaat	Enerji	Ulaşım	Sanayi	Tarım/Gıda	Atık	Madencilik
Çalışma Sayısı	20	25	3	60	15	44	2
Yüzde Oranı	%12	%15	%2	%36	%9	%24	%2

Bayrak, (2014) Türkiye’de üretilen kömürün sahadan çıkarılmasından termik santrale verilinceye kadar olan aşamalarına (madencilik, kömür hazırlama ve zenginleştirme ve taşıma) ait çevresel etkileri yaşam döngüsü analizi yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada, çevreye etkilerin azaltılması için madencilik uygulamalarında bazı değişiklikler içeren iyileştirme senaryoları geliştirilmiş olup bu senaryolar; iş makinesi çalışma kapasitelerinin artırılması, yıkama prosesi atık suyunun susuzlaştırılması ve atığın geri kazanımı, biyodizel karışımı yakıt kullanımı ve yolların sulanması gibi madencilik faaliyetlerinde uygulanabilir değişikliklerdir. Ülkemizde yapılan bir diğer çalışmada ise, açık ocak madenciliğinde 20 km mesafeye taşınan kömürün konveyörler veya kamyonlar ile taşınmasının karşılaştırmalı olarak YDA’sını gerçekleştirmiştir. İklim değişikliği ve asitleşme etki kategorilerinde SimaPro 7.3. sürümünde çalışılmıştır. Kamyon ile taşınmanın asitlenme kategorisinde 1,9 kat daha fazla etkiye sahip olduğu ve bantlı konveyörlerin de iklim değişikliği kategorisinde fosil yakıt yakılmasından dolayı 1,6 kat fazla etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır (Erkayoğlu ve Demirel, 2011).

Görüldüğü üzere, ülkemizde yer alan sektör verileriyle madencilik alanında yürütülmüş çalışmalar çok azdır. Kömür üretiminin ülkemize göre nispeten daha fazla olduğu diğer ülkelerde ise madencilik alanında gerçekleştirilen çalışmaların doğru orantılı olarak daha fazla olduğu görülmektedir. Buchart-Korol ve diğ. (2016) tarafından kömür madenciliği faaliyetleri için hesaplamalı çevresel yaşam döngüsü değerlendirmesi modeli geliştirilmiş ve modelini Polonya’daki kömür madenciliği faaliyetlerine uygulamıştır. Geliştirilen YDA modeli ile, taş kömürü madenlerinde belirlenen tüm birim süreçler için çevresel göstergeler yaşam döngüsü yaklaşımıyla değerlendirilmiştir. Etki kategorilerinde en büyük çevresel etkilerin fosil yakıt kullanımı, metan emisyonları, elektrik kullanımı, atıkların işlenmesi, ısı ve çelik tahkimatlardan kaynaklandığı ortaya çıkmıştır. Adiansyah, (2017) çalışmasında yaşam döngüsü analizini kullanarak kömür madeni atık yönetimi stratejilerini karşılaştırmıştır. Flotasyon hücrelerinde zenginleştirilmesi yapılan 1 ton kömür konsantresi elde edilmesi amacıyla farklı maden atığı yönetim stratejilerinin çevresel performansını/etkisini

karşılaştırmak ve arazi kullanım değişikliğinin büyüklük etkisini değerlendirmiştir. Çalışmada TRACI ve ReCiPe YDA etki yöntemler kullanmıştır. Değerlendirme sonucunda, elektrik enerjisinin çevresel zararların tümünün %90'ından fazlasına etkide bulunduğu tespit edilmiş ve atıkların çevresel etkilerinin en az olduğu sonucuna varılmıştır. Zhang ve diğ. (2018) kömür üretiminin çevre üzerindeki etkisini değerlendirmek için, SimaPro yazılımı kullanılarak Çin'deki bir kömür madeninin madencilik süreci üzerinde bir yaşam döngüsü analizi gerçekleştirmiştir. YDA verilerini sağlamak için Ecoinvent veri tabanı kullanılmış ve belirsizlik bilgileriyle birlikte orta nokta sonuçları, ReCiPe Orta Nokta (midpoint) (H) yöntemi kullanılarak hesaplamıştır. Orta nokta sonuçları normalleştirildikten sonra, fosil tükenmesi en baskın çevresel etki kategorisi olarak belirlenmiş ve bunu deniz ekotoksitesitesi, tatlı su ekotoksitesitesi, iklim değişikliği, tatlı su ötrofikasyonu ve insan toksitesitesi izlemiştir.

Da Silva ve diğ. (2018) Brezilya'daki bir yer üstü madeninden elde edilen kömürün yaşam döngüsünün envanterini oluşturup analiz sonucu elde ettiği çevresel etki çalışmasını sunmuştur. Bu envanter, literatürde böyle bir bilginin bulunmaması nedeniyle özellikle sera gazlarının etkisinin dikkate alınarak yaşam döngüsü analizi çalışmalarına veri tabanı görevi görmesi amacıyla geliştirilmiştir. Kömür yaşam döngüsü emisyonlarından biri olan CO₂ için, kg kömür başına $3,29 \times 10^{-2}$ kg CO₂ eşd. hesaplanmıştır.

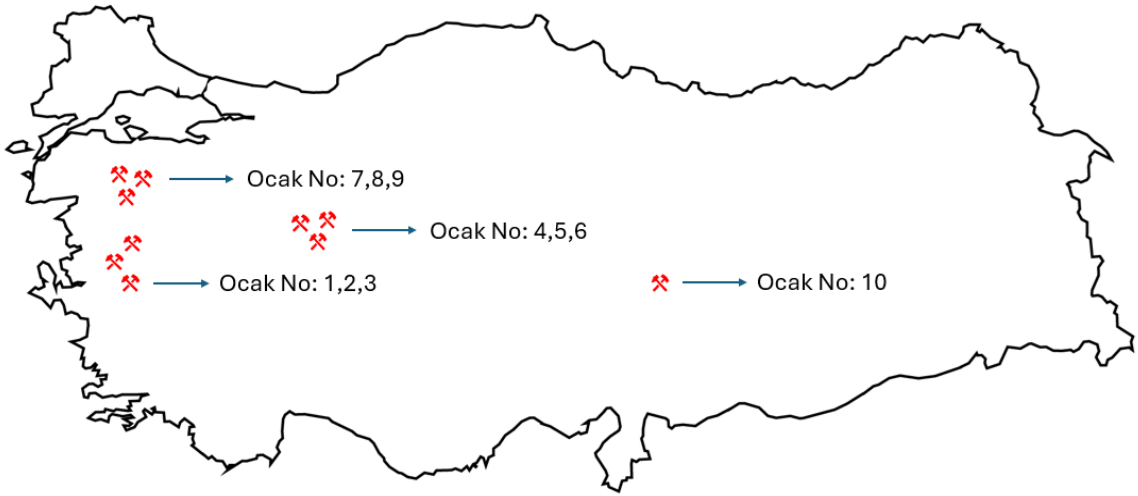
Türkmen, (2020) çalışmasında; ilk kez Türkiye'deki elektrik sektörünün çevresel, ekonomik ve sosyal yönleri dikkate alınarak entegre bir yaşam döngüsü sürdürülebilirlik değerlendirmesini sunmuştur. Linyit yakıtlı bir enerji santralinde 1 kWh enerji üretilmesi sonucu çevreye verilen etkileri analiz etmiştir. 1 kWh enerji eldesi için 1,206 gr CO₂, 7.78 gr SO₂ ve 2.89 gr PM₁₀ toz oluşumu emisyonlarının meydana geldiğini saptamıştır. Restrepo ve diğ. (2015), Brezilya'da elektrik üretimi için kullanılan ve yeraltı oda topuk yöntemi ile üretilen kömür üzerinde bir yaşam döngüsü değerlendirmesi yapmıştır. Etki kategorilerini değerlendirmek için Eco-İndicator 99 ve IPCC GWP 100 yöntemlerini kullanmıştır. Uzun vadede maden atıklarının en yüksek çevresel etkiye sahip olduğu, kısa dönemde ise solunum inorganikleri en etkili çevresel etken olarak tespit edilmiştir. Her iki senaryo için de küresel ısınma potansiyeli endeksi, kömürün kg'ı başına 0,0856 kg CO₂ eşd olarak tespit edilmiştir. Diharjo ve Sar Manik, (2023) Doğu Kalimantan'da yer alan (Endonezya) bir kömür madeni işletmesinde, arazi ıslahından kömürün gemilere yüklenmesine kadar olan süreçleri kapsayan bir YDA gerçekleştirmişlerdir. OpenLCA yazılımı ve ReCiPe 2016 yöntemi kullanılarak yapılan

analizde, ince partikül madde oluşumu, küresel ısınma, karasal asitleşme, ozon oluşumu ve su tüketimi gibi çevresel etkiler değerlendirilmiştir. Özellikle, örtü tabakasının kazılması sürecinin çevresel etkilerde önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir. Lelek ve Kulczycka, (2021) Polonya'daki bir açık ocak linyit madeninde gerçekleştirilen madencilik faaliyetlerinin çevresel etkilerini değerlendirmişlerdir. SimaPro yazılımı ve ILCD 2011 Midpoint yöntemi kullanılarak yapılan analizde, elektrik tüketimi, atık ve örtü tabakası yönetimi gibi faktörlerin çevresel etkilere katkısı incelenmiştir. İnceleme sonucunda, büyük miktarda örtü tabakasının kaldırılmasının çevresel bozulmaya yol açtığını belirtmektedir. Durucan ve diğ. (2006) çalışmasında Macaristan'da yer alan bir boksit madeni için YDA analizi yapmıştır. Madenin ön araştırmasından, üretim, yöntem, konum ve çevreye deşarjların detaylı verilerini oluşturarak “Kara Kutu” olarak anılan madencilik sistemini kapsamlı bir şekilde temsil edebilen bir araç geliştirmiştir. Çevresel etkilerin orta nokta değerleriyle ifade edilerek kaynak yönetiminin geliştirilmesi gerekliliğini vurgulamıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmanın amacı; Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu'na ait 10 adet kömür madeni sahasında kömürün üretilmesi aşamasına ait çevresel etkilerinin yaşam döngüsü perspektifinden incelenmesidir. 3 adeti Ege Bölgesinde, 3 adeti Marmara Bölgesinde, 3 adeti İç Anadolu Bölgesinde ve 1 adeti de Doğu Anadolu Bölgesinde yer almakta olan maden ocaklarının lokasyonları Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Konumların birbirine mücavir olması sebebiyle gösterimi yapılan çift çekiç simgeleri temsilen yerleştirilmişlerdir. Kömür madenciliği, kömür arama çalışmaları sonrası kömür varlığının ortaya konulması, varlığı bilinen kömürün arama çalışmalarından elde edilen veriler eşliğinde modellenmesi, açık veya yeraltı şeklinde üretim metodunun seçimi, kömürün üretilmesi amacıyla dekapaj faaliyetlerinin yapılması, kömür üretimi ve taşınması, kömür hazırlama ve zenginleştirme işlemleri ile son aşama olan kömürün nihai ulaşım yerine nakliyesi şeklindedir.



Şekil 3.1. Maden Sahalarının Haritadaki Konumları

Kömür madenciliğinin son aşaması olan kullanım yerine nakliye edilmesi; enerji üretimi amacıyla santrale verilmesi, ısınma amacıyla kullanımı ve sanayi-endüstriyel kullanım amacıyla ilgili yerlere nakliyesini içermektedir. 10 adet maden sahasına ait madencilik amacıyla kullanılan alan, dekapaj miktarı ve üretim miktarı verileri Tablo 3.1'de, üretimlerin kullanım yerlerine göre teslim miktarları ise Tablo 3.2'de sunulmaktadır.

Tablo 3.1. 2023 Yılına Ait Dekapaj ve Üretim verileri

OCAK NO	İşgal Edilen Alan [Ha]	Dekapaj Miktarı [mM ³]	Açık Ocak Üret. [mT]	Yeraltı Üretimi [mT]
1-2-3	815	9,05	1,92	-
4-5-6	2813	6,31	1,73	0,24
7-8-9	1209	2,05	3,55	-
10	450	3,30	-	-
TOPLAM	5287	20,71	7,20	0,24

Not: (mM³= Milyon Metreküp, mT= Milyon Ton)

Tablo 3.2. Üretimlerin Teslim Yerlerine Göre Miktarları

OCAK NO	Termik [mT]	Sanayi-Isınma [mT]	Diğer [mT]	Atık ve Şlam [mT]	Toplam [mT]
1-2-3	1,42	0,21	0,19	0,10	1,92
4-5-6	1,12	0,71	0,10	0,04	1,97
7-8-9	3,18	0,10	0,17	0,10	3,55
10	-	-	-	-	-
TOPLAM	5,72	1,02	0,46	0,24	7,44

Bu sahalarda 2023 yılı içinde 7,44 milyon ton linyit kömürü üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu üretimin 0,24 milyon tonu yeraltı üretimi şeklinde ve 7,2 milyon tonu da açık ocak üretim faaliyetleri neticesinde gerçekleştirilmiştir. Yaşam döngüsüne konu olabilecek diğer bir etken ise dekapaj miktarıdır. 2023 yılında anılan sahalarda 20,71 milyon m³ dekapaj yapılmıştır. Bu sahalara ait bazı veriler havza madenciliği yapıldığı için işletme bazlı olarak belirlenmek zorunda kalmıştır. Ocakların birbirine yakın olması, mücavir ocakların envanter verilerinin beraber değerlendirilmesi ve elektrik, dizel, benzin, yağ vb. gider kalemlerinin beraber değerlendirilmesi zorunluluğunda kalınması neticesinde 1-2-3, 4-5-6, 7-8-9 ve 10 numaralı ocaklar için envanter verilerinin bazıları beraber hesaplanmıştır. Verilerin işlenmesi sırasında, ayrı verilerin birleştirilmesi toplam emisyonu etkilemeyeceği için verilerin tek elden yürütülmesinde sakınca görülmemiştir. Çalışmada sadece 2023 yılı için envanter verilerine ulaşılabildiği için ilk yatırım maliyetleri dahilinde olan makine-ekipman ve tesis malzemelerine ait veriler kayıt dışı tutulmuştur. Envanter analizi çalışmaları kapsamında sahalardan toplanan veriler bulgular kısmında ayrıca sunulmaktadır.

Elde edilen malzeme ve enerji verilerine yönelik kullanım yerleri ve miktarları hakkında aşağıda bilgi verilmektedir.

Çelik tel halat; kömür madenciliği süreçlerinde, özellikle açık ocak madenciliğinde ve yer altı madenlerinde, madencilik ekipmanlarının ve taşıma sistemlerinin bir parçası olarak yaygın şekilde kullanılır. Bu malzeme, özellikle taşıma ve kaldırma işlemlerinde, kaya ve madenlerin taşınmasında önemli bir rol oynar. Ayrıca yeraltı madenlerinde tahkimat sistemi olarak kullanımı da mevcuttur.

Çelik tel hasır; küçük çaplı çelik tellerin bir araya getirilerek, genellikle kare veya dikdörtgen şekillerde örgü haline getirilmesiyle üretilir. Bu malzeme, dayanıklılığı ve esnekliği sayesinde çeşitli yapısal uygulamalarda, özellikle zemin stabilizasyonu ve güvenlik sistemlerinde kullanılır. Çelik tel hasır, ayrıca yer altı madenlerinde kullanılan taşıma sistemlerinde, özellikle kaya ve taşların taşıma sistemlerinde güvenliği artırmak için de yaygın bir şekilde tercih edilir. Madencilik faaliyetlerinde, çelik tel hasır, yer altı madencilik shaftlarında, ocaklarda ve açık hava işletmelerinde, ağır yüklerin taşınmasında ve zemin desteğinde kullanılmaktadır.

Dizel; madencilik faaliyetlerinin her aşamasında kullanılan dizel yakıt ülkemizde bulunan rafinerilerde elde edilmektedir. Dizel yakıtın özgül ağırlığı 0,838 kg/L'dir.

Benzin; madencilik faaliyetlerinin her aşamasında kullanılan benzin ülkemizde bulunan rafinerilerde elde edilmektedir. Benzinin özgül ağırlığı 0,9/l'dir

Kapsül; madencilikte kullanılan kapsüller, patlayıcı maddelerin kontrollü şekilde infilak ettirilmesini sağlayan başlatıcı elemanlardır ve delme-patlatma yöntemlerinin etkinliğini doğrudan etkileyen kritik bileşenler arasında yer alır. Genellikle alüminyum, çelik veya plastik gövdeli olarak üretilen kapsüller, içerdikleri primer patlayıcılar (örneğin PETN, RDX) aracılığıyla ana patlayıcının detonasyonunu başlatır.

Emulan; emülsiyon patlayıcıları (kısaca emülan), madencilikte yaygın olarak kullanılan, yüksek performanslı ve çevresel açıdan daha güvenli kabul edilen modern patlayıcı maddelerdendir. Su bazlı yapıları sayesinde hem yer altı hem de açık ocak madenciliğinde ıslak delik koşullarında dahi yüksek kararlılık gösterirler. Temel olarak, su içinde dağılmış bir oksitleyici fazın (çoğunlukla amonyum nitrat ve sodyum nitrat çözeltisi) yağ bazlı bir yakıt fazı (parafin, mineral yağ vb.) ile stabil hale getirilmesiyle oluşturulurlar.

ANFO (Ammonium Nitrate Fuel Oil); madencilikte en yaygın kullanılan dökme patlayıcı türlerinden biridir ve adını bileşimindeki iki temel bileşenden alır: %94–96 oranında amonyum nitrat (NH_4NO_3) ve %4–6 oranında yakıt yağı (genellikle dizel). Bu

iki bileşenin homojen şekilde karıştırılmasıyla elde edilen ANFO, düşük maliyeti, kolay üretimi ve yüksek enerji verimi sayesinde özellikle açık ocak madenciliğinde tercih edilmektedir.

Dinamit; madencilikte uzun yıllardır kullanılan, yüksek şok etkili ve güçlü bir nitrogliserin bazlı patlayıcı maddedir.

Binek Araç ve Ağır Kamyon Lastikleri; ağır yük taşıma kapasitesine sahip, dayanıklı ve uzun ömürlü bir lastik türüdür. Genellikle yüksek mukavemetli kauçuk bileşenlerinden, çelik kord ve tekstil katmanlarından üretilir. İçeriğinde, kauçuk karışımı (içeriklerinde doğal ve sentetik kauçuk), karbon siyahı, silika, sülfür, çelik tel, plastik ve çeşitli kimyasal katkı maddeleri bulunur.

Ağaç Maden Direği; ahşap tahkimat, maden ocaklarında, özellikle yer altı çalışma alanlarında, tünel ve galerilerin stabilitesini sağlamak amacıyla kullanılan bir destek sistemidir. Genellikle dayanıklı ve esnek ahşap direkler, kirişler ve çerçeveler ile inşa edilen bu tahkimat, yer altındaki jeolojik şartlara göre şekillendirilir.

İşlenmiş Demir ve Saclar; madencilikte tahkimat üniteleri başta olmak üzere kömür hazırlama ve zenginleştirme tesislerinde kullanılmaktadır.

Bantlar; bantlı konveyör, malzeme taşımak için kullanılan, genellikle düz veya eğimli bir bant sistemi üzerinde hareket eden otomatik taşıma sistemleridir. Genellikle PVC, kauçuk veya çelik tel gibi dayanıklı malzemelerden üretilen taşıma bandı, bir motor tarafından hareket ettirilir ve bu motor, döner tamburlara bağlı olarak bandın sürekli hareket etmesini sağlar. İşletmelerde 800 mm ve 1400 mm aralığında bant lastiği kullanımı mevcuttur.

Manyetit; demir oksit minerali olan ve yüksek oranda demir içeren bir bileşiktir (Fe_3O_4), kömür zenginleştirme proseslerinde (lavvar) manyetik ayırma yöntemiyle kullanılır. Manyetit, özellikle manyetik özellikleri nedeniyle, kömür ve diğer minerallerden ayırma işlemlerinde verimli bir şekilde kullanılır.

Temiz Hava; yeraltı madenciliğinde ocağa giren taze hava, solunabilir ortam sağlamak, zararlı gazları seyreltmek, patlama ve yangın riskini azaltmak amacıyla kullanılmaktadır.

Elektrik; maden işletmelerinde genellikle orta ve yüksek gerilim (1 kV ile 36 kV arasındaki gerilim seviyeleri) kullanılmaktadır. Bu gerilim seviyesi, yer altı ve yüzeydeki ekipmanlar için ideal enerji sağlama kapasitesine sahip olup, enerji kaybını minimize ederken güvenli ve verimli bir enerji iletimi sağlar. Orta gerilim sistemleri, yüksek güçlü motorlar, taşıma sistemleri, pompalar ve yer altındaki büyük elektrikli

makineler için uygun olup, aynı zamanda yüksek gerilim seviyeleriyle beslenen daha büyük trafo merkezlerinden dağıtımı daha güvenli hale getirir.

Doğalgaz, zenginleştirme, kalsinasyon, kurutma, ısıtma sistemleri gibi işlemlerde doğalgaz enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır.

3.2. Yöntem

Yaşam döngüsü analizi, ürünlerin, süreçlerin ve sistemlerin çevresel etkilerini bütüncül bir yaklaşımla değerlendirmek amacıyla uygulanmıştır. Analiz sürecinde, uluslararası düzeyde tanınan bir yaşam döngüsü değerlendirme yazılımı olan SimaPro (System for Integrated Environmental Assessment of Products) kullanılmıştır. SimaPro yazılımı, ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarına tam uyumlu şekilde yapılandırılmış olup, veri girişi, sistem modelleme, etki değerlendirme ve sonuç analizi gibi temel aşamaları etkin bir biçimde yürütme kapasitesine sahiptir (Pré Sustainability, 2021).

Yazılım, kullanıcıya çevresel envanter verilerini ayrıntılı olarak tanımlama ve yönetme imkânı sunmakta; aynı zamanda ReCiPe, CML, Eco-indicator 99 ve IPCC gibi çeşitli etki değerlendirme yöntemleriyle karbon ayak izi, su kullanımı, asitlenme, toksisite ve arazi kullanımı gibi etki kategorilerinde analiz gerçekleştirme olanağı tanımaktadır. SimaPro, akademik çalışmalarda olduğu kadar, endüstriyel üretim süreçlerinin çevresel performansının izlenmesi ve sürdürülebilirlik raporlamasında da yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Sistem sınırları, 1 ton linyit kömür üretiminin, madencilik aşamasını kapsayacak şekilde “beşikten kapıya” (cradle-to-gate) olarak belirlenmiştir. Analiz kapsamında kullanılan veriler hem Ecoinvent veri tabanından hem de Türkiye Kömür İşletmeleri'ne (TKİ) bağlı sahalardan elde edilen saha ölçümleri, işletme kayıtları, çevresel izleme raporları ve literatür kaynaklarından derlenmiştir. Analiz, ReCiPe Midpoint (H) yöntemine göre gerçekleştirilmiş ve ilgili 17 etki kategorisi üzerinden değerlendirilmiştir.

Modelleme sürecinde, madencilik faaliyetlerine ait tüm girdi (input) ve çıktı (output) verileri detaylandırılarak sisteme tanımlanmıştır. Girdiler arasında elektrik, dizel yakıt, su, anfo tipi patlayıcılar, çelik ekipmanlar ve taşıma araçlarının kaynak tüketimi yer alırken; çıktılar arasında karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), partikül madde (PM), atık kaya, şlam, atık su ve ağır metal içerikli toprak emisyonları gibi çevresel etkiler yer almıştır.

Anlık hava ölçümleri, yüzeyde yer alan birikinti su ölçümleri ve şlam örneklerinden elde edilen laboratuvar analiz sonuçlarına dayanarak; havada, suda ve toprakta birikim potansiyeli taşıyan kirleticiler (karbonmonoksit, arsenik, mangan, demir vb.) yıllık bazda kütleli olarak hesaplanmış ve "emissions to air/water/soil" kategorisi altında modele entegre edilmiştir. Bu yaklaşım, hem lokal çevresel etkilerin doğru şekilde temsil edilmesini hem de madencilik faaliyetlerinin yerel ekosistem üzerindeki potansiyel etkilerinin daha kapsamlı olarak değerlendirilmesini mümkün kılmıştır. Şekil 3.2’de SimaPro yazılımının envanter arayüzündeki veri tabanında yer alan bazı süreçleri göstermekte olup Şekil 3.3’te ise envanterlere ait girdiler ve emisyon çıktılarının yazılım arayüzünde tanımlanmasını göstermektedir.

Name	Unit	Waste type	Project
GES	ton	not defined	TKI
Infra lignite briquets S	TJ	not defined	ETH-ESU 96 System process
Infra lignite briquets U	TJ	not defined	ETH-ESU 96 Unit process
Infra lignite dust S	TJ	not defined	ETH-ESU 96 System process
Infra lignite dust U	TJ	not defined	ETH-ESU 96 Unit process
Infra lignite mine UCPTE S	ton	not defined	ETH-ESU 96 System process
Infra lignite mine UCPTE U	ton	not defined	ETH-ESU 96 Unit process
Lignite briquettes production plant/RER/I S	p	not defined	Ecoinvent system process
Lignite briquettes production plant/RER/I U	p	not defined	Ecoinvent unit processes
Lignite dust production plant/RER/I S	p	not defined	Ecoinvent system process
Lignite dust production plant/RER/I U	p	not defined	Ecoinvent unit processes
LINYIT	ton	not defined	TKI
Open cast mine, lignite/RER/I S	p	not defined	Ecoinvent system process
Open cast mine, lignite/RER/I U	p	not defined	Ecoinvent unit processes
Open cast mine, peat/NORDEL/I S	p	not defined	Ecoinvent system process
Open cast mine, peat/NORDEL/I U	p	not defined	Ecoinvent unit processes

Translated name: Mine, Tagbau, Braunkohle
 Included processes: This module includes an estimation of the most important construction materials and energy use for the relevant material use is not separated from the total material use in the available references. Land use for the infrastructure the operation of the mine.
 Remark: Information was available only for a few mines. For the preparation of this module only amounts per tonne were available.

13172 items | 1 item selected

Şekil 3.2. SimaPro Yazılımında Süreçlerin Ecoinvent Veritabanı Üzerinden Seçimi ve Sistem Tanımları

Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SD Min	Max	Comment
Lubricant oil (1)		877006	l	Undefined			
Diesel, low-sulphur, at regional storage/RER S		17248593	kg	Undefined			
Petrol, low-sulphur, at regional storage/RER S		14249	kg	Undefined			
Tin plate 100% scrap B250(98)		3435	ton	Undefined			
Steel cold rolled, BOF FAL							
Natural rubber FAL							
EPDM rubber ETH S		44	ton	Undefined			
Ammonium nitrate, as N, at regional storehouse/RER S		1274	ton	Undefined			
Operation, lorry 16-32t, EURO5/RER S		1893144	km	Undefined			
Transport, coach/CH S		10773472	personkm	Undefined			
Transport, aircraft, passenger, Europe/RER S		170708	personkm	Undefined			
Transport, coach/CH S		10773472	personkm	Undefined			
Transport, lorry 16-32t, EURO5/RER S		52100000	tkm	Undefined			
Iron ore, 65% Fe, at beneficiation/GLO S		3225	ton	Undefined			

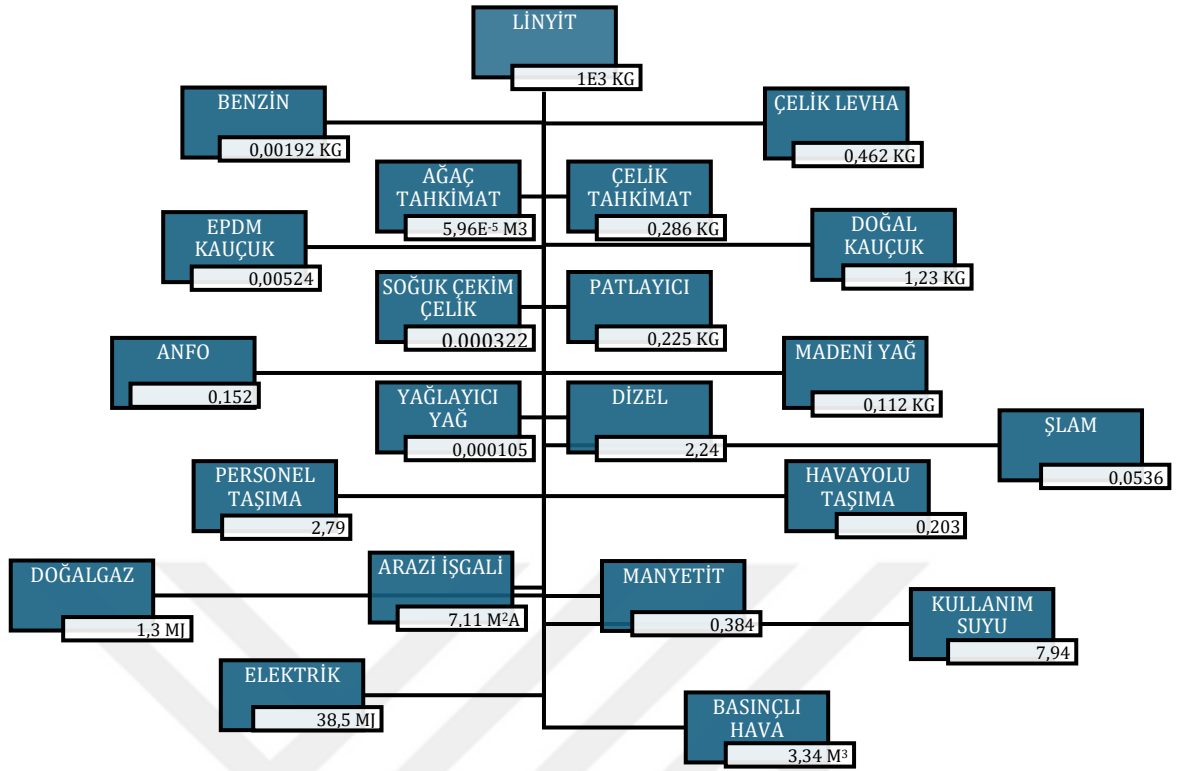
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SD Min	Max	Comment
Electricity, high voltage, production GR, at grid/GR S							
Iron ore, 65% Fe, at beneficiation/GLO S							
Tap water, at user/RER S		10000000	kg	Undefined			
Compressed air, optimised generation, <30kW, 12 bar gauge, at compressor/RER S		28000000	m3	Undefined			
Produced natural gas GUS S		254937	m3	Undefined			

Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SD Min	Max	Comment
Carbon dioxide, fossil	low. pop.		kg	Undefined			
Carbon monoxide, fossil	low. pop.		kg	Undefined			
Nitrogen oxides	low. pop.	1172,34	kg	Undefined			
Particulates, > 10 um	low. pop.	25671,24	kg	Undefined			
Sulfur dioxide	low. pop.	793,58	kg	Undefined			

Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SD Min	Max	Comment
Aluminum	groundwater	3,26	kg	Undefined			
Barium	groundwater	10,88	kg	Undefined			
Boron	groundwater						

Şekil 3.3. SimaPro Yazılımında Envanter Girdileri ve Emisyon Çıktılarının Tanımlandığı Yaşam Döngüsü Envanteri Arayüzü

SimaPro yazılımı ile yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğunda %18,89'luk bir oran ile ReCiPe yönteminin en çok tercih edildiği bilgisi yer almaktadır (iPoint-systems GmbH, 2023). Tüm veriler ReCiPe Midpoint (H) (Europe ReCiPe) etki değerlendirme yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu sayede kömür madenciliği sürecine ait faaliyetlerin iklim değişikliği (climate change), ekotoksisite (ecotoxicity), insan sağlığı (human health), arazi kullanımı (land use) gibi çevresel kategorilerdeki etkileri sayısal olarak analiz edilmiştir. Modelleme süreci aynı zamanda farklı senaryoların karşılaştırılması ve çevresel etkinin kaynak bazlı ayrıştırılması açısından da temel bir aşamayı oluşturmaktadır.



Şekil 3.4. Simapro Tekil Ürün Akış Şeması (Single Product Flow)

Şekil 3.4'te sunulan ürün akış şeması, bu çalışmada yaşam döngüsü analizi kapsamında belirlenen sistem sınırları dâhilinde, 1 ton linyit kömürü üretimi için oluşturulmuş bir tekil ürün sistemi (single product system) modelini göstermektedir. SimaPro yazılımı kullanılarak yapılandırılan bu model, hammaddenin çıkarılmasından başlayarak kömür üretim süreçleri, zenginleştirme süreçleri ve emisyon oluşumu gibi çevresel olarak kritik alt süreçleri içermektedir.

Şemada yer alan her bir düğüm, yaşam döngüsü boyunca sisteme tanımlanan bir proses adımını temsil etmektedir. Bu süreçler; elektrik tüketimi, dizel kullanımı, su ihtiyacı, patlayıcı madde kullanımı gibi girdileri içeren alt bileşenlerle birlikte modellenmiş ve bir ağaç yapısı içerisinde sistematik olarak yapılandırılmıştır. Söz konusu görsel, her bir girdinin veya alt sürecin toplam çevresel yüke olan katkısını kantitatif olarak analiz etmeye imkân sağlamaktadır.

Bu şema, YDA modellemesinde kullanılan sistem sınırları çerçevesinde tasarlanmış olup, analiz birimi olarak kabul edilen 1 ton kömür temelinde normalize edilmiştir. Görsel, çalışmanın yaşam döngüsü modellemesindeki yapısal mantığını teknik olarak temsil etmekte ve sonraki aşamada gerçekleştirilen etki değerlendirme işlemlerine temel veri akışını oluşturmaktadır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Araştırma Bulguları

Envanter analizi çalışmaları kapsamında elde edilen envanter girdi verileri (inputs) ve çıktı verileri (outputs) bu bölümde yer almaktadır. Madencilik aşamasına ait girdi verileri Türkiye Kömür İşletmeleri'ne ait saha ve envanter kayıtlarından temin edilmiş olup Tablo 4.1'de sunulmaktadır.

Tablo 4.1. Madencilik Envanteri Girdi Verileri

Malzeme Adı	SimaPro Proses Adı	Miktar
Ham Linyit Kömürü (Kg)	Coal, Brown in Ground	7.440.000.000
Dekapaj Malzemesi (Kg)	Gravel + Sand + Shale + Clay	20.710.000.000
Maden Çıkarım Alanı (Ha)	Occupation, Mineral Extraction Site	5287
Personel Taşımacılığı (KişixKm)	Transport, Coach, S	20773472
Maden Direği (m ³)	Sawn Timber, Hardwood, RER S	500
Hidrolik Tahkimat (Şilt) (Kg)	Reinforcing Steel, RER S	2.700.000
Hasır Çelik (Kg)	Steel Low Alloyed, RER S	2.700
Dinamit (Kg)	Explosives,ETH S	18.600
Anfo(Kg)	Amonium Nitrate, RER S	1.274.773
İnfilaklı Fitol (Mt)	Amonium Nitrate, RER S	8.000
Kapsül (Adt)	Polyethylene	30.089
Gecikme Rölesi (Mt)	Polyethylene	490
Emülsiyon Patlayıcı (Kg)	Emulsifier	576.140
Dizel (Lt)	Diesel, Low Sulphur	19.894.571
Benzin (Lt)	Petrol, Low Sulphur	15.833
Madeni Yağlar (Kg)	Lubricating Oil	723.530
Çelik Levha Sac (Kg)	Reinforcing Steel, RER S	3.435.456
Çelik Halat (Mt)	Steel, Cold Rolled	20.000
Kamyon Lastik (Adt)	Natural Rubber	397
Otobüs Lastik (Adt)	Natural Rubber	495
Araç Lastikleri (Adt)	Natural Rubber	264
Bantlar (Mt)	Rubber, Synthetic	4.900
Elektrik (kWh)	Electricity, High Voltage	79.600.000
Manyetit (Kg)	İron, %65 FE	3.600.000
Su (m ³)	Water Ground/Surface	59103
Hava (m ³)	Compressed Air	28.440.000
Doğalgaz (Mj)	Natural Gaz, Burned Industrial	9.687.606

Madencilik envanterine ait girdi verileri sonrası yaşam döngüsü analizinin yapılabilmesi için çıktı verilerine de ihtiyaç duyulmaktadır. Söz konusu 10 adet maden sahasına ait verilerin toprağa, suya ve havaya emisyon verilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Çalışmanın sağlıklı olabilmesi açısından gerçek saha verilerine dayalı olarak evvelki çalışmalar incelendiğinde hazır veri setleri dahilinde elde edilen verilerin esas alındığı bilinmektedir. Uluslararası veri tabanları olan IPCC, EPA ve Ecoinvent'e ait kaynaklardan hazır veriler elde edilebilir durumdadır. Örnek olarak 1 ton kömürün üretilmesi aşamasına ait emisyon verileri bu kaynaklardan elde edilebilir. Fakat elde edilen değerlerin her şartta aynı olamayacağı ve gerçekçi bir çalışmaya mesnet olamayacağı için saha verilerinin güvenilirliği esastır.

Çıktı verisi olarak işlenmesi gereken çevresel parametrelerin, ISO 14000 serisi standartlarında belirtildiği üzere, havaya, suya ve toprağa yönelik emisyon miktarlarını kapsaması gerekmektedir. Bu doğrultuda, TKİ ve TÜBİTAK iş birliğiyle yürütülen “TKİ’ye Bağlı İşletmelerde Çevresel Durum Değerlendirme Projesi” (2012) kapsamında elde edilen saha verileri referans alınmıştır (Tablo 4.2; Tablo 4.4; Tablo 4.5). Emisyonların envanter verisine dönüştürülebilmesi için fiziksel ölçümler, hacimsel tahminler ve saha alanına özgü hesaplamaların birlikte değerlendirilmesi gereklidir. Çevresel durum değerlendirme projesinin verilerinin bu çalışmada kullanılabilirliğine ilişkin temel gerekçe, Türkiye’de açık ocak kömür madenciliğinde kullanılan üretim teknikleri, mekanizasyon düzeyi ve operasyonel süreçlerin 2012 yılından bu yana büyük oranda sabit kalmış olmasıdır. Madencilik yönteminin (açık kazı, yükleme, taşıma ve lavvar işleme) değişmemiş olması ve kullanılan ekipman türlerinin aynı kalması, söz konusu verilerin güncel koşulları temsil etmesini sağlamaktadır. Bu nedenle, söz konusu saha ölçümlerinin günümüz koşullarında da geçerliliğini koruduğu ve bu çalışmada referans veri seti olarak kullanılmasında bilimsel açıdan herhangi bir sakınca bulunmadığı değerlendirilmektedir.

Tablo 4.2. Havaya Deşarj Olan Kirlilik Parametreleri

Gaz Adı	Miktarı	Birimi
Karbon Monoksit - CO	0,12	mg/m ³
Partikül Madde - PM ₁₀	128,1	µg/m ³
Azot Dioksit - NO ₂	5,85	µg/m ³
Kükürt Dioksit - SO ₂	3,96	µg/m ³

Hava emisyonlarının yıllık toplam kütleli yükü esas alınarak envanter hesaplaması yapılırken, meteorolojik faktörler (rüzgâr, sıcaklık, atmosferik dispersiyon vb.) modele dahil edilmemiştir. Bu yaklaşım, ISO 14044 kapsamında öngörülen süreçte dayalı yaşam döngüsü analizlerinde yaygın olarak kullanılan ve süreçle ilgili doğrudan emisyonları değerlendiren metodolojilere uygundur. Emisyonların çevredeki yayılım ve maruziyet etkilerinin değerlendirilmesi ayrı bir hava kalitesi modellemesi sürecini gerektirmektedir.

Açık ocak madenciliği sahasında gerçekleştirilen hava emisyonu ölçümlerinde, gazların fiziksel özellikleri ve uluslararası standartlar dikkate alınarak ölçüm yükseklikleri belirlenmiştir. SO₂ ve CO gibi gazlar için ölçümler, işçi solunum bölgesini temsil eden 1,5 – 2,0 m yükseklikte gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, OSHA ve NIOSH tarafından belirlenen maruziyet sınırlarının doğru bir şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır (OSHA, 2023). Benzer bir değerlendirmede, Bayrak (2024) çalışmasında ölçüm yüksekliği 1 metre olarak esas alınmıştır; bu farklılık, saha koşulları veya ölçüm cihazı tipiyle ilişkili olabilir. Toplam yüzey alanının hesaplanması ile bu yükseklik değeri için toplam hava hacmi hesaplanabilecektir. 2023 yılı içerisinde TKİ'nin faaliyet gösterdiği 10 ayrı sahada maden işletme sınırları (MAPEG verileri) baz alınarak Google Earth desteği ile gerçekleştirilen ölçümlerde 5287 hektarlık bir alanda faaliyet gösterildiği sonucuna varılmaktadır. Bu bağlamda, saha kaynaklı hava emisyonlarına ilişkin ölçümler, hacimsel parametrelerle çarpılarak kütleli birimlere dönüştürülmüş ve ardından SimaPro uyumlu çıktı formatına aktarılmıştır (Tablo 4.3)

Tablo 4.3. Havaya Deşarj Olan Parametrelerin Envanter Verisine Dönüştürülmesi

	Karbon Monoksit	Partikül Madde	Azot Dioksit	Kükürt Dioksit
	CO	PM₁₀	NO₂	SO₂
Ölçüm Değeri	0,12	128,1	5,85	3,96
Birimi	mg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³
CAS Kayıt Numarası	000630-08-0	-	011104-93-1	007446-09-5
Toplam Alan (Ha)	5287	5287	5287	5287
Yükseklik (m)	2	2	2	2
Envanter Dön. (Kg)	12,68	13,54	0,62	0,42
SimaPro Tanımı	Carbon Monoxide, Fossil, Low Pop.	Particules, >10 µm, Low Pop.	Nitrogen Oxides, Low Pop.	Sulfur Dioxide, Low. Pop.

Not: Low. Pop. (Low Population Density) (Düşük Nüfus Yoğunluğuna Sahip Yer)

Suya deşarj edilen kirleticilerin hesaplanmasında, TKİ ve TÜBİTAK tarafından yürütülen saha bazlı örneklem ve analizlere dayalı olarak gerçekleştirilen “Çevresel Durum Değerlendirme Projesi (2012)” verileri referans alınmıştır. Ocak faaliyetlerinin yoğunlaştığı belirli sahalarda, belirlenen zaman periyotlarında toplanan yüzey suyu örnekleri üzerinden aritmetik ve ağırlıklı ortalama yöntemleri kullanılarak konsantrasyon değerleri belirlenmiştir.

Yıllık toplam yüzeysel su akışı, meteorolojik ve hidrolojik veriler dikkate alınarak tahmin edilmiştir. Türkiye’nin bu bölgelerinde ortalama yıllık yağış miktarı 700-1.200 mm/m² arasında değişmektedir (TÜİK, 2023). Ortalama yağış miktarları metrekare başına; ocak 1-2-3 bölgesinde 742,2 mm, ocak 4-5-6 bölgesinde 561,9 mm, ocak 7-8-9 bölgesinde 623,2 ve ocak 10 bölgesinde ise 721,6 mm olarak gerçekleşmiştir. Her bölgenin yağış miktarı ile madencilik amacıyla kullanılan alanların çarpımlarının aritmetik ortalaması ise 619,36 mm/m² olarak hesaplanmaktadır.

Bu tahmini akış miktarı, belirli bir yüzey alanından ne kadar suyun biriktiğini ve yeraltına karıştığını gösteren önemli bir veri setidir. Yağış miktarı ve akış koefisiyenti ile toplam yıllık su akışı hesaplandıktan sonra, bu suyun kirleticilerle nasıl etkileşime girdiği üzerine ek hesaplamalar yapılabilir. Örneğin, maden sahasında biriken sudan alınan alüminyum örneği (Tablo 4.4), 31 mg/litre değerinde bir kirleticinin bulunduğunu göstermektedir. Bu, suyun birikiminden kaynaklanan kirlenmenin bir göstergesidir. Toplam etkilenen su miktarının hesaplanması ve kirleticilerin envanter verisine dönüştürülmesi aşağıdaki gibidir;

$$\text{Yıllık Su Hacmi (m}^3\text{)} = \text{Yağış (m/yıl)} \times \text{Akış Koefisiyenti} \times \text{Saha Alanı (m}^2\text{)} \quad (4.1.)$$

$$\text{Kirletici Miktar (kg)} = \text{Su Hacmi (m}^3\text{)} \times \text{Konsantrasyon (mg/L)} \times 10^{-6} \quad (4.2.)$$

Formül 4.1. ile yapılan hesaplamalar sonucunda toplam su hacmi; 0,619 m yağış miktar, 0,6 seçilen akış koefisiyenti ve 52.870.000 m² belirlenen yüzey alanının çarpılması sonucu 19.635.918 m³ olarak hesaplanmaktadır. Maden sahalarında biriken kirletici miktarları ise 4.2’de yer alan formül vasıtasıyla; toplam su hacmi ile Tablo 4.4.’te yer alan alan kirletici miktarı ve 10⁻⁶ birimler arası dönüşüm faktörünün çarpılması sonucu hesaplanmaktadır. Akışların yüzeyden toprağa ve oradan yeraltı suyuna geçişi nedeniyle, SimaPro çıktı verileri arasında kirleticinin yeraltı suyu (groundwater) ortamındaki etkisi dikkate alınmıştır.

Tablo 4.4. Suyu Deşarj Olan Kirlilik Parametreleri (TKİ - Tübitak, 2012)

Kirletici Adı	Ölçüm Değeri	Birimi	CAS Kayıt Numarası	Su Miktarı (mM ³)	Envanter Verisi (kg)
Aluminyum (Al)	31,4	mg/l	007429-90-5	19,635	616.507
Arsenik (As)	61,50	µg/l	017428-41-0	19,635	1.207
Baryum (Ba)	104,79	µg/l	007440-39-3	19,635	2.057
Bor (B)	9,279	µg/l	007440-42-8	19,635	182
Klorür (Cl)	92,34	mg/l	016887-00-6	19,635	1.813.180
Krom +3 (Cr)	1,18	mg/l	016065-83-1	19,635	23.170
Kobalt (Co)	32,82	µg/l	007440-48-4	19,635	644
Bakır (Cu)	33,06	µg/l	007440-50-8	19,635	649
Florür (F)	1,15	µg/l	016894-48-8	19,635	22
Demir (Fe)	741	µg/l	007439-89-6	19,635	14.550
Kurşun (Pb)	1,76	µg/l	007439-92-1	19,635	34
Mangan (Mn)	2,645	µg/l	007439-92-1	19,635	51
Nikel (Ni)	1,371	µg/l	007440-02-0	19,635	26
Nitrat (NO ₃)	27,22	mg/l	014797-55-8	19,635	534.489
Fosfor (P)	0,10	mg/l	007723-14-0	19,635	1963
Selenyum (Se)	19,12	µg/l	007782-49-2	19,635	375
Sodyum (Na)	317	µg/l	017341-25-2	19,635	6.224
Çinko (Zn)	89	µg/l	007440-66-6	19,635	1.747

Suya deşarj olunan kirleticilerin hesaplanması gibi aynı şekilde toprağa deşarj olunan kirleticilerin de hesaplanması gerekmektedir. Toprağa deşarj edilen kirletici yüklerinin belirlenmesinde, lavvar tesislerinden çıkan suyun analizine dayalı olarak gerçekleştirilen eluat testlerinin sonuçları referans alınmıştır. TKİ ve TÜBİTAK iş birliğiyle gerçekleştirilen “Çevresel Durum Değerlendirme Projesi (2012)” kapsamında, atıkların çevreye olan potansiyel etkilerini belirlemek amacıyla 68 adet şlam numunesi üzerinde Sıvı/Katı = 10 L/kg oranında eluat testi uygulanmış ve çözünabilir metal konsantrasyonları belirlenmiştir (Bayrak, 2014). Eluat analizleri, Avrupa Atık Direktifi’ne (Council Directive 91/689/EEC) ve TS EN 12457-2 standardına uygun biçimde, katı atıkların su ile temasında ortama geçebilecek kirleticilerin tespiti açısından uygun bir yöntemdir. Bu nedenle, elde edilen konsantrasyon verileri toprağa potansiyel geçiş yapacak çözünmüş fraksiyonları temsil ettiği varsayımıyla değerlendirilmiştir.

2023 yılı içerisinde kömür hazırlama ve zenginleştirme tesislerinde işlenen kömürün artığı olarak meydana gelen kömür şlamının 240.000 ton olduğu Tablo 3.2’de

sunulmuştur. Elde edilmesi gereken önemli bir parametre ise kömür şlamının çevresel yayılım alanıdır. Ancak şlam depolama alanlarının dinamik yapısı, atık dağılımındaki heterojen karakteristikler ve zamansal değişkenlik dikkate alındığında, bu alanın kesin sınırlarla belirlenmesi güçleşmektedir. Bu nedenle, çalışmada saha gözlemleri, mevcut şlam havuzları ve şlam kurutma harmanlarının yapısı esas alınarak, ortalama yerleşim ölçümleri temelinde bir değerlendirme yapılmıştır. Alan çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen saha gözlemleri, kömür şlamının ortalama 100 cm yüksekliğinde depolandığını göstermektedir. Bu verilere dayanılarak, toplam şlam hacminin yaklaşık 2.400.000 m³ olduğu tahmin edilmiştir (Formül 4.3). Bu veri üzerinden yapılan hesaplamalarda, yaklaşık 240 hektarlık bir alanın bu stoklama faaliyetinden etkilenmiş olabileceği öngörülmektedir (Formül 4.4).

$$\text{Toplam Hacim (m}^3\text{)} = \text{Toplam Şlam Miktarı (Ton)} \times \text{Şlam Yoğunluğu (t/m}^3\text{)} \quad (4.3.)$$

$$\text{Toplam Hacim (m}^3\text{)} = \text{Alan (m}^2\text{)} \times \text{Kalınlık (m)} \quad (4.4.)$$

$$\text{Kirletici Ağırlığı (Kg)} = \text{Kirletici Konsantrasyonu (mg/L)} \times \text{Şlam Miktarı (Kg)} \times \text{Şlam Yoğunluğu} \times 10^{-6} \quad (4.5.)$$

Formül 4.5 vasıtasıyla hesaplanan kirletici konsantrasyonlarının envanter verisine dönüştürülmüş hali Tablo 4.5'te sunulmaktadır. Bu yaklaşımla belirlenen değerler, yaşam döngüsü envanteri kapsamında toprağa doğrudan deşarj olarak değerlendirilmiş ve SimaPro yazılımına “emission to soil, industrial” çıktısı olarak işlenmiştir. Yöntem, ISO 14044 ve SETAC tavsiyeleri doğrultusunda sürece dayalı emisyon hesaplama yöntemleriyle uyumludur. Ancak kirleticilerin yeraltı suyuna geçişi, biyoyararlanımı veya toksikokinetik davranışı gibi parametreler bu analiz kapsamında değerlendirilmemiştir.

Tablo 4.5. Toprağa Deşarj Olan Kirlilik Parametreleri

Kirletici Adı	Miktar	Birimi	CAS Kayıt Numarası	Alan (Ha)	Envanter Verisi (Kg)
Arsenik - As	0,026	mg/l	007440-38-2	240	62,4
Baryum - Ba	0,068	mg/l	007440-39-3	240	163,2
Kadmiyum - Cd	0,000073	mg/l	007440-43-9	240	0,2
Bakır - Cu	0,0037	mg/l	007440-50-8	240	8,9
Civa - Hg	0,00046	mg/l	007439-97-6	240	1,1
Molibden - Mo	0,023	mg/l	007439-98-7	240	55,2

Nikel - Ni	0,14	mg/l	007440-02-2	240	336
Kurşun - Pb	0,00065	mg/l	007439-91-1	240	1,6
Antimon - Sb	0,002	mg/l	007440-36-0	240	4,8
Selenyum - Se	0,0031	mg/l	007782-49-2	240	7,4
Çinko - Zn	0,018	mg/l	007440-66-6	240	43,2
Klorür - Cl	7	mg/l	016887-00-6	240	16800
Florür - F	0,31	mg/l	016984-48-8	240	744
Sülfat - SO4	477,31	mg/l	007704-34-9	240	1.145.544

Yaşam döngüsü analizi çalışması kapsamında, SimaPro yazılımına entegre edilen kapsamlı envanter verileri doğrultusunda 2023 yılı içinde üretilmiş olan 7,44 milyon ton kömürün madencilik aşamasındaki çevresel etkileri analiz edilmiş olup sonuçları Tablo 4.6’da yer almaktadır. Bu analiz, ISO 14040 ve ISO 14044 standartları doğrultusunda “beşikten kapıya” sistem sınırları esas alınarak yürütülmüş olup, kömürün çıkarıldığı noktadan nihai kullanıcıya ulaşıncaya kadar geçen süreçteki çevresel etkiler dikkate alınmıştır. Kömürün yanma aşaması ve son kullanım sürecine ait emisyonlar bu çalışmanın sistem sınırları dışında bırakılmıştır. Bu yaklaşım, hammaddenin çıkarımı ve taşınmasına odaklanan, sürece dayalı bir YDA (Yaşam Döngüsü Analizi) metodolojisi ile uyumludur.

SimaPro yazılımına entegre edilen envanter verileri, her bir etki kategorisine özgü karakterizasyon faktörleri ile çarpılarak çevresel etkiler, ilgili eşdeğer birimlere dönüştürülmüştür. Örneğin, İklim Değişikliği Etki Kategorisi için sera gazları (CO₂, CH₄, N₂O vb.), CO₂ eşdeğeri (kg CO₂ eşdeğeri) cinsinden ifade edilmiş olup, dönüşüm hesaplamalarında IPCC tarafından önerilen küresel ısınma potansiyeli faktörleri kullanılmıştır. Bu dönüşüm, SimaPro veri tabanında yer alan ISO 14044 uyumlu karakterizasyon metodolojileri ile otomatik olarak gerçekleştirilmiştir.

Fonksiyonel birimlerin her biri için çevresel etki çıktılarının tek bir temsili birim (örneğin kg CO₂-eşd, kg SO₂-eşd, kg 1,4-DB-eşd) ile sunulması, etki kategorileri arasındaki karşılaştırmalı değerlendirmeyi kolaylaştırmakta ve yorumlama sürecine açıklık kazandırmaktadır. Bu analizler sonucunda, envanter verilerinin her bir etki kategorisindeki yüzdesel katkı payları grafiksel olarak Şekil 4.1’de sunulmuş; aynı veriler sayısal olarak Tablo 4.7’de detaylandırılmıştır.

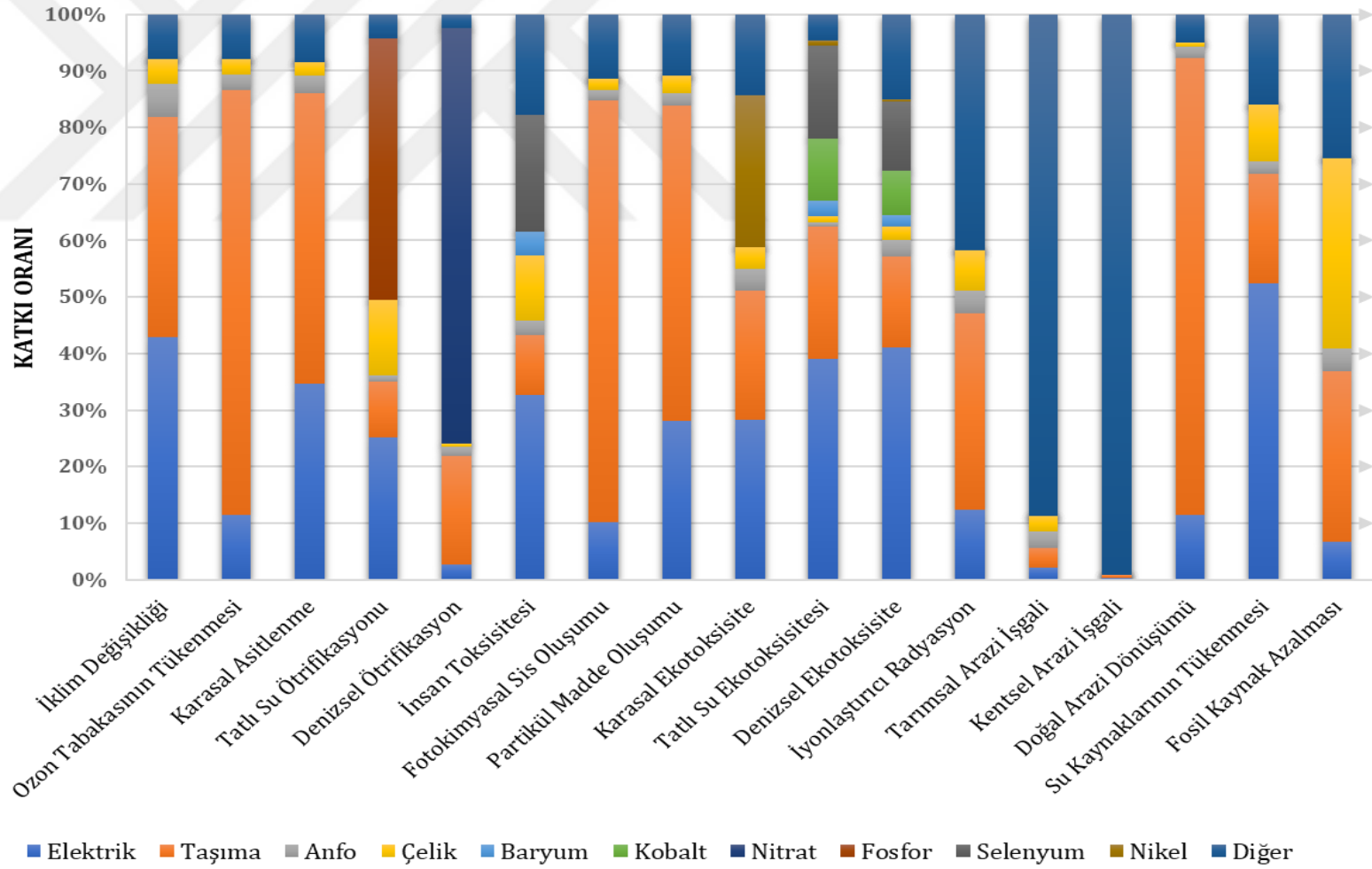
Bu tür görsel ve sayısal karşılaştırmalar, özellikle çevresel hot-spot analizlerinin yapılması açısından büyük önem taşımaktadır. En yüksek çevresel yük oluşturan

proseslerin veya hammaddelerin belirlenmesi, iyileştirme senaryolarının doğru kurgulanabilmesi açısından temel teşkil etmektedir.

Bu sonuçların sektöre olumlu katkıları olduğu düşünülerek, Türkiye özelinde saha verilerine dayalı gerçek zamanlı madencilik verilerinin ISO tabanlı çevresel etki modellemesi ile entegre edilmiş olmasıdır. Böylelikle, genellikle Ecoinvent, IPCC ya da EPA gibi uluslararası veri tabanlarından alınan genel geçer varsayımların ötesine geçilerek, yerel ölçekte çevresel politika ve sürdürülebilir madencilik stratejileri geliştirilmesine olanak tanıyacak yüksek doğrulukta sonuçlara ulaşılmıştır.

Tablo 4.6. ReCiPe Midpoint (H) Metodolojisine Göre Elde Edilen Sonuçlar

Etki Kategorisi	Birim	Değer
İklim Değişikliği Etki Kategorisi (İDEK)	Kg CO ₂ eşd.	25,4
Ozon Tabakasının Tükenmesi E.K. (OTTEK)	Kg CFC-11 eşd	2,83E ⁻⁶
Karasal Asitlenme Etki Kategorisi (KA EK)	Kg SO ₂ eşd	0,163
Tatlı Su Ötrifikasyonu Etki Kategorisi (TSÖEK)	Kg P eşd.	0,000571
Denizsel Ötrifikasyon Etki Kategorisi (DÖEK)	Kg N eşd.	0,0225
İnsan Toksisitesi Etki Kategorisi (İTEK)	Kg 1,4-DB eşd	2,61
Fotokimyasal Sis Oluşumu E.K. (FSOEK)	Kg NMVOC	0,172
Partikül Madde Oluşumu E.K. (PMOEK)	Kg PM10 eşd	0,704
Karasal Ekotoksisite Etki Kategorisi (KEEK)	Kg 1,4-DB eşd	0,0018
Tatlı Su Ekotoksisitesi Etki Kategorisi (TSEK)	Kg 1,4-DB eşd	0,0262
Denizsel Ekotoksisite Etki Kategorisi (DEEK)	Kg 1,4-DB eşd	0,0366
İyonlaştırıcı Radyasyon Etki Kategorisi (İREK)	kBq U235 eşd	1,19
Tarımsal Arazi İşgali Etki Kategorisi (TAİEK)	M ² a	0,474
Kentsel Arazi İşgali Etki Kategorisi (KAİEK)	M ² a	7,19
Doğal Arazi Dönüşümü E. Kategorisi (DADEK)	M ²	0,0105
Su Kaynaklarının Tükenmesi E.K. (SKTEK)	M ³	0,12
Fosil Kaynak Azalması E. Kategorisi (FKA EK)	Kg Yağ eşd.	0,00596



Şekil 4.1. ReCiPe Midpoint (H) Yöntemine Göre Etki Kategorilerinde Envanter Girdilerinin Yüzdesel Oranları Grafiği

Tablo 4.7. ReCiPe Midpoint (H) Yöntemine Göre Etki Kategorilerinde Envanter Girdilerinin Yüzdesel Oranları (%) Tablosu

Etki Kategorisi	Elektrik	Taşıma	Anfo	Çelik	Baryum	Kobalt	Nitrat	Fosfor	Selenyum	Nikel	Diğer
İklim Değişikliği Etki Kategorisi (İDEK)	42,8	39,0	5,9	4,3	-	-	-	-	-	-	8
Ozon Tabakasının Tükenmesi E.K. (OTTEK)	11,5	75,0	2,8	2,7	-	-	-	-	-	-	8
Karasal Asitlenme Etki Kategorisi (KA EK)	34,7	51,4	3,1	2,3	-	-	-	-	-	-	8,5
Tatlı Su Ötrifikasyonu Etki K. (TSÖEK)	25,2	9,9	1,1	13,3	-	-	-	46,2	-	-	4,3
Denizsel Ötrifikasyon Etki K. (DÖEK)	2,73	19,1	1,7	0,5	-	-	73,5	-	-	-	2,47
İnsan Toksisitesi Etki Kategorisi (İTEK)	32,6	10,7	2,6	11,4	4,3	-	-	-	20,5	-	17,9
Fotokimyasal Sis Oluşumu E.K. (FSOEK)	10,1	74,7	1,7	2,0	-	-	-	-	-	-	11,5
Partikül Madde Oluşumu E.K. (PMOEK)	28,1	55,8	2,2	3,1	-	-	-	-	-	-	10,8
Karasal Ekotoksosite Etki K. (KEEK)	28,2	23,0	3,8	3,8	-	-	-	-	-	26,9	14,3
Tatlı Su Ekotoksitesi Etki K. (TSEK)	39,1	23,3	0,8	1,1	2,8	10,9	-	-	16,4	0,9	4,7
Denizsel Ekotoksosite Etki K. (DEEK)	41,0	16,1	3,0	2,3	2,1	7,8	-	-	12,3	0,4	15
İyonlaştırıcı Radyasyon Etki K. (İREK)	12,4	34,7	4,0	7,2	-	-	-	-	-	-	41,7
Tarımsal Arazi İşgali Etki K. (TAİEK)	2,1	3,5	2,9	2,8	-	-	-	-	-	-	88,7
Kentsel Arazi İşgali Etki Kategorisi (KAİEK)	0,3	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	99,2
Doğal Arazi Dönüşümü E. K. (DADEK)	11,4	80,8	2,0	0,7	-	-	-	-	-	-	5,1
Su Kaynaklarının Tükenmesi E.K. (SKTEK)	52,4	19,3	2,2	10,2	-	-	-	-	-	-	15,9
Fosil Kaynak Azalması E. K. (FKA EK)	6,7	30,2	4,0	33,6	-	-	-	-	-	-	25,5

İklim değışikliğı etkilerinde başlıca etkenler; elektrik tedarığı (%42,8) ve taşıma (%39) süreçleridir. Fosil yakıtlara dayalı enerji üretimi ve dizel taşıma araçlarının CO₂ emisyonları bu sonuçların temel nedenidir. Anfo (%5,9) ve çelik tahkimat malzemeleri (%4,3) girdileri de süreç boyunca sera gazı salımına etki göstermektedir. Ozon tabakasının tükenmesi kategorisinde taşıma faaliyetleri %75 gibi yüksek bir etki göstermekte olup, taşıma sırasında halokarbon salımları başlıca etkindir. Elektrik tüketimi (%11,5) ve çelik üretimi (%2,7) de ozon tabakası üzerinde etkili olmaktadır. Karasal ekosistemlerde asidifikasyona en büyük etkiyi taşıma (%51,4) ve elektrik (%34,7) süreçleri sağlamaktadır. Bu süreçlerde ortaya çıkan NO_x ve SO₂ emisyonları, toprak ve su kaynaklarında pH dengesinin bozulmasına neden olmaktadır. Anfo ve çelik girdileri sınırlı katkı sunmaktadır. Tatlı su ötrifikasyonu etki kategorisinde fosfor girdisi %46,2 ile baskın bir etki yaratırken, çelik %13,3 ve elektrik ise %25,2'lik değer ile önemli etkiler göstermektedir.

Denizsel ötrifikasyon etki kategorisinde en yüksek etki nitrat girdisinden (%73,5) kaynaklanmaktadır. Nitrathlı patlayıcı atıklarının sızması denizel sistemlerde ciddi besin elementi dengesizliklerine neden olabilir. Taşıma (%19,1) ve elektrik (%2,73) ikincil etkiler sunarken, yağlar kategorisinden kaynaklı etki gözlemlenmemektedir. İnsan sağlığı üzerindeki toksik etkiler, özellikle elektrik (%32,6), çelik (%11,4) ve selenyum (%20,5) girdileriyle ilişkilidir. Baryum %4,3'lük etki göstermektedir. Troposferik ozon ve fotokimyasal oksidanların oluşumunda taşıma süreçleri %74,7 pay ile en büyük etkiyi göstermektedir. Elektrik üretimi ve yan ürünler (%10,1) VOC ve NO_x salımı yoluyla bu süreci desteklemektedir. Partikül madde emisyonlarının büyük kısmı taşıma (%55,8) ve elektrik (%28,1) kaynaklıdır. Toz emisyonları ve yanma ürünleri bu kategori açısından önemlidir. Karasal toksisiteye en yüksek etkiler arasında nikel (%26,9), elektrik (%28,2) ve taşıma (%23) süreçleri öne çıkmaktadır. Çelik ve diğer girdiler de %3–4 bandında etki göstermektedir.

Tatlı su ekotoksitesitesi etki kategorisinde elektrik (%39,1), kobalt (%10,9) ve selenyum (%16,4) girdileri ön plandadır. Baryum da %2,8 oranında etki göstermektedir. Bu durum, sucul yaşam formları üzerinde metal temelli toksik etkilerin baskın olduğunu göstermektedir. Yağ prosesinin sistem dışına alınması, modelin toksikolojik doğruluğunu artırmıştır. Elektrik (%41), kobalt (%7,8), selenyum (%12,3) ve baryum (%2,1) gibi girdiler denizel toksisite üzerinde etkili olmaktadır. Nikel ve taşıma girdileri de ekosistem üzerindeki kimyasal stres faktörlerini artırmaktadır. Madeni yağ prosesinin çıkarılması bu kategoride daha anlamlı bir metal-tabanlı toksik etki dağılımı

elde edilmesini sağlamıştır. İyonlaştırıcı radyasyon etkilerinde “Diğer” girdiler (%41,7) en yüksek etkiyi gösterirken, taşıma (%34,7) ve elektrik (%12,4) girdileri ikincil roller üstlenmektedir. Bu sonuç, özellikle fosil yakıtların çıkarımı ve taşınması esnasında çevreye salınan doğal radyonüklidlerin etkisini yansıtmaktadır.

Tarımsal arazi işgali etki kategorisi kapsamında en yüksek katkı %88,7 oranı ile kesilmiş odun girdisinden kaynaklanmaktadır. Bu durum, madencilik faaliyetlerinde tahkimat amacıyla kullanılan ahşap destekleme malzemelerinin üretim sürecinin, yaşam döngüsü boyunca tarımsal arazilerin kullanımına yol açan bir süreç olarak değerlendirildiğini göstermektedir. Orman ürünlerinin temini sırasında gerçekleştirilen ağaç kesimi, arazi örtüsünde değişime ve potansiyel olarak tarımsal alan kaybına neden olmakta; bu da söz konusu girdinin bu etki kategorisine yüksek düzeyde katkı sunmasına neden olmaktadır. Kentsel arazi işgali etki kategorisi kapsamında en yüksek etki %99,2 oranıyla “occupation, mineral extraction site” girdisinden kaynaklanmaktadır. Bu girdi, maden sahalarının uzun süreli kullanımı nedeniyle arazinin kalıcı olarak endüstriyel faaliyetlere tahsis edilmesini temsil etmektedir. SimaPro’da bu süreç, madencilik faaliyetleri için ayrılan alanların çevresel etkisini yansıtmak amacıyla “arazi işgali” başlığı altında değerlendirilmektedir. Dolayısıyla, söz konusu yüksek katkı, maden işletmelerine tahsis edilmiş geniş alanların doğrudan kentsel veya endüstriyel kullanıma açılmasından kaynaklanan alan kullanım baskısını göstermektedir. Doğal arazi dönüşümü etki kategorisinde taşıma faaliyetleri %80,8 ile baskın etkiye sahiptir. Elektrik ve çelik etkileri sınırlı kalmıştır. Su kaynaklarının tüketimi üzerinde en büyük etki elektrik tüketimi (%52,4) ve çelik üretimi (%10,2) süreçlerinden gelmektedir. Bu durum, termik santrallerdeki yoğun soğutma suyu kullanımı ve çelik endüstrisinin su ayak izinin büyüklüğünü yansıtır. Fosil kaynak tükenmesinde çelik üretimi (%33,6) ve taşıma (%30,2) öne çıkarken, elektrik kullanımı da önemli etki göstermektedir.

4.2. Tartışma

Yaşam döngüsü analizi çalışmalarında elde edilen sonuçların geçerliliğinin ve bilimselliğinin değerlendirilmesi açısından, benzer çalışmalarla yapılan karşılaştırmalar büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, çalışmamızda SimaPro yazılımı aracılığıyla ReCiPe Midpoint (H) yöntemine göre hesaplanan çevresel etki göstergeleri, literatürde yer alan dört farklı çalışma ile karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Bu analiz hem sonuçların güvenilirliğini değerlendirmek hem de modelleme yaklaşımlarının ve

coğrafi/sistemselsel farklılıkların çevresel sonuçlara etkisini irdelleyebilmek açısından değerli bir araçtır.

Karşılaştırmada yalnızca orta nokta (midpoint) sonuçlarına odaklanılmıştır. Uç nokta (endpoint) göstergeleri her ne kadar daha kolay yorumlanabilir bir yapı sunsa da içerdği yüksek belirsizlik düzeyi ve bazı etki kategorilerindeki doğrusal olmayan ilişki yapısı nedeniyle bu çalışmanın sistem sınırları dışında bırakılmıştır. Orta nokta sonuçları, çevresel etkilerin neden-sonuç ilişkisine daha yakın konumlanması, belirsizlik düzeylerinin nispeten daha düşük olması ve müdahale önceliklerinin belirlenmesi açısından daha sağlıklı bir temel sunmaktadır (ÇŞİDB, 2023).

Bu tür karşılaştırmalı analizler, çalışmanın sadece yerel ölçekteki geçerliliğini değil, aynı zamanda yöntemsel olarak küresel literatürle ne ölçüde uyum sağladığını da göstermektedir. Özellikle enerji, su kullanımı, emisyon ve toksisite gibi girdilerin çevresel etkilerdeki göreceli ağırlıklarının değişkenliği, farklı ülkelerde yapılan çalışmalarla kıyaslama yapıldığında daha net ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, fonksiyonel birim olarak seçilen “1 ton kömür üretimi” temelinde normalize edilen sonuçlar, karşılaştırılabilirlik açısından uygun bir yöntemsel strateji olarak değerlendirilmiştir.

Ek olarak, karşılaştırılan çalışmalarda kullanılan veri kaynakları, modelleme varsayımları, sistem sınırları ve etki kategorisi kapsamlarının farklılık göstermesi olasıdır. Bu durum, bazı etki kategorilerinde (örneğin: insan toksisitesi, denizsel ötrifikasyon, iyonlaştırıcı radyasyon) önemli sapmaların oluşmasına neden olabilir. Bu farklılıklar yalnızca bölgesel çevresel koşullarla değil, aynı zamanda veri tabanı seçimi (örneğin Ecoinvent, ELCD), zaman aralığı, proses detay seviyesi ve envanter verilerinin kapsamı ile de ilişkili olabilir. Bu nedenle yapılan karşılaştırmalar, sadece sayısal uyum değil, bağlamsal açıklamalarla da desteklenerek yorumlanmalıdır.

Tablo 4.8’de sunulan veriler doğrultusunda her bir etki kategorisinde gözlemlenen benzerlikler ve sapmalar analiz edilerek detaylı olarak aşağıda irdelenmektedir.

Tablo 4.8. Çalışmanın Sonuçları ile Diğer Çalışmaların Karşılaştırılması

Etki Kategorisi	Birimi	Bu Çalışma	Diharjo ve Sar Manik, 2023	Zhang ve Diğ., 2018	Memon ve Diğ., 2024	Bayrak, 2014
İklim Değişikliği Etki Kategorisi (İDEK)	Kg CO ₂ eşd.	25,4	73,28	73,3	201	36
Ozon Tabakasının Tükenmesi E.K. (OTTEK)	Kg CFC-11 eşd	2,83E ⁻⁶	1,65E ⁻⁶	-	6,6E ⁻⁶	3,25E ⁻⁷
Karasal Asitlenme Etki Kategorisi (KA EK)	Kg SO ₂ eşd	0,163	0,41	1,1	0,657	0,675
Tatlı Su Ötrifikasyonu Etki Kategorisi (TSÖEK)	Kg P eşd.	0,000571	-	0,0230	0,0247	-
Denizsel Ötrifikasyon Etki Kategorisi (DÖEK)	Kg N eşd.	0,0225	-	-	0,0015	0,0025
İnsan Toksisitesi Etki Kategorisi (İTEK)	Kg 1,4-DB eşd	2,61	-	-	11,1	14,45
Fotokimyasal Sis Oluşumu E.K. (FSOEK)	Kg NMVOC	0,172	-	-	-	0,055
Partikül Madde Oluşumu E.K. (PMOEK)	Kg PM10 eşd	0,704	0,122	0,0595	0,286	0,045
Karasal Ekotoksiste Etki Kategorisi (KEEK)	Kg 1,4-DB eşd	0,0018	-	-	2,83E ⁻³	-
Tatlı Su Ekotoksitesi Etki Kategorisi (TSEK)	Kg 1,4-DB eşd	0,0262	-	-	3,17	0,675
Denizsel Ekotoksiste Etki Kategorisi (DEEK)	Kg 1,4-DB eşd	0,0366	-	-	5,21	-
İyonlaştırıcı Radyasyon Etki Kategorisi (İREK)	kBq U235 eşd	1,19	-	-	4,17	-
Tarımsal Arazi İşgali Etki Kategorisi (TAİEK)	M ² a	0,474	-	-	-	-
Kentsel Arazi İşgali Etki Kategorisi (KAİEK)	M ² a	7,19	-	-	-	-
Doğal Arazi Dönüşümü Etki Kategorisi (DADEK)	M ²	0,0105	0,0000165	-	-	-
Su Kaynaklarının Tükenmesi E.K. (SKTEK)	M ³	0,12	11,43	-	1,02	-
Fosil Kaynak Azalması Etki Kategorisi (FKA EK)	Kg Yağ eşd.	0,00596	-	5,74	563	-

Bu çalışmada, 25,4 kg CO₂-eşd. değeriyle iklim değişikliği potansiyeli diğer çalışmalara göre oldukça düşüktür. Zhang ve diğ. (2018) ile Diharjo ve Sar Manik (2023) benzer düzeyde yüksek değerlere (~73 kg), Memon ve diğ. (2012) ise 201 kg CO₂-eşd. ile en yüksek değere sahiptir. Bu farklar, özellikle elektrik üretim kaynaklarındaki farklılıklar, taşıma sistemlerinin yapısı ve sistem sınırı tanımlarından kaynaklanmaktadır. Türkiye özelinde daha az karbon yoğun teknolojilerin veya lokal kaynak kullanımının tercih edilmesi bu sonucu açıklayabilir. Bu çalışmada OTTEK değeri 2,83E⁻⁶ kg CFC-11 eşd. ile oldukça düşüktür; Memon ve diğ. (2012) ile kıyaslandığında (~6,6E⁻⁶) bu fark neredeyse %60'tır. Diğer çalışmalarda ya veri bulunmamaktadır ya da çok daha düşük değerler (Diharjo ve Sar Manik, 2023: 1,65E⁻⁶) rapor edilmiştir. Bu çalışmada, karasal asitletme etkisi 0,163 kg SO₂-eşd. ile en düşük düzeydedir. Diğer çalışmalarda bu değerler 0,41 ile 1,1 kg SO₂-eşd. aralığında yer almaktadır. Bu fark, özellikle NO_x ve SO₂ emisyonlarının kaynağı olan yakıt türleri, taşıma mesafeleri ve patlayıcı tüketim miktarları ile ilişkilidir. Açık ocaklarda yakıt optimizasyonunun sağlanmış olması bu sonucu destekleyebilir.

Tatlı Su Ötrifikasyonu etkisi bu çalışmada 0,000571 kg P-eşd. değeri olarak hesaplanmış olup oldukça düşüktür. Zhang ve diğ. (2018) ile Memon ve diğ. (2012) çalışmalarında bu değer yaklaşık 0,023–0,025 kg P-eşd. olarak verilmiştir. Farklılık, özellikle fosfor içeren bileşiklerin atık sulara karışma oranı, sahadaki drenaj sistemleri ve fosfatlı girdilerin kullanımına bağlı olabilir. Denizsel Ötrifikasyon etki kategorisinde bu çalışmanın 0,0225 kg N-eşd. değeri, Memon ve diğ. (2012) (0,0015) ile Bayrak (2014) (0,0025) çalışmalarına göre oldukça yüksektir. Bu durum nitrat ve amonyum gibi azotlu bileşiklerin denizel alıcı ortama geçiş riskinin, incelenen sahalarda daha fazla olduğunu göstermektedir. Bu, nitrat bazlı patlayıcıların yaygın kullanımı ile ilişkilendirilebilir. İnsan Toksisitesi kategorisinde yer alan 2,61 kg 1,4-DB eşd. değeri, Memon ve diğ. (2012) (11,1 kg 1,4-DB eşd.) ve Bayrak (2014) (14,45 kg 1,4-DB eşd.) çalışmalarıyla karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Farklılık; ağır metal maruziyeti, atık yönetimi, saha izolasyon sistemleri ve çevresel sızmalarla ilgili altyapı önlemleriyle açıklanabilir. Bu çalışmada 0,172 kg NMVOC olarak hesaplanan fotokimyasal sis etkisi değeri, Bayrak (2014)'te raporlanan 0,055 kg NMVOC değerine göre yüksektir. Bu fark, taşıma ve patlatma faaliyetlerinden kaynaklanan uçucu organik bileşik (VOC) salımlarına, farklı yakıt türlerine veya motor teknolojilerine bağlı olabilir.

Partikül Madde Oluşumu etki kategorisinde, bu çalışmada 0,704 kg PM₁₀ eşdeğeri, diğer tüm çalışmalardan belirgin şekilde yüksektir. Örneğin Zhang ve diğ.

(2018) çalışmasında bu değer yalnızca 0,0595 kg'dır. Bu durum, sahalarda gerçekleştirilen açık ocak çalışmaları sırasında ortaya çıkan toz emisyonlarının yüksekliğini veya kontrol önlemlerinin sınırlı olabileceğini düşündürmektedir. Karasal Ekotoksosite etki değeri bu çalışmada 0,0018 kg 1,4-DB eşd. değeri olarak belirtilmekle beraber, Memon ve diğ. (2024)'ün 0,00283 kg'lık değerine göre daha düşüktür. Bu sonuç, toprak sistemlerine yayılan ağır metallerin ve toksik maddelerin sınırlı miktarda çevreye verildiğini göstermektedir. Metal emisyonlarının kontrolü bu farkı açıklayabilir.

Tatlı Su Ekotoksitesi etki değeri olarak belirtilen 0,0262 kg 1,4-DB eşd. değeri, Bayrak (2014) çalışmasına göre çok daha düşüktür (0,675 kg) ancak Memon ve diğ. (2024)'ün 3,17 kg değerine göre daha da düşük kalmaktadır. Tatlı su toksitesi farkı, özellikle selenyum, arsenik ve kobalt gibi elementlerin su ortamına geçişine bağlıdır. Sahada gerçekleştirilen kontrol ve drenaj sistemlerinin bu etkiyi sınırladığı düşünülebilir. Denizsel Ekotoksitesi, bu çalışmada belirlenen 0,0366 kg 1,4-DB eşd. değeri, Memon ve diğ. (2024) (5,21 kg) çalışmasına kıyasla son derece düşüktür. Bu sonuç, özellikle suya doğrudan deşarj edilen ağır metallerin ya da inorganik toksik bileşiklerin sahada daha düşük seviyelerde olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışmada 1,19 kBq U235 eşd. iyonlaştırıcı radyasyon değeri yer almaktadır. Memon ve diğ. (2024)'ten elde edilen değer ile (4,17 kBq U235 eşd.) kıyaslandığında oldukça düşüktür. Türkiye'de nükleer kaynaklı enerji kullanımının olmaması ve maden sahasında radyoaktif mineral maruziyetinin düşük olması bu farkın temel nedeni olabilir.

0,0105 m² değeri ile bu çalışmada doğal arazi dönüşümü düşük düzeydedir. Zhang ve diğ. (2018)'de bu değer 0,0000165 m² olarak çok daha düşük raporlanmıştır. Fark, maden sahasının genişliği, arazi kullanım sürekliliği ve modelleme sınırlarının nasıl tanımlandığına bağlı olarak ortaya çıkabilir. Su kaynaklarının tükenmesi kategorisinde ise bu çalışmada 0,12 m³ su tüketimi saptanmıştır. Zhang ve diğ. (2018)'de bu değer 11,43 m³, Memon ve diğ. (2024) çalışmasında ise 1,02 m³ olarak rapor edilmiştir. Bu çalışmadaki düşük değer, suyun geri kazanımı, kapalı devre kullanım veya bölgesel su tüketim yoğunluğunun düşüklüğü ile açıklanabilir. Bu çalışmada 0,00596 kg yağ eşd. değeri ile fosil kaynak tüketimi oldukça sınırlıdır. Zhang ve diğ. (2018) çalışmasında bu değer 5,74 kg, Memon ve diğ. (2024)'de ise 563 kg olarak belirtilmiştir. Bu önemli fark, özellikle güncellenmiş madeni yağ prosesinin model dışına alınması ve düşük fosil enerji kullanımıyla ilişkilidir.

Elde edilen yaşam döngüsü analizi sonuçları, benzer ulusal ve uluslararası çalışmalarla karşılaştırıldığında birçok etki kategorisinde daha düşük çevresel yükler ortaya koymuştur. Bu durum, yalnızca kullanılan veri seti veya yazılım kaynaklı değil; aynı zamanda saha koşulları, operasyonel süreçler ve işletme verimliliği gibi birçok faktörün bir araya gelmesiyle açıklanabilir. Analiz sonuçlarının çevresel açıdan daha olumlu olmasına katkı sunan başlıca faktörler aşağıda sıralanmıştır:

1. Üretim tecrübesine bağlı olarak operasyonların daha verimli şekilde yürütülmesi,
2. Örtü-kazı oranı düşük sahalardaki rezervlerin öncelikli olarak değerlendirilmesi,
3. Dizel tahrikli ekskavatörlerde elektrikli sistemlere yönelik modifikasyonların uygulanması,
4. Patlatma gereksinimi olmayan gevşek toprak yapılarında kazının doğal yollarla yapılabilmesi,
5. Üretimi tamamlanan açık ocak çukurlarının hafriyat ile yeniden doldurularak rehabilite edilmesi,
6. Selektif madencilik uygulamaları sayesinde lavvar (zenginleştirme) veriminin artırılması ve şlam oluşumunun azaltılması,
7. Kömür üretiminde uzun yıllara dayanan kurumsal tecrübenin süreç yönetimine olumlu katkı sağlaması.

Bu tür operasyonel avantajlar hem yakıt hem de enerji tüketim değerlerinin düşmesinde etkili olmuş ve sonuç olarak çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sunmuştur. Bu bağlamda, 1 ton kömür üretimi için hesaplanan dizel tüketimi 2,67 litre/ton, elektrik tüketimi ise 10,7 kWh/ton olarak belirlenmiştir. Bu değerler, benzer çalışmalarda raporlanan ortalama değerlerin altında olup, özellikle madencilik süreçlerinin etkinliğinin artırılmasının çevresel performans üzerindeki etkisini göstermektedir.

Ayrıca, çalışmaya konu olan sahalarda 2023 yılı itibarıyla örtü-kazı oranı ortalaması yaklaşık 1/3 t/m³ olarak belirlenmiştir. Bu oran, diğer açık ocak kömür işletmelerine kıyasla daha düşük olup, kazı işlemlerinde ihtiyaç duyulan enerji ve yakıt miktarını azaltmakta; böylece genel yaşam döngüsü boyunca oluşan çevresel yüklerde azalma sağlamaktadır. Bununla birlikte, ocak içi taşıma mesafesi, iş makinesi parkının teknik durumu, çalışılan arazinin eğimi ve kullanılan yakıtın kalitesi gibi teknik parametrelerin de nihai çevresel çıktılar üzerinde belirleyici rol oynadığı değerlendirilmektedir.

5. İYİLEŞTİRME SENARYOLARI

Kömür madenciliğine yönelik yaşam analizi çalışmasında gerçek saha verileri ile elde edilen sonuçlar ile çevresel etkileri ortaya konulmuştur. Daha çevreci bir madencilik yapılabilmesi amacıyla ISO 14000 kılavuzunda yer alan iyileştirme senaryolarına rehberlik yapacak kriterler aşağıda özetlenmiştir.

- Mevcut ürünlerin daha çevreci olanlar ile değiştirilmesi.
- ISO 14000 serisine uyumun gerçekleştirilmesi.
- Uluslararası taraf olunan anlaşmalar gereği yükümlülükler.
- Gerçekleştirilmesi planlanan çevresel senaryolara hazırlık.
- Daha çevreci süreçler ile maliyetlerin düşürülmesi.

Bu sebepler ile daha çevreci madencilik yapılabilmesi amacıyla oluşturulan senaryolar dahilinde oluşan kirlilikleri azaltım senaryoları hazırlanmış olup hazırlanan senaryoların uygulanması sonrası çevresel etkilerde ne kadar azalma yaşandığı ortaya konulmaya çalışılmıştır.

5.1. Üzerinde Faaliyet Bulunmayan Sahalara GES Kurulması Senaryosu

TKİ'ye ait madencilik faaliyetleri tamamlanmış ve terk edilmiş birçok saha bulunmaktadır. Madencilik faaliyetleri sonrası saha ıslahı çalışmaları ile eşzamanlı olarak sahanın rekültivasyonu yapılmakta ve saha tekrardan doğaya kazandırılmaktadır. Eski haline getirilen sahada ekim çalışmaları genellikle yapılmaktadır. Özellikle sahaya dökülen malzeme nedeniyle ekilip dikilmesi mümkün olmayan sahaların ekonomik amaçlarla kullanılması amacıyla, yeterli yüzölçümü oranına sahip olanlara; madencilik faaliyetlerinde kullanılan elektriğin karşılanması amacıyla Güneş Enerjisi Santrali kurulması senaryosu değerlendirilmiştir. Bu senaryo ile çevreci enerji kaynağı kazanmakla beraber, üzerinde faaliyet olmayan alanların değerlendirilmesi de sağlanacaktır. Ayrıca kullanılmayan alanların tekrardan rehabilite edilmesine gerek kalmayacağı için maliyet anlamında da kazanç sağlanmış olacaktır. TKİ'nin mevcut durumda, bazı arazi ve maden sahaları içerisinde kurulu GES üniteleri bulunmakla beraber var olan kapasitenin artırılmasına dair çalışmalar devam etmektedir. Mevcut kurulu güç yaklaşık 6 mW olup, 2026 yılı sonuna kadar bu oranın 15 mW 'ye artırılmasını planlandığı beyan edilmiştir (TKİb, 2025).



Resim 5.1. TKİ'ye Ait Soma'da Bulunan GES Panelleri (Kaynak: tki.gov.tr)

Tablo 4.1'de yer alan veriler incelendiğinde, madencilik faaliyetleri sonucu enerji tüketiminin 79.600.000 kWh olduğu görülmektedir. Kullanılan enerjinin madencilik sistemine ait yaşam döngüsü analizinde yer alan her bir etki kategorisindeki etki değerinin hesaplanması Tablo 4.7'de yapılmıştır.

Tablo 5.1. Elektriğin, Etki Kategorileri İçerisindeki Yüzdesel Payı

Etki Kategorisi	Elektrik Kullanımı Payı (%)
Su Kaynaklarının Tükenmesi Etki Kategorisi (SKTEK)	52,4
İklim Değişikliği Etki Kategorisi (İDEK)	42,8
Denizsel Ekotoksisite Etki Kategorisi (DEEK)	41,0
Tatlı Su Ekotoksitesite Etki Kategorisi (TSEK)	39,1
Karasal Asitlenme Etki Kategorisi (KA EK)	34,7
İnsan Toksikitesite Etki Kategorisi (İTEK)	32,6
Karasal Ekotoksitesite Etki Kategorisi (KEEK)	28,2
Partikül Madde Oluşumu Etki Kategorisi (PMOEK)	28,1
Tatlı Su Ötrifikasyonu Etki Kategorisi (TSÖEK)	25,2
İyonlaştırıcı Radyasyon Etki Kategorisi (İREK)	12,4
Ozon Tabakasının Tükenmesi Etki Kategorisi (OTTEK)	11,5
Doğal Arazi Dönüşümü Etki Kategorisi (DADEK)	11,4
Fotokimyasal Sis Oluşumu Etki Kategorisi (FSOEK)	10,1
Fosil Kaynak Azalması Etki Kategorisi (FKA EK)	6,7
Denizsel Ötrifikasyon Etki Kategorisi (DÖEK)	2,73
Tarımsal Arazi İşgali Etki Kategorisi (TAİ EK)	2,1
Kentsel Arazi İşgali Etki Kategorisi (KAİ EK)	0,3

Tablo 5.1.'de elektrik kullanımının çevresel etkilerinin tüm kategorilerde çoğunlukla yüksek etkiye sahip olduğu sonucuna varılmaktadır. Bunun sebebi ise, ülkemizde üretilen enerjinin yaklaşık %50'sinin fosil yakıtlı santrallerden elde edilmesinden kaynaklanmaktadır. Fosil yakıtlı santrallerden elde edilen enerjinin yenilenebilir enerjiye dönüştürülmesi çevresel kirliliklerin azaltılması bakımından önem arz etmektedir.

Son yıllarda yenilenebilir enerjiye geçiş aşamasında, ülkemizde ciddi anlamda yatırımlar söz konusudur. Madencilik açısından en uygulanabilir olanı ise gerek madencilik yapılan sahaların konumu gerekse değerlendirilebilirliğinin gerçekleştirilmesi anlamında güneş enerjisi sisteminden yararlanmaktır. Türkiye'nin yenilenebilir enerjiye verdiği önemin ve yatırımlarının bir göstergesi olarak 2013 yılı sonunda 6mW seviyelerinde olan güneş enerji santralleri kurulu kapasitesi, 2023 yılı sonunda 18.000 mW'ye ulaşmıştır. Bu veriler, 2013'ten 2023'e kadar olan dönemde güneş enerjisi kurulu gücünün yaklaşık 3.000 kat arttığını göstermektedir (Ember-Energy, 2024).



Şekil 5.2. Güneşlenme Sürelerine göre Türkiye Haritası (MGM, 1991-2020)

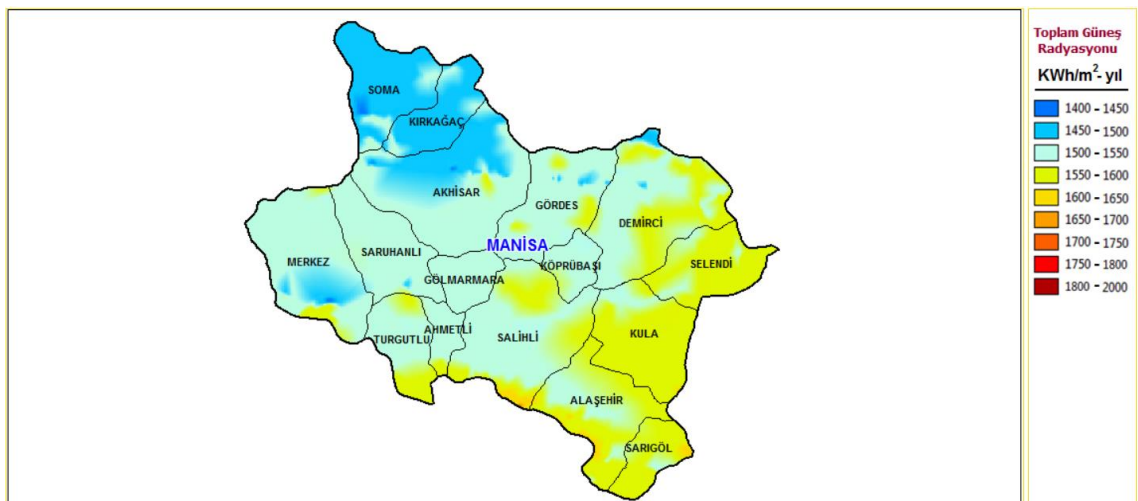
Çalışma kapsamında yer alan ruhsat sahalarının mevcut konumları düşünüldüğünde, güneşlenme süreleri bakımından oldukça avantajlı konumlarda oldukları görülmektedir. Belirtilen konumlar içerisinde Şekil 5.2'de gösterimi yapılan haritada, güneşlenme süresi kriteri ve arazi yapısının elverişli olması sebebiyle Soma bölgesinde GES ünitelerinin kurulması değerlendirilmiştir. Kurulması planlanan güneş enerjisi

santrali, bu süreçte tüketici olan maden işletmecisinin ihtiyacı kadar olan enerjiyi kendisinin harcayacağı, fazla enerjiyi ise elektrik şebekesine aktarmayı uygun kılan bir yöntem olarak düşünülmektedir. Böylelikle hem üretim hem de kullanım aşamasında ihtiyaç olunan enerji daha çevreci olarak temin edilebilecektir.

Güneş hücrelerinin bir araya getirilmesi ile güneş modülleri oluşturulmaktadır. Günümüzde elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanılan güneş modüllerin yüzey alanları $2,1 \text{ m}^2$ ve güçleri ise 675 Wp değerlerine ulaşmış durumdadır (ETKB, 2024). Güneş modüllerinin bir araya getirilmesi ile yüksek güçlerde güneş panelleri ve güneş elektrik santralleri (GES) tesis edilebilmektedir. Özellikle, binaların çatı ve cephelerine kurulan GES'ler ile ihtiyaç duyulan elektrik enerjisi tüketim noktalarında üretilmektedir (Enerji.gov.tr, 2025).

Enerji arzı olan yıllık $79.600.000 \text{ kwh}$ (Tablo 4.1) enerji miktarına ulaşılması amacıyla monokristalin silikon fotovoltaik hücreler kullanılarak kurulması planlanan GES ünitelerinin ne kadarlık bir alan kapladığının belirlenmesi gerekmektedir.

Yaklaşık $79.600.000 \text{ kWh}$ kurulu güce sahip bir GES santrali talep edilen enerjiyi üretebilecek kapasitededir. Monokristalin güneş panelleri, yüksek verimlilikleri sayesinde daha az alan kaplar. Soma bölgesi için GEPA verileri eşliğinde 1 metrekaresel bir alandan yılda ne kadar enerji üretilbileceği verileri elde edilebilmektedir. Şekil 5.3'te Soma ilçesinin toplam güneş radyasyonu değerinin ortalama $1400 \text{ kWh/m}^2\text{-yıl}$ olduğu görülmektedir (Gepa, 2025). Dolayısıyla, bu bölgede 1 metrekaresel yüzeye düşen güneş enerjisi miktarı yılda yaklaşık 1400 kWh olup, %20 verimli bir fotovoltaik panel kullanıldığında her 1 m^2 panelden % 70-80 performans ile yıllık yaklaşık 220 kWh elektrik enerjisi üretilmesi mümkündür (İSE, 2023; NREL, 2023), (Formül 5.1).



Şekil 5.3. Manisa İlçelerinin Yıllık Toplam Güneş Radyasyonu (Gepa, 2025)

$$E_{NET} = G_{YIL} \times \eta_{PANEL} \times \eta_{SISTEM} \quad (5.1)$$

E_{NET} : 1 m² panel yüzeyinden elde edilen yıllık net elektrik üretimi (kWh/m²-yıl)

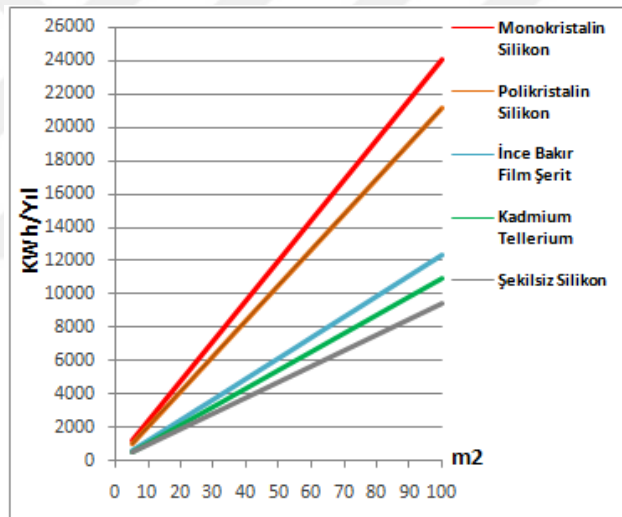
G_{YIL} : Yıllık toplam global güneş radyasyonu (kWh/m²-yıl) (GEPA, 2025)

η_{PANEL} : Panelin dönüşüm verimi (panel verimi) (%20) (İSE, 2023; NREL, 2023)

η_{SISTEM} : Sistem performans oranı (inverter, sıcaklık, kablolama, tozlanma gibi toplam sistem kayıplarını kapsayan verimlilik katsayısı) (% 78,6) (US Energy, 2021)

$$E_{NET} = 1400 \text{ kWh/m}^2/\text{yıl} \times 0,20 \times 0,786 = 220,08 \text{ kWh/m}^2/\text{yıl}$$

Soma ilçesi için formül 5.1 ile hesaplanan 1 m² panelden elde edilen yıllık net elektrik üretimi 220,08 kWh/m²/yıl olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.4'te yer alan Soma'nın güneş enerji atlası grafiğine göre monokristalin silikon paneller ile 1 metrekare alandan yılda elde edilebilecek ortalama enerji miktarı olan 240 kWh/m²/yıl sonucu ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 5.4. Soma PV Tipi-Alan Üretilebilecek Enerji Grafiği (kWh/Yıl) (Gepa, 2025)

GES ünitelerinin kurulması için gereken alan miktarına yönelik hesaplamalar formül 5.2'de hesaplanmaktadır.

$$A_{GES} = E_{TOPLAM} / E_{NET} \quad (5.2)$$

A_{GES} : Güneş enerji santrali için gerekli toplam panel alanı (m²)

E_{TOPLAM} : Yıllık ihtiyaç duyulan toplam elektrik enerjisi (kWh/yıl)

E_{NET} : 1 m² panelden elde edilen yıllık net elektrik üretimi (kWh/m²-yıl)

$$A_{GES} = 79.600.000 \text{ kWh/Yıl} / 220,08 \text{ kWh/m}^2/\text{Yıl} = 361.673 \text{ m}^2 = 36,17 \text{ Ha}$$

Soma ilçesinde yıllık 79.600.000 kWh elektrik enerjisi üretmeyi hedefleyen bir GES için, yaklaşık 36,17 hektarlık net panel kurulum alanı gereklidir. Bu hesaplama, monokristalin silikon panellerin %20 verimle çalıştığı ve sistem performans oranının %78,6 olduğu varsayımıyla yapılmıştır. Elde edilen yeni veriler SimaPro yazılımına entegre edilmiştir. Madencilik amacı ile işgal edilen toplam alan değişimleri ve enerji eldesinin GES üniteleri ile karşılanması durumu ile yeni senaryo karşılaştırması Tablo 5.2’de yer almaktadır. Ecoinvent veritabanındaki mevcut elektrik prosesi “Electricity, production mix photovoltaic, at plant, TR S” ile ikame edilmiştir.



Tablo 5.2. Senaryonun Uygulanması Durumunda Elde Edilen Veriler

Etki Kategorisi	Birimi	Çalışma Verisi	Senaryo Sonrası	İyileşme Oranı (%)
İklim Değişikliği Etki Kategorisi (İDEK)	Kg CO ₂ eşd.	25,4	15,1	%41
Ozon Tabakasının Tükenmesi E. K. (OTTEK)	Kg CFC-11 eşd	2,83E ⁻⁶	2,62E ⁻⁶	%7
Karasal Asitlenme Etki Kategorisi (KA EK)	Kg SO ₂ eşd	0,163	0,109	%33
Tatlı Su Ötrifikasyonu Etki Kategorisi (TSÖEK)	Kg P eşd.	0,000571	0,000444	%22
Denizsel Ötrifikasyon Etki Kategorisi (DÖEK)	Kg N eşd.	0,0225	0,022	%2
İnsan Toksisitesi Etki Kategorisi (İTEK)	Kg 1,4-DB eşd	2,61	1,99	%24
Fotokimyasal Sis Oluşumu Etki Kategorisi (FSOEK)	Kg NMVOC	0,172	0,157	%9
Partikül Madde Oluşumu Etki Kategorisi (PMOEK)	Kg PM10 eşd	0,704	0,0517	%93
Karasal Ekotoksisite Etki Kategorisi (KEEK)	Kg 1,4-DB eşd	0,0018	0,00245	%-36
Tatlı Su Ekotoksisitesi Etki Kategorisi (TSEEK)	Kg 1,4-DB eşd	0,0262	0,0167	%36
Denizsel Ekotoksisite Etki Kategorisi (DEEK)	Kg 1,4-DB eşd	0,0366	0,0254	%31
İyonlaştırıcı Radyasyon Etki Kategorisi (İREK)	kBq U235 eşd	1,19	1,23	%-3
Tarımsal Arazi İşgali Etki Kategorisi (TAİEK)	M ² a	0,474	0,488	%-3
Kentsel Arazi İşgali Etki Kategorisi (KAİEK)	M ² a	7,19	7,1	%1
Doğal Arazi Dönüşümü Etki Kategorisi (DADEK)	M ²	0,0105	0,00946	%10
Su Kaynaklarının Tükenmesi Etki Kategorisi (SKTEK)	M ³	0,12	0,0636	%47
Fosil Kaynak Azalması Etki Kategorisi (FKA EK)	Kg Yağ eşd.	0,00596	0,00619	%-4

Tablo 5.2’de yer alan veriler ışığında; GES ünitelerinin kurulumu, enerji üretim altyapısında fosil kaynakların azaltılmasına olanak sağlayarak birçok etki kategorisinde olumlu çevresel iyileşmeler sağlamıştır. Ancak bazı kategorilerde sınırlı veya olumsuz değişimler gözlenmiştir. İklim değişikliği etki kategorisinde senaryo sonrası %41 oranında iyileşme gözlenmiş olup bu, GES kaynaklı elektrik kullanımının doğrudan CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde düşürdüğünü göstermektedir. Fosil yakıtla üretilen elektrik yerine yenilenebilir kaynak kullanımı, karbon ayak izinin azaltılmasında en etkili stratejilerden biridir. Ozon tabakasının tükenmesi kategorisinde %7 oranında iyileşme sağlanmıştır. Ozon tabakasına zararlı CFC-11 eşdeğeri emisyonlarının bir kısmı elektrik üretiminde kullanılan sistemlerden kaynaklandığı için, yenilenebilir enerjiye geçiş bu etkileri sınırlı da olsa azaltmıştır. Karasal asitlenme kategorisinde %33’lük iyileşme, özellikle elektrik üretimi ve taşıma süreçlerindeki azalmış SO₂ ve NO_x emisyonları ile ilişkilidir. GES kullanımı ile kömür ve doğalgaz bazlı yanma süreçlerinin azaltılması toprak pH dengesine olumlu katkı sağlamaktadır.

Tatlı su ötrifikasyonu kategorisinde elde edilen %22’lik iyileşme, fosfor salımlarındaki azalmaya işaret etmektedir. GES üretim altyapısı, fosfor içeren kimyasalların veya ilgili üretim girdilerinin azaltılmasına katkı sağlamıştır. Denizsel ötrifikasyonda yalnızca %2 oranında iyileşme sağlanmıştır. Azot bazlı kirleticilerin (örneğin nitratlı patlayıcılar) senaryodan etkilenmemiş olması, bu kategoride sınırlı değişim gözlenmesinin başlıca nedenidir. İnsan Toksisitesi etki kategorisinde hesaplanan %24 oranındaki iyileşme, ağır metal emisyonlarının dolaylı yollarla azaltılmasıyla ilişkilidir. Özellikle selenyum ve nikel gibi elementlerin enerji üretim sistemleri kaynaklı doğrudan emisyonlarının düşmesi bu sonucu desteklemektedir. Fotokimyasal sis oluşumunda yakalanan %9’luk iyileşme, uçucu organik bileşiklerin (NMVOC) azalmasıyla bağlantılıdır. Bu etki, elektrik üretimiyle bağlantılı ozon öncülü bileşiklerin azaltılmasından kaynaklanmaktadır.

Partikül madde oluşumu senaryo sonrası %93 oranında dikkat çekici bir iyileşme sağlanmıştır. Bu durum, kömür veya dizel bazlı enerji sistemlerinin yerine GES kullanımıyla oluşan partikül madde salımlarındaki ciddi düşüşü yansıtmaktadır. Karasal Ekotoksitesite kategorisinde %36 oranında artış gözlenmiştir. Bu olumsuz değişim, GES sistemlerinin kurulumu için kullanılan bazı materyallerin (örneğin metaller, elektronik bileşenler) üretimi ve bertaraf süreçleriyle ilişkili olabilir. Bu durum, yenilenebilir sistemlerin de üretim kaynaklı toksik etkiler doğurabileceğini göstermektedir. Tatlı su ekotoksitesitesi etki değerinde %36 oranında iyileşme sağlanmış olup, tatlı su sistemlerinde

ağır metal veya toksik bileşik baskısının azaldığını göstermektedir. GES sisteminin operasyonel aşamada düşük emisyon profili bu kategori üzerinde olumlu etki yaratmıştır. Denizsel Ekotoksisite etki değerindeki %31 oranındaki düşüş, denizel toksisiteye neden olan elementlerin (örneğin kobalt, selenyum) emisyonlarının senaryo sonrası azaldığını göstermektedir. Bu etki, özellikle elektrik üretiminin kaynak değişimiyle bağlantılıdır.

İyonlaştırıcı radyasyon kategorisinde %3 oranında artış gözlenmiştir. GES üretiminde kullanılan bazı elektronik bileşenlerin üretim süreçlerinde düşük düzeyde radyoaktif madde kullanımı olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca veri tabanındaki sistem sınırlarına bağlı olarak küçük sapmalar oluşabilir.

Tarımsal arazi işgalindeki %3 oranında artış, GES ünitelerinin kurulumu için kullanılan 54,4 hektarlık alanın bazı veri tabanı modellerinde tarımsal karakterde tanımlanmış olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle alan tahsisi etkisi bu kategoride artış olarak yansımıştır. Kentsel Arazi İşgalinde de aynı şekilde %1’lik düşüş, oldukça sınırlı olmakla birlikte GES alanının mevcut maden sahası içinde konumlandırılması nedeniyle olumsuz alan genişlemesi yaşanmamasından kaynaklanmıştır. Doğal arazi dönüşümünde gerçekleşen %10’luk iyileşme, mevcut kullanım altında kalan alanın yeniden yapılandırılması sonucu doğal arazi baskısının azaltılmasına işaret etmektedir. GES kurulumunun daha önce işgal edilmiş bir alanda yapılması bu olumlu etkiye katkı sağlamıştır. Su Kaynaklarının Tükenmesi kategorisindeki %47’lik iyileşme, GES sistemlerinin enerji üretiminde su tüketiminin çok düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle termik santrallerin soğutma suyu ihtiyacının ortadan kalkması bu kategoride çarpıcı bir azalma sağlamıştır. Fosil Kaynak Azalması etki kategorisinde %4 oranında artış gözlenmiştir. GES bileşenlerinin üretimi sırasında kullanılan fosil kaynaklar (örneğin panel taşıma, metal işleme gibi süreçlerde dizel ve kömür kullanımı) bu sonucu doğurmuş olabilir. Bu durum, GES sistemlerinin operasyonel değil, üretim aşamasındaki fosil kaynak tüketimiyle ilişkilidir.

5.2. Dizel İş Makinalarının Elektrik Tahrikli Sisteme Çevrilmesi Senaryosu

Günümüzde madencilik sektörü, yüksek enerji tüketimi ve fosil yakıt kullanımından kaynaklanan sera gazı emisyonları nedeniyle çevresel baskıların önemli bir kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Madencilik faaliyetlerinde kullanılan dizel kamyonlar, yüksek karbon emisyonlarına ek olarak partikül madde, azot oksitler ve kükürt dioksit gibi kirleticilerin salınımında da önemli bir rol oynamaktadır. Bu

çalışmada, madencilik sektöründe kullanılan dizel kamyonların elektrik tahrikli sisteme dönüştürülmesi senaryosu ele alınacaktır. Elektrikli kamyonların dizel muadillerine kıyasla çevresel etkileri, SimaPro yazılımı ile yaşam döngüsü analizi yöntemi kullanılarak değerlendirilecek ve gerçekleştirilecek senaryo ile etki kategorilerindeki iyileşme oranları belirlenecektir.

Elektrik tahrikli sistemlerin madencilik sektöründe uygulanabilirliği, enerji tüketimi ve karbon ayak izinin azaltılması gibi kritik faktörlerin yanı sıra, işletme maliyetlerinde sağlanan düşüşlerle de dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, elektrikli kamyonların üretim süreçlerinde kullanılan batarya teknolojileri ve bu süreçlerin çevresel etkileri de dikkate alınmalıdır. Bu çalışma, elektrik tahrikli kamyonların madencilik operasyonlarında kullanımı ile sağlanan çevresel iyileşmeleri, karbon emisyonlarındaki azalma, fosil yakıt tüketiminin minimize edilmesi ve atık yönetimi gibi parametreler çerçevesinde analiz etmeyi amaçlamaktadır.

Son zamanlarda özellikle metalik madencilik yapılan açık ocak işletmelerinde, zemin ve topoğrafya durumu uygun ise elektrik tahrikli iş ekipmanlarının kullanımı yaygınlaşmıştır. Evvelce bir örneği TKİ işletmelerinde mevcut olan dizel güç üniteli ve elektrik tahrikli kamyonlar hala kullanılmaktadır. Çalışmada ele alınacak senaryoda komple elektrikli iş makineleri ile ikame etme yöntemi uygulanacaktır. Elektrikli iş ekipmanlarının yaygınlaşması ile ülkemizde de komple elektrikli kamyonlar da artık kullanılabilir. Madencilik alanında elektrikli kamyonların kullanılması ile ilgili üretici firma verilerine göre, 30 ve 70 m³ kapasiteli %30 eğimde ve zorlu maden koşullarında çalışan 400-700 kW motor gücü ve 800 kWh kapasiteli akülü kamyon seçenekleri ülkemizde kullanılmaktadır (Nuh Çimento, 2022).

Bu senaryonun uygulanabilmesi amacıyla, ikame edilecek iş makinelerinin yıllık kömür üretim ve dekapaj miktarları ile açık ocak madenciliğinde uygulanan üretim metotlarına uygun olması gerekmektedir. Çalışmada ele alınan 10 adet maden sahasında çalışan aktif kamyon sayısı 158 adettir. (TKİ İşletmeleri, 2023).

Maden işletmelerinde yer alan dizel tahrikli kamyonların, elektrik tahrikli olarak ikame edilebilmesi amacıyla; öncelikle dizel tahrikli kamyonların yıl içerisindeki tüketim verilerinin, çalışma saatlerinin ve diğer özelliklerinin bilinmesi, sonrasında bu veriler çerçevesinde ikame edilecek iş makinelerinin özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir.



Şekil 5.5. Elektrik Tahrikli Ağır Sınıf Maden Kamyonu (OpenAI, 2025)

İşletmeler bazında farklı kapasitelerde ekipmanlar yer almakla beraber, kömür üretiminde çalışan kamyonlar 50-120 ton taşıma kapasitesine sahiptir. Ağır iş kamyonlarının çalışma saatleri 2023 yılında toplamda 155.880 saat olarak gerçekleşmiştir (TKİ İşletmeleri, 2023). Yıllık dizel tüketimi ise Tablo 4.1’de yer aldığı gibi 19.894.571 lt olarak gerçekleşmiştir. Dizel tüketim verisi, TKİ işletmelerinden temin edilmiş olup kamyon ve diğer iş makinalarının toplam tüketimleridir. Sabit dizel istasyonları ve gezici istasyonlar ile dizel dağıtımı gerçekleştirildiği için iş ekipmanı bazında ayırım yapılamamıştır. Bu nedenle, ağır kamyonlardan sonra en çok tüketim miktarına sahip ekskavatörler ile delici ekipmanların tüketimleri göz ardı edilmiştir.

Yıllık dizel tüketim miktarının, ağır kamyonlarından elde edilen yıllık çalışma saatine bölünmesi ile saatlik dizel tüketim verisi hesaplanacaktır.

$$\text{Dizel Tüketimi (L/sa)} = \text{Toplam Dizel Miktarı (L)} / \text{Çalışma Saati (Sa)} \quad (5.3.)$$

Yukarıdaki formülden saatlik dizel tüketimi 127 L/sa olarak hesaplanmıştır. Bu verilerle ikame edilecek elektrikli ağır kamyonlar seçilecektir. Konu ile ilgili, "Decarbonizing Mining: Diesel vs Electric Haul Trucks on Cost and Efficiency" başlıklı çalışmada, madencilik sektöründe kullanılan 150 ton kapasiteli dizel ve elektrikli taşıma kamyonlarının toplam sahip olma maliyeti ve operasyonel verimlilik açısından

karşılaştırmasını yapılmaktadır (Ghosh ve diğ., 2024). Çalışmada, elektrikli kamyonların uzun vadede hem ekonomik hem de çevresel açıdan daha avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışmada, simüle edilen 150 ton yükleme kapasiteli dizel kamyonların saatte 100 litre yakıt tükettiği, elektrikli kamyonların ise aynı sürede yaklaşık 275 kWh enerji harcadığı belirtilmektedir.

Chalmers Teknoloji Üniversitesi tarafından yürütülen "Drive-Cycle Simulations of Battery-Electric Large Haul Trucks for Open-Pit Mining with Electric Roads" başlıklı çalışmada, Aitik bakır madenindeki açık ocak madenciliği operasyonları için beş farklı sürüş döngüsü simüle edilmiştir. 14 ile 58 dakika arası açık ocak bakır madeninde simüle edilen 200 ton taşıma kapasiteli kamyonlar seçilmiştir. 14 dakikalık kısa sürelerde 499 kwh/sat, uzun mesafelerde ise (58 dk) 350 kwh/sa enerji tüketiminin gerçekleştirildiği bildirilmektedir. TKİ işletmelerinde kullanılan kamyonların yükleme kapasitelerine benzer kapasitelerle gerçekleştirilen her iki çalışmadan elde edilen veriler değerlendirildiğinde, bu çalışma ile dizel tahrikli kamyonların tükettikleri 127 L/sa dizel tüketim verisi ile paralel şekilde ve aynı kapasitede elektrikli kamyon seçilirse, saatlik ortalama tüketim verisi 275 kwh/sa olacaktır. Bu veriler çerçevesinde, dizel kamyonların yıllık toplam çalışma saatlerinin çalışma süreleri ile çarpılması sonucu gerekli olan toplam enerji tüketimi elde edilir (Tablo 5.3).

Tablo 5.3. Elektrikli ve Dizel kamyonların Tüketim Verileri

Ekipman Adı	Saatlik Tüketim (Ort)	Yıllık Çalışma Saati	Toplam Tüketim
Elektrikli Kamyon	275 kWh Elektrik	155.880	42.867.000 kWh
Dizel Kamyon	127 L Dizel	155.880	19.894.571 L

Tablo 5.3'te yapılan hesaplamada, ağır kamyonların yıllık 19.984.571 litre dizel yakıt tüketiminin karşılığı, 42.867.000 kWh enerji miktarıdır. Bu sonuçtan hareketle, verilerin tekrar SimaPro yazılımına girilmesi sonrasında oluşan yeni analiz değerleri Tablo 5.4'te gösterilmektedir. Bu senaryoda tedarik edilen elektrik enerjisi kaynağı, ana çalışma ile aynıdır.

Tablo 5.4. Senaryonun Uygulanması Durumunda Elde Edilen Veriler

Etki Kategorisi	Birimi	Çalışma Verisi	Senaryo Sonrası	İyileşme Oranı (%)
İklim Değişikliği Etki Kategorisi (İDEK)	Kg CO ₂ eşd.	25,4	21,3	%16
Ozon Tabakasının Tükenmesi E. K. (OTTEK)	Kg CFC-11 eşd	2,83E ⁻⁶	8,69E ⁻⁷	%69
Karasal Asitlenme Etki Kategorisi (KA EK)	Kg SO ₂ eşd	0,163	0,111	%32
Tatlı Su Ötrifikasyonu Etki Kategorisi (TSÖEK)	Kg P eşd.	0,000571	0,000592	%-4
Denizsel Ötrifikasyon Etki Kategorisi (DÖEK)	Kg N eşd.	0,0225	0,0185	%18
İnsan Toksisitesi Etki Kategorisi (İTEK)	Kg 1,4-DB eşd	2,61	2,79	%-7
Fotokimyasal Sis Oluşumu Etki Kategorisi (FSOEK)	Kg NMVOC	0,172	0,0525	%69
Partikül Madde Oluşumu Etki Kategorisi (PMOEK)	Kg PM10 eşd	0,704	0,0419	%94
Karasal Ekotoksisite Etki Kategorisi (KEEK)	Kg 1,4-DB eşd	0,0018	0,00166	%8
Tatlı Su Ekotoksisitesi Etki Kategorisi (TSEEK)	Kg 1,4-DB eşd	0,0262	0,0256	%2
Denizsel Ekotoksisite Etki Kategorisi (DEEK)	Kg 1,4-DB eşd	0,0366	0,0388	%-6
İyonlaştırıcı Radyasyon Etki Kategorisi (İREK)	kBq U235 eşd	1,19	0,86	%28
Tarımsal Arazi İşgali Etki Kategorisi (TAİEK)	M ² a	0,474	0,463	%2
Kentsel Arazi İşgali Etki Kategorisi (KAİEK)	M ² a	7,19	7,16	%0
Doğal Arazi Dönüşümü Etki Kategorisi (DADEK)	M ²	0,0105	0,00267	%75
Su Kaynaklarının Tükenmesi Etki Kategorisi (SKTEK)	M ³	0,12	0,131	%-9
Fosil Kaynak Azalması Etki Kategorisi (FKA EK)	Kg Yağ eşd.	0,00596	0,00438	%27

İklim değışikliğı etki kategorisi açısından bakıldığında, elektrikli taşıma sistemine geçişle birlikte %16'lık bir iyileşme sağlanmış ve toplam karbon ayak izi 25,4 kg CO₂ eşdeğerinden 21,3 kg CO₂ eşdeğerine düşmüştür. Bu düşüş, dizel motorlu kamyonların doğrudan CO₂ salımı ile ilişkili olup, elektrikli sistemlerin yerel sıfır emisyon profili ile açıklanabilir. Elektrik üretimindeki dolaylı emisyonlara rağmen toplam salımın düşmesi, sistemin genel verimliliğı ile ilişkilidir. Ozon tabakasının tükenmesi etki kategorisi sonucunda %69 oranında azalma gözlemlenmiştir (2,83E⁻⁶ kg CFC-11 eşd → 8,69E⁻⁷ kg CFC-11 eşd). Bu iyileşme, özellikle dizel araçların bakım ve idamesinde kullanılan malzemeler ile ilgili doğrudan salımların elektrikli sistemlerde bulunmamasıyla ilişkilidir. Karasal asitleme etki kategorisi sonuçlarında da %32'lik iyileşme sağlanmıştır. Asidifikasyon potansiyelinin ana kaynakları olan SO₂ ve NO_x emisyonlarının dizel yanmasıyla ilişkili olduğu düşünüldüğünde, bu değerler elektrikli sistemlerin düşük gaz salımı avantajını yansıtmaktadır.

Tatlı su ötrifikasyonu etki kategorisi yönünden ise, 0,000571 kg P eşdeğerinden 0,000592 kg P eşdeğerine %4'lük küçük bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, elektrikli araçların üretim süreçlerinde fosfor içeren bileşenlerin (örneğin batarya üretimi sırasında) çevresel etkilerinin daha belirgin olabileceğini göstermektedir. Denizsel ötrifikasyon etki kategorisi için %18 oranında iyileşme dikkat çekicidir (0,0225 kg N eşd → 0,0185 kg N eşd). Bu, azot oksitlerin ve ilgili azotlu bileşiklerin denizel sistemler üzerindeki yükünü azaltan bir sonuç olup, dizel yanmasının ortadan kaldırılmasıyla doğrudan ilişkilidir. İnsan toksisitesi etki kategorisi incelendiğinde, %7 oranında kötüleşme (2,61 → 2,79 kg 1,4-DB eşd) görülmektedir. Bu artışın temel nedeni, batarya ve elektrikli ekipman üretim süreçlerinde kullanılan ağır metallerin (örneğin kobalt, lityum) yaşam döngüsüne katkı yapması olabilir. Elektrikli taşıma sistemlerinde doğrudan emisyonlar azalırken, tedarik zincirine dayalı toksik etki potansiyeli artabilmektedir. Fotokimyasal sis oluşumu eki kategorisi açısından %69 oranında iyileşme dikkat çekicidir. Dizel yakıtlı motorların ozon öncüsü uçucu organik bileşikler (NMVOC) salımı, fotokimyasal sis oluşumunun başlıca nedenidir. Bu nedenle elektrikli taşıma sistemine geçiş, bu etkiyi dramatik biçimde azaltmıştır. Partikül madde oluşumu etki kategorisi için en yüksek iyileşme (%94) gözlemlenmiştir (0,704 kg PM₁₀ eşd → 0,0419 kg PM₁₀ eşd). Dizel motorların yanma sonucunda ortaya çıkan ince ve ultra ince partiküller insan sağlığı ve hava kalitesi açısından kritik önem taşımaktadır. Elektrikli sistemlerde egzoz emisyonunun olmaması bu olumlu sonucu doğurmuştur.

Karasal ekotoksosite ve tatlı su ekotoksitesi kategorilerinde sırasıyla %8 ve %2 oranlarında iyileşme sağlanmıştır. Bu iyileşmeler, motor yağı ve egzoz bileşenlerinin toprak ve tatlı su sistemlerine dolaylı etkilerinin ortadan kaldırılmasıyla ilgilidir. Denizsel ekotoksosite kategorisinde %6 oranında kötüleşme gözlemlenmiştir (0,0366 → 0,0388 kg 1,4-DB eşd). Bu artış, batarya üretiminde kullanılan maddelerin (özellikle ağır metallerin) denizel toksisiteye etkisiyle ilişkili olabilir. İyonlaştırıcı radyasyon etki kategorisi için %28 oranında iyileşme sağlanmış olması, elektrikli sistemlerin enerji talebinin büyük ölçüde fosil dışı kaynaklardan (örneğin hidroelektrik, güneş) karşılanabileceğini ve nükleer enerji kaynaklı etkilerin daha az katkı yaptığını göstermektedir. Tarımsal arazi işgali ve Kentsel Arazi İşgali kategorilerinde değişim minimal düzeydedir (%2 ve %0). Bu durum, taşıma sistemindeki değişikliğin arazi kullanımına doğrudan bir etkisi olmadığını göstermektedir. Doğal arazi dönüşümü etki kategorisi için %75'lik dikkat çekici bir iyileşme gözlenmiştir. Bu, dizel yakıt tedarik zincirinde (rafineri, taşıma, depolama) kullanılan alanların elektrikli taşıma altyapısına göre daha yoğun arazi kullanımı gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Su kaynaklarının tükenmesi etki kategorisi kapsamında %9'luk bir kötüleşme mevcuttur. Bu, batarya üretimi ve enerji dönüşüm süreçlerinin yüksek su ayak izine sahip olmasıyla açıklanabilir. Elektrikli sistemin enerji talebinin karşılanma biçimi (örneğin su bazlı soğutmalı enerji üretimi) bu etkiyi artırmaktadır. Son olarak, Fosil kaynak azalması etki kategorisi bakımından %27 oranında iyileşme sağlanmış olup, bu durum dizel yakıt kullanımının tamamen ortadan kaldırılmasının fosil kaynaklar üzerindeki yükü azalttığını göstermektedir.

5.3. İş Makinalarında Dizel Yerine Biyodizel Kullanımı Senaryosu

Kömür madenciliği sektöründe dizel yakıtla çalışan iş makineleri, çevresel etkiler açısından dikkate değer bir kaynak teşkil etmektedir. Yıllık yaklaşık 19.894.571 litre dizel tüketimi ve ağır iş makinelerinin sürekli faaliyeti, başta sera gazı emisyonları olmak üzere, hava kirliliği (PM, NO_x, SO₂) gibi olumsuz çevresel etkilerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu durum, madencilik operasyonlarının çevresel sürdürülebilirliği açısından ciddi bir endişe kaynağıdır.

Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının madencilik sektörüne entegrasyonu, çevresel etkilerin azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması açısından stratejik bir potansiyel sunmaktadır. Özellikle biyodizel gibi alternatif yakıtlar, fosil

yakıtların ikamesi amacıyla kullanılarak karbon ayak izinin düşürülmesine katkı sağlayabilir. Organik atıklardan elde edilen biyodizel, aynı zamanda atık yönetimine entegre edilerek döngüsel ekonomi anlayışını desteklemektedir.

Biyodizel, bitkisel yağlar veya atık yağların transesterifikasyon yoluyla işlenmesi sonucu elde edilen yenilenebilir bir yakıttır ve dizel motorlarda doğrudan kullanılabilir. Biyodizelin karbon yoğunluğu, konvansiyonel dizel yakıtla kıyasla daha düşüktür; yanma sırasında daha az partikül madde (PM₁₀) ve azot oksit (NO_x) emisyonu üretmektedir. Literatürde yer alan bulgulara göre, biyodizel kullanımı ile karbon dioksit (CO₂) emisyonları litre başına yaklaşık 0,7 kg seviyelerine kadar düşebilmektedir (Dizge ve diğ., 2025).

Bu çalışmada, mevcut durumda kullanılan dizel yakıtın %100 oranında biyodizel ile değiştirilmesi senaryosu ele alınmıştır. Bu kapsamda, SimaPro yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilen yaşam döngüsü analizi ile söz konusu senaryonun uygulama aşamaları, emisyon faktörleri ve çevresel etki kategorileri sistematik olarak değerlendirilmiştir. Amaç, madencilik operasyonlarında daha çevreci ve sürdürülebilir bir enerji yönetimi modeli geliştirmektir.

Biyodizel, küresel ölçekte artan kullanım oranlarıyla birlikte, konvansiyonel dizel yakıtın alternatiflerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Türkiye’de biyodizel üretimi ve kullanımı hem mevzuat düzenlemeleri hem de sektörün girişimleri sayesinde son yıllarda artış göstermiştir. Bu gelişme, enerji arz güvenliğinin sağlanması ve sera gazı emisyonlarının azaltılması hedeflerine katkı sunmaktadır. Demir (2024) ve Çiftçi (2025) tarafından yürütülen çalışmalarda, dizel motorlarda biyodizelin doğrudan kullanımının teknik olarak uygun olduğu vurgulanmaktadır.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından 16 Haziran 2017 tarihli Resmî Gazete’de yayımlanan tebliğ kapsamında, motorin türlerine %0,5 (binde 5) oranında biyodizel harmanlanması zorunlu hale getirilmiştir (Resmî Gazete, 2017). Avrupa Birliği’nde bu oran %9 seviyelerine kadar ulaşırken, Türkiye’de gönüllü harmanlama oranı halen %2 civarındadır (Anadolu Ajansı, 2019). Gelecekte biyodizel teknolojisinin gelişimi ile birlikte bu oranların artması beklenmektedir. Türkiye’de biyodizel üretimi ve kullanımı, Avrupa Birliği biyodizel standardı olan EN 14214 temel alınarak oluşturulan TS EN 14214+A2 standardına uygun olarak yürütülmektedir (Türkiye Standardları Enstitüsü, TS EN 14214+A2:2019).

Bu senaryoda, SimaPro yazılımında tanımlı dizel yakıtın üretim ve kullanımına ilişkin süreç verileri (örneğin: "diesel, at regional storage" ve "diesel, burned in

vehicle") yerine, biyodizel üretimi ve tüketimine ilişkin eşdeğer prosesler ikame edilmiştir. İkame edilen prosesler şunlardır; “Vegetable oil, from waste cooking oil, at plant, RER S” ve “Biodiesel, Burned in heavy truck/GLO S”. Envanter verilerinin tekrar modellenmesinin ardından elde edilen sonuçlar, Tablo 5.5’te sunulmaktadır.



Tablo 5.5. Senaryonun Uygulanması Durumunda Elde Edilen Veriler

Etki Kategorisi	Birimi	Çalışma Verisi	Senaryo Sonrası	İyileşme Oranı (%)
İklim Değişikliği Etki Kategorisi (İDEK)	Kg CO ₂ eşd.	25,4	22,2	13%
Ozon Tabakasının Tükenmesi E. K. (OTTEK)	Kg CFC-11 eşd	2,83E ⁻⁶	1,71E ⁻⁶	40%
Karasal Asitlenme Etki Kategorisi (KA EK)	Kg SO ₂ eşd	0,163	0,0959	41%
Tatlı Su Ötrifikasyonu Etki Kategorisi (TSÖEK)	Kg P eşd.	0,000571	0,000559	2%
Denizsel Ötrifikasyon Etki Kategorisi (DÖEK)	Kg N eşd.	0,0225	0,0186	17%
İnsan Toksisitesi Etki Kategorisi (İTEK)	Kg 1,4-DB eşd	2,61	2,5	4%
Fotokimyasal Sis Oluşumu Etki Kategorisi (FSOEK)	Kg NMVOC	0,172	0,0574	67%
Partikül Madde Oluşumu Etki Kategorisi (PMOEK)	Kg PM10 eşd	0,704	0,0403	94%
Karasal Ekotoksisite Etki Kategorisi (KEEK)	Kg 1,4-DB eşd	0,0018	0,00165	8%
Tatlı Su Ekotoksisitesi Etki Kategorisi (TSEK)	Kg 1,4-DB eşd	0,0262	0,0229	13%
Denizsel Ekotoksisite Etki Kategorisi (DEEK)	Kg 1,4-DB eşd	0,0366	0,0341	7%
İyonlaştırıcı Radyasyon Etki Kategorisi (İREK)	kBq U235 eşd	1,19	1,19	0%
Tarımsal Arazi İşgali Etki Kategorisi (TAİEK)	M ² a	0,474	0,469	1%
Kentsel Arazi İşgali Etki Kategorisi (KAİEK)	M ² a	7,19	7,18	0%
Doğal Arazi Dönüşümü Etki Kategorisi (DADEK)	M ²	0,0105	0,00595	43%
Su Kaynaklarının Tükenmesi Etki Kategorisi (SKTEK)	M ³	0,12	0,111	8%
Fosil Kaynak Azalması Etki Kategorisi (FKA EK)	Kg Yağ eşd.	0,00596	0,00543	9%

Biyodizel kullanımına geçilmesiyle iklim değişikliği kategorisinde %13'lük bir iyileşme sağlanmıştır. Bu durum, biyodizelin büyük ölçüde biyogenik karbon içermesi ve bu nedenle yanma sonrası salınan CO₂'nin atmosferik karbon döngüsüne net katkı yapmamasıyla açıklanabilir. Ancak biyodizelin üretim, işleme ve taşınma süreçlerinde kullanılan enerji kaynaklarının fosil kökenli olması nedeniyle bu kategoriye etkisi sıfırlanmamıştır. Dolayısıyla elde edilen iyileşme kısımdır ancak çevre dostu yakıt geçişi için anlamlıdır. Ozon tabakasının tükenmesine etkide %40 oranında azalma gözlemlenmiştir. Bu dikkate değer düşüş, biyodizel yanmasının daha düşük sıcaklıkta gerçekleşmesi ve kloroflorokarbon (CFC) gibi ozon tükenmesine neden olan bileşiklerin salınımına neden olmamasıyla ilişkilendirilebilir. Ayrıca, biyodizel üretim zincirinde bu tür kimyasal girdilerin daha az kullanılması, bu kategoriye olumlu katkı sağlamaktadır. Biyodizel senaryosu, karasal asitlenme kategorisinde %41'lik bir iyileşme sağlamıştır. Bu kategorideki iyileşme, büyük oranda kükürt dioksit (SO₂) ve azot oksitler (NO_x) gibi asitifikasyon potansiyeli yüksek gazların salınımındaki azalmadan kaynaklanmaktadır. Biyodizelin kükürt içeriği oldukça düşük olduğundan, özellikle SO₂ salınımı minimal seviyelerde kalmakta ve bu da çevresel asidifikasyonu anlamlı ölçüde düşürmektedir.

Tatlı su ötrofikasyonu kategorisinde %2 gibi düşük bir iyileşme gözlemlenirken, denizsel ötrofikasyon etkisinde %17'lik bir düşüş kaydedilmiştir. Biyodizel yanması, özellikle NO_x emisyonlarını azaltarak nitrojen temelli besin maddelerinin çevreye salınımını sınırlamaktadır. Ancak biyodizel üretiminde kullanılan tarımsal girdiler (örneğin gübre kalıntıları) ve proses atıkları, tatlı su ötrofikasyon etkisini sınırlı düzeyde azaltabilmiştir. İnsan toksisitesi kategorisinde %4'lük bir azalma gözlemlenmiştir. Bu kategori, ağır metaller, partikül madde ve zehirli gazların insan sağlığı üzerindeki etkilerini yansıtır. Biyodizel kullanımıyla partikül madde ve karbon monoksit gibi emisyonlar azalsa da biyodizel üretimi sürecinde kullanılan bazı kimyasalların etkisi sürdüğünden bu kategorideki iyileşme sınırlı kalmıştır. Biyodizel kullanımı, fotokimyasal sis oluşumu potansiyelinde %67 oranında iyileşme sağlamıştır. Bu kategori, özellikle uçucu organik bileşikler (NMVOC) ve NO_x salınımı ile ilişkilidir. Biyodizel, daha temiz bir yanma profiline sahip olduğundan, troposferik ozon ve sis oluşumuna neden olan gazları dizel yakıta kıyasla önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu durum, hava kalitesi açısından oldukça olumlu bir gelişmedir.

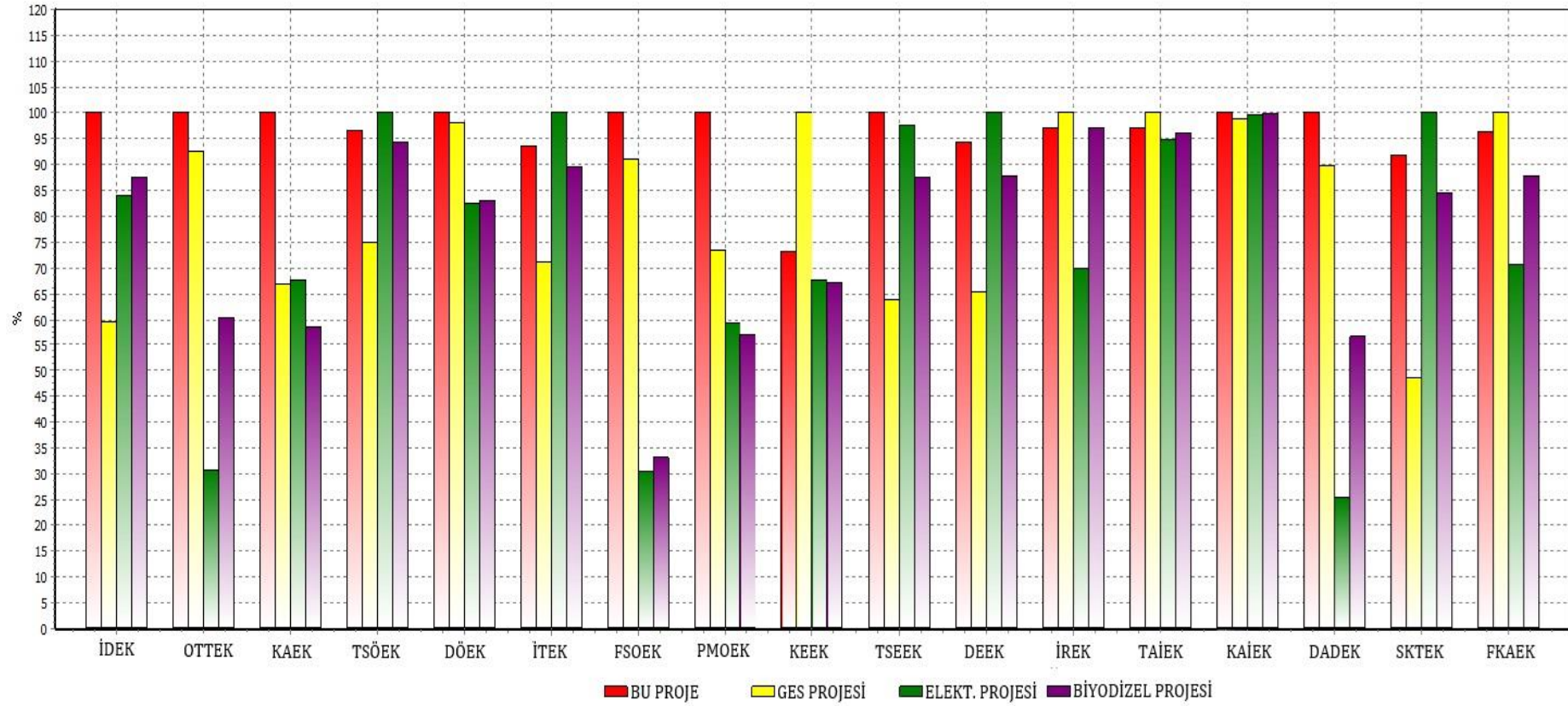
Partikül madde oluşumu etkisinde %94 gibi çok yüksek düzeyde bir azalma sağlanmıştır. Biyodizel yakıtlar, dizel yakıta kıyasla daha az kurum ve PM₁₀ ürettiğinden, özellikle solunabilir partiküllerin havaya karışması ciddi şekilde

azalmaktadır. Karasal, tatlı su ve denizsel ekotoksosite kategorilerinde sırasıyla %8, %13 ve %7 oranlarında iyileşme sağlanmıştır. Bu kategoriler, biyodizelin daha düşük ağır metal, VOC ve yan ürün salımı sayesinde toksik etkilerde azalma sağlamasıyla ilişkilidir. Ancak biyodizel üretim zincirinde kullanılan bazı tarım kimyasalları ve endüstriyel girdiler, mutlak iyileşmeyi sınırlamıştır. Tarımsal (%1) ve kentsel (%0) arazi işgali kategorilerinde biyodizel senaryosunun çok sınırlı etkileri olmuştur. Ancak doğal arazi dönüşümü kategorisinde %43 oranında belirgin bir azalma kaydedilmiştir. Bu sonuç, biyodizelin lojistik ve madencilik operasyonlarındaki daha az yer kaplama ve çevresel iz bırakma potansiyeliyle açıklanabilir. Biyodizel kullanımının su tüketimi üzerindeki etkisi %8'lik bir azalma ile sınırlı kalmıştır. Bu durum, biyodizelin doğrudan su tüketimini azaltmasa da dizel üretim sürecine göre genel çevresel yükünün daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Biyodizel, yenilenebilir bir enerji kaynağı olduğu için fosil kaynak tüketimi kategorisinde %9'luk bir iyileşme sağlamıştır. Ancak biyodizelin üretiminde kullanılan enerji kaynaklarının kısmen fosil temelli olması bu iyileşmenin daha fazla olmasını engellemiştir.

6. SONUÇ

6.1. Sonuçlar

Bu çalışma, Türkiye sınırları içerisinde yer alan 10 adet kömür sahasında yürütülen madencilik faaliyetlerinin çevresel etkilerini, yaşam döngüsü analizi yöntemi ile bütüncül olarak incelemiş ve çevresel sürdürülebilirliği artırmaya yönelik üç farklı senaryo ile etki azaltım potansiyellerini ortaya koymuştur. SimaPro yazılımı kullanılarak yapılan analizlerde, kömür çıkarımından kullanıcıya sevk sürecine kadar olan aşamalar detaylı bir şekilde modellenmiştir. Yaşam döngüsü analizi sonuçlarına dayanarak, ReCiPe Midpoint (H) Europe etki değerlendirme yöntemiyle oluşturulan sonuçlar, her bir senaryonun yer aldığı, 1 ton kömür üretimi için modellenmiş çevresel etki kategorilerine göre karşılaştırma grafiği Şekil 6.1’de sunulmaktadır. Grafikteki kırmızı renkler mevcut çalışmayı, sarı renk üzerinde faaliyet bulunmayan sahalara geç kurulması senaryosunu, yeşil renk dizel iş makinelerinin elektrik tahrikli sisteme çevrilmesi senaryosunu ve mor renk ise iş makinelerinde dizel yerine biyodizel kullanımı senaryosunu temsil etmekte olup her bir dikey bar, ilgili projenin yüzdesel çevre yükünü göstermekte ve tüm değerler mevcut projeye göre (%100) normalize edilmiştir.



Şekil 6.1. Mevcut Çalışma ile Hazırlanan 3 Senaryonun Karşılaştırma Grafiği

Birinci senaryo olan üzerinde faaliyet bulunmayan sahalara güneş enerji santralleri kurulması, özellikle iklim değışikliğı etki kategorisinde %41 oranında iyileşme sağlayarak, fosil yakıta dayalı enerji kullanımını yenilenebilir kaynaklarla ikame etmenin çevresel faydalarını ortaya koymuştur. Ayrıca, su kaynaklarının tükenmesi kategorisinde %47 oranında azalma elde edilmesi, bu senaryonun özellikle dolaylı su ayak izini düşürme konusunda etkili olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, karasal ekotoksiste gibi bazı kategorilerde artış gözlenmiştir; bu durum, güneş enerji sistemlerinin kurulum süreçlerindeki malzeme girdilerinin (örneğin nadir toprak elementleri) etkisini yansıtabilir.

İkinci senaryo olan dizel iş makinelerinin elektrikli sistemlerle değıştirilmesi, partikül madde oluşumu ve fotokimyasal sis oluşumu gibi hava kalitesiyle doğrudan ilişkili kategorilerde sırasıyla %94 ve %69 oranında önemli iyileşmeler sağlamıştır. Ayrıca, ozon tabakasının tükenmesi etki kategorisinde %69 gibi dikkat çekici bir azalma sağlanmıştır. Ancak, elektrikli makinelerin şebekeye bağımlılığı ve Türkiye'nin mevcut enerji üretim altyapısındaki fosil yakıt payı nedeniyle bazı kategorilerde (örneğin tatlı su ötrifikasyonu ve denizsel ekotoksiste) olumsuz etkiler gözlenmiştir.

Üçüncü senaryo olan dizel yerine biyodizel kullanımı, özellikle karasal asitleşme ve fotokimyasal sis oluşumu gibi etki kategorilerinde %41 ve %67 gibi yüksek iyileşme oranlarına ulaşmıştır. Biyodizelin yenilenebilir oluşu ve daha düşük kükürt içeriğı sayesinde insan sağlığı üzerindeki toksik etkiler de sınırlı ölçüde azaltılmıştır. Ancak, biyodizelin tarım kaynaklı olması nedeniyle arazi kullanımı ve su tüketimi üzerindeki etkilerde sınırlı veya olumsuz değışiklikler gözlemlenmiştir.

Senaryolar genel olarak değęlendirildiğinde, partikül madde oluşumu, iklim değışikliğı, ozon tabakası tahribatı ve fotokimyasal sis oluşumu gibi hava kaynaklı çevresel etkilerin her üç senaryo ile de önemli oranda azaltılabildiğı tespit edilmiştir. Buna karşılık, ekotoksiste ve arazi kullanımı gibi kategorilerde senaryoların etkileri daha karmaşık ve sınırlı düzeyde kalmıştır.

Bu bağlamda çalışma, enerji dönüşümü, motor tipi değışimi ve âtil alan değęlendirmesi gibi müdahalelerin, madencilik gibi yüksek çevresel baskı yaratan sektörlerde sürdürülebilirlik açısından kayda değęr iyileştirmeler sağlayabileceğini açıkça ortaya koymuştur. Ancak bu iyileştirmelerin etkili olabilmesi, sistematik bir çevresel planlama yaklaşımı ve teknolojik altyapı yatırımları ile mümkündür.

6.2. Öneriler

Bu çalışmada kömür madeni işletmesinde enerji kaynağı dönüşümünün çevresel etkileri üç farklı senaryo üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, enerji kaynağı değişim senaryolarının çevresel etkiler açısından çok boyutlu bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu kapsamda, benzer çalışmaları yürütecek araştırmacılara öncelikli olarak önerilen yaklaşım, senaryo seçimlerinde yalnızca karbon emisyonları üzerindeki iyileşmeleri değil, aynı zamanda diğer etki kategorilerindeki olası olumsuz etkileri de kapsamlı bir şekilde analiz etmektir.

Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu ve Enerji Otonomisi: Faaliyet dışı sahalarda güneş enerjisi sistemlerinin kurulması, yalnızca doğrudan karbon emisyonlarını azaltmakla kalmamakta, aynı zamanda madencilik tesislerinin enerji açısından daha bağımsız ve dirençli hale gelmesini sağlamaktadır. Bu bağlamda, rüzgâr enerjisi potansiyeli olan alanlarda hibrit sistemlerin (Ges+Res) değerlendirilmesi de gerekmektedir.

Su Yönetimi ve Geri Kazanımı: Madenlerde yoğun su kullanımı gerektiren işlemlerde (örneğin lavvar, toz bastırma) su arıtma sistemleri ve yağmur suyu toplama altyapısı kurulması çevresel su ayak izini azaltacaktır. Ayrıca, kapalı çevrim su sistemleri ile tüketim minimize edilebilir.

İleri Düzey Atık Yönetimi: Dekapaj malzemeleri, düşük kalorili kömürler ve şamlar gibi atıkların alternatif kullanım senaryoları (örneğin dolgu malzemesi, yapı sektörü hammaddesi) ile değerlendirilmesi hem ekonomik hem çevresel fayda sağlayacaktır. Bu süreçler, çevresel etki analizleri ile yeniden planlanmalıdır.

ISO 14001, ISO 50001 ve ISO 14067 Uyumlu Yönetim Sistemleri: Kurumsal sürdürülebilirlik kültürünün oturtulabilmesi için çevre yönetimi (ISO 14001), enerji yönetimi (ISO 50001) ve ürün karbon ayak izi (ISO 14067) standartlarına uyum süreçlerinin başlatılması ve denetimlerle periyodik izlenmesi önerilmektedir.

Kamu Politikası ve Teşvik Mekanizmaları ile Uyum: Çevreci madenciliğin kurumsallaşması, yalnızca işletme bazlı değil, aynı zamanda sektörel teşvik ve düzenlemelerle desteklenmelidir. Karbon ayak izi ödüllendirme sistemleri, yeşil sertifikalandırma, madencilik fonları gibi teşvik araçlarının yaygınlaştırılması gerekmektedir.

Kömürün Gübre Hammaddesi olarak Kullanılması: Düşük kalorifik değere sahip, ekonomik olarak enerji üretiminde değerlendirilmesi sınırlı olan kömürlerin

alternatif kullanım alanlarından biri de tarımsal gübre katkı maddesi olarak değerlendirilmesidir. Özellikle humik ve fulvik asit açısından zengin linyit türü kömürler (Leonardit), toprak yapısını iyileştirici özellikleri nedeniyle organomineral gübre üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabilir. Bu uygulama hem atık statüsündeki kömürlerin çevreye zarar vermeden değerlendirilmesini sağlamakta, hem de tarım sektöründe dışa bağımlılığı azaltacak yerli kaynak kullanımını teşvik etmektedir. Bu nedenle, tarım-sanayi iş birlikleri çerçevesinde mevcut pilot uygulamaların yaygınlaştırılması hem madencilik hem de tarım sektörü açısından çevresel ve ekonomik fayda yaratabilecek bir strateji olarak değerlendirilmektedir. Bu faaliyetlerin bir örneği, Kütahya'nın Tavşanlı ilçesinde bağlı Tunçbilek beldesinde yer alan Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu'na ait leonarditin hammadde olarak kullanıldığı TKİ-HÜMAS tesislerinde organik sıvı gübre üretilerek gerçekleştirilmektedir (TKİc, 2022).

KAYNAKLAR

- Adiansyah, J., Haque, N., Rosano, M., Biswas, W., 2017, Application Of A Life Cycle Assessment To Compare Environmental Performance İn Coal Mine Tailings Management, Journal Of Environmental Management, Vol 199, 181-191, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.050>
- Anadolu Ajansı, 2019, “5 termik santral tamamen kapatıldı" başlıklı haber, [Online], <https://www.aa.com.tr/tr/turkiye/cevre-ve-sehircilik-bakani-kurum-5-termik-santral-tamamen-kapatildi/1689676>, [Ziyaret tarihi: 15 Mayıs 2025]
- Arvanitoyannis, I. S., 2008, Waste Management For The Food Industries, Food Science and Technology, 941-1045, <https://doi.org/10.1016/b978-012373654-3.50018-3>
- Bishop, P. L., 2000, Pollution Prevention: Fundamentals and Practice, ISBN-10: 0071160582, McGraw-Hill, New York, 1-717
- Buchart-Korol, B., Fugiel, A., Czaplicka-Kolarz, K., Turek, M., 2016, Model Of Environmental Life Cycle Assessment For Coal Mining Operations, Science Of The Total Environment, Vol 562, 61-72, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.202>
- Council Directive 91/689/EEC, 1991, Access to European Union law, European Union, Official Journal, L 377, 20-27
- Curran M. A., 2006, Life Cycle Assessment: Principles and Practice, National Risk Management Research Laboratory Office Of Research And Development U.S. Environmental Protection Agency, OHIO, EPA/600/R-06/060
- ÇSGB, 2011, Sanayiden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Belirlenmesi ve Azaltılmasına Yönelik Uygulamanın Kolaylaştırılmasının Sağlanması Projesi, Taslak, 2-3
- ÇŞİDB, 2023, Türkiye'nin Döngüsel Ekonomiye Geçiş Potansiyelinin Değerlendirilmesi için Teknik Destek Projesi, 2023, EuropeAid/140562/IH/SER/TR, Ankara
- Da Silva, M. G., Muniz, A. R. C., Hoffman, R., Lisboa, A. L. C., 2018, İmpact of Greenhouse Gases on Surface Mining in Brasil, Journal of Cleaner Production, Vol 193, 206-216, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.076>
- Demirer, G. N., 2011, Sürdürülebilir Üretim ve Tüketim Yayınları- 1: Yaşam Döngüsü Analizi. Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı
- Diharjo, D. F. M. W., Sar Manik Y. B., 2023, Life Cycle Assessment a Coal Mining in East Kalimantan, Jurnal Sains dan Teknologi, Vol 12, No:3, Page: 613-621, <https://doi.org/10.23887/jstundiksha.v12i3.68103>
- Dizge, N., Canlı, O., Karpuzcu, M., 2025, Biyodizel Kullanımının Çevresel Etkileri, Gebze Yüksek Teknoloji Üniversitesi, Çevre Mühendisliği, İstanbul, [Online],

- https://www.emo.org.tr/ekler/5aa4bd09c07d8b2_ek.pdf [Ziyaret tarihi: 15 Mayıs 2025]
- Durucan, S., Korre, A., Melendez, G., 2006, Mining life cycle modelling: a cradle-to-gate approach to environmental management in the minerals industry, *Journal of Cleaner Production*, Vol 14, 1057-1070, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.12.021>
- Ember-Energy, 2024, Güneş Kapasitesi 2,5 Yılda İki Katına Çıkararak 2025 Hedefini Aştı, [Online], <https://ember-energy.org/tr/analizler/gunes-kapasitesi-25-yilda-iki-katina-cikarak-2025-hedefini-asti>, [Ziyaret tarihi: 15 Mayıs 2025]
- Erkayoğlu, M., Demirel, N., 2011, Bir Açık Ocak Kömür Madeninde Kamyon ve Bantlı Konveyörün Yaşam Döngüsü Değerlendirme Metodu ile Karşılaştırılması, *Madencilik*, Cilt 50, Sayı 3, 25-34
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinee, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Suh, S., 2009, Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1–21, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- Ghosh, S., Gain, S., De, S., 2024, Decarbonizing Mining: Diesel vs Electric Haul Trucks on Cost and Efficiency, SRK Consulting, [Online], https://cdn-web-content.srk.com/upload/user/image/SGhosh-SGain-SDe_DecarbonizingMiningDieselVsElectricHaulTrucksOnCostAndEfficiency_2024.pdf [Ziyaret tarihi: 15 Mayıs 2025]
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & Van Zelm, R., 2009, ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, 1, 1-126
- Goldsmith, G., Allen, R., Allaby, M., Davoll J., Lawance, S., 1972. A Blueprint for Survival, *The Ecologist*, Vol.2, No.1, 1-48
- Hauschild, M.Z., Huijbregts, M.A.J., 2015, Life Cycle Impact Assessment. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment. Springer Netherlands, <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9744-3>
- Hunt, R. G., Franklin, W. E. & Hunt R. G., 1996, How It Came About? The International Journal of Life Cycle Assesment, Vol 1, 4-7, <https://doi.org/10.1007/bf02978624>
- IEA, 2023, World Energy Outlook 2023, [Online] International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023> [Ziyaret tarihi: 15 Mayıs 2025]
- iPoint-systems GmbH, 2023, Most Used LCIA Methods in SimaPro and GaBi Explained, [Online], <https://go.ipoint-systems.com/blog/lcia-indicator> [Ziyaret Tarihi: 19.04.2025]

- ISE, 2023, Photovoltaics Report, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE with the support of PSE Projects GmbH
- ISO 14001:2015, Environmental Management Systems — Requirements With Guidance For Use
- ISO 14002-1:2019, Environmental Management Systems — Guidelines For Using ISO 14001 To Address Environmental Aspects And Conditions Within An Environmental Topic Area
- ISO 14040:2006, Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework
- ISO 14044:2006, Environmental Management, Life Cycle Assessment, Requirements And Guidelines
- ISO 14048:2002, Environmental Management, Life Cycle Assessment, Data Documentation Format
- ISO 14067:2018, Greenhouse Gases, Carbon Footprint Of Products, Requirements And Guidelines For Quantification
- ISO 50001:2018, Energy Management Systems — Requirements With Guidance For Use
- Kılıç, E., 2017, Bir Araç Koltuğunun Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi İle Çevresel Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, 7
- Klöppfer. W., Grahl, B., 2014, Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice, 20-100, <http://dx.doi.org/10.1002/9783527655625>
- Kömür, 2024, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, [Online], <https://enerji.gov.tr/bilgimerkezi-tabii-kaynaklar-komur> [Ziyaret Tarihi: 18 Şubat 2025]
- Lelek, L., Kulczycka J., 2021, Life Cycle Assessment Of Opencast Lignite Mining, International Journal Of Coal Science & Technology, Vol 8, 1272 – 1287, <https://doi.org/10.1007/s40789-021-00467-9>
- Li, J., Ding R., 2024, Research on Comprehensive Evaluation Indicators and Methods of World-Class Open-Pit Coal Mines, School of Management, China University of Mining and Technology (Beijing), Sustainability 2024, 16(18), <https://doi.org/10.3390/su16188134>
- MAPEG, 2023, Maden İstatistikleri, Maden Üretim Değerleri, [Online], <https://www.mapeg.gov.tr/Sayfa/Madenistatistik> [Ziyaret Tarihi: 12 Mayıs 2025].
- Meadows, D. H., Meadows D. L., Randers, J., Behrens, W. W., 1972. The Limits to Growth, [Digital Scan Version), The Donella Meadows Project, [Online],

<https://www.donellameadows.org/wp-content/userfiles/Limits-to-Growth-digital-scan-version.pdf> [Ziyaret Tarihi: 15 Mart 2025]

Memon, M.B., Tao, M., Yang, Z., Ahmed, T., Ibrahim M., 2024, Life cycle assessment model for small-scale coal mining operations with equivalent coal output: a greener perspective towards coal mining. Environ Dev Sustain <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05021-6>

MGM, 2025, Türkiye Ortalama Güneşlenme Süresi (1991-2020), [Online], <https://www.mgm.gov.tr/kurumici/turkiye-guneslenme-suresi.aspx> [Ziyaret Tarihi: 12 Şubat 2025]

MTA, 2023, Türkiye Kömür Raporu, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü

NREL, 2023, Best Research-Cell Efficiency Chart, National Renewable Energy Laboratory, [Online], <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency> [Ziyaret Tarihi: 12 Haziran 2025]

Nuh Çimento, 2022, Dünyada bir ilk! Elektrikli kamyonlarımızla 1 milyon litre yakıt tasarrufu, [Online], <https://www.nuhcimento.com.tr/dunyada-bir-ilk-elektrikli-kamyonlarımızla-1-milyon-litre-yakit-tasarrufu> [Ziyaret Tarihi: 13 Mayıs 2025].

OpenAI, 2025. Güneş Panelleri Ve Elektrikli Maden Kamyonu. Yapay Zeka İle Üretilmiş Görsel. <https://openai.com> [Ziyaret Tarihi: 17.05.2025]

OSHA, 2023, Personal Sampling for Air Contaminants, OSHA Technical Manual (OTM) Section II: Chapter 1, [Online], <https://www.osha.gov/otm/section-2-health-hazards/chapter-1?utm> [Ziyaret Tarihi: 12 Mayıs 2025]

Polat, O., 2024, Kömür ile Çalışan Termik Santrallerin LCA Analizi ile Kazan Teknolojilerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilecik

Pré Sustainability, 2021, SimaPro software: Life cycle assessment software for sustainability experts, [Online], <https://pre-sustainability.com/simapro> , [Ziyaret Tarihi: 18 Şubat 2025]

Resmî Gazete, 2017, Motorin Türlerine Biodizel Harmanlanması Hakkında Tebliğ, Sayı:30098, Tarih: 16.06.2017

Restrepo, A., Bazzo, E., Miyake, R., 2015, A Life Cycle Assessment Of The Brazilian Coal Used For Electric Power Generation, Journal Of Cleaner Production, Vol 92, 179-186. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.065>

Ritche H., 2020, Sector By Sector: Where Do Global Greenhouse Gas Emissions Come From? [Online], <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector> [Ziyaret Tarihi: 18 Şubat 2025]

- Rudar, 2022, Newspaper of the Velenje Coal Mine Group, Slovenia, No:2, 4-5, [Online], <https://greenjobsproject.uniovi.es/wp-content/uploads/2022/12/RUDAR-01-2022-GREENJOBS-info.pdf> [Ziyaret Tarihi: 12 Şubat 2025]
- Segura-Salazar, J., Lima, M. L., Tavares, L. M., 2019, Life Cycle Assessment In The Minerals Industry: Current Practice, Harmonization Efforts, And Potential Improvement Through The Integration With Process Simulation, Journal Of Cleaner Production, Vol 232, 174-192 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.318>
- Silva, D. A. L., Nunes, A. O., Piekarski C. M., Morris, V. A. D. S., De Souza L. S. M., Rodrigues T. O., 2019, Why using different Life Cycle Assessment software tools can generate different results for the same product system? A cause-effect analysis of the problem, Sustainable Production and Consumption, Vol 20, 304-315, <http://dx.doi.org/10.1016/j.spc.2019.07.005>
- Speight, J. G., 2013, The Chemistry and Technology of Coal (3rd edition). CRC Press., <https://doi.org/10.1201/b12497>
- Statista, 2023, Greenhouse Gas Emissions Worldwide - Statistics & Facts, [Online], <https://www.statista.com/topics/5770/global-greenhouse-gas-emissions> [Ziyaret tarihi: 15 Mayıs 2025]
- Taşkın, E., 2018, Linyit Yakıtlı Pilot Termik Santral İçin Baca Gazı Emisyon Azaltma Seçeneklerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- The Energy Institute, 2024, Energy Institute Statistical Review of World Energy 2024, [Online], https://www.energyinst.org/_data/assets/pdf_file/0006/1542714/684_EI_Stat_Review_V16_DIGITAL.pdf [Ziyaret tarihi: 15 Mayıs 2025], 46-48
- TKİa, 2025, Açık Ocak Madenciliği, [Online], <https://www.tki.gov.tr/acik-ocak-madenciligi> [Ziyaret Tarihi: 13 Şubat 2025]
- TKİb, 2025, TKİ'den Yenilenebilir Enerji Atağı: GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİ, [Online], <https://www.tki.gov.tr/haberler/tkiden-yenilenebilir-enerji-atagi-gunes-enerjisi-santralleri> [Ziyaret Tarihi: 13 Şubat 2025]
- TKİc, 2022, Tki-Hümas Organik Gübre Üretim Tesisi Açılış Töreni Gerçekleştirildi, [Online], <https://www.tki.gov.tr/haberler/tki-humas-organik-gubre-uretim-tesisi-acilis-toreni-gerceklestirildi>, [Ziyaret Tarihi: 1 Haziran 2025]
- TMMOB, 2020, Türkiye'nin Enerji Görünümü. Türkiye Mühendis ve Mimar Odaları Birliği, Makine Mühendisler Odası, Oda Raporu, MMO/731, 180
- Tok, G., 2015, Refrakter Tuğla Üretiminin Yaşam Döngüsü Analizi ve Yaşam Döngüsü Maliyeti Yöntemleriyle Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Eskişehir, 14

- Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 14214+A2:2019, Sıvı Petrol Ürünleri, Dizel Motorlarda ve Isıtma Uygulamalarında Kullanım İçin Yağ Asidi Metil Esterleri (FAME), Gereksinimler ve Test Yöntemleri
- Türk Standartları Enstitüsü, TS-EN 12457-2, Atıkların Nitelendirilmesi, Katıdan Özütleme Analizi, Granül Katı Atıkların ve Çamurların Katı Özütlemesi İçin Uygunluk Deneyi
- TÜİK, 2023, Sera Gazı Emisyon İstatistikleri (1990-2001), [Online], <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2021-49672&dil=1>, [Ziyaret Tarihi: 1 Mayıs 2025].
- TKİ- TÜBİTAK Raporu, 2012, TKİ'ye Bağlı Müessese ve İşletmelerde Çevresel Durum Değerlendirme Raporu, Ankara
- TÜİK, 2023, "Türkiye Yağış Verileri, [Online], www.tuik.gov.tr [Ziyaret Tarihi: 1 Mayıs 2025]
- Türkmen, B. A., Deveci, E. Ü., Sağlam, Ç. Ş., 2020, Environmental Sustainability Of Electricity Generation: Case Study Of Lignite Combustion, Environmental Progress & Sustainable Energy, Vol 40, Issue 2, <https://doi.org/10.1002/ep.13521>
- US Energy, 2021, Understanding Solar Photovoltaic System Performance, An Assessment of 75 Federal Photovoltaic Systems
- Zhang, L., Wang, J., Feng, Y., 2018, Life Cycle Assessment Of Opencast Coal Mine Production: A Case Study In Yimin Mining Area In China, Environmental Science And Pollution Research, Vol 25, 8475–8486 <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1169-6>