

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAŞAM DÖNGÜSÜ ETKİ DEĞERLENDİRMESİNE
YÖNELİK BİR MODELİN DEMİR-ÇELİK SEKTÖRÜ ÖZELİNDE
OLUŞTURULMASI

AYŞEGÜL AVİNAL
DOKTORA TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2023

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAŞAM DÖNGÜSÜ ETKİ DEĞERLENDİRMESİNE
YÖNELİK BİR MODELİN DEMİR-ÇELİK SEKTÖRÜ
ÖZELİNDE OLUŞTURULMASI

AYŞEGÜL AVİNAL
DOKTORA TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. PINAR ERGENEKON

GEBZE
2023

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**DEVELOPMENT OF A MODEL FOR
LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT SPECIFIC TO
THE IRON AND STEEL INDUSTRY**

AYŞEGÜL AVİNAL

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF PHILOSOPHY
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING**

THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. DR. PINAR ERGENEKON

GEBZE

2023



DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 29/12/2022 tarih ve 2022/67 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 25/01/2023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ayşegül AVİNAL'ın tez çalışması Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Pınar ERGENEKON

ÜYE : Prof. Dr. Nihal BEKTAŞ

ÜYE : Prof. Dr. Aykan KARADEMİR

ÜYE : Doç. Dr. Saniye KARAMAN ÖZTAŞ

ÜYE : Doç. Dr. Mahmut Kemal KORUCU

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinde (YDD) her bir etki kategorisinin ağırlıklandırma katsayıları, o kategorinin çevre için göreceli önemini temsil etmektedir. Bu katsayılar öznel olup sosyoekonomik kriterlere ve coğrafi bölgeye göre değişebilmektedir. Bu çalışmada, demir-çelik ürünlerinin yaşam döngüleri boyunca sebep olduğu çevresel etkilerin, yerel faktörleri dikkate alarak değerlendirilmesine olanak sağlayan bir yaşam döngüsü etki değerlendirme modelinin oluşturulması amaçlanmıştır. Türkiye'ye özgü normalizasyon ve ağırlıklandırma katsayılarının belirlenmesinde kullanılacak bir model oluşturulmuş (YDED YANKI) ve model demir-çelik sektöründe sınanmıştır.

Oluşturulan modelde, ağırlıklandırma ve normalizasyon katsayılarının belirlenmesi, etki değerlendirme ve modelin sınanması olmak üzere dört aşama bulunmaktadır. İlk aşamada, 17 panelistle anketler yapılarak ve “hedefe uzaklık”, “panel yaklaşımı” ile “değişime direnç” yöntemleri birlikte kullanılarak ağırlıklandırma katsayıları belirlenmiştir. İkinci aşamada ise ulusal istatistikler, raporlar ve uluslararası kuruluşlara sağlanan veriler dikkate alınarak normalizasyon katsayıları hesaplanmıştır. Etki değerlendirme aşamasında, bir indüksiyon ocağı (IF) tesisinde üretilen 1 kg ham çelik ile elektrik ark ocağı (EAO) tesisinde üretilen 1 kg ham çelik, YDD yaklaşımı kullanılarak çevresel etki açısından karşılaştırılmıştır. Çalışmada IF için veri setleri oluşturulmuş, OpenLCA programı ve ecoinvent 3.6 veri tabanı kullanılmıştır. Orta nokta sonuçlarına göre Türkiye IF teknolojisi, dünyadaki bir EAO ile karşılaştırıldığında, IF'nin % 7,3 daha az karbondioksit eşdeğeri emisyon saldığı ve EAO'nun % 21,8 daha az su tükettiğı görülmüştür. Modelin sınanması sonucunda, yerel ve Avrupa katsayıları ile hesaplanan sonuçlar karşılaştırıldığında küresel ısınma etki kategorisinin mertebesi aynı kalmış olsa da diğer kategorilerin sonuçlarının bir milyon ila 0,001 kat mertebelerinde değişiklik gösterdiği görülmüştür. Bu durum YDD sonuçlarının yerel katsayılardan önemli derecede etkilendiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD), Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi (YDED), Normalizasyon, Ağırlıklandırma, Demir-Çelik, Model.

SUMMARY

The weighting factors of each impact category in the Life Cycle Assessment (LCA) represent the relative importance of that category to the environment. These factors are subjective and may vary according to socioeconomic criteria and geographic region. In this study, it is aimed to create a life cycle impact assessment model in which the environmental impacts of iron and steel products throughout their life cycle are evaluated by considering local factors. A model (YDED YANKI) to be used in determining the normalization and weighting factors specific to Turkey was created and tested for the iron and steel industry.

There are four phases in the model created: determination of weighting and normalization factors, impact evaluation and proving of the model. In the first phase, weighting factors were determined by conducting surveys to 17 panelists and by using "distance to target", "panel approach" and "resistance to change" methods together. In the second phase, normalization factors were calculated by taking national statistics, reports and data provided to international organizations into account. In the impact assessment phase, 1 kg of crude steel produced in an induction furnace (IF) plant and 1 kg of crude steel produced in an electric arc furnace (EAF) plant were compared in terms of environmental impact using the LCA approach. The study was conducted by using OpenLCA program and ecoinvent 3.6 database and the datasets for an IF were generated. According to the midpoint results, when Turkey's IF technology is compared to an EAF in the world, it is seen that IF emits 7.3% less carbon dioxide equivalent emissions and EAF consumes 21.8% less water. As a result of the testing of the model, when the results calculated using local and European factors were compared, it was seen that although the level of the global warming impact category result remained the same, the results of the other categories varied between a million and 0,001 times. This situation reveals that the YDD results are significantly affected by the local coefficients.

Key Words: Life Cycle Assessment (LCA), Life Cycle Impact Assessment (LCIA), Normalization, Weighting, Iron and Steel, Model.

TEŞEKKÜR

Başta, doktora eğitimim boyunca bana yön gösteren, desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Pınar ERGENEKON'a,

bu çalışmanın yürütülmesi sırasında yönlendirmeleri ile bana destek olan tez izleme jürileri Sayın Doç. Dr. Saniye KARAMAN ÖZTAŞ'a ve Sayın Prof. Dr. Nihal BEKTAŞ'a,

pilot tesis olmayı kabul ederek tez çalışmasını mümkün kılan KILIÇLAR Bilecik Demir Çelik San. ve Tic. A.Ş Genel Müdürü Sayın Muammer BİLGİÇ'e ve veri temini sırasındaki emeklerinden dolayı Çelikhane İşletme Müdürü Sayın Uğur CENGİZ'e,

bu tezin sonuçlanmasında önemli bir yere sahip olan anket çalışmasında kıymetli vakitlerini ayırarak anketi doldurmayı kabul eden çok değerli panelistlere,

YDD veri tabanı ecoinvent'i kullanmama olanak sağladıkları için TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi'ne

tıkandığım noktalarda bilgi, deneyim ve fikirlerini benimle paylaşan değerli arkadaşım Ceren TOSUN'a,

ihtiyaç duyduğum zamanlarda desteklerini benden esirgemeyen sevgili arkadaşlarım Ayşen KILIÇ'a ve Yasemin TABAK'a,

tez savunma sınavım sırasında beni yalnız bırakmayarak desteklerini esirgemeyen Müge ARITÜRK MIZRAK ve Bayise KAVAKLI VATANSEVER'e

ve göstermiş oldukları destek ve anlayışlarından dolayı sevgili Annem'e ve Babam'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvii
TABLolar DİZİNİ	xix
1. GİRİŞ	1
1.1. Konu ile İlgili Çalışmalar	3
1.2. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	5
2. KURAMSAL BİLGİLER	9
2.1. Yaşam Döngüsü Yaklaşımı	9
2.2. İhmal Kriteri	14
2.3. Etki Kategorisi, Hasar Kategorisi ve Etki Yöntemi	14
2.4. Orta Nokta ve Son Nokta Yaklaşımı	15
2.5. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi	17
2.5.1. Normalizasyon	18
2.5.2. Ağırlıklandırma	18
2.6. YDD Veri Tabanları	22
2.7. YDD Yazılımları	22
3. DEMİR-ÇELİK SEKTÖRÜ	25
3.1. Türkiye’de Demir-Çelik Sektörü	25
3.2. Demir-Çelik Üretim Prosesleri	28
3.2.1. Ham Cevheri Kullanan Entegre Tesisler	29
3.2.2. Hurdadan Üretim: EAO ve IF Tesisleri	30
3.2.2.1. Elektrik Ark Ocaklı Tesisler	30
3.2.2.2. İndüksiyon Ocaklı Tesisler	31

3.2.3. Haddehaneler	33
3.3. Çelik Üretiminin Çevresel Etkileri	33
3.3.1. Kaynak Kullanımları	33
3.3.1.1. Su Tüketimi	33
3.3.1.2. Enerji Tüketimi	34
3.3.1.3. Ham Madde Tüketimi	36
3.3.2. Çevresel Emisyonlar	37
3.3.2.1. Atıksular	37
3.3.2.2. Atık Gaz Emisyonları	39
3.3.2.3. Katı Atıklar	42
4. YÖNTEM	44
4.1. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi Yerel Ağırlıklandırma ve Normalizasyon Katsayıları (YDED YANKI) Modeli Adımlarının Tanımlanması	44
4.2. Ulusal Ağırlıklandırma Katsayılarının Belirlenmesi	46
4.2.1. Mevcut Etki Yöntemlerinin İncelenmesi	46
4.2.1.1. Etki Yöntemlerinin Karşılaştırması	47
4.2.1.2. Kullanılacak Etki Kategorilerinin Belirlenmesi	48
4.2.1.2.1. Küresel Isınma	49
4.2.1.2.2. Abiyotik Kaynak Tükenmesi	50
4.2.1.2.3. Asidifikasyon	50
4.2.1.2.4. Ötrofikasyon	50
4.2.1.2.5. Ekolojik Zehirlilik	51
4.2.1.2.6. Arazi Kullanımı	51
4.2.1.2.7. Su Tüketimi	51
4.2.1.2.8. Ozon Tabakasında İncelme	52
4.2.1.2.9. İnsan Zehirlenmesi	52
4.2.1.2.10. İyonlaştırıcı Radyasyon	52
4.2.1.2.11. Fotokimyasal Sis Oluşumu	53
4.2.1.2.12. İnce Partikül Madde Oluşumu	53
4.2.2. Ağırlıklandırma Yönteminin ve Kriterlerinin Belirlenmesi	53
4.2.3. Anketin Oluşturulması	56

4.2.4. Panelistlerin Belirlenmesi	61
4.2.5. Anket Sonuçlarına Göre Ağırlıklandırma Katsayılarının Belirlenmesi	61
4.3. Ulusal normalizasyon Katsayılarının Belirlenmesi	67
4.4. Etki Değerlendirme	72
4.4.1. YDD Veri Setlerinin Oluşturulması	73
4.4.1.1. YDD Çalışması Yapılacak Demir-Çelik Firmasının Belirlenmesi ve Veri Temini	73
4.4.1.2. YDD çalışmasının Amaç ve Kapsam Tanımı	74
4.4.1.3. Envanter Analizi	76
4.4.1.3.1. Hurda Hazırlama	76
4.4.1.3.2. Çelik Üretimi	77
4.4.1.3.3. Hurda Hazırlama ve İndüksiyon Ocağı Tesisleri İnşaatı	79
4.4.1.4. Senaryolar	81
4.4.2. İndüksiyon Ocaklı Tesislerde Çelik Üretiminin Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi	83
4.5. Modelin sınanması	85
4.5.1. Ağırlıklandırma ve Normalizasyon Katsayılarının Uygulanması	85
4.5.2. Yeni katsayılar ile YDED Çalışmasının Gerçekleştirilmesi	86
5. BULGULAR ve TARTIŞMA	88
5.1. YDED Orta Nokta Sonuçları	88
5.2. YDED Son Nokta Sonuçları	92
5.2.1. İnce Partikül Madde Oluşumu	92
5.2.2. Ötrofikasyon (Tatlı Su)	95
5.2.3. İnsan Zehirlenmesi (Kanserojen Olmayan)	95
5.2.4. Asidifikasyon	96
5.2.5. Küresel Isınma, İnsan Sağlığı	97
5.2.6. Su Tüketimi, İnsan Sağlığı	97
5.2.7. Tek Skor Sonuçları	98
5.3. YANKI Modeli Sonuçlarının Ham Etki Sonuçları ile Karşılaştırılması ve Değerlendirme	100
5.4. YDED TR Modeli ile YANKI Modeli Katsayılarının Karşılaştırması	106
6. SONUÇ ve ÖNERİLER	108

KAYNAKLAR	114
ÖZGEÇMİŞ	121
EKLER	122



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrad Derece
μm	: Mikrometre
a_i	: i kriteri ağırlık puanı
$a_{i,s}$	: i çevresel sonuç kriterinin ağırlığını
$a_{i,sd}$	: i çevresel sonuç derecesi kriterinin ağırlığını
A_j	: Etki kategorisinin (j) ağırlığı
A_j'	: Her etki kategorisi (j) için ağırlık puanı
A_k	: Etki Kategorisi k için ağırlıklandırma katsayısı
$\text{Alan}_{\text{tarım},2019}$	: 2019 yılı Türkiye’de bulunan toplam tarım arazisi alanı
$\text{ASD}_{\text{deniz,ort}}$	: Türkiye’de soğutma suyu hariç alıcı ortama deşarj edilen atıksu miktarları
CaS	: Kalsiyum Sülfür
CO	: Karbonmonoksit
CO_2	: Karbondioksit
Cl	: Klor
CN	: Siyanür
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
D_i	: i kriteri değerlendirme puanı
$\text{EM}_{\text{CO}_2-\text{eşd},2019}$	: 2019 yılı Türkiye toplam CO_2 eşdeğer emisyon miktarı
$\text{EM}_{\text{HCFC},2019}$	: 2019 yılı Türkiye toplam HCFC emisyon miktarları
$\text{EM}_{\text{NOX},2019}$	: 2019 yılı Türkiye toplam NO_x emisyonu miktarı
$\text{EM}_{\text{PM}_{2.5},2019}$	: 2019 yılı Türkiye toplam $\text{PM}_{2.5}$ emisyon miktarı
$\text{EM}_{\text{SO}_2,2019}$	: 2019 yılı Türkiye toplam SO_2 emisyonu miktarı
FeO	: Demir Oksit
Fe_2O_3	: Hematit
Fe_3O_4	: Manyetit
H_2S	: Hidrojen Sülfür

HCl	: Hidroklorik Asit
HF	: Hirdojen Florür
Hg	: Cıva
MgO	: Magnezyum Oksit
Mn	: Manganez
MnS	: Manganez Sülfür
N	: Azot
NaF	: Sodyum Florür
NH ₃	: Amonyak
Ni	: Nikel
N _k	: Etki Kategorisi k için normalleştirilmiş gösterge
NK _A	: Asidifikasyon etki kategorisinin normalizasyon katsayısı
NK _{AK}	: Arazi Kullanımı etki kategorisinin normalizasyon katsayısı
NK _{DO}	: Deniz Ötrofikasyonu etki kategorisinin normalizasyon katsayısı
NK _{FKT}	: Fosil Kaynak Tükenmesi etki kategorisinin normalizasyon katsayısı
NK _{FSO}	: Fotokimyasal Sis Oluşumu etki kategorisinin normalizasyon katsayısı
NK _{IPMO}	: İnce Partikül Madde Oluşumu etki kategorisinin normalizasyon katsayısını
NK _{KI}	: Küresel Isınma etki kategorisinin normalizasyon katsayısı
NK _{MKT}	: Mineral Kaynak Tükenmesi etki kategorisinin normalizasyon katsayısı
NK _{OTI}	: Ozon Tabakasında İncelme etki kategorisinin normalizasyon katsayısı
NK _{ST}	: Su Tüketimi etki kategorisinin normalizasyon katsayısı
NK _{TO}	: Tatlı Su Ötrofikasyonu etki kategorisinin normalizasyon katsayısı
P	: Fosfor
Pb	: Kurşun
p _i	: i kriterinin toplam ağırlık puanı
R _k	: Etki Kategorisi k için referans değer veya normalizasyon katsayısı
Sb	: Antimon
Se	: Selenyum
S _k	: Etki Kategorisi k için karakterizasyon aşamasından gelen gösterge

SKKY _{azot}	: Su Kirliliği ve Kontrolü Yönetmeliğinde yer alan azot sınır değeri
SKKY _{fosfor}	: Su Kirliliği ve Kontrolü Yönetmeliğinde yer alan fosfor sınır değeri
Sn	: Kalay
SO ₂	: Kükürt dioksit
Tüketim _{fosil, 2019}	: Türkiye’de tüketilen fosil yakıtların toplam kg eşdeğer petrol cinsinden miktarı
Üretim _{mineral, 2019}	: 2019 yılı Türkiye’de üretilen maden kaynaklarının toplam miktarı
Te	: Tellür
V	: Vanadyum
AB	: Avrupa Birliği
APOS	: İkame Noktasında Tahsis (Allocation at the Point of Substitution)
AYM	: Avrupa Yeşil Mutabakatı
BOF	: Bazik Oksijen Fırını
BTEX	: Benzen, Toluen, Ksilen
CFC	: Kloroflorokarbon
CFC11	: Trikloroflorometan
ÇE	: Genel Çevresel Etki Göstergesi
ÇŞB	: Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
DALY	: Sakatlığa Ayarlanmış Yaşam Yılları (Disability-adjusted life year)
DCB	: Diklorobenzen
DRI	: Sünger Demir
EAO	: Elektrik Ark Ocağı
EKÖK	: Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrolü
EPA	: Avrupa Çevre Ajansı
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
eşd.	: Eşdeğer
eq.	: Eşdeğer
g	: Gram
GWP	: Global Warming Potential (Küresel Isınma Potansiyeli)
HCFC	: Hidrokloroflorokarbon
IF	: İndüksiyon Ocağı

ISO	: Uluslararası Standartlar Teşkilâtı
K	: Kriter
kBq	: Kilobekerele
KFG	: Kok Fırın Gazı
kg	: Kilogram
KoA	: Koruma Alanları
kWh	: Kilowatt saat
L	: Litre
LCA	: Life Cycle Assesment (Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi)
KIP	: Küresel Isınma Potansiyeli (Global Warming Potential)
m	: metre
m ² a	: Metrekare.yıl
Mcal	: Megakalori
mg	: Miligram
MJ	: Megajul
mm	: Milimetre
MTA	: Maden Tetkik Arama Kurumu
NO _x	: Azot Oksitler
O	: Orta nokta modeli uygulanabilir.
PAH	: Poliaromatik Hidrokarbonlar
PCB	: Poliklorlu Bifeniller
PCDD/F	: Poliklorlanmış dibenzo-p-dioksin ve dibenzofuran
PM	: Partikül madde
S	: Son nokta modeli uygulanabilir.
SKKY	: Su Kirliliği ve Kontrolü Yönetmeliği
SO _x	: Kükürt Oksitler
species.yr	: Tür.yıl
STK	: Sivil Toplum Kuruluşu
TOK	: Toplam Organik Karbon
TR	: Türkiye
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
u	: Uygulanabilir
U	: Birim Proses

UNEP	: Birleşmiş Milletler Çevre Programı
UOB	: Uçucu Organik Bileşikler
USD2013	: 2013 ABD Doları
UV	: Morötesi
UVB	: Morötesi B
YDD	: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi
YDE	: Yaşam Döngüsü Envanteri
YDED	: Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi
YDY	: Yaşam Döngüsü Yaklaşımı
YDED YANKI	: Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi Yerel Ağırlıklandırma ve Normalizasyon Katsayıları
YF	: Yüksek Fırın
YFG	: Yüksek Fırın Gazı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil No</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: Türkiye’de yapılan YDD çalışmalarının sektörel olarak dağılımı.	4
2.1: Yaşam döngüsü aşamaları.	9
2.2: Yaşam döngüsü değerlendirmesinin evreleri.	11
2.3: OpenLCA yazılımında bir veri setinin girdi-çıkış sayfasının görüntüsü.	23
3.1: Türkiye’nin yıllara göre ham çelik üretimi ve tüketimi.	26
3.2: 2019 yılı dünya ham çelik üretim a) ve tüketiminin b) ülkelere göre dağılımı.	27
3.3: Ülkelerin, 2019 yılı dünya çelik ihracatı a) ve ithalatındaki b) payları.	27
3.4: Türkiye’nin yıllara göre çelik ihracat ve ithalat miktarı.	28
3.5: Entegre demir-çelik üretim tesisi akım şeması.	29
3.6: Elektrik ark ocaklı tesislere ait üretim akım şeması.	31
3.7: İndüksiyon ocaklı tesislere ait üretim akım şeması.	31
4.1: YDED YANKI modeli adımları.	45
4.2: Abiyotik Kayak Tükenmesi Etki Kategorisi için örnek anket formu.	57
4.3: Değişime direnç yöntemi için oluşturulan anket formu.	60
4.4: Kriter ağırlıklı hesaplama matrisi örneği.	62
4.5: İndüksiyon ocaklı bir çelik üretim tesisinin akış şeması.	75
4.6: Elektrik ark ocaklı çelik üretim tesisinin akış şeması.	75
4.7: Enerji kaynaklarının, 2019 yılı Türkiye enerji üretimi içinde dağılımı.	82
4.8: Enerji kaynaklarının, 2019 yılı Dünya ve Avrupa enerji üretimi içinde dağılımları.	82
5.1: İndüksiyon Ocağı ve Elektrik Ark Ocağı ile üretilen 1 kg ham çeliğin son nokta etki sonuçlarının karşılaştırması.	93
5.2: Farklı çelik üretim teknolojilerinin ince partikül madde oluşum sonuçları.	95
5.3: Farklı çelik üretim teknolojilerinin tatlı su ötrofikasyon sonuçları.	95
5.4: Farklı çelik üretim teknolojilerinin İnsan zehirlenmesi (kanserojen olmayan) sonuçları.	96
5.5: Farklı çelik üretim teknolojilerinin karasal asidifikasyon sonuçları.	96

5.6:	Farklı elik üretim teknolojilerinin küresel ısınma, insan sağlığı sonuçları.	97
5.7:	Farklı elik üretim teknolojilerinin su tüketimi, insan sağlığı sonuçları.	98
5.8:	Farklı elik üretim teknolojilerinin tek puan sonuçları.	100



TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: ReCiPe etki yöntemi için etki kategorilerinin orta ve son nokta karakterizasyon katsayılarının referans birimleri.	16
2.2: YDED çalışmasında zorunlu ve isteğe bağlı çeşitli unsurlar.	17
2.3: Yedi kriter için değerlendirme seviyeleri.	20
2.4: Kriter ağırlığının belirlenmesi için kullanılan değişime direnç iki kutuplu yapısı.	21
3.1: İndüksiyon ocaklarının avantaj ve dezavantajları.	32
3.2: Çelik üretim proseslerinde ortalama su tüketim miktarları.	34
3.3: Çelik üretim proseslerinde ortalama enerji tüketim miktarları.	35
3.4: Ham çelik üretiminde kullanılan temel ham maddelerin üretim süreçlerinde ortalama kullanım miktarları (ton/ton ham çelik).	36
3.5: Çelik üretim proseslerinde ortalama atıksu oluşum miktarları.	39
3.6: EAO prosesinden kaynaklı hava emisyonlarının torbalı filtre ve elektrostatik filtrelerde arıtılması sonrası mevcut konsantrasyonları.	41
3.7: Proseslere göre çelik üretimi hava emisyonları.	42
4.1: Yaşam döngüsü etki kategorileri ve etki alanları.	46
4.2: Etki yöntemlerinin etki kategorileri bakımından karşılaştırması.	47
4.3: Belirlenen kriterler ve açıklamaları.	54
4.4: Seçilen Dokuz kriter için etki değerlendirme dereceleri ve kesinlik seviyeleri.	56
4.5: Kriter ağırlığının belirlenmesi için değişime direnç referans kutupları.	57
4.6: Etki kategorilerinin alt kırılımları.	63
4.7: Panelistlere ait etki kategorisi ağırlıkları.	65
4.8: Ağırlıklandırma katsayılarına ilişkin istatistiki bilgiler.	66
4.9: ReCiPe 2016 etki yönteminde yer alan orta nokta etki kategorileri ve hesaplanan ulusal normalizasyon katsayıları.	67
4.10: Veri tabanında bulunan ve çalışma kapsamına giren çelik üretim prosesleri ile bunlara karşılık oluşturulan veri setleri ve akışlar.	73

4.11:	Hurda hazırlama işlemi birim proses girdi ve çıktı akışları.	76
4.12:	İndüksiyon ocaklı tesiste çelik üretimi birim proses girdi ve çıktı akışları.	77
4.13:	"Hurda Tesisi İnsaatı" ve "İndüksiyon Ocağı Tesisi İnşaati" birim prosesleri girdi ve çıktı akışları.	80
4.14:	Ekipmanın senaryolara göre tahmini ağırlıkları.	81
4.15:	Teknoloji senaryoları.	83
4.16:	Oluşturulan gruplar ve bunlara atfedilen akışlar.	84
4.17:	Uygulanan normalizasyon ve ağırlıklandırma katsayıları.	85
4.18:	Normalizasyon ve ağırlıklandırma setleri.	87
5.1:	Orta nokta etki sonuçları.	88
5.2:	Senaryoların elektrik kullanımı, su tüketimi ve KIP değerleri literatür çalışmaları ile karşılaştırması.	89
5.3:	Orta nokta etki kategorilerinin Monte Carlo Analizi Sonuçları (5000 kez).	91
5.4:	Son nokta etki kategorilerinin Monte Carlo Analizi Sonuçları (5000 kez).	94
5.5:	Çalışılan senaryolar için tek skor sonuçları.	98
5.6:	YDED çalışmalarının ham etki sonuçları ile normalizasyon ve ağırlıklandırma setlerine göre hesaplanmış sonuçları.	101
5.7:	Model sonucu orta nokta etki kategorilerinin Monte Carlo Analizi Sonuçları (5000 kez).	105
5.8:	YDED TR Modeli ile YANKI Modeli Katsayılarının Karşılaştırması.	106

1. GİRİŞ

Küreselleşme, ekonomik büyüme ve artan dünya nüfusu, doğal kaynaklar üzerindeki baskıyı ve rekabeti; üretim süreçlerinin neden olduğu etkiler ve ürünün kullanılma süresi sonrası atık haline gelmesi doğa üzerindeki olumsuz etkiyi sürekli artırmaktadır. Özellikle üretim sürecinde yayılan sera gazları iklim değişikliğine neden olarak ilişkili birçok alanda olumsuz etkilerini göstermektedir. İklim değişikliği ile mücadele etmek amacıyla 16 Şubat 2005 tarihinde yürürlüğe giren, 191 ülke ve Avrupa Birliği'nin (AB) taraf olduğu Kyoto Protokolüyle ve sonrasında 4 Kasım 2016 itibarıyla yürürlüğe giren ve 175 ülke tarafından imzalanan Paris Antlaşmasıyla birlikte uygulanan önlemlere rağmen atmosferdeki sera gazı miktarı artmaya devam etmektedir. Buna bağlı olarak atmosfer sıcaklığı, buzulların erime hızı ve orman yangınları artmakta, meteorolojik olaylar değişmekte ve şiddetini artırmaktadır. İklim değişikliği nedeniyle karasal ve su ekosistemlerinde meydana gelen değişiklikler birçok canlıyı nesillerinin tükenmesi tehlikesiyle karşı karşıya getirmektedir. Avrupa Komisyonu, 11 Aralık 2019 tarihinde bu zorluklara bir cevap niteliğinde olan Avrupa Yeşil Mutabakatı (AYM) Bildirimini yayınlamıştır. Bu Mutabakat, 2050 yılına kadar AB'yi, net sera gazı emisyonlarının olmadığı ve verimli kaynak kullanımına ve rekabetçi bir ekonomiye sahip bir topluma dönüştürmeyi; bunu yaparken de en çok etkilenecek olan tarafları destekleyerek adil bir geçişin gerçekleşmesini amaçlayan yeni bir büyüme stratejisidir [1]-[4].

Bildirimde, Avrupa Yeşil Mutabakatını sağlayabilmek için ekonomi, endüstri, üretim ve tüketim, gıda ve tarım, ulaştırma, büyük ölçekli altyapı, inşaat, vergilendirme ve sosyal faydalar genelinde temiz enerji arzı için politikaların yeniden düşünülmesine ihtiyaç olduğu belirtilmiştir. Bir takım ana değer zincirininin tedarikçisi oldukları için çelik, çimento ve kimyasallar gibi enerjiyi yoğun olarak kullanan endüstrilerin, Avrupa ekonomisi için vazgeçilmez olduğu bilinmektedir. Bu nedenle AYM'de bu sektörlerin dekarbonizasyonu ve modernizasyonu esastır [3].

İlk olarak 1960'larda başlayan ve bir ürünün veya bir faaliyetin tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkisini değerlendirmek için kullanılan Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) son yıllarda enerji yoğun endüstrilerin iklim ve çevre üzerindeki etkilerini hesaplayabilmek, stratejileri ve düzenlemeleri belirleyebilmek

bakımından yoğun ilgi görmektedir. Genel olarak, YDD kullanmanın temel amacı, karar verme sürecini daha sürdürülebilir çözümlere yönlendirerek ürünlerin çevresel etkilerini azaltmaktır. "Yaşam döngüsü" terimi, kullanım, bakım ve nihai bertaraf dahil olmak üzere hammadde çıkarma ve üretim ile başlayan ve ürünün ömrü boyunca devam eden ana faaliyetleri ifade eder. Bu nedenle, Yaşam Döngüsü Analizi çalışmalarının amacı, tüm yaşam döngüsü aşamalarında daha düşük çevresel etkiler ve daha az kaynak kullanımı perspektifinden ürün veya proseslerin potansiyel iyileştirme fırsatlarını belirlemektir. YDD sonucunda elde edilen bilgiler, bir ürün veya proses seçmek için maliyet ve performans verileri gibi diğer faktörlerle birlikte kullanılabilir. Çeşitli çözümler karşılaştırılmak istendiğinde normalizasyon ve ağırlıklandırma önem kazanmaktadır. Normalizasyon farklı çevresel etki kategorileri karşılaştırmak için bir temel sağlamakta, ağırlıklandırma ise farklı etki kategorilerine atfedilen önemi veya alaka düzeyini belirlemektedir [5], [6].

Her bir etki kategorisinin ağırlıklandırma katsayıları, etki kategorilerinin çevre için göreceli önemini temsil etmektedir. Bu katsayılar öznel ve sosyoekonomik kriterlere ve coğrafi bölgeye göre değişebilmektedir. Ulusal ölçekte gerçekleştirilen tüm aktivitelerin (ürün ve hizmetlerin) çevresel etkilerinin bütüncül ve somut olarak ölçülüp değerlendirilebilmesi amacıyla ulusal koşulları yansıtan yerel etki modellerinin geliştirilmesine gereksinim duyulmaktadır.

Türkiye’de faaliyet gösteren ve çevresel etki bakımından incelenmesi gereken en önemli sektörlerden biri Demir-Çelik sektörüdür. Sektörde demir cevherinin çıkarılması aşamasından, demir ve çelik üretimi sırasında oluşan cürufun bertarafına, üretilen ham çeliğin işlenmesinden geri dönüşümüne kadar birçok süreçte, yoğun ham madde ve enerji kullanımı nedeniyle önemli çevresel etkiler oluşmaktadır. Bu etkiler YDD kapsamında fosil yakıtların tükenmesi, iklim değişikliği, ozon tabakası incilmesi potansiyeli, solunabilir inorganikler, asidifikasyon, ötrofikasyon, ekolojik zehirlilik ve insan zehirlenmesi kategorileri altında yer almaktadır [7], [8].

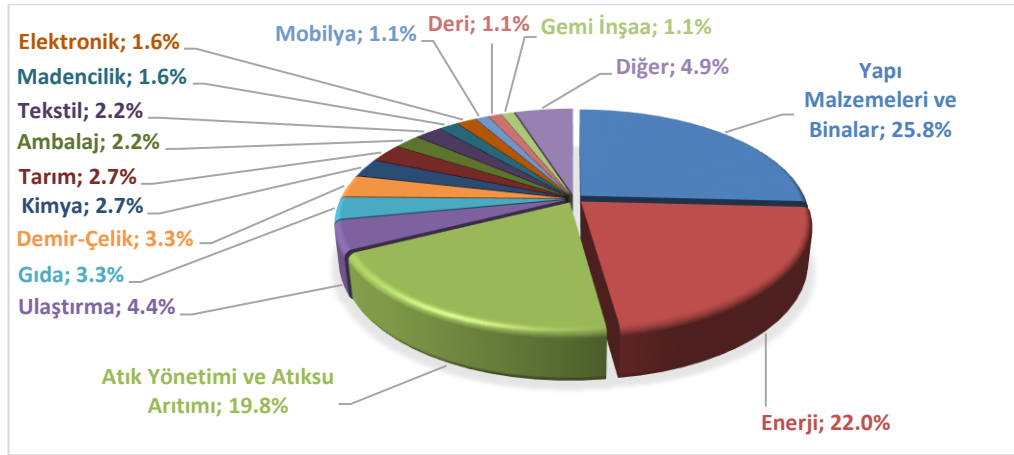
Türkiye’de demir çelik sektörü 1925 yılında faaliyete geçmiştir. Bugün toplam 37 çelik üretim tesisi (3 entegre, 26 elektrik ark ocağı ve 8 indüksiyon ocağı) Türkiye’de faaliyet göstermektedir. Dünya çapında çelik üretimi 2020 yılında, bir önceki yıla kıyasla %0,9 düşüşle 1,86 milyar tona gerilemiştir. Türkiye çelik üretimi ise aynı yıl %6,1 oranında artarak 35,8 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. 2020 yılında Türkiye,

Almanya'yı geride bırakarak Avrupa'nın en büyük ve dünyanın 7. büyük üreticisi konumuna yükselmiştir [9].

1.1. Konu ile İlgili Çalışmalar

Elektrik Ark Ocağı (EAO) ve Yüksek Fırın Bazık Oksijen Fırını (YF-BOF) (entegre çelik üretim tesisi) teknolojileri ile ilgili YDD çalışmalarına literatürde sıklıkla rastlanmaktadır. Sonuçlar, EAO üretiminin çevresel etkilerinin, özellikle İnsan Zehirlenmesi Potansiyeli, Küresel Isınma Potansiyeli, Abiyotik Tükenme Potansiyeli, Kümülatif Enerji Talebi ve Ötrofikasyon Potansiyelinde YF-BOF teknolojisine kıyasla daha az olduğunu göstermiştir [10]-[12]. Örneğin, YF-BOF ile çelik üretiminin EAO ile çelik üretiminden 2,8 kat daha fazla enerji gerektirdiği ve 2,6 kat daha fazla CO₂ emisyonu yaydığı görülmektedir [10]. İndüksiyon ocaklı (IF) tesisler için ise, literatürde çok az çalışma vardır. Bedarkar ve Dalal (2020), bir IF tesisinin enerji dengesini incelemiş ve IF ile çelik üretiminin özgül enerji tüketiminin EAO tesisinden daha az olduğunu bulmuştur [11]. Özdemir, vd. (2018), diğer yandan, YDD kullanarak, bir IF tesisinin 1 ton çelik inşaat demiri üretiminin beşikten kapiya çevresel etkilerini araştırmıştır. Etki değerlendirmesi CML-IA yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Analiz sonuçları, çelik inşaat demiri ve ham çelik üretimlerinin küresel ısınma potansiyeline katkılarının sırasıyla 720 ve 670 kg CO₂ eşd./ton çelik olduğunu göstermiştir. Ayrıca çalışmada ham çelik üretiminin oluşturduğu çoğu çevresel etkinin elektrik tüketimi kaynaklı olduğu belirtilmiştir [12].

Türkiye özelinde YDD konusunda yapılmış çalışmaları değerlendirebilmek amacıyla, 2017 yılında "LCA in Turkey" anahtar kelimeleri ile hem Google Akademik arama motoru üzerinden makale hem de YÖK'ün Ulusal Tez Merkezi üzerinden tezler arasında tarama yapılmış ve toplamda 160 adet çalışmanın (90 adet makale ile 70 adet tez çalışması) Türkiye'deki sektör verileri kullanılarak gerçekleştirildiği gözlenmiştir. Bu çalışmalar incelenerek sektörel olarak sınıflandırılmıştır. Bir yayın içerisinde birden çok sektör için çalışma yapılmışsa, söz konusu yayın, çalışılan her sektöre eklenmiştir. Çalışma sonuçları Şekil 1.1'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1: Türkiye’de yapılan YDD çalışmalarının sektörel olarak dağılımı.

Çalışmada sonuçları incelendiğinde, ülkemizde YDD çalışmalarının %25,8 oranla ağırlıklı olarak yapı malzemeleri ve binalar konusunda gerçekleştirildiği gözlenmektedir. Bunu %22 ile Enerji ve %15,4 ile Katı Atık/Atık Yönetimi takip etmektedir. Demir-çelik konusunda yapılmış olan çalışmalar ise %3.3’lük bir bölümü kapsamaktadır. Çalışmada %1’in altında kalan sektörler “Diğer” adı altında gösterilmiştir.

Türkiye’de YDD konusunda günümüze dek yürütülen 70’in üzerinde tez çalışmasının üç tanesi demir-çelik sektöründe yaşam döngüsü değerlendirmesi ile ilgilidir. 2011 yılında G. Ölmez tarafından sunulan doktora tezinde, SimaPro yazılımı ve IMPACT 2002+ değerlendirme metodu kullanılarak yaşam döngüsü aşamalarının (kok yapımı, sinterleme, demir üretimi, çelik üretimi) ve nihai ürünlerin (kütük, slab, sıcak haddelenmiş kangal, sıcak haddelenmiş bobin) etkilerini karşılaştırmak amacıyla, bir Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ortaya konulmuştur [7]. 2014 yılında H. Aksel tarafından sunulan yüksek lisans tez çalışması kapsamında yapısal çeliğin, yaşam döngüsü içerisinde, yeniden kullanım ve geri dönüşüm olanakları incelenmiş ve literatürdeki verilere dayalı bir çevresel karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca GaBi yazılımı kullanılarak elde edilen sonuçlara göre yapısal çeliğin ham maddeden doğrudan üretimi ile geri dönüşüm ile üretimi, çelik bileşen örneği üzerinden çevresel açıdan karşılaştırılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, cevherden çelik üretiminde kullanılan BOF’da çelik üretimi, ozon tabakası incelmeye potansiyeli açısından EAO’da geri dönüşüm (hurda metal) ile üretime göre çevresel açıdan üstünlük sağlamaktadır. Fakat küresel ısınma, asidifikasyon, ötrofikasyon ve insan zehirlenmesi etki

kategorileri için tam tersi bir durumun geçerli olduğu görülmüştür [8]. Bunların yanında demir döküm endüstrisine yönelik yaşam döngüsü değerlendirmesini konu alan bir yüksek lisans tezi 2013 yılında Ç. Yiğit tarafından gerçekleştirilmiştir [13].

Yaşam döngüsü çevresel etki değerlendirmesine yönelik çeşitli çalışmalar yapılmış olsa da ağırlıklandırma ve normalizasyon katsayılarının ülke koşullarına göre belirlendiği sadece bir çalışmaya ulaşılabilmektedir. S. Karaman Öztaş tarafından 2014 yılında doktora tezi olarak sunulan bu çalışmada Türk yapı malzemesi sektörü için yaşam döngüsü etki değerlendirilmesine yönelik bir model önerilmiştir. Çalışmada yapı malzemesi sektörü ile ilişkili 11 çevresel etki kategorisi ve panel yöntemi (Analitik Hiyerarşi Prosesi) kullanılarak bu etki kategorileri için ağırlıklandırma katsayıları belirlenmiştir. Ayrıca normalizasyon referans değeri tanımlanmış, etki değerlendirme evresi için toplam çevresel performansın hesaplandığı bir bağlantı önerilmiştir [14].

1.2. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Bu çalışmanın amacı, demir-çelik ürünlerinin yaşam döngüleri boyunca sebep olduğu çevresel etkilerin, yerel faktörlerin göz önünde bulundurularak değerlendirildiği bir yaşam döngüsü etki değerlendirmesi modelinin oluşturulmasıdır. Oluşturulan model ile Türkiye koşullarında üretilen ürünlerinin yerel çevresel etkilerinin hesaplanabilmesi hedeflenmektedir.

Çalışmada aynı zamanda;

- Demir-çelik sektörü için ağırlıklandırma farkından en çok hangi kategorinin etkilendiğini ortaya koymak amacıyla gerekli temeli oluşturarak ülkemizdeki ve dünyadaki YDD çalışmalarına bir yol göstermek,
- Yerel ağırlıklandırma ve normalizasyon katsayılarının belirlenmesi,
- EAO ve IF çelik üretim teknolojilerinin YDD yaklaşımını ile karşılaştırılmalı olarak incelemek,
- Etki sonuçlarının yerel katsayılardan ne derecede etkilendiğinin ortaya koymak ve
- Ağırlıklandırma ve normalizasyon katsayılarının sektörel ve zamansal farklılıklarla nasıl değiştiğinin belirlemek amaçlanmaktadır.

Ülkemizde ve dünyada demir-çelik sektörünün yaşam döngüsü değerlendirmesine yönelik birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Fakat bu çalışmalarda oluşan etkilerin değerlendirmesi sırasında, kullanılan etki değerlendirme yöntemlerinin oluşturuldukları bölge özelinde veya küresel ölçekte belirlenen ağırlıklandırma ve normalizasyon katsayıları kullanılmıştır. Yerel faktörler yaşam döngüsü etki değerlendirmesi sonuçlarını etkilemektedir. 2014 yılında Türk yapı malzemesi sektörü için yaşam döngüsü etki değerlendirilmesine yönelik bir model oluşturulmuşsa da değişen ekolojik ve demografik koşullar ve güncellenen etki yöntemleri nedeniyle modelin güncellenme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu amaçla, bu çalışmada farklı olarak “Hedefe uzaklık” ve “Panel yaklaşımı” çok kriterli karar verme yöntemleri ile değişime direnç kriter ağırlıklandırma yöntemi birlikte kullanılarak model yapısı tekrar oluşturulmuş ve demir-çelik sektörüne yönelik olarak sınanmıştır. Aynı zamanda farklı altı etki kategorisi çalışmaya dahil edilmiştir. Demir-çelik sektörüne yönelik bu kapsamda bir çalışma daha önce gerçekleştirilmemiştir.

Geliştirilen bu model ile güncellenen ulusal normalizasyon ve ağırlıklandırma katsayıları sayesinde ülkemizde faaliyet gösteren sektörlerin YDD çalışmalarında sonuçları yerel etkilere bağlı olarak görebilmeleri mümkün olacaktır. Bu çalışmanın, ülkemiz için oluşturulmakta olan Ulusal YDD veri tabanına ve 19 Ekim 2018 tarihine yürürlüğe giren Çevre Etiketli Sistemine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Literatürde IF ile ilgili birkaç çalışma olmasına rağmen [11], [12], YDD kullanılarak EAO ve IF üretim süreçlerinin karşılaştırılması ile ulusal normalizasyon ve ağırlıklandırma katsayıları üzerine herhangi bir yayına rastlanmamıştır. Bu çalışma ile, yaşam döngüsü yaklaşımını kullanarak EAO ve IF'de ham çelik üretiminin çevresel etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. IF teknolojisindeki en önemli etkileri kullanılan elektriğin kaynağı (enerji taşıyıcı) belirlediğinden, farklı elektrik kaynağı kullanımına dayalı senaryolar geliştirilmiştir. IF için gerekli envanter verisi, kullanılan veri tabanında IF için mevcut bir envanter veri seti bulunmadığı için, Türkiye'deki yerel bir IF çelik üretim tesisi tarafından sağlanmıştır. Bu şekilde çalışmada, daha sonraki YDD çalışmaları için bir IF tesisine ait Yaşam Döngüsü Envanteri (YDE) veri setleri geliştirilmiştir. Ayrıca, zaman içinde IF ile üretim yapan fabrika sayısı arttıkça, bu çalışma yeni girişimcilere EAO'ya kıyasla IF hakkında bilimsel bilgi sağlayacaktır.

Çalışma, Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında çevresel etkisi düşük teknolojilere yapılacak yatırımlar için referans niteliğindedir.

Çalışmanın ilk aşamasında tez çalışmasının temelini oluşturacak literatür tarama ve veri temini çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Demir-Çelik sektörü prosesleri tanımlanmış ve kısaca açıklanmıştır. Gerekli veri, İndüksiyon Ocağı ile çelik üretimi yapan bir tesisten sağlanmış ve bu tesis, YDD çalışmasının yürütüleceği pilot tesis olarak belirlenmiştir. Detaylı bir YDD çalışması için eksik olduğu tespit edilen fakat temin edilemeyen bazı veriler kabul yoluyla tamamlanmıştır.

Çelik üretimi tesislerindeki kaynak kullanımı ve oluşan çevresel etkiler incelenmiş ve ilgili olabilecek on iki adet etki kategorisi belirlenmiştir. Belirlenen etki kategorilerini en fazla kapsayan Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi (YDED) yöntemi çalışma kapsamında kullanılacak etki yöntemi olarak seçilmiştir.

Çevresel etki değerlendirme ve ağırlıklandırma katsayılarının belirlenmesinde kullanılan karar verme yöntemleri incelenerek, çalışmada temel alınacak yöntem belirlenmiştir. Üniversite, kamu ve özel sektörden uzmanlara, Sivil Toplum Kuruluşları (STK) ve sektör birliklerine gönderilmek üzere modelde kullanılacak katsayıların belirlenmesine yönelik anketler hazırlanmıştır. Bu amaçla 9 adet kriter belirlenmiş ve puanlama cetveli oluşturulmuştur. Kriterlerin ağırlıklandırılması için ankete ikinci bir bölüm eklenmiştir. Hem kriterlerin hem de etki kategorilerinin ağırlıklandırması için hesaplama yöntemleri tanımlanmıştır.

Bu aşamadan sonra, panelistlerden dönen anket sonuçlarına göre ağırlıklandırma katsayıları hesaplanmıştır. Ayrıca ulusal istatistikler, raporlar ve uluslararası kuruluşlara sağlanan veriler incelenerek gerekli veriler temin edilmiş ve normalizasyon katsayıları hesaplanmıştır.

YDD çalışması için proses bazlı yaklaşım esas alınmıştır. OpenLCA programında, ecoinvent 3.6 veri tabanı kullanılarak, tesiste bulunan her proses için ayrı birim proses veri setleri oluşturulmuştur. Sistem sınırları beşikten kapıya, fonksiyonel birim 1 kg ham çelik olarak belirlenmiştir. Kullanılan veri tabanı içinde yer alan ark ocaklı tesiste üretilen 1 kg ham çelik ile çalışma kapsamında oluşturulan indüksiyon ocaklı tesiste üretilen 1 kg ham çelik arasında yaşam döngüsü yaklaşımı kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında ÷lkemize özgü ağırlıklandırma ve normalizasyon katsayılarının belirlenmesine yönelik bir model oluşturulmuş ve demir-çelik sektörü özelinde sınanmıştır. Çalışma kapsamında oluşturulan veri setlerinin etki sonuçları Türkiye'ye özgü normalizasyon ve ağırlıklandırma katsayıları ile normalize edilmiş ve ağırlıklandırılmıştır. Elde edilen etki sonuçları, Avrupa'ya özgü katsayılar kullanılarak belirlenen etki sonuçları ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda yerel katsayıların kullanılması ve kullanılmaması arasındaki farkın ne boyutta olacağı ortaya konulmuştur.

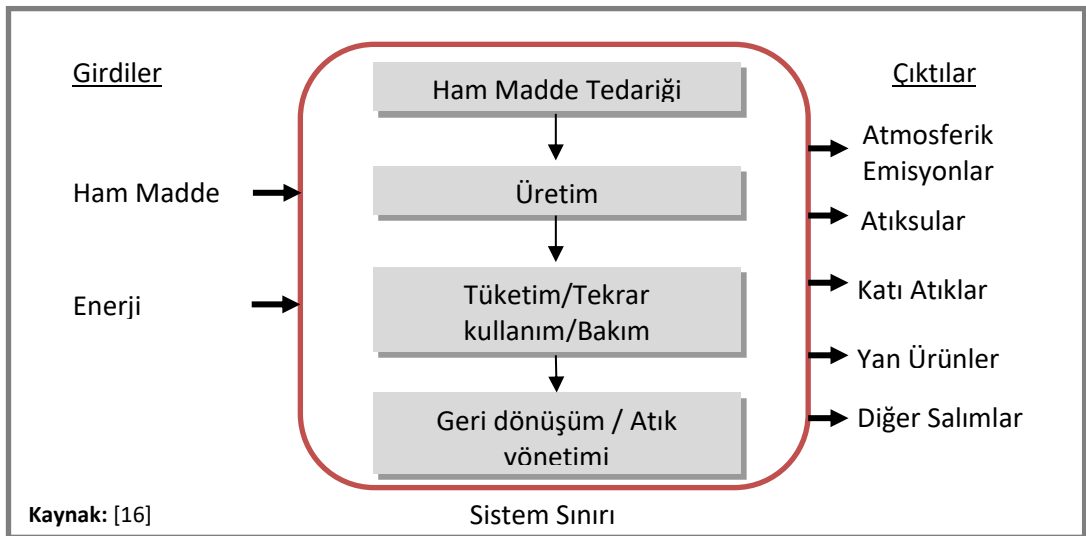


2. KURAMSAL BİLGİLER

Tez çalışmasında kullanılan yaklaşımlar, terimler ve yöntemlerin teorik bilgilerine bu bölüm altında yer verilmiştir. Öncelikle yaşam döngüsü yaklaşımı ve YDED tarif edilmiş, YDD ile kullanılan etki kategorisi, orta ve son nokta etkileri gibi terimler açıklanmıştır. Bunların yanı sıra dünya genelinde kullanılan YDD veri tabanları ve yazılımları ile ilgili bilgi verilmiştir.

2.1. Yaşam Döngüsü Yaklaşımı

Günümüzde, yaşam kalitesini arttırmak, hayatı kolaylaştırmak, hatta yaşamsal faaliyetleri sürdürebilmek gibi çeşitli amaçlarla birçok ürün üretilmekte ve/veya hizmet verilmektedir. Bu ürün ve hizmetlerin her biri için üretim amacıyla gereken ham maddenin çıkarılmasından, ürünün kullanıldıktan sonra bertaraf edilmesine kadar birbirini takip eden bir dizi sürecin gerçekleşmesi gerekmektedir. Beşikten mezara kadar bir ürün veya hizmetin yaşam döngüsü boyunca gerçekleşen bu tüm aşamalarında insan sağlığı ve çevre üzerinde olumsuz etki yaratan bir takım faaliyetlerin de gerçekleşmesi söz konusudur. "Yaşam döngüsü" terimi, hammadde çıkarma ve üretimi ile başlayan ve kullanım, bakım ve nihai bertaraf dahil olmak üzere ürün yaşam döngüsü boyunca devam eden temel faaliyetleri ifade eder [5], [6]. Şekil 2.1'de yaşam döngüsünün aşamaları şematik olarak gösterilmektedir.



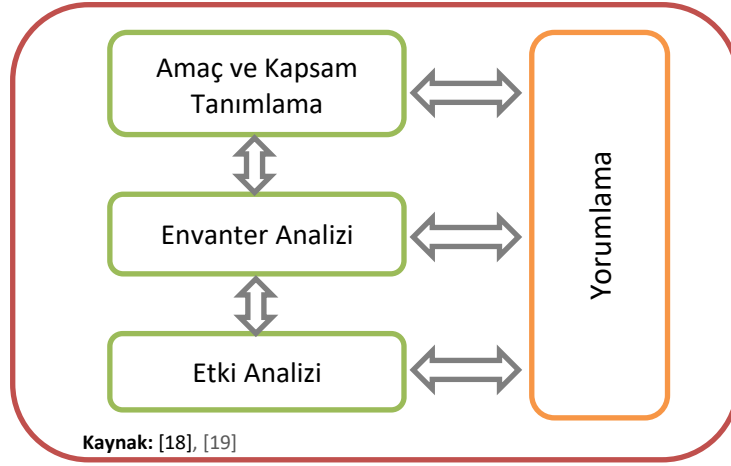
Şekil 2.1: Yaşam döngüsü aşamaları.

YDD, ürün ya da hizmetlerin yaşam döngüsü boyunca oluşan emisyon, kaynak tüketimi miktarlarını ve çevresel ve sağlık etkilerini belirleyen ve bu etkilerin değerlendirilmesi ve raporlanabilmesi için kullanılan, uluslararası olarak yapılandırılmış ve standartlaştırılmış bir yöntem ve yönetim aracıdır [15], [16]. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinin amacı, çevresel yüklerin yer değiştirmesini önlerken tüm yaşam döngüsü dönemlerinde daha düşük çevresel etkiler ve daha az kaynak kullanımı bakış açısıyla, ürünler veya prosesler için potansiyel iyileştirme fırsatlarını belirlemektir [5], [6].

Çevre ile ilgili farkındalık arttıkça, işletmelerin sosyal prestijlerini korumak ve rekabet edebilirliklerini sağlamak amacıyla “daha yeşil” prosesler kullanarak “daha yeşil” ürünler üretmeye olan eğilimleri artmıştır [5]. Yaşam Döngüsü Yaklaşımı (YDY) ve buna bağlı olarak YDD, özel sektörde çevresel iyileştirme, stratejik karar destek ve kuruluş dışı iletişim için temel olarak kullanılmaktadır. YDD sonuçları, bir ürün veya proses seçmek için maliyet ve performans verileri gibi diğer faktörlerle birlikte kullanılabilir. Küresel ölçekte ise çevre politikalarının geliştirilmesinde, uygulanmasında ve izlenmesinde gittikçe daha yüksek oranda kullanılmaktadır [5], [15], [16].

YDD bir ürünün tüm yaşam aşamalarını birbirinden bağımsız olarak değerlendirmektedir. Bu yaklaşıma göre bir işlem (operasyon) bir sonrakine öncülük eder. YDD ile genellikle hesaba katılmayan ham madde çıkarılması, malzemelerin nakliyesi gibi işlemlerin etkilerini de içeren tüm aşamalar için kümülatif çevresel sonuçların belirlenmesi mümkündür. YDD ve YDY, “yüklerin yer değiştirmesi” olarak tabir edilen, çevresel bir problemin çözülmesi sırasında başka birinin yaratılması durumunu engellemektedir [5], [15], [16].

ISO 14040 ve 14044’te tanımlanan Yaşam döngüsü değerlendirmesinin evreleri Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Yaşam döngüsü değerlendirmesinin evreleri.

- Amaç ve kapsamın belirlenmesi. Ürün, proses veya faaliyet belirlenmekte ve tanımlanmaktadır. Değerlendirmenin yapılacağı kapsam oluşturulmakta ve sınırlar gözden geçirilerek çevresel etkiler belirlenmektedir.
- Envanter Analizi: Enerji, su ve malzeme kullanımları ve çevresel salımlar (Örn. Hava emisyonları, katı atık bertarafı, atık su deşarjları) tanımlanmaktadır ve miktarları belirlenmektedir.
- Etki Analizi: Envanter analizinde belirlenen enerji, su ve malzeme kullanımlarının ve çevresel salımların insan ve ekoloji üzerine potansiyel etkileri değerlendirilmektedir.
- Yorumlama: Envanter analizi ve etki değerlendirmesi sonuçları, tercih edilen ürün, proses veya hizmeti seçmek amacıyla değerlendirilmektedir. Bu değerlendirmede belirsizlik ve sonuçların oluşturulmasında kullanılan kabuller açıkça belirtilmektedir.

YDD çalışmasında çevresel etki değişimlerinin izlenmesi ve dokümente edilmesi karar vericilere destek olmaktadır. YDD çalışması yaparak, değerlendiriciler [5].

- Belirlenen bir ürün ile ilgili çevresel sonuçların sistematik değerlendirmesini geliştirebilir.

- Planlanan bir eylem için paydaşların (devlet, topluluk vb.) kabul edilmesine yardımcı olmak üzere bir veya daha fazla spesifik ürün/proses ile ilişkili çevresel alış-verişleri analiz edebilir.
- Her bir yaşam döngüsü aşaması ve/veya katkıda bulunan ana prosese göre hava, su ve toprağa yapılan çevresel salımların miktarını belirleyebilir.
- Yaşam döngüsü aşamaları ve çevresel ortam arasındaki çevresel etkilerde gerçekleşen önemli değişimlerin tespit edilmesine yardımcı olabilir.
- Malzeme tüketimi ve çevresel salımların yerel toplum, bölge ve dünya üzerindeki insani ve ekolojik etkilerini değerlendirebilir.
- İki veya daha fazla rakip ürün/proses arasındaki sağlık etkilerini ve ekolojik etkileri karşılaştırabilir veya belirli bir ürün veya prosesin etkilerini belirleyebilir.
- Belirlenen bir veya daha fazla çevresel faaliyet alanı üzerindeki etkileri belirleyebilir.

Yaşam Döngüsü Yaklaşımında sıkça kullanılan terimler aşağıda kısaca açıklanmaktadır [6].

- YDD: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi veya Yaşam Döngüsü Analizi olarak da adlandırılmaktadır.
- YDED yöntemi: Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi Yöntemleri veya etki değerlendirme yöntemleri olarak da adlandırılmaktadır.
- YDE sonuçları: Yaşam Döngüsü Envanteri Sonuçları veya envanter sonuçları olarak da adlandırılmaktadır
- Etki kategorileri (orta nokta kategorileri): Bir maddenin çevreye saldıkları ve bıraktıkları aracılığı ile doğal çevresel boyutlarda oluşan değişikliklere göre modellenen çevresel kategorilerdir.
- Hasar kategorileri (son nokta kategorileri): Bir maddenin çevreye saldıkları ve bıraktıkları aracılığı ile çevresel boyutlarda oluşan hasar etkisine göre modellenen çevresel kategorilerdir. Hasar kategorileri, gerekli çalışmaya bağlı olarak etki kategorileri olarak da adlandırılabilir. Ancak, etki kategorileri ve hasar kategorileri terminolojileri yapılan çalışmada açıkça tanımlanmalıdır.

- Koruma alanları (KoA): Çevrenin, zararlı salımlara ve bırakılanlara karşı korunması gereken alanlarıdır. Bazı yöntemlerde, son nokta hasar kategorileri ile aynı kabul edilir. Bununla birlikte, son nokta hasar kategorileri ve Koruma Alanları (KoA) arasında bir ayırım yapılabilir, yani KoA, insan sağlığı, doğal çevre, doğal kaynaklar ve insan yapısı çevre gibi sosyal bir değer ve endişeyi temsil eden bir tür uç nokta iken; bir son nokta hasar kategorisi bu sosyal kaygının bir değişkenidir. Öyle ki bunlar KoA'nın ölçülebilir bir temsili olarak kabul edilir.
- Orta nokta modelleme: Belirli bir maddenin çevre üzerindeki etkisini, doğal çevresel boyutlarda oluşan değişikliklere göre modelleme tekniğidir.
- Son nokta modelleme: Belirli bir maddenin çevre üzerindeki etkisini, doğal çevresel boyutlarda oluşan hasar etkisine göre modelleme tekniğidir.
- Karakterizasyon: YDD çalışmasının Etki Değerlendirmesi aşamasında bir adımdır. Ürün sistemi içindeki her bir girdinin ve çıktının göreceli katkısı etki kategorilerine atanır ve çevre üzerindeki ilgili potansiyel etkileri temsil eden göstergelere dönüştürülür. Sınıflandırma aşamasında elde edilen sonuçlar, her etki kategorisindeki her bir maddenin karakterizasyon katsayıları ile çarpılır.
- Normalizasyon (standartlaştırma): Bir YDD çalışmasının Etki Değerlendirme aşamasında karakterizasyon adımından sonra gelen bir adımdır. Her kategori göstergesi sonucunun toplamı bir referans değere bölünür. Böylece, normalizasyon, etki göstergelerinin birbiriyle karşılaştırılmasını sağlayacak şekilde ifade edilir.

YDD çalışması yürütmek zamana ve kaynağa duyarlıdır. YDD kullanıcısının ne kadar derine inmek istediğine bağlı olarak veri toplamada sorun yaşanabilmektedir. Verinin bulunabilirliği sonuçların doğruluğunu büyük ölçüde etkileyebilmektedir [5].

YDD, hangi ürün ya da prosesin daha verimli olduğunu veya daha iyi çalıştığını belirleyemez. Bu nedenle YDD çalışmasında geliştirilen bilgi, maliyet ve performansın göz önünde bulundurulduğu daha kapsamlı bir karar sürecinin bileşenlerinden biri olarak kullanılmalıdır [5].

Daha önce de belirtildiği gibi, YDD potansiyel çevresel alış-veriş tanımlama konusunda yardımcı olabilmektedir. Bununla birlikte etki sonuçlarını tek bir skora

dönüştürme işi, çalışmanın yürütücüsü veya modelleyicisi tarafında uygulanması gereken değer yargılarının kullanılmasını gerektirecektir. Bu uzman panelleri gibi farklı yollarla yapılabilir fakat sadece doğal bilimlere dayanarak yapılamaz [5].

2.2. İhmal Kriteri

"İhmal" (cut-off), ilgili olmayan yaşam döngüsü aşamalarının, faaliyet türlerinin (örn. yatırım malları, depolama, vb.), belirli süreçlerin ve ürünlerin ve sistem modelinden temel akışların ihmal edilmesi anlamına gelmektedir. Genel olarak analiz edilen sisteme atfedilebilen (veya sonuçsal modelleme durumunda sonuçlardan etkilenen) tüm süreçler ve akışlar sistem sınırlarına dahil edilmelidir. Bununla birlikte, tüm bu süreçler ve temel akışlar nicel olarak ilgili değildir: Bu süreç ve akışlar, verileri toplamak için gerekli olacak çaba ve zamanı, ilgili süreçler ve temel akışlar için daha iyi veriler elde etmeye odaklanmak amacıyla tamamen kapsam dışında bırakılabilmektedir [15].

İhmal, eşik yoluyla hariç tutulacağı tahmin edilen çevresel etkilerin yüzdesiyle ilişkili olarak nicelendirilmektedir. Bu eşik değeri "durdurma kriteri" olarak adlandırılmaktadır. Örneğin, "%95 durdurma kriteri", toplam çevresel etkinin (veya seçilen bir etki kategorisinin) yaklaşık %5'inin ihmal edilmesi ile ilgilidir [15].

2.3. Etki Kategorisi, Hasar Kategorisi ve Etki Yöntemi

Etki kategorileri, bir maddenin çevreye saldıkları ve bıraktıkları aracılığı ile doğal çevresel boyutlarda oluşan değişikliklere göre modellenen çevresel kategorilerdir [6]. Modelleme sonucunda elde edilen orta nokta karakterizasyon katsayıları, girdilerin ve çıktıların miktarlarını çevresel etki büyüklüğüne dönüştürmek için kullanılmaktadır. Çeşitli bilimsel yöntemlere göre çeşitli karakterizasyon katsayıları mevcuttur. Karakterizasyon katsayısı, tek bir temel akış için, kategori göstergesinin ortak biriminde ifade edilmesi amacıyla bir karakterizasyon modeli ile hesaplanmış maddeye özgü bir katsayıdır.

Hasar kategorileri ise bir maddenin çevreye saldıkları ve bıraktıkları aracılığı ile çevresel boyutlarda oluşan hasar etkisine göre modellenen çevresel kategorilerdir

[6]. Orta nokta etkilerini son nokta etkilerine dönüştürebilmek amacıyla son nokta karakterizasyon katsayıları kullanılmaktadır. Bu katsayılar da benzer şekilde kullanılan yöntemle göre çeşitlilik göstermektedir.

Etki yöntemleri, etki ve hasar kategorileri için belirlenmiş karakterizasyon faktörlerini bünyesinde barındıran veri setleridir. Farklı yöntemlerle hesaplanmış karakterizasyon katsayılarının bulunduğu birden çok etki yöntemi bulunmaktadır. Bu nedenle YDD çalışmalarının karşılaştırılabilir olmasının koşullarından bir tanesi de çalışmalarda aynı etki yönteminin kullanılmış olmasıdır. Sıklıkla kullanılan YDED yöntemleri aşağıda listelenmiştir [16]:

- CML 2002
- Eco-Indicator 99
- EDIP (1997-2003)
- EPS2000
- Impact 2002+
- LIME
- ReCiPe
- Swiss Ecoscarcity or Ecological scarcity
- TRACI
- MEEuP methodology

2.4. Orta Nokta ve Son Nokta Yaklaşımı

YDED yöntemleri orta noktalara ve son noktalara (hasar) yönelik olabilmektedir. Orta noktalar veya etki kategorileri problem bölgeleridir (örneğin asidifikasyon, ozon tabakasında incelme). Son noktalar ise insan sağlığı veya ekosistem sağlığı gibi etki kategorisinin nihai planda zarar vermesi en istenmeyen unsurlar üzerindeki etkilerdir [17]. Orta nokta yaklaşımında, emisyonlara neden olan belirli bir proses veya faaliyet ile başlayan sebep-sonuç zinciri, çevrede birincil değişikliklerin (atmosferdeki gaz konsantrasyonlarının değişimi, vb.) ortaya çıkması ile sonuçlanır. Bu noktada YDE sonuçları, farklı çevresel problemlerin oluşmasındaki katkısı belirtir. Son nokta yaklaşımında ise, sebep-sonuç zincirinin sonunda, ekosistem, insan sağlığı ve

kaynaklar üzerinde hasar olarak belirtilen biyolojik değişimlerin (örneğin ozon tabakasında incelme nedeniyle cilt kanseri olanların sayısının artması) meydana gelmesi söz konusudur [6]. ReCiPe etki yöntemi için etki kategorilerinin orta ve son nokta karakterizasyon katsayılarının referans birimleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1: ReCiPe etki yöntemi için etki kategorilerinin orta ve son nokta karakterizasyon katsayılarının referans birimleri.

Etki Kategorisi	Referans Birim	
	Orta Nokta	Son Nokta
İnce partikül madde oluşumu	kg PM2.5 eq	DALY
Fosil kaynakların kıtlığı	kg oil eq	USD2013
Ekolojik zehirlilik (tatlı su)	kg 1,4-DCB	species.yr
Ötrofikasyon (tatlı su)	kg P eq	species.yr
İnsan zehirlenmesi (kanserojen)	kg 1,4-DCB	DALY
İnsan zehirlenmesi (kanserojen olmayan)	kg 1,4-DCB	DALY
İyonlaştırıcı radyasyon	kBq Co-60 eq	DALY
Arazi kullanımı	m ² a crop eq	species.yr
Ekolojik zehirlilik (deniz)	kg 1,4-DCB	species.yr
Ötrofikasyon (deniz)	kg N eq	species.yr
Mineral kaynakların kıtlığı	kg Cu eq	USD2013
Fotokimyasal sis oluşumu (insan sağlığı)	kg NOx eq	DALY
Fotokimyasal sis oluşumu (karasal ekosistem)	kg NOx eq	species.yr
Ozon Tabakasında İncelme	kg CFC11 eq	DALY
Asidifikasyon	kg SO2 eq	species.yr
Ekolojik zehirlilik (kara)	kg 1,4-DCB	species.yr
Küresel ısınma	kg CO2 eq	species.yr (Tatlı su ekosistemleri için) DALY (İnsan sağlığı için) species.yr (Karasal ekosistemler için) species.yr (Sucul ekosistemler için)
Su tüketimi	m ³	DALY (İnsan sağlığı için) species.yr (Karasal ekosistemler için)

2.5. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi

Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi (YDED) çalışması zorunlu ve isteğe bağlı çeşitli unsurlardan oluşmaktadır. Bunlar Tablo 2.2’de verilmiştir [18], [19]:

Tablo 2.2: YDED çalışmasında zorunlu ve isteğe bağlı çeşitli unsurlar.

Zorunlu unsurlar	Etki kategorileri seçimi ve tanımlanması Sınıflandırma Karakterizasyon
İsteğe bağlı unsurlar	Normalizasyon Gruplandırma Ağırlıklandırma

- Etki kategorilerinin seçimi ve tanımlanması: Bu aşamada çalışma ile ilgili çevresel etki kategorileri, karakterizasyon modeli etki yolu ve etki göstergesi belirlenir. Bunun yanı sıra etki kategorilerine etki edebilecek temel akışlar tanımlanır.
- Sınıflandırma: YDE sonuçları bir veya daha fazla etki kategorisine atanır.
- Karakterizasyon: Belirlenen çevresel mekanizmalara göre bütün emisyonların etkileri miktarsal olarak modellenir. Etki, karakterizasyon katsayıları kullanılarak etki kategorisi içerisinde yer alan tüm katkılar ortak tek bir etki skoru olarak ifade edilir (Örn. kg CO₂ eşdeğeri)
- Normalizasyon: Ortak bir kaynakla ilgili olan karakterize edilmiş farklı etki skorlarının etki kategorileri arasında karşılaştırılmasını sağlar.
- Gruplandırma: Çevresel etki kategorileri, göstergelerin hava ve su emisyonları gibi özelliklerine veya lokasyonlarına (yerel, bölgesel, küresel gibi) göre sınıflandırılarak gruplandırılabilir. Diğer bir gruplandırma şekli ise etki kategorilerinin düşük, orta veya yüksek öncelikli olma durumlarına göre sınıflandırmaktır. Bu gruplandırma şekilleri gerçekleştirilen çalışmanın niteliğine göre değişebilmektedir.
- Ağırlıklandırma: Çalışmada göz önünde bulundurulanan etkilerin bağıl önemini yansıtacak şekilde çevresel etki kategorileri puanlanmakta ve/veya ağırlıklandırılmaktadır.

2.5.1. Normalizasyon

Etki kategorileri seçildikten ve tanımlandıktan sonra, ürün sistemindeki her girdi ve çıktının çevresel yüke göreceli katkısı bu etki kategorilerine atanır ve etki kategorisine karşılık gelen, çevre üzerindeki potansiyel etkileri temsil eden göstergelere dönüştürülür. Bu dönüştürme işlemi, sınıflandırma aşamasında elde edilen envanterin sonuçları ile her bir etki kategorisindeki her bir maddenin karakterizasyon katsayıları çarpılarak yapılır. Bazı durumlarda, YDD uygulayıcıları, ürün alternatiflerini önceliklendirmek veya alternatifler arasındaki değişimlere karar verebilmek için etki veya hasar kategorilerini karşılaştırma ihtiyacı duyabilmektedir. Kategorilerin birbirleri ile karşılaştırılabilmesi için sonuçların aynı boyutta olması gerekmektedir. Bu amaçla her bir kategori gösterge sonucu, o kategoriye ait bir referans değere bölünür [6], [20].

$$N_k = \frac{S_k}{R_k} \quad (2.1)$$

Burada k etki kategorisini, N normalleştirilmiş göstergeyi, S karakterizasyon aşamasından gelen kategori göstergesini ve R referans değeri veya normalizasyon katsayısını simgelemektedir. Normalizasyon katsayıları genellikle bir coğrafi alan için ve belirli bir zaman aralığına karşılık gelen etki kategorisinin gerçek veya potansiyel büyüklüğünü temsil edecek şekilde seçilir. Mekânsal ölçek, zamansal ölçek, tanımlanmış bir sistem (örn. bir bölge veya ekonomik sektör) ve kişi başı miktar, referans değeri seçilirken dikkate alınabilecek özelliklere örnektir [6], [20].

2.5.2. Ağırlıklandırma

Ağırlıklandırma, etki kategori göstergeleri (veya normalleştirilmiş sonuçlar) arasında karşılaştırmayı kolaylaştırmak amacıyla öznel değerlemelere dayalı sayısal katsayıların (ağırlıklandırma katsayıları) kullanılması anlamına gelmektedir. Bu ağırlıklandırma katsayıları, sosyal, politik ve etik faktörlerin birleşmesine bağlıdır. Hem normalizasyon hem de ağırlıklandırma, çeşitli çözümlerin karşılaştırılması gerektiğinde önemlidir. Normalizasyon farklı çevresel etki kategorilerini

karşılaştırmak için bir temel sağlar (tüm etkiler aynı birimi alır), ağırlıklandırma ise farklı etki kategorilerine atanan önemi veya onlara olan ilginin seviyesini belirler.

Ağırlıklandırma aşamasında, her bir etki kategorisi için hesaplanan normalizasyon sonucu ağırlıklandırma katsayıları ile çarpılır [6], [20].

$$\zeta E = \sum A_k N_k \text{ veya } \sum A_k S_k \quad (2.2)$$

Burada ζE , genel çevresel etki göstergesini; A_k , etki kategorisi k için ağırlıklandırma katsayısını; N normalleştirilmiş göstergeyi ve S , karakterizasyon aşamasından gelen kategori göstergesini simgelemektedir [6], [20].

Her bir etki kategorisinin ağırlıklandırma katsayıları, bu etki kategorilerinin çevre için göreceli önemini temsil eder. Bu faktörler öznel ve sosyoekonomik kriterlere ve coğrafi bölgeye göre değişebilir. Ağırlıklandırma, mutlaka doğal bilimlere değil, genellikle politik veya etik değerlere dayalı olan hem nitel hem de nicel adım olarak kabul edilebilir. Ağırlıklandırma yöntemleri farklı kurumlar tarafından farklı ilkelere dayalı olarak geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları şu şekildedir [6]:

- Proxy yaklaşımı:

Bir veya birkaç niceliksel önlemin toplam çevresel etkinin göstergesi sayıldığı bir yaklaşımdır.

- Monetarizasyon:

İnsanlara tercihlerinin sorulduğu, ifade edilen tercih yoluyla gerçekleştirilen bir ağırlıklandırma yöntemidir. Örneğin, insanlara çevreyi güvende tutmak ve korumak için ödeme yapmak isteyip istemedikleri veya çevresel bozulmayı kabul edip etmedikleri sorulur. Monetarizasyon yöntemi, faydacılığın öncülleriyle de tanımlanabilir (değerler, insan tercihlerinin bir araya getirilmesiyle ölçülür).

- Hedefe uzaklık:

Ağırlıklandırma katsayıları bir hedefle ilgilidir. Bu hedef, hava, su, toprak veya çalışma ortamına salınan emisyonlar için kritik konsantrasyonları hesaplamak için

kullanılabilecek çevresel standartlar, çevresel kalite hedefleri veya politik hedefler olabilir.

- Panel yaklaşımı:

Bir grup insandan farklı etki ve hasar kategorilerini sıralaması istenir. Etki ve hasar kategorilerinin göreceli önemi, anketler yoluyla bir grup insanın görüşleriyle belirlenir. Görüşü alınan insan grubunun bilimsel uzmanlardan, hükümetlerden veya uluslararası kuruluşlardan oluşması tercih edilir.

Soares ve arkadaşları panel ve hedefe uzaklık yöntemlerinin bir arada kullanıldığı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Her etki kategorisinin panelistler tarafından değerlendirilmesi amacıyla üçü çevresel sonuçları (insan sağlığı, ekosistem sağlığı ve doğal kaynaklar) ve dördü çevresel sonuçların derecelerini (coğrafi ölçek, etki süresi, tersinirlik, hedefe uzaklık) temsil eden 7 kriter belirlenmiştir. Kriterlerin değerlendirilebilmesi amacıyla, her bir kriter için altı farklı derece tanımlanmıştır (Tablo 2.3). 100 puanlık değerlendirme skalasında, belirsizliği de dikkate alabilmek amacıyla, her derece için bir aralık tanımlanmıştır. Panelistlerin görüşlerinin kesinliğine ise yüksek, orta ve düşük olmak üzere üç farklı değer atanmıştır.

Tablo 2.3: Yedi kriter için değerlendirme seviyeleri.

Kriter i							Değer- lendir- me (e ⁱ ,j)	Kesinlik (ei,j)		
Çevresel sonuçlar			Çevresel sonuçların dereceleri					Yüksek	Orta	Düşük
K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7				
Çok yüksek etki			Global	Çok uzun vadeli	Geri döndürülemez	Çok daha büyük	100-81	100	90	81
Oldukça yüksek etki			Kıta	Uzun vadeli	Yalnızca yapay (kısmi)	Büyük	80-61	80	70	61
Hafif etki			Ulusal	Orta vadeli	Yalnızca yapay (tam)	Aynı seviyede	60-41	60	50	41
Düşük etki			Bölge- sel	Kısa vadeli	Doğal (kısmi)	Daha küçük	40-21	40	30	21
Neredeyse algılanamaz			Yerel	Çok kısa vadeli	Doğal (tam)	Çok daha küçük	20-1	20	10	1

Tablo 2.3: Devam.

Kriter i Çevresel sonuçlar	Çevresel sonuçların dereceleri						Değer- lendir- me (e'i,j)	Kesinlik (ei,j)		
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	Yüksek	Orta	Düşük
Yok				Nokta- sal	Anlık	Doğal anlık	Sonsuz derecede küçük	0-1	0	1

Kaynak: [17]

Soares ve arkadaşlarının çalışmasında kriterlerin kendi arasında ağırlıklarının belirlenebilmesi için değişime direnç yöntemi kullanılmıştır. Değişime direnç prosedürü, karar çalışmasıyla ilgili olduğu düşünülen kriterlerin sıralanmasıyla başlar. Ardından, her bir kriter için istenen seviye ve istenmeyen seviye olmak üzere iki limit veya referans kutup tanımlanır (Tablo 2.4) [17].

Tablo 2.4: Kriter ağırlığının belirlenmesi için kullanılan değişime direnç iki kutuplu yapısı.

	Kriter no	İki Kutuplu Yapı
Çevresel sonuç Kriterleri	K1	İnsan sağlığı için algılanamaz/insanlarda ciddi hasar verir
	K2	Ekosistem sağlığı için algılanamaz/ciddi ekosistem sağlığı hasarı (türlerin yok olması)
	K3	Doğal kaynak mevcudiyeti üzerinde algılanamaz etki/doğal kaynak kullanılabilirliğini etkileyen ciddi hasar
Çevresel sonuç Kriterlerinin derecesi	K4	Eylemin konumuyla sınırlı etki/tüm gezegene yayılan etki
	K5	Çok kısa etki süresi (anlık)/sınırsız etki süresi (kalıcı)
	K6	Doğal ve kolayca geri döndürülebilir etki/geri dönüşü olmayan etki
	K7	Referans sınırından çok daha küçük etki/referans sınırından çok daha büyük etki

Kaynak: [17]

Kriterler (limitlerine göre) kare matriste ikili olarak karşılaştırılır. Her bir çift için, her iki kriterin referansı bilinerek, karar vericinin istenen kutuptan en az tercih edilen kutba geçişe karşı direnci değerlendirilir. Karşılaştırma, karar verici için iki değişiklikten hangisinin en istenmeyen olduğunu belirterek tamamlanır [17].

2.6. YDD Veri Tabanları

YDD çalışmasının gerçekleştirilebilmesi amacıyla ihtiyaç duyulan ögelerden bir tanesi veri tabanıdır. Dünyanın çeşitli bölgelerinde geliştirilmiş/geliştirilmekte olan birçok YDD veri tabanı bulunmaktadır. 2000'li yılların başından bu yana dünyada ulusal YDD veri tabanı oluşturulması ve işletimi çalışmaları Çevresel Toksikoloji ve Kimya Topluluğu (SETAC) ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) öncülüğünde ivme kazanarak devam etmektedir. Günümüzde bazı Avrupa ülkeleri ve Kanada'nın yanı sıra, Amerika Birleşik Devletleri ve Japonya gibi ülkelerin veri tabanlarının oldukça geniş olduğu ve ulusal düzeyde veri alışverişine olanak sağladığı görülmektedir. Gelişmekte olan ülkelerde ise genellikle kamu ile sanayinin YDD konusunda ilgisinin az olduğu ve çalışmaların daha çok akademik seviyede gerçekleştiği bilinmektedir.

Uluslararası arenada yaygın olarak kullanılan temel veri tabanlarından ecoinvent ve GaBi, bölgesel veri tabanlarını kendi yapılarına entegre ederek ve bölgesel paydaşlarla veri toplamada iş birliği yaparak mevcut veri tabanlarının zenginleşmesini sağlamaktadır.

ecoinvent Veri Tabanı, kar amacı gütmeyen İsviçre bazlı bir kurum olan "ecoinvent Merkezi" tarafından yönetilen bir YDD veri tabanıdır. Mevcut sürümü (v3.9.1), enerji, ulaştırma, malzeme üretimi, tarım gibi sektörler altında toplanmış yaklaşık 18.000 birim proses veri seti içermektedir [21].

GaBi Veri Tabanı'nda ise yaklaşık 17.000 kullanıma hazır veri seti bulunmaktadır. 30 yılı aşkın bir süre önce başlayan GaBi veri tabanının geliştirilmesi çalışmaları günümüzde 20'den fazla ülkeden 200'den fazla yaşam döngüsü uzmanının katkılarıyla devam etmektedir [22].

2.7. YDD Yazılımları

YDD çalışmasının gerçekleştirilebilmesi amacıyla ihtiyaç duyulan bir diğer öge ise hesaplama aracıdır. Bu araç Microsoft Excel'de oluşturulabileceği gibi bu amaca yönelik geliştirilmiş bir yazılım da olabilmektedir. Dünyada en yaygın kullanılan YDD yazılımları GaBi, SimaPro ve OpenLCA'dir.

GaBi ve SimaPro ticari yazılımlardır. GaBi Kendi veri tabanının yanı sıra ecoinvent veri tabanını da kullanabilmektedir. SimaPro ise ecoinvent veri tabanı ile birlikte çalışmaktadır.

OpenLCA açık kaynak kodlu ücretsiz bir yazılım olup birlikte kullanılacak veri tabanları çeşitlilik gösterebilmektedir. Veri girişi, genel bilgiler, girdi-çıkı, yönetsel bilgi, modelleme ve doğrulama, parametreler ve tahsisat (alokasyon) sekmelerinden yapılabilmektedir. OpenLCA yazılımında bir veri setinin girdi-çıkı sekmesinin görüntüsü Şekil 2.3'te verilmiştir.

Flow	Category	Amount	Unit	Uncertainty	Avoided waste	Provider	Data quality entry
Fe aluminium oxide, non-metalurgical	242/Manufacture of basic ferroal...	0.00006	kg	lognormal		P market for aluminium ox...	(1, 4, 1, 1)
Fe aluminium, wrought alloy	242/Manufacture of basic ferroal...	0.00181	kg	lognormal		P market for aluminium, wr...	(1, 4, 1, 1)
Fe anode, for metal electrolysis	279/Manufacture of other electric...	0.00005	kg	lognormal		P market for anode, for me...	(1, 4, 1, 1)
Fe argon, liquid	301/Manufacture of basic chemi...	0.00103	kg	lognormal		P market for argon, liquid (...)	(1, 4, 1, 1)
Fe diesel, burned in building machine	431/Demolition and site preparat...	0.00000	MJ	lognormal		P market for diesel, burned ...	(1, 4, 1, 1)
Fe electricity, medium voltage	351/Electric power generation, tra...	0.76000	kWh	lognormal		P market for electricity, me...	(2, 4, 1, 1)
Fe ethylene glycol	301/Manufacture of basic chemi...	0.00000	kg	lognormal		P market for ethylene glyco...	(1, 4, 1, 1)
Fe ferrochromium, high-carbon, 68% Cr	241/Manufacture of basic iron an...	0.00000	kg	lognormal		P market for ferrochromi...	(1, 4, 1, 1)
Fe ferromanganese, high-coal, 74.5% Mn	241/Manufacture of basic iron an...	0.00006	kg	lognormal		P market for ferromangan...	(1, 4, 1, 1)
Fe ferrosilicon	241/Manufacture of basic iron an...	0.00000	kg	lognormal		P market for ferrosilicon (...)	(1, 4, 1, 1)
Fe fluorspar, 97% purity	089/Mining and quarrying n.e.c./...	0.00012	kg	lognormal		P market for fluorspar, 97%...	(1, 4, 1, 1)
Fe hard coal	054/Mining of coal and lignite/91...	0.00005	kg	lognormal		P market for hard coal | ha...	(1, 4, 1, 1)
Fe induction furnace converter	4100/Construction of building/L...	7.52000E-11	item	lognormal		P induction furnace conver...	(1, 4, 1, 1)
Fe iron scrap, sorted, pressed	382/Waste treatment and dispos...	1.10000	kg	lognormal		P sorting and pressing of ...	(1, 4, 1, 1)
Fe lime, hydrated, packed	238/Manufacture of non-metallic...	0.00000	kg	lognormal		P market for lime, hydrated...	(1, 4, 1, 1)
Fe lubricating oil	302/Manufacture of refined petro...	0.00000	kg	lognormal		P market for lubricating oi...	(1, 4, 1, 1)
Fe magnesium	Resource/n ground	0.00000	kg	lognormal		P market for magnesium ...	(1, 4, 1, 1)
Fe molybdenum trioxide	242/Manufacture of basic ferroal...	0.00000	kg	lognormal		P market for molybdenum ...	(1, 4, 1, 1)

Flow	Category	Amount	Unit	Uncertainty	Avoided product	Provider	Data quality entry
Fe Antimony	Emission to air/unspecified	6.90000E-9	kg	lognormal			(1, 4, 1, 1)
Fe Arsenic	Emission to air/unspecified	1.37000E-9	kg	lognormal			(1, 4, 1, 1)
Fe Cadmium	Emission to air/unspecified	2.12000E-9	kg	lognormal			(1, 4, 1, 1)
Fe Carbon monoxide, fossil	Emission to air/unspecified	0.00003	kg	lognormal			(1, 4, 1, 1)
Fe Chloride	Emission to water/unspecified	0.00000	kg	lognormal			(1, 4, 1, 1)
Fe Chromium	Emission to water/unspecified	1.75000E-9	kg	lognormal			(1, 4, 1, 1)
Fe Chromium VI	Emission to air/unspecified	0.00000	kg	lognormal			(1, 4, 1, 1)
Fe Cobalt	Emission to air/unspecified	1.37000E-9	kg	lognormal			(1, 4, 1, 1)
Fe Copper	Emission to air/unspecified	9.25000E-10	kg	lognormal			(1, 4, 1, 1)
Fe Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodioxin	Emission to air/unspecified	2.64000E-7	mg	lognormal			(1, 4, 1, 1)
Fe dust, unalloyed electric arc furnace steel	382/Waste treatment and dispos...	0.04140	kg	lognormal		P treatment of dust, unalloy...	(1, 4, 1, 1)
Fe Hydrocarbons, aromatic	Emission to air/unspecified	0.00000	kg	lognormal			(1, 4, 1, 1)
Fe Hydrogen chloride	Emission to air/unspecified	5.88000E-7	kg	lognormal			(1, 4, 1, 1)
Fe Hydrogen fluoride	Emission to air/unspecified	1.21000E-6	kg	lognormal			(1, 4, 1, 1)
Fe inert waste, for final disposal	382/Waste treatment and dispos...	1.00000E-9	kg	lognormal		P market for inert waste, fir...	(1, 4, 1, 1)
Fe Lead	Emission to air/unspecified	1.25000E-9	kg	lognormal			(1, 4, 1, 1)
Fe Manganese	Emission to air/unspecified	3.40000E-9	kg	lognormal			(1, 4, 1, 1)
Fe Mercury	Emission to air/unspecified	9.25000E-11	kg	lognormal			(1, 4, 1, 1)

Şekil 2.3: OpenLCA yazılımında bir veri setinin girdi-çıkı sayfasının görüntüsü.

OpenLCA ile ISO 14040 ve 14044 standartlarına uygun YDD çalışmaları gerçekleştirilebilmektedir. Veri kalitesini belirlemek amacıyla kullanıcı tarafından veri kalitesi sistemi oluşturulabilmekte veya mevcut olan sistem kullanılabilmektedir. Söz konusu sistemlerden akışlara ait belirsizlik değerleri hesaplanabilmekte ve bu değerler, Bölüm 5.1 içerisinde tanımlanan Monte Carlo Simülasyonunda kullanılabilmektedir. Akışlarda, parametrelerde ve karakterizasyon faktörlerinde tanımlanmış bütün belirsizlik dağılımları söz konusu simülasyonda dikkate alınmaktadır.

OpenLCA'de ürün sistemlerinin otomatik olarak veya grafiksel modeller ile oluşturulması mümkündür. Diğer yazılımlar ile karşılaştırıldığında grafiksel modelleme özelliğinin gelişmeye açık olduğu gözlenmektedir.

Analiz sonuçlarının gösteriminde standart gösterimin yanı sıra katkı ağacı gösterimi de bulunmaktadır. Bahsi geçen gösterim türünde, tedarik zincirindeki her bir tedarik sürecinin etkiye katkısı yüzdesel oran olarak gösterilmektedir.

OpenLCA, 1.4.1 sürümünden itibaren, Python ve JavaScript programlarını ve SQL sorgularını doğrudan çalıştırma imkânını desteklemektedir. Böylelikle kullanıcılara, openLCA'deki hesaplamaları otomatikleştirebilme, içe veya dışa veri aktarımı konusunda kendi kodlarını yazabilme ve parametre değerlerini değiştirerek hassasiyet analizi hesaplamaları yapabilme olanaklarını sağlanmaktadır.



3. DEMİR-ÇELİK SEKTÖRÜ

Günümüzde çelik üretimi ağırlıklı olarak iki teknoloji ile gerçekleştirilmektedir; elektrik kullanarak EAO veya IF tesislerinde hurda çelikten ve entegre tesislerde oksijen kullanarak demir cevherinden. Demir cevherinden çelik üretiminde pik demirin çeliğe dönüştürülmesi entegre tesislerdeki bazik oksijen fırınlarında (BOF) gerçekleşmektedir [23].

Dünya genelinde, çelik üretiminde BOF kullanımı %72 civarındadır [24]. Türkiye’de çelik üretimi, 2019 verilerine göre %67.8 oranında hurdadan üretime dayanmaktadır. Hurdadan çelik üretim oranı, Avrupa Birliğinde %41.3, dünya genelinde ise %28 civarındadır [24]. Hurda demirden çelik üretiminde, Avrupa Birliği ülkelerinde, yalnızca EAO kullanılmaktadır. Ülkemizde ise hurdadan çelik üretimi, EAO’larda veya IF’lerde gerçekleştirilmektedir. Türkiye’de indüksiyon ocaklı tesislerdeki üretim, toplam çelik üretiminin %2 ila 5’ini oluşturmaktadır. Dünyanın ikinci büyük çelik üreticisi konumundaki Hindistan’da indüksiyon ocaklarında çelik üretimi %30 civarındadır [11], [25]. Dünyadaki en büyük çelik üreticisi olan Çin’de %53 oranında bazik oksijen fırınlarında, %47 oranında ise ark ocaklı tesislerde gerçekleşmektedir. Bununla birlikte son yıllarda indüksiyon ocaklı tesislerde çelik üretimi oldukça popüler hale gelmiştir [11].

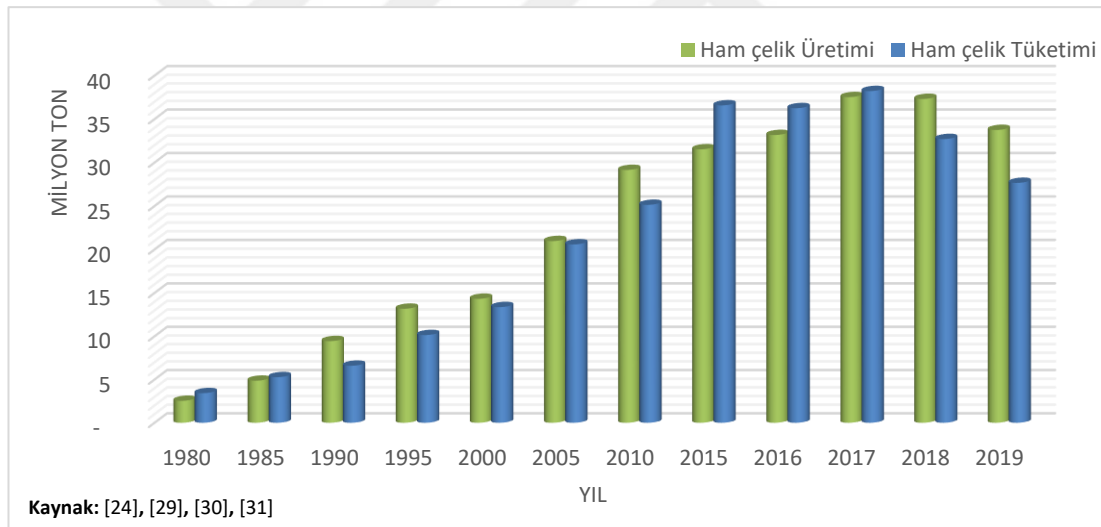
3.1. Türkiye’de Demir-Çelik Sektörü

Türkiye’de demir-çelik sektörünü kurma yönünde fizibilite çalışmaları 1925 yılında başlatılmıştır. İlk olarak, 1932’de Kırıkkale Askeri Fabrikalar Genel Müdürlüğü’ne bağlı çelik fabrikası kurulmuştur. Birinci Beş Yıllık Sanayi Planı’nın yayınlanmasından sonra Sovyet ve Amerikalı uzmanlara incelemeler yaptırılmış ve bu incelemelerin sonucunda Karabük bölgesinde günde 300 ton (yıllık 100 bin ton) kapasiteli bir yüksek fırına sahip bir tesis kurulmasının uygun olduğuna karar verilmiştir. 1936’da yapımına başlanan Karabük Demir-Çelik Fabrikası (Kardemir) 1939 yılından itibaren kısım kısım işletmeye alınmıştır. Türkiye’de Kardemir’den sonra, özel sektörün ilk yatırımı 1956 yılında Metaş tarafından yapılmıştır [26]-[28].

1950'li yıllarda hızla artan demir-çelik talebini karşılamak amacıyla 1958 yılında Ereğli bölgesinde yeni bir demir-çelik fabrikasının kurulmasına karar verilmiştir. 1960 yılında kurulmaya başlanan Ereğli Demir-Çelik Fabrikası (Erdemir) 1965 yılında 600 bin ton ham demir ve 470 bin ton çelik kapasiteleri ile işletmeye alınmıştır. Devam eden çelik talebini karşılamak amacıyla İskenderun'da 1,1 milyon ton kapasiteli İskenderun Demir-Çelik Fabrikası (İsdemir) 1975'te üretime başlamıştır [26].

Demir-çelik sektörünün gelişmesi birçok sanayi tesisini ülkemize kazandırmıştır. IV. Beş Yıllık Kalkınma Planı (1979-1983) döneminin başlarında, özel sektör kuruluşu olan Asil Çelik vasıflı çelik üretimine başlamıştır. 1980 yılı sonrasında Türkiye'de ark ocaklarına özel vergi iadesi, elektrik tarifesi, navlun teşviki gibi olanaklar sağlanmıştır. Bu politikalar ile birlikte, birçok elektrik ark ocaklı tesisin kurulmasına olanak tanınmıştır [27].

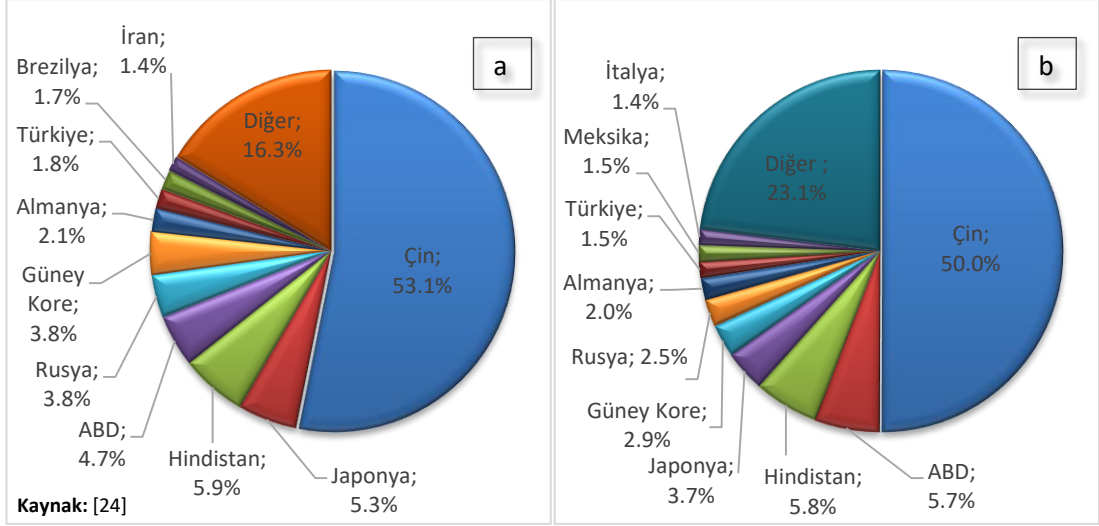
Türkiye'nin yıllara göre ham çelik üretimi ve tüketimi Şekil 3.1'de verilmiştir.



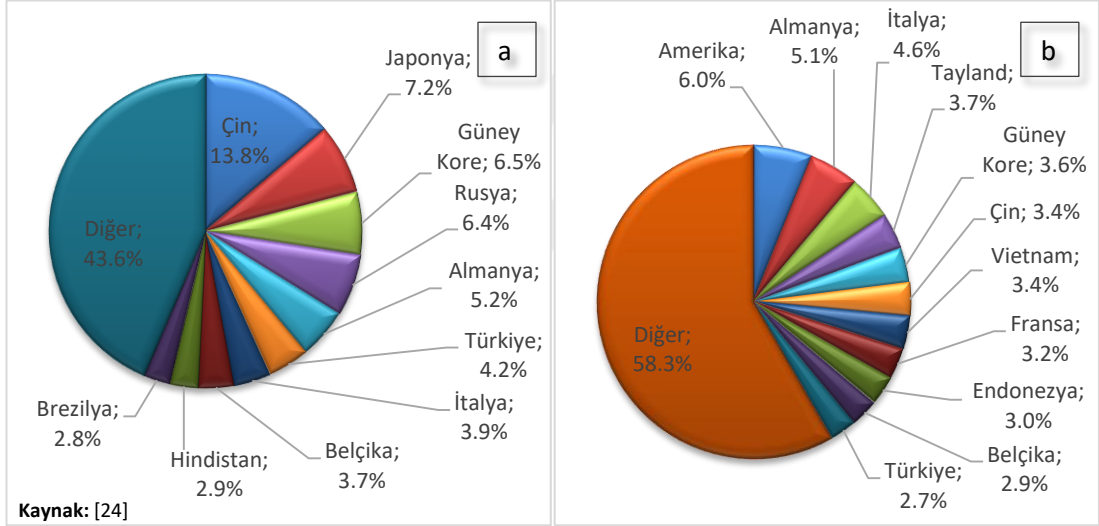
Şekil 3.1: Türkiye'nin yıllara göre ham çelik üretimi ve tüketimi.

Şekil 3.1'de görüldüğü üzere ham çelik üretimi 2017-2018 yıllarına kadar artan bir eğilime sahipken 2019 yılında düşüş göstermiştir. Bununla birlikte çelik tüketimi de 2017 yılından itibaren düşüşe geçmiştir [24], [29]-[31].

Dünya genelinde 2019 yılı dünya ham çelik üretim ve tüketiminin ülkelere göre dağılımı Şekil 3.2'de, ülkelerin ihracat ve ithalattaki payları Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



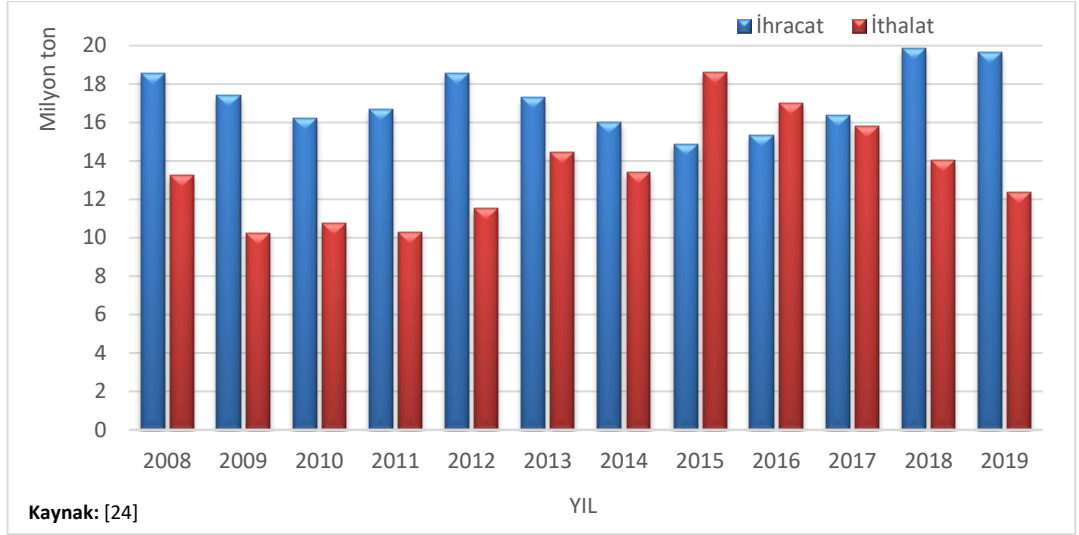
Şekil 3.2: 2019 yılı dünya ham çelik üretim a) ve tüketiminin b) ülkelere göre dağılımı.



Şekil 3.3: Ülkelerin, 2019 yılı dünya çelik ihracatı a) ve ithalatındaki b) payları.

2019 dış ticaret verileri incelendiğinde (Şekil 3.3) toplam 439 milyon ton ham çeliğin dünya genelinde ihraç edildiği görülmektedir. İhracatta Çin %13,8’lik bir payla birinci sıradadır. Çin’i %7,2 ile Japonya, %6,5 ile Güney Kore ve %6,4 ile Rusya takip etmektedir. İthalat verileri incelendiğinde toplam 438 milyon ton ham çeliğin dünya genelinde ithal edildiği görülmektedir. ABD %6’lık bir payla birinci sıradadır. ABD’yi %5,1 ile Almanya, %4,6 ile İtalya ve %3,7 ile Tayland takip etmektedir.

Türkiye’nin 2008-2019 yılları arasında çelik ihracat ve ithalat miktarı Şekil 3.4’te gösterilmektedir.



Şekil 3.4: Türkiye'nin yıllara göre çelik ihracat ve ithalat miktarı.

Türkiye, 2019 yılında 19,7 milyon tonluk ihracat miktarı ve 12,3 milyon tonluk ithalat miktarı ile ihracatta 6. ve ithalatta 11. sırada yer almıştır [24]. Demir-çelik sektörü, inşaat, makine ekipman imalatı, otomotiv gibi sanayinin birçok alanına girdi sağlamaktadır. Cevher ve hurda, demir-çelik sektörünün ana hammaddeleridir. Ham çelik, sektörün en temel çıktısıdır. Ham çelik, üretilecek son ürüne göre, yassı (slab) ve uzun (kütük) yarı mamuller olarak üretilmektedir. Haddeleme prosesi sonrasında uzun yarı mamuller inşaat demiri, kangal, filmaşın, profil, dikişsiz boru, ray, lama vb. ürünlere dönüşürken, yassı yarı mamullerden sac levha ve rulo sac üretilmektedir. Üretilen saca isteğe göre boyama ve galvanizleme işlemleri uygulanmaktadır.

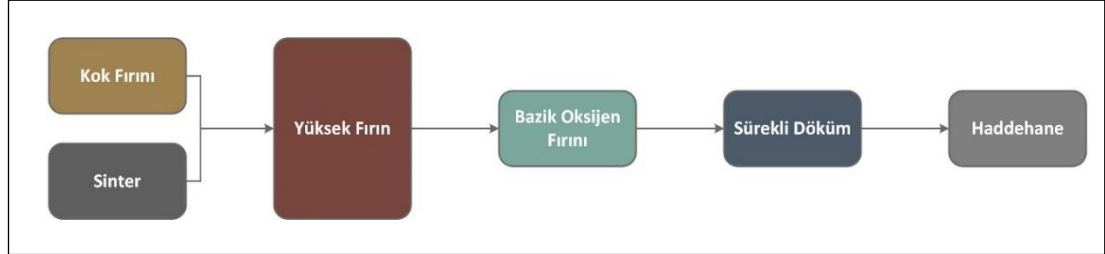
Türkiye'nin ham çelik üretim kapasitesi yaklaşık 50 milyon ton olup, indüksiyon ocaklı tesisler toplam kapasitenin yaklaşık %2 ila 5'ini oluşturmaktadır. Fakat ergitmenin yapıldığı indüksiyon ocağı haricinde kalan proses adımları, kapasitenin yaklaşık %70'ini oluşturan EAO'lar ile aynıdır ve aynı çevresel etkileri barındırmaktadır.

3.2. Demir-Çelik Üretim Prosesleri

Ham cevheri kullanan entegre tesisler ile hurdayı kullanan EAO ve IF tesislerinin demir-çelik üretim proseslerinin detayları aşağıda verilmiştir. Hurdadan çelik üretimi başlı başına bir geri dönüşüm sürecidir. Bu nedenle çelik üretiminin çevresel etkilerinin azaltılmasında özel bir öneme sahiptir.

3.2.1. Ham Cevheri Kullanan Entegre Tesisler

Entegre tesisler, kok üretimi, sinter üretimi, yüksek fırınlar, BOF, sürekli döküm, sıcak ve soğuk haddehanlerden oluşmaktadır. Entegre demir-çelik üretim tesisi akım şeması Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Entegre demir-çelik üretim tesisi akım şeması.

Kok üretiminde kok bataryaları ve söndürme kuleleri kullanılmaktadır. Kok bataryalarına beslenen kömür içindeki uçucular yüksek sıcaklıkta ve havasız ortamda uzaklaştırılır. Yakıt olarak genellikle yan ürün tesislerinde temizlenmiş kok fırın gazı (KFG), bazı durumlarda zenginleştirilmiş yüksek fırın gazı (YFG) kullanılmaktadır. Söndürme işlemi söndürme kulelerinde kuru veya sulu olarak gerçekleştirilebilmektedir. [28].

Sinter üretiminde; belirli bir tane boyutunun altındaki cevher, kireç taşı, manyezit, MgO içerikli dolomit, olivin ve dünit gibi yardımcı maddeler ile toz halindeki geri kazanılmış sinter ve tufal kullanılmaktadır. Tutuşmayı sağlayan kok tozu ve antrasit ile birlikte yüksek sıcaklıkta, bu malzemelerin dış yüzeyleri ergitilmekte ve birbirine yapışması sağlanarak yüksek fırına beslenebilecek büyüklüğe getirilmektedir [28].

Yüksek fırınlar, kapalı sistemlerdir ve burada demir cevherinden pik demir üretilmektedir. Pik demir bir demir-karbon alaşımıdır. Bileşiminde %2'den çok karbon bulunmaktadır. Parça halindeki demir cevheri, kok, sinter ve kireç katmanlar halinde fırının üst bölgesinden beslenir. Harman aşağı doğru hareket ederken, sıcaklık yükselir, indirgenme reaksiyonlarının ve cürufun oluşumu kolaylaşır. Üretim sırasında oluşan yüksek fırın gazı (YFG) da fırının üst bölgesinden toplanır. Yıkayıcı filtrelerden geçirilen YFG, ısıtma amaçlı olarak yüksek fırın sobalarında veya enerji üretiminde kullanılır. Tüyer bölgesinden verilen yüksek hızlı sıcak hava yardımıyla bu seviyede

sıcaklık 2000°C'yi geçebilir. Bu seviyede eriyik haldeki cüruf ve pik demir damla damla yüksek fırının en alt bölümündeki hazneye iner [28]. Cüruf, daha düşük yoğunluğa sahip olduğu için pik demirden ayrılmaktadır [32].

Bazik oksijen fırınında (BOF veya konverter), sıcak metal içerisindeki safsızlıklar yakılmakta ve karbon içeriği istenen seviyeye (%4-5'ten %0,01-0,4'e) düşürülmektedir. Bu amaçla oksijen, konverterin içerisine indirilen bir lans yardımıyla beslenmektedir. Ekzotermik oksidasyon reaksiyonları ile ortaya çıkan enerji ortam sıcaklığının artmasını ve BOF içerisindeki malzemelerin erimesini sağlamaktadır. Bu sayede ilave enerjiye gereksinim duyulmamaktadır [28], [33]. Konvertörde işlem gören metale, çeliğin kalite gereksinimlerini karşılamak ve verimliliği artırmak amacıyla, pota ocaklarında ikincil metalurji işlemi uygulanmaktadır [28].

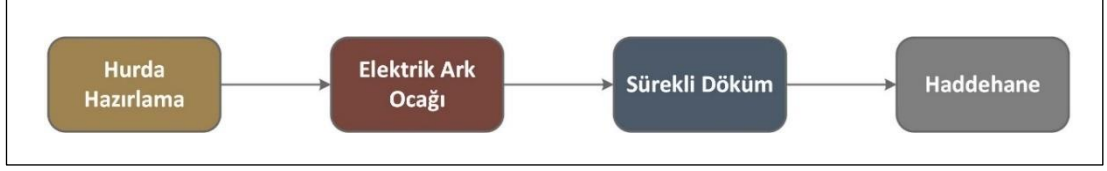
Sıvı çelik, ikincil metalurji işlemleri uygulandıktan sonra sürekli döküm için tandişe aktarılır. Tandışten akan sıvı çelik su soğutmalı bakır kalıplardan geçer. Dökümden çıkan çelik üzerine su püskürtülerek soğutulur. Yüzeyi katılaştıran çelik istenilen boyutta kesilir [28].

3.2.2. Hurdadan Üretim: EAO ve IF Tesisleri

Demir hurdası, EAO ve IF tesislerinde çeliğe dönüştürülmektedir. EAO ve IF aynı işlem adımlarına sahip olsalar da fırının çalışma prensibi ve fırına beslenen hurda miktarı bakımından farklılık göstermektedirler. EAO'da çelik, genelde üç adet grafit elektrot ile oluşturulan bir ark ile demirli hurda malzemelerin doğrudan eritilmesiyle üretilir [28]. İndüksiyon ocağında ise, refrakter astarı çevreleyen ve fırın gövdesi içine yerleştirilmiş su soğutmalı bir bakır bobin tarafından oluşturulan elektromanyetik alan tarafından indüklenen akımlar tarafından ergime ısısı üretilir. [28], [34], [35].

3.2.2.1. Elektrik Ark Ocaklı Tesisler

Elektrik ark ocaklarında çelik, hurda gibi demir içeren malzemelerin elektrik kullanılarak ergitilmesiyle üretilmektedir. BOF'ta olduğu gibi, kireç ilavesi ile cüruf oluşturularak, safsızlıklar çelik içerisinden uzaklaştırılmaktadır [28]. Elektrik ark ocaklı tesislere ait üretim akım şeması Şekil 3.6'da verilmiştir.



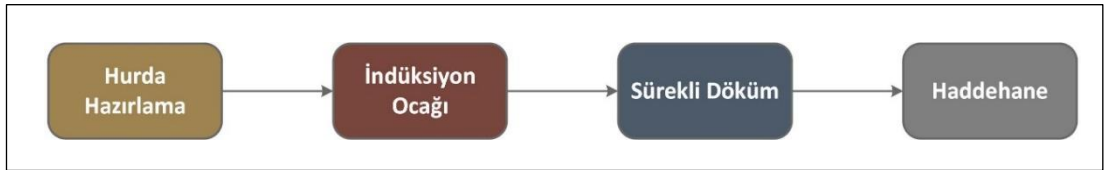
Şekil 3.6: Elektrik ark ocaklı tesislere ait üretim akım şeması.

Hurda hazırlama aşamasında demirli hurda metal, fırına şarj edilmek üzere hazırlanmaktadır. Bu aşamada kullanılan kısıkaçlar (polipler) veya mıknatıslar sayesinde, manyetik olmayan demir dışı metallerin, odun ve taş parçalarının ocağa girmesi engellenmektedir [28].

Karbon içeren malzemeler, çelik üretim prosesini iyileştirmek, kireç veya dolomitik kireç ise cüruf oluşturmak amacıyla, fırına şarj edilebilmektedir. Şarj işlemi tamamlandıktan sonra fırın içine indirilen elektrotlar vasıtasıyla oluşturulan elektrik arkı vasıtasıyla ergitme işlemi uygulanmaktadır. Oksijen, EOF ile çelik üretiminde, verimliliğin artırılması, istenmeyen elementlerin alınması, ergimiş metalin karbonsuzlaştırılması ve zararlı gazların ocaktan dışarı çıkmalarını engellemek amacıyla kullanılmaktadır [28]. İkincil metalurji ve döküm için entegre tesislerle aynı işlemler uygulanmaktadır.

3.2.2.2. İndüksiyon Ocaklı Tesisler

İndüksiyon ocaklı tesislere ait üretim akım şeması Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7: İndüksiyon ocaklı tesislere ait üretim akım şeması.

İndüksiyon ocağında, ısı indüklenmiş akımlar ile üretilir. İndüklenmiş akımlar, fırının içerisinde bulunan ve fırının etrafını saran bir bobin tarafından yaratılan elektromanyetik alanlarla oluşturulmaktadır. Bu elektromanyetik alan, aynı zamanda erimiş haldeki metale kuvvet uygulayarak metal banyosunun homojen şekilde

karışmasını sağlamaktadır [34]-[37]. İndüksiyon ocaklarının avantaj ve dezavantajlarından Tablo 3.1’de bahsedilmektedir [34].

Tablo 3.1: İndüksiyon ocaklarının avantaj ve dezavantajları.

Avantajları	Dezavantajları
Alaşımlarda ve ergitme rejiminde yüksek derecede esneklik sağlaması	Enerji maliyeti fosil yakıt kullanımına göre daha yüksektir.
Kısa ergitme sürelerine sahip olması	15 ton/saat’in altında kalan ergitme kapasiteleri için uygundur.
Dökümhane kaynaklı çevresel sorumlulukların düşük olması	Bekleme sırasında, su soğutmalı indüksiyon bobinindeki ısı kaybı nedeniyle düşük verime sahiptir.
Refrakter tabakasının ömrüne bağlı olarak düşük bakım maliyetleri	Kurulumu yüksek yatırım maliyeti gerektirir. Fakat diğer çevresel yatırımlardan tasarruf etmek mümkündür. Kurulan 1 ton fırın içeriği başına net maliyet 375.000 Avro civarındadır.
İyi proses kontrol: optimum sıcaklık kontrolüne izin veren bilgisayar desteği ve tam otomatik işletme mümkündür.	İndüksiyon ocağının eriyik üzerindeki temizleme etkisi sınırlıdır çünkü düşük miktarda cüruf oluşur ve cüruf ve eriyik arasındaki yüzey alanı küçüktür. Bu nedenle daha yüksek kalitede ve daha pahalı şarj kullanılması gerekmektedir.
Proses parametreleri lokal olarak hesaplanmış ve ayarlanmışsa maksimum termal verimlilik sağlanması mümkündür.	
Banyo içerisindeki yoğun karıştırma sayesinde eriyiğin homojen olması sağlanır.	

Kaynak: [34].

Metallerin ergitilmesinde kullanılan indüksiyon ocakları çekirdeksiz ve çekirdekli (özlü veya kanal) olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Demirli metallerin ergitme işleminde çekirdeksiz tip indüksiyon ocağı kullanılmaktadır. Çekirdeksiz fırınlar soğuk şarj ergitmeye olanak sağlamaktadırlar [35], [37]. Çekirdeksiz indüksiyon ocakları izabe için kullanılamamaktadır. Bu nedenle IF ocaklı tesislerde doğru kimyasal kompozisyona sahip ham maddenin şarj edilmesi önem arz etmektedir. Bu tesislerde pota ocakları, IF’lerde ergitme işlemi sonrasında izabe işleminin gerçekleştirilmesi için kullanılmaktadır [34].

3.2.3. Haddehaneler

Haddeleme, metal ürünlere şekil verilmesi işlemidir. Haddeleme işleminde dönen merdaneler kullanarak metal malzemenin kesit alanı düşürülmektedir. Dönerek malzemeyi iten merdaneler, metale bir taraftan sıkıştırma uygulamaktadır. Uygulamaya ve malzemeye bağlı olarak sıcak, ılık veya soğuk haddeleme yapılabilmektedir [37].

Kütük veya slab haldeki çelik, sıcak haddehanede tav fırınlarında çelik, tavlama sıcaklığına (1050-1300°C) kadar ısıtılır. Tavlanan metalin üzerindeki tufal temizlenir. Haddeleme işlemi sonucunda kütük haldeki çelikten inşaat demiri, kangal çubuk, slab haldeki çelikten ise yassı levha elde edilmektedir [38]. Sıcak haddehaneden çıkan levha, daha ince kalınlıkta yassı levha elde edebilmek için soğuk haddehanede işlem görmektedir. Soğuk haddehanede tavlama işlemini, çeşitli kaplama prosesleri takip etmektedir [37], [38].

3.3. Çelik Üretiminin Çevresel Etkileri

Çelik üretiminde kullanılan kaynaklar ve oluşan çevresel etkiler bu bölümde incelenmektedir.

3.3.1. Kaynak Kullanımları

Kaynak kullanımları su tüketimi, enerji tüketimi ve ham madde tüketimi olmak üzere üç başlık altında incelenmiştir.

3.3.1.1. Su Tüketimi

Entegre demir-çelik tesislerinde su, doğrudan ve dolaylı soğutma, gaz ve atık gaz temizleme gibi yıkama vb. süreçler sırasında kullanılmaktadır. Üretim hacmine ve yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen işlemlere bağlı olarak yoğun su tüketimi bulunan entegre tesislerde, suyun devridaim edilmesi su tasarrufunun sağlanması bakımından büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, dolaylı ve doğrudan soğutma sırasında ve

proses suyu için kapalı veya yarı kapalı devre su sistemleri uygulanabilmektedir. Bu aşamalarda yapılan su devridaimi ile yaklaşık %98 oranında su tasarrufu sağlanabilmektedir. Ayrıca kapalı devre su sistemlerinin kullanılması ile birlikte buharlaşma kayıplarının da yaklaşık %40 oranında azaltılması mümkündür [28].

Elektrik ark ocaklı tesislerde çelik üretimi için su, ocağın dış çeperlerinin ve üst kısmının soğutulması ve elektrotların üzerine su püskürtülmesi, sıcak baca gazlarının hızlı soğutulması, ıslak tozsuzlaştırma uygulanması, vakum oluşturma ve döküm sırasında doğrudan soğutma işlemlerinde kullanılmaktadır [28]. Haddemeleme prosesinde ise tufalin kırılması ve çeliğin soğutulması amacıyla su tüketilmektedir.

Çelik üretim proseslerinde ton ham çelik başına tüketilen ortalama su miktarları Tablo 3.2’de verilmektedir.

Tablo 3.2: Çelik üretim proseslerinde ortalama su tüketim miktarları.

Proses	Soğutma Suyu (m ³ /ton ham çelik)	Proses Suyu (m ³ /ton ham çelik)	Toplam Tüketim (m ³ /ton ham çelik)
Kok Üretimi	0,66	0,77	1,43
Sinter Üretimi	0,14	-	0,14
Demir Üretimi	10,00	5,71	15,71
Çelik Üretimi	21,25	-	21,25
EAO	21,90	-	21,90
IF*	0,2	-	0,2
Sıcak Haddemeleme	8,25	-	8,25
Soğuk Haddemeleme	21,85	0,11	21,96

* Sünger demir (DRI) tesisi ve indüksiyon ocağı içeren bir işletme (haddehaneler, güç üretim tesisi vb. hariç)

Kaynak: [28], [35], [38]

3.3.1.2. Enerji Tüketimi

Yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen ergitme, alaşımlama (ikincil metalürji), tavlama ve koklaştırma işlemleri nedeniyle, demir ve çelik üretimi enerji yoğun bir süreçtir. Termal enerji kaynağı olarak; entegre tesislerde özellikle kok fırın gazı tesis genelinde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra yüksek fırın gazı ve doğal gaz da kullanılan diğer enerji kaynaklarıdır. Yüksek fırınlarda gerekli sıcaklığa ulaşılabilme amacıyla kok ve yüksek hızlı sıcak havanın yanında tüyer seviyesinden kömür, yağ gazı ve diğer hidrokarbon kaynakları enjekte edilir.

Elektrik ark ocakları ve indüksiyon ocaklarında, elektrik ve doğal gaz en önemli enerji kaynaklarıdır. Ergitme sürecinde aşağıda ifade edilen bazı enerji türleri aynı anda oluşmaktadır [28]:

- Elektrik arkından kaynaklı termal enerji
- Doğal gaz veya diğer gaz ve sıvı yakıtlardan kaynaklı termal enerji
- Metalin oksitlenmesi ile ocakta oluşan ekzotermik reaksiyonlardan kaynaklı termal enerji

Çelik üretim proseslerinde ton ham çelik başına tüketilen enerji miktarları Tablo 3.3'te verilmektedir.

Tablo 3.3: Çelik üretim proseslerinde ortalama enerji tüketim miktarları.

	Elektrik	KFG	YFG	Kok	Diğer ⁽⁴⁾	Toplam Tüketim
Kok Üretimi	22,1	3054,7 ⁽¹⁾				3077,7
Sinter Üretimi	98,4	87,6 ⁽²⁾		1229,6		1416,3
Demir Üretimi	411,5	351,3	1,5	5017,7	304,9	6087,7
Çelik Üretimi	125,5	400,0	30,5	5,9	81,5	644,3
EAO	2073,5			453,9		2528,4
IF	1265,4					1265,4
Sıcak Haddeleme	381,6	1150,0 ⁽³⁾				1532,6
Soğuk Haddeleme	1587,7				900,2	2489,0

Birim: MJ/ton ham çelik

⁽¹⁾ YFG ve KFG birlikte

⁽²⁾ YFG, KFG ve doğal gaz birlikte

⁽³⁾ YFG, KFG, BOF gazı ve doğal gaz birlikte

⁽⁴⁾ Buhar, BOF gazı, yakıt vb.

Kaynak: [28], [35], [38]

İndüksiyon ocakları için, ocak boyutunun büyütülmesi enerji kayıplarını azaltmakla ve çelik üretimindeki enerji verimliliğini artırmaktadır. İndüksiyon ocaklarında çelik üretiminde tek enerji kaynağı elektriktir. Yalnızca pota ön ısıtma işlemi için doğal gaz kullanılabilir. İndüksiyon ocakları için spesifik elektrik tüketimi dünya genelinde 520-850 kWh/ton ham çelik arasında değişmektedir [34], [35]. Diğer demir-çelik üretim tesislerinde olduğu gibi, indüksiyon ocaklı tesislerde de atık gazlar ile hurdanın ön ısıtılması enerji gereksinimlerini azaltmaktadır. Enerji

tasarrufu sağlanması için şarj edilecek malzemelerin doğru şekilde sıkıştırılması, homojen ve hızlı şekilde ısıtma için önemlidir. Benzer şekilde, ergimiş çelik banyosunun aşırı ısınmasının engellenmesi veya minimize edilmesi de enerji tasarrufu sağlamaktadır. Küresel ölçekte en iyi teorik elektrik tüketimi 351,5 kWh/ton ham çelik olarak belirtilmiştir. ABD menşeli firmalarda en iyi tüketim değerleri 538,1 kWh/ton ham çelik olarak belirlenmiştir [35].

Pota ocağına elektrik enerjisinin yanı sıra pota ön ısıtma işlemi için doğal gaz kullanılmaktadır. Sürekli döküm tesisinde sıvı çeliğin bulunduğu potanın ön ısıtması için yakıt tüketimi ortalama olarak 5 Mcal/ton sıvı çelik'tir. Döküm makinelerinin elektrik tüketimi ise 10 Mcal/ton sıvı çelik'tir [28]. Isıtma ve ısı işlem fırınlarındaki enerji tüketimi ise 170 ile 1500 Mcal/ton çelik arasında değişmektedir [38].

3.3.1.3. Ham Madde Tüketimi

Çelik üretiminde ham madde olarak cevher, kömür, sinter, hurda, kireç gibi çok çeşitli girdiler kullanılmaktadır. Ülkemizde çelik üretimi, yaklaşık %68 oranında hurdadan çelik üretimine dayandığından en çok kullanılan ham madde hurda metaldir. Bunun yanı sıra entegre tesislerde kullanılan demir cevheri, sinter ve koklaşabilir kömür (kok üretiminde) yoğunlukla kullanılmaktadır [28]. Pota ocağı prosesinde (ikincil melatürji) çelikhaneden (BOF, EAO, IF) gelen sıvı ham çelik ana hammaddeyi oluşturmaktadır. Bununla birlikte çelik kalitesinin ayarlanması amacıyla çeşitli alaşımlar kullanılmaktadır. Ham çelik üretiminde kullanılan temel ham maddelerin üretim süreçlerinde, ton ham çelik başına ortalama kullanım miktarları Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4: Ham çelik üretiminde kullanılan temel ham maddelerin üretim süreçlerinde ortalama kullanım miktarları (ton/ton ham çelik).

Ham madde	Kok Üretimi	Sinter Üretimi	Demir Üretimi	Çelik Üretimi	EAO	Toplam
Kömür	1,14		0,10		0,02*	1,25
Kok		0,04	0,34	0,0002		0,38
Sinter		0,22	0,75			0,97

Tablo 3.4: Devam.

Ham madde	Kok Üretimi	Sinter Üretimi	Demir Üretimi	Çelik Üretimi	EAO	Toplam
Demir Cevheri		0,65	0,29	0,01		0,95
Sıvı Maden				0,86		0,86
Kireç taşı/Kireç/Dolomit		0,11	0,03	0,07	0,08	0,30
Hurda				0,22	1,14	1,36
Pik Demir					0,08	0,08
Sünger Demir (DRI)					0,11	0,11
Grafit Elektrot					0,004	0,00
Refrakter					0,04	0,04
Alaşımlar (karbon çeliği için)					0,03	0,03

* Antrasit ve kok toplamı

Kaynak: [28]

3.3.2. Çevresel Emisyonlar

Çevresel emisyonlar, atıksuar, atık gaz emisyonları ve katı atıklar olmak üzere üç başlık altında incelenmiştir.

3.3.2.1. Atıksular

Entegre tesislerde atıksu temel olarak kok, demir ve çelik üretimi ile haddeleme süreçlerinde oluşmaktadır. Kok üretimi esnasında atıksu oluşumunun yoğun olarak gerçekleştiği süreçler; KFG'nin temizlenmesine yönelik işlemler ve hem kömür içeriğinde yer alan ve hem de fırında kömürün termal dekompozisyonu ile oluşan nem içeriğinin atık gazda yoğunlaşmasına yönelik işlemlerdir. Kok tesisinde süreç boyunca açığa çıkan suyun önemli bir kısmı (ortalama %8-15 arası) nem içeren kömürden kaynaklanmaktadır. Buna ilaveten kömürün termal dekompozisyonu kömürün kalitesine bağlı olarak değişmektedir. Eğer atık gazların soğutulması ve çekilmesi amacıyla buhar enjeksiyon yöntemi kullanılıyorsa, tüketilen buharla orantılı olarak ilk soğutucularda tekrar kondense su oluşmaktadır. Kok üretimi sürecinde oluşan atıksu içerisinde askıda katı madde ve fenol, azotlu bileşikler, poliaromatik hidrokarbonlar (PAH) gibi çeşitli organik kimyasal bileşenleri içermektedir. Bu kirleticilerin konsantrasyonları kullanılan atık gaz işleme sistemlerinin, şarj etme yöntemlerinin ve

kömür tiplerinin farklılaşmasına bağlı olarak tesis bazında değişiklik gösterebilmektedir. Atık gaz arıtımından kaynaklanan atıksu, tesiste ancak ıslak arıtma uygulanıyorsa açığa çıkmaktadır. Bu atıksuda ağır metal ihtiva eden askıda katı madde, Poliklorlanmış dibenzo-p-dioksin ve dibenzofuran (PCDD/F), Poliklorlanmış bifeniller (PCB), PAH, sülfür bileşikleri ve klorürler bulunmaktadır. Bu atıksu, deşarj edilmeden önce arıtılmalıdır.

Sürekli döküm makinelerinden çıkan atıksu direkt soğutma sistemlerinden (makine, kütük, slab ve blumların direkt soğutulması) dolayı oluşmaktadır. Atıksuyun yapısında 1-3 g/L hadde tufali ve yağ/gres bulunmaktadır. Bu atıksu genellikle haddehaneden gelen atıksu ile birlikte arıtılır. Atıksu miktarı tesisin koşullarına ve su yönetim sistemine göre değişkenlik göstermektedir. Sürekli döküm için ihtiyaç duyulan spesifik su miktarı 5-35 m³/ton sıvı çelik'tir. Sürekli dökümden çıkan atıksu miktarı ise 2 m³/ton sıvı çelik'e kadar yükselebilmektedir [28].

Elektrik ark ocağı tesislerinde kapalı devre bir soğutma suyu çevrimi olduğu için bu kısımda atıksu oluşmamaktadır fakat atık gazın temizlenmesi ile döküm aşamasında da atıksu oluşumu mevcuttur. Bununla birlikte elektrik ark ocağı tesislerinde kullanılan hurda çeşitleri, genellikle asfaltlanmamış hurda sahalarında depolanmaktadır. Özellikle de yağ gibi maddelerle kontamine olmuş hurdalardan dolayı, drenaj suları kirlenebilmektedir. Kirlenen bu su tahliye edilmeden önce genellikle bir yağ ayırıcıda arıtılmaktadır [37].

Sıcak haddeleme prosesinde suya verilen kirlilik, yağ ve konsantrasyonu 5 ila 200 mg/L arasında değişen askıda katı maddeden oluşmaktadır. Atıksuyun hidrokarbon içeriği 0,2 ila 10 mg/L arasında değişmektedir. Atıksu arıtmadan çıkan yağlı atıksu miktarı hat tipine göre 0,4 ila 36 kg/ton arasında değişmektedir. Soğuk haddeleme sırasında asitli atıklar ve yağ içeren atıksu oluşmaktadır. Galvanizleme tesislerinde ise yağ giderme solüsyonları, asitleme ve temizleme havuzlarında atıksu oluşumu gerçekleşmektedir [38].

Çelik üretim proseslerinde ton ham çelik başına oluşan ortalama atıksu miktarları Tablo 3.5'te verilmektedir.

Tablo 3.5: Çelik üretim proseslerinde ortalama atıksu oluşum miktarları.

Proses	Atıksu oluşumu (m ³ /ton ham çelik)
Kok Üretimi	0,66
Sinter Üretimi	0,04
Demir Üretimi	5,94
Çelik Üretimi	3,15
Sıcak Haddeleme	8,05
Soğuk Haddeleme	8,05
Kaynak: [28], [38]	

3.3.2.2. Atık Gaz Emisyonları

Entegre demir ve çelik üretim aşamaları ele alındığında, kok üretimi toz ve gaz emisyonların ana kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Kok üretiminden kaynaklanan atık gazın bileşimde toz, toplam organik karbon (TOK), benzen, toluen, ksilen (BTEX), uçucu organik bileşikler (UOB), hidrojen sülfür (H₂S), SO₂, amonyak (NH₃), karbonmonoksit (CO), PAH ve cıva gibi ağır metaller bulunur. Bunların yanında söndürme aşamasında oluşan atık gaz içerisindeki temel bileşenler toz, CO, NH₃ ve H₂S'tir [28].

Sinter üretim sürecinde ham maddeler ve sinterin kırılması, elenmesi, taşınması ve depolanması sırasında toz emisyonları oluşmaktadır. Bu toz emisyonları, entegre bir demir-çelik üretim tesisi emisyonlarının yaklaşık %50'sine karşılık gelmektedir ve uygun toz tutma sistemleriyle kontrol altına alınmaktadır. Sinterleme prosesinden çıkan atık gaz; kurşun, cıva, çinko gibi ağır metal, demir birleşikleri, kurşun bileşikler gibi partiküller, alkali klorürler, kükürt oksitleri, azot oksitleri, HCl, HF, hidrokarbonlar, karbonmonoksit ile PAH, PCB ve PCDD/F gibi aromatik bileşikler de içermektedir [28].

Yüksek Fırın Sobaları, demir üretim sürecindeki NO_x emisyonlarının ana kaynağıdır. NO_x soba içerisindeki yüksek sıcaklık sonucu meydana gelmektedir. Bunun yanı sıra sobalardan toz ve SO₂ emisyonları oluşmaktadır. YFG ve küküldü giderilmemiş KFG karışımının kullanılması durumunda SO₂ emisyonlarının konsantrasyonunun arttığı görülmüştür [28].

Yüksek Fırınlarda demir üretiminde sıcak metalin dökümü sırasında metalin ve cürufun ortamdaki oksijen ile temas etmesiyle toz emisyonları meydana gelir. Bu emisyonlarının önlenmesi amacıyla döküm deliğinde toz toplama, kevgir ve sıcak

metalin torpido potasına şarjı gibi teknikler kullanılmaktadır. Suyun eriyik haldeki cüruf ile reaksiyona girmesiyle, hem buhar hem de kükürt bileşikleri (aslında CaS ve MnS) nedeniyle H₂S ve SO₂ emisyonları oluşmaktadır. Bu emisyonlar koku ve korozyon sorunlarına neden olabilmektedir [28].

Entegre tesislerde çelik üretim sürecinde gerçekleştirilen potadan potaya aktarma, kükürt giderme ve cüruf çekme işlemleri esnasında toz emisyonları açığa çıkmaktadır. Toz emisyonların etkili bir şekilde toplanması amacıyla davlumbaz ve kapalı emiş sistemleri (doghouse) kullanılmaktadır.

Çelik üretiminden kaynaklanan hava emisyonlarının temizlenmesinde ıslak yıkayıcı ya da herhangi bir toz toplama sistemi (torbalı filtreler ya da elektrostatik filtreler (ESF'ler)) kullanılabilir. Tozların etkili bir şekilde tutulup, torbalı filtrelerden geçirildiği durumda, emisyon seviyesi 10 mg/Nm³'ün altına düşmektedir (yaklaşık 1 g/ton sıvı çelik) [28].

EAO tesisleri kaynaklı toplam emisyonların yaklaşık %95'ini birincil atık gazlar oluşturmaktadır. Hurdanın hazırlanması, şarj edilmesi ve döküm alınması gibi işlemlerden kaynaklı emisyonların tamamı birincil emisyonların içerisinde değerlendirilmektedir. İkincil emisyonları ise genellikle elektrik ark ocağı kaynaklı kaçak emisyonlar oluşturmaktadır [28].

Hurda metaller genellikle büyük ve üzeri açık depolama sahalarında, çoğunlukla da asfaltsız zeminlerde depolanmaktadır. Bazı hurda türleri, kalitelerine bağlı olarak hurda sepetine alınma veya ocağa beslenme gibi çeşitli işlemler esnasında ağır metal ve hidrokarbonların zemin üzerinde birikimine neden olabilmektedir. Bu işlemler esnasında toz emisyonları ile diğer organik emisyonlar açığa çıkmaktadır [28].

EAO'larda toplanan atık gazlarda toz, ağır metal, azot, kükürt oksit ve organik maddeler (örneğin; UOB, klorürbenzoller, PCB, PAH ve PCDD/F) gibi birincil ve ikincil emisyonlar bulunmaktadır. Organik madde emisyonları hurda kalitesine bağlı olarak değişmekle birlikte bazı hurdalar boya, yağ ve diğer organik maddeleri içerebilmektedir. Özellikle toplam PCDD/F emisyonlarının minimize edilmesi için güçlü bir bina havalandırma ve tahliye sistemi kurulmalıdır. EAO prosesinden kaynaklı hava emisyonlarının torbalı filtre ve ESF'lerde arıtılması sonrası mevcut konsantrasyonlar Tablo 3.6'da verilmiştir [28].

Tablo 3.6: EAO prosesinden kaynaklı hava emisyonlarının torbalı filtre ve elektrostatik filtrelerde arıtılması sonrası mevcut konsantrasyonları.

Parametreler		Torbalı filtre	Elektrostatik filtre ¹	Birim
Toz		0,35 – 3,4	1,8	mg/Nm ³
CO		88 – 256		mg/Nm ³
NO _x		0,97 – 70		mg/Nm ³
SO _x		8 – 17		mg/Nm ³
Metaller	Hg	0,016 – 0,019		mg/Nm ³
	Toplam (Sb, Pb, Cr, CN, F, Cu, Mn, V, Se, Te, Ni, Co, Sn dahil)	0,006 – 0,022		mg/Nm ³
	Cr (Cr (VI) hariç)	0,013		
	Mn	0,036		
	Ni	0,003		
PAH		<0,00001	<0,001	mg/Nm ³
PCDD/F		0,0015 – 0,1 ²		ng/Nm ³
HF		0,085 – 0,2		mg/Nm ³
HCl		3 – 5,4		mg/Nm ³
Cl ₂		<3		mg/Nm ³

¹ Tablodaki değerler paslanmaz çelik üreten bir Alman tesisinden alınmıştır.

² Aralığın en yüksek değeri 1997 yılında yapılan ölçümlere dayanmaktadır.

Not: Değerler yıllık ortalama değerlerdir ve merkezi toz tutma sistemi verileridir.

PAH benzo(a)piren ve dibenzol-(a,h)-antrasen içerir.

Kaynak: [28]

Sıcak haddeleme sırasında özellikle fırınlardaki yüksek enerji tüketimine bağlı olarak NO_x ve SO_x emisyonları ve ürünlerin manipülasyonu sırasında veya yüzey temizlemesi sırasında ortama yayılan toz emisyonları meydana gelmektedir [38].

Soğuk haddeleme sırasında yağsızlaştırma buharı, asit ve yağ içeren buharlar, tufal giderme sırasında toz, asitleme işlemi sırasında NO_x gazı ve yakma fırınlarından çıkan emisyonlar oluşmaktadır. Soğuk haddelemedeki asit emisyonları; asitleme ve asit rejenerasyon prosesinden kaynaklanmaktadır ve kullanılan asit türüne göre değişiklik göstermektedir [38].

Çelik üretim proseslerinde oluşan hava emisyonları ve ilişkili prosesler Tablo 3.7'de özetlenmektedir.

Tablo 3.7: Proseslere göre çelik üretimi hava emisyonları.

Proses	Emisyon
Kok Üretimi	Toz, TOK, BTEX, UOB, H ₂ S, SO ₂ , NH ₃ , CO, PAH ve cıva gibi ağır metaller
Sinter Üretimi	Toz, Pb, Hg, Zn gibi ağır metal, demir birleşikleri, kurşun bileşikleri gibi partiküller, alkali klorürler, SO _x , NO _x , HCl, HF, hidrokarbonlar, CO ile PAH, PCB ve PCDD/F gibi aromatik bileşikler
Yüksek Fırın	Toz, NO _x , SO ₂ , H ₂ S
Çelik Üretimi (EAO/BOF/IF)	Toz, ağır metaller, hidrokarbonlar, CO, NO _x , SO _x ve organik maddeler (örneğin; UOB, klorürbenzoller, PCB, PAH ve PCDD/F), Mn, Ni, Cr, HF, HCl, Cl ₂
Sıcak Haddeleme	Toz, NO _x , SO _x
Soğuk Haddeleme	Toz, NO _x , asit ve yağ içeren buharlar

3.3.2.3. Katı Atıklar

Entegre demir ve çelik üretim tesisleri, üretim proseslerinden çıkan çelik harici temel çıktılar; yüksek fırın cürufu ile çeşitli çelik cürufları, amonyum sülfat, desülfürizasyon ünitesinden çıkan sülfür veya sülfürik asit, kok katranı, kok zifti, benzen, kok fırın gazı ve demir hurdası olarak sıralanabilir. Demir ve çelik üretim proseslerine bağlı olarak yüksek fırın cürufu, çelikhane cürufu veya ikincil metalurji proses cürufları gibi farklı türlerde cüruf açığa çıkmaktadır. Bu malzemelerin bazıları, diğer sektörlerde ham madde olarak kullanılabilen; ayrıca tesis içi proses optimizasyonu ile karbon ve demir taşıyan tozların iç sirkülasyonunun maksimize edilmesi ve çelik üretimine ait çeşitli atıkların minimize edilmesi sağlanabilmektedir [28], [39].

Tufal, baca gazı tozu ve cüruf, oluşum miktarları, geri kazanılabilir olmaları ve farklı kullanım alanlarına sahip olmaları bakımından demir ve çelik üretiminde öne çıkan atıklar arasındadır. Tufal, haddehanelerde, sürekli döküm tesislerinde, sıcak slab ve kütük yüzeyinin soğutulması sırasında yüksek sıcaklık (1100-1300°C) ve oksitleyici ortam nedeniyle oluşan metal oksit tabakasıdır [40]. Baca gazı tozunun başlıca kaynakları; hurda içerisindeki galvanizli kısım, demir pası, hurdayla birlikte sisteme giren minör anorganik kirlilikler, proseste kullanılan antrasit ve fırın refrakter

parçacıklarıdır. Demir ve çelik üretimi esnasında ortaya çıkan baca gazı tozunun içerdiği çinko, kurşun, krom, kadmiyum ve arsenik gibi maddelerden dolayı tehlikeli atık niteliğindedir [41], [42].

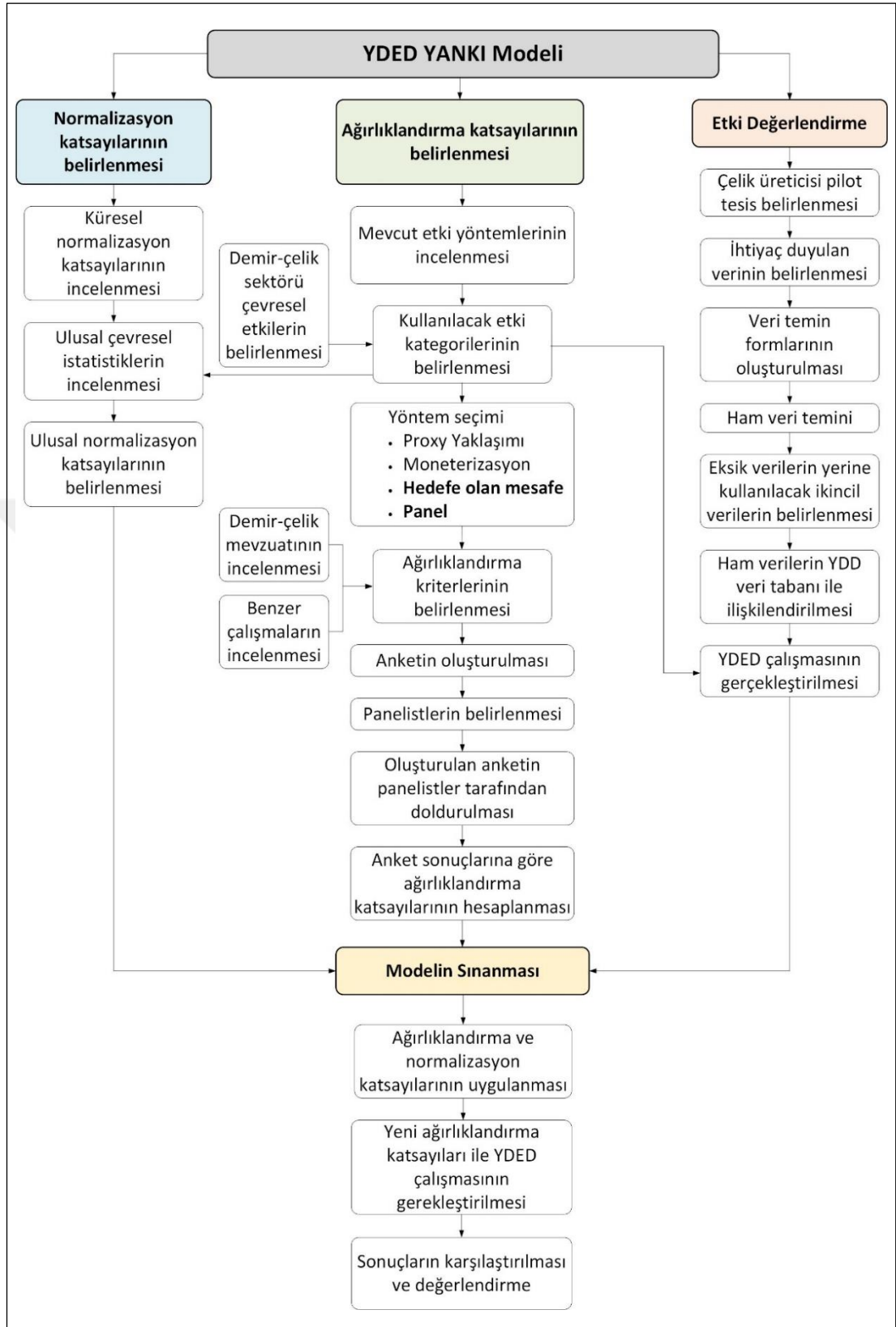
Elektrik kullanarak çelik üretimi, iki ana atık malzeme, tehlikeli elektrik ark ocağı tozu ve tehlikeli olmayan elektrik ark ocağı cürufu üretir. Ton çelik başına ağırlıkça %10–15 cüruf ve 14-20 kg EAO tozu oluşur [43]-[45]. İndüksiyon ocaklarında ise ton sıvı çelik başına 10 ila 20 kg arasında cüruf, 60 g ila 1 kg arasında baca tozu oluşumu gözlenmektedir [35]. Kullanılan yöntemden bağımsız olarak, ergimiş çeliğin üretimi sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar nedeniyle cüruf oluşur. Geleneksel yöntemlerle cüruf bertarafı, insanlar ve çevre üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Küresel olarak, cürufun sadece küçük bir kısmı geri dönüştürülmekte ve büyük bir kısmı bertaraf edilmektedir. [46]. Hurdadan çelik üretmek daha ucuz ve daha sürdürülebilir olduğundan, demir cevheri yerine birincil girdi olarak çelik hurdası tercih edilmektedir. Hurda %100 oranda geri dönüştürülebilmekte ve kalite kaybı olmadan birçok kez tekrar kullanılabilir. Sıfır atık yaklaşımına hizmet etmenin yanı sıra, hurdadan çelik üretmek, demir cevherinden üretmekten %56 daha az enerji gerektirmektedir. Bu durum, hurda kullanımını daha uygun maliyetli ve çevre dostu hale getirmektedir. Hurdadan çelik üretmek, CO₂ emisyonlarını %58 oranında azaltmakla birlikte zararlı madencilik faaliyetlerini de azaltmaktadır. Bir ton geri dönüştürülmüş çelik, bir ton demir cevheri ve yarım ton kömür tasarrufu sağlamaktadır [23].

4. YÖNTEM

Türkiye'ye özgü Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi ağırlıklandırma ve normalizasyon katsayılarının belirlenmesine yönelik oluşturulan modelde (YDED YANKI), ağırlıklandırma katsayılarının belirlenmesi, normalizasyon katsayılarının belirlenmesi, etki değerlendirme ve modelin sınanması olmak üzere dört aşama bulunmaktadır. İlk aşamada ağırlıklandırma ve normalizasyon katsayılarının belirlenmesinde uygulanabilecek karar verme yöntemleri incelenerek değerlendirilmiştir. Ağırlıklandırma katsayılarının belirlenmesinde kullanılacak anket oluşturulmuş, bu amaçla 9 adet kriter belirlenmiş ve puanlama cetveli oluşturulmuştur. Hem kriterlerin hem de etki kategorilerinin ağırlıklandırması için hesaplama yöntemleri tanımlanmıştır. Anketlerin gönderileceği panelistler belirlenmiştir. 17 panelistle gerçekleştirilen anket çalışması sonuçlarına göre ağırlıklandırma katsayıları belirlenmiştir. İkinci aşamada ise ulusal istatistikler, raporlar ve uluslararası kuruluşlara sağlanan veriler incelenmiş ve normalizasyon katsayıları hesaplanmıştır. Etki değerlendirme aşamasında, bir indüksiyon ocağı (IF) tesisinde üretilen 1 kg ham çelik ile elektrik ark ocağı (EAO) tesisinde üretilen 1 kg ham çelik, YDD yaklaşımı kullanılarak çevresel etki açısından karşılaştırılmıştır. Modelin sınanması sonucunda, yerel ve Avrupa katsayıları ile hesaplanan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

4.1. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi Yerel Ağırlıklandırma ve Normalizasyon Katsayıları (YDED YANKI) Modeli Adımlarının Tanımlanması

Türkiye'ye özgü Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi yerel ağırlıklandırma ve normalizasyon katsayılarının belirlenmesine yönelik modelde (YDED YANKI) 4 aşama bulunmaktadır. Oluşturulan YANKI modeli için tanımlanmış detaylı adımlar Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: YDED YANKI modeli adımları.

İlk üç aşama (normalizasyon katsayılarının belirlenmesi, ağırlıklandırma katsayılarının belirlenmesi ve etki değerlendireme) birbirinden bağımsız olarak

ilerlemekte, ağırlıklandırma katsayılarının belirlenmesi aşamasında yer alan, “kullanılacak etki kategorilerinin belirlenmesi” adımıyla birbirleriyle etkileşim göstermektedir. Söz konusu bu adım normalizasyon katsayılarının belirlenmesi ve etki değerlendirme adımlarına girdi oluşturmaktadır. Her üç aşama tamamlandıktan sonra gerçekleştirilen 4. aşama, modelin sınanmasıdır. Bu aşamada, belirlenen ağırlıklandırma ve normalizasyon katsayıları ile mevcutta yayınlanmış olan küresel ağırlıklandırma ve normalizasyon katsayıları kullanılarak gerçekleştirilen YDED sonuçları karşılaştırılarak değerlendirilmektedir. Model adımları bu bölümde detaylı olarak anlatılmaktadır.

4.2. Ulusal Ağırlıklandırma Katsayılarının Belirlenmesi

Ulusal ağırlıklandırma katsayılarının belirlenmesi amacıyla Şekil 4.1’de bahsi geçen model adımları uygulanmıştır. Öncelikle Mevcut etki yöntemleri incelenmiş ve kullanılacak etki kategorileri belirlenmiştir. Ağırlıklandırma yönteminin ve kriterlerinin belirlenmesinin ardından "Kriter Değerlendirme" ve "Değişime Direnç" olmak üzere iki bölümden oluşan bir anket hazırlanmış ve belirlenen panelistler tarafından doldurulması sağlanmıştır. Ulusal ağırlıklandırma katsayıları anket sonuçlarına göre hesaplanmıştır.

4.2.1. Mevcut Etki Yöntemlerinin İncelenmesi

Etki değerlendirmesinin sağlıklı yapılabilmesi amacıyla faaliyetlerin çevreye olan etkileri farklı kategoriler altında incelenmektedir. Bu kategorilerden en yaygın olanları ile bunların etki alanları Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Yaşam döngüsü etki kategorileri ve etki alanları.

	Küresel	Bölgesel	Yerel
Su Kullanımı		x	x
Küresel Isınma	x		
Abiyotik Kaynakların Tükenmesi	x	x	x
Arazi Kullanımı	x	x	x
Asidifikasyon		x	x
Ekolojik Zehirlilik			x

Tablo 4.1: Devam.

	Küresel	Bölgesel	Yerel
İnsan Zehirlenmesi	x	x	x
Ötrofikasyon			x
Ozon Tabakası İncelmesi Potansiyeli	x		
Fotokimyasal Sis			x
Solunabilir İnorganikler			x
İyonlaştırıcı Radyasyon*			x

Kaynak: [5]

*Yararlanılan kaynakta yer almamaktadır.

4.2.1.1. Etki Yöntemlerinin Karşılaştırması

Tablo 4.2’de başlıca etki yöntemleri, içerdikleri etki kategorileri bakımından karşılaştırılmaktadır. YDED çalışmalarında kullanılan tüm yöntemler bu karşılaştırmada yer almamakla, yaygın kullanılan yöntemler listelenmektedir [16].

Tablo 4.2: Etki yöntemlerinin etki kategorileri bakımından karşılaştırması.

	İklim değişikliği	Ozon tabakası incelmesi	Solunabilir inorganikler	İnsan zehirlenmesi ¹	İyonlaştırıcı radyasyon	Ekolojik zehirlilik ³	Ozon oluşumu ⁴	Asidifikasyon	Karasal ötrofikasyon	Sucul ötrofikasyon	Arazi kullanımı	Kaynak tüketimi ⁵	Su Tüketimi
CML 2002	u	u		O	u ²	u	O	O	O	O	u	O	
Eco-indicator 99	S	S	S	u	u		S	S	S		S	S	
EDIP2003 /EDIP97 ⁶	u	O	u	O	u	O	O	O	O	O		O	
EPS 2000	S	S	S	S	u	S	S	u	u	u	S	S	
Impact 2002+	u	u	S	O S	u	O S	S	O S		O S	u	S	
LIME	S	S	O	S		u	O S	O S	u	S	S	S	
LUCAS	u	u		u		u	u	u	u	u	u	u	
MEEuP	u	u	O	O		O	O	O	O	O		Su	
ReCiPe	O S	O S	O S	O S	u	O S	O S	O S	u	O S	O S	O S	O S
Swiss Ecoscarcity07	u	u	u	u	O S	O	u	u	u	u	O S	Su	
TRACI	u	u	O	O		O	O	O	u	O		u	

1. Kanser ve kanser olmayan etkiler bazı durumlarda ayrı değerlendirilmiştir.

2. Çalışmaya özel isteğe bağlı etki kategorisi

3. Kara, deniz ve tatlı ekosistemleri bazı durumlarda ayrı değerlendirilmiştir.

4. İnsan sağlığı ve karasal ekosistemler bazı durumlarda ayrı değerlendirilmiştir.

5. Fosil ve mineral kaynak tüketimleri bazı durumlarda ayrı değerlendirilmiştir.

6. EDIP97 kaynaklar, EDIP2003 diğer etki kategorileri için

u: Yöntem içerisinde uygulanabilir, fakat ayrıntılı bilgi mevcut değil.

O: Orta nokta modeli uygulanabilir.

S: Son nokta modeli uygulanabilir.

Kaynak: (EC-JRC-IES, 2010b; Goedkoop, ve diğerleri, 2013)

Yukarıdaki bilgiler ışığında, diğer yöntemlere nazaran hem orta hem son nokta modelinin uygulanabildiği etki kategori sayısının daha fazla olması nedeniyle ReCiPe yöntemi bu çalışma kapsamında kullanılacak etki yöntemi olarak seçilmiştir. ReCiPe yaşam döngüsü etki kategorilerinin göstergelerinin hesaplanabilmesi için birçok enstitünün (Hollanda Ulusal Halk Sağlığı ve Çevre Enstitüsü, Radboud Üniversitesi, Leiden Üniversitesi Endüstriyel Ekoloji Bölümü ve PRé Sustainability) işbirliğinde geliştirilmiştir.

4.2.1.2. Kullanılacak Etki Kategorilerinin Belirlenmesi

Temel alınacak YDED yönteminin seçilmesi amacıyla Bölüm 3.3'te anlatılan demir-çelik sektöründe kaynak kullanımı ve oluşan çevresel etkiler incelenmiş, dikkate alınacak etki kategorileri buna göre belirlenmiştir. Oluşturulacak etki değerlendirme modelinde kullanılmak üzere 12 adet etki kategorisi seçilmiştir. Bunlar;

- Abiyotik Kaynak Tükenmesi
- Asidifikasyon
- Ötrofikasyon
- Ekolojik Zehirlilik
- Küresel Isınma
- İnsan Zehirlenmesi
- İyonlaştırıcı Radyasyon
- Arazi Kullanımı
- İnce Partikül Madde Oluşumu
- Ozon Tabakasında İncelme
- Fotokimyasal Sis Oluşumu
- Su Tüketimi

Etki kategorilerini belirlerken Atık yönetimi yönetmeliği, Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği ve Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği; ayrıca Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrolü (EKÖK) Yönetmeliği taslağı incelenmiştir. Atık yönetimi

yönetmeliği, atık oluşumunun azaltılması, atıkların yeniden kullanımı, geri dönüşümü, geri kazanımı gibi yollar ile doğal kaynak kullanımının azaltılması ve atık yönetiminin sağlanmasına dair usul ve esasları tanımlamaktadır. Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'nde, sanayi ve enerji üretim tesislerinin faaliyeti sonucu atmosfere yayılan is, duman, toz, gaz, buhar ve aerosol halindeki emisyonların kontrol altına alınmasına ve hava kirlenmeleri sebebiyle çevrede ortaya çıkan olumsuz etkilerin giderilmesine ve bu etkilerin ortaya çıkmasının engellenmesine yönelik usul ve esasları belirlenmiştir. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği ise, Ülkenin yeraltı ve yerüstü su kaynakları potansiyelinin korunması ve en iyi bir biçimde kullanımının sağlanması için, su kirlenmesinin önlenmesi için gerekli olan hukuki ve teknik esasları tanımlamaktadır. EKÖK çevrenin bütüncül olarak korunması için hava, su ve toprak kirliliğine yönelik sanayi kaynaklı emisyonları önlemek veya önlenemediği durumlarda azaltmak ve atık oluşumunu en aza indirmek için entegre kirlilik önleme ve kontrol sistemi oluşturmaya yönelik usul ve esasları düzenlemektedir Tüm bu yönetmeliklerin incelenmesi sonucunda eklenmesi gerekli farklı bir kategoriye ait bir parametreye rastlanmamıştır.

4.2.1.2.1. Küresel Isınma

Küresel ısınma, sera gazlarının atmosfere salımı sonucu oluşan sera etkisinin neden olduğu küresel sıcaklıktaki değişim olarak tanımlanmaktadır. Sera gazı emisyonlarındaki artışın iklim üzerinde kayda değer bir etkisi olduğu konusunda bilimsel bir fikir birliği mevcuttur. Bir sera gazı emisyonu, ışımsal zorlama kapasitesini (W/m^2) artıracak ve bu da küresel ortalama sıcaklıkta ($^{\circ}C$) bir artışa yol açacaktır. Küresel sıcaklık artışının iklimsel bozulmaya, çölleşmeye, deniz seviyelerinin yükselmesine ve hastalıkların yayılmasına neden olacağı tahmin edilmektedir. Küresel Isınma Potansiyeli (KIP) farklı sera gazlarının küresel ısınma potansiyelini karşılaştırmak amacıyla ortaya konmuş bir göstergedir ve 1 ton gaz emisyonunun belirli bir zaman aralığında, 1 ton CO_2 emisyonuna bağlı olarak ne kadar enerji absorplayacağını ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. KIP, en yaygını 100 yıl (GWP100) olmak üzere, farklı zaman dilimlerinde ifade edilmektedir. İklim değişikliği sonucunda

hastalık (yetersiz beslenme, sıtma ve ishal) ve sel risklerinin artması insan sağığına verilen zarar olarak değeriendirilmektedir [47]-[49].

4.2.1.2.2. Abiyotik Kaynak Tükenmesi

Abiyotik kaynak tükenmesi başlığı altında dikkate alınması gereken birçok farklı alt etki bulunmaktadır. Genel olarak bu etki kategorisi, fosil yakıtlar, mineraller, metaller, su vb. biyolojik olmayan kaynakların tüketimine dikkat çekmektedir. Bir maddenin (örneğin, linyit ya da kömür) abiyotik kaynak tükenmesinin değeri maddenin kıtlığının ölçüsüdür. Bu değeri, kaynak miktarına ve kaynağın çıkarılma oranına bağılıdır. Mineral ve fosil kaynak tükenmesi olarak iki başlık altında incelenmektedir [47].

4.2.1.2.3. Asidifikasyon

Asidik gazlar atmosferde su ile reaksiyona girerek asit yağmuru oluşturmaktadır. Bu işleme asit biriktirme olarak adlandırılmaktadır. Amonyak (NH_3), azot oksitler (NO_x) ve kükürt oksitler (SO_x) gibi asidik gazların atmosferde birikmesi, toprakta asitliğin değışmesine neden olur. Hemen hemen tüm bitki türleri için tanımlanan optimum asitlik seviyesinden ciddi bir sapma olması, söz konusu tür için zararlıdır ve asidifikasyon olarak adlandırılmaktadır [47], [48].

4.2.1.2.4. Ötrofikasyon

Ötrofikasyon, bir ekosistemde olağan dışı büyümeye yol açan fosfor ve nitrojen gibi besin maddelerinin birikmesidir. Bu durum sucul ortamlarda algler başta olmak üzere bitkilerde aşırı büyümeye, su kalitesinin ve suda yaşayan hayvan popülasyonunun azalmasına neden olmaktadır. Tatlı su ötrofikasyonu, besinlerin toprağı veya tatlı su kütlelerine boşaltılması nedeniyle oluşur. Amonyak, nitrat, azot oksit ve fosforlu bileşiklerin havaya veya suya olan emisyonlarının ötrofikasyon üzerinde etkisi bulunmaktadır [47], [48].

4.2.1.2.5. Ekolojik Zehirlilik

Ekolojik zehirlilik, tatlı su, deniz ve karasal ekosistemleri inceleyen üç ayrı etki kategorisi olarak ölçülmektedir. Ağır metaller gibi bazı maddelerin emisyonlarının ekosistem üzerinde etkileri olmaktadır. Zehirliliğin (toksisite) değerlendirilmesi, ekosistemler için sudaki göz yumulabilir maksimum konsantrasyona dayanmaktadır. Ekolojik zehirlilik potansiyelleri, AB'nin toksisite modeli olan EUSES'e dayanan USES-LCA ile hesaplanmaktadır [47].

4.2.1.2.6. Arazi Kullanımı

Arazi kullanımı süreci üç aşama olarak değerlendirilmektedir. İlk olarak, dönüşüm aşamasında arazi yeni işlevine uygun hale (örn. orijinal bitki örtüsünü kaldırarak) getirilir. İkinci olarak, işgal aşamasında arazi belirli bir süre kullanılmaktadır. Son olarak, arazi artık kullanılmadığında, arazinin (yarı) doğal duruma dönmesine izin verilen bir dinlenme aşaması vardır. Dinlenme döneminde, arazinin, hemen birincil habitata döndürülmediği veya orijinal habitata değil, farklı bir duruma geri döndürüleceği göz önüne alındığında, tür zenginliği üzerinde (bazı) olumsuz etkilerinin olduğu varsayılmaktadır [50].

4.2.1.2.7. Su Tüketimi

Su, dünyanın birçok bölgesinde kıt olarak nitelendirilebilecek bir kaynaktır. Aynı zamanda diğer bölgelerde bol miktarda bulunabilmektedir. Diğer kaynakların aksine, suyun büyük mesafeler kat ederek bir bölgeden diğerine taşınması çok yüksek maliyetler gerektirdiği için mümkün değildir. Su tüketimi, suyun ürünlere katılarak, diğer havzalara aktararak, denize bırakılarak veya buharlaştırılarak kullanılmasıdır. İnsanlar için, tatlı su mevcudiyetindeki azalma, farklı su kullanımları arasında rekabete yol açar ve azalan sulama miktarı nedeniyle mahsul üretiminin azalmasına yol açar. Sonuç olarak, yerel nüfus arasında yetersiz beslenmenin artmasına neden olur [48].

4.2.1.2.8. Ozon Tabakasında İncelme

Ozon tüketen kimyasallar (CFCler, halonlar ve HCFCler) yapılarında klor ve brom grupları içeren oldukça kararlı maddelerdir. Bu kararlı yapı, bu kimyasalların stratosfere kadar ulaşabilmesine ve buradaki ozona etki ederek ozon tabakasını inceltmesine olanak sağlamaktadır. Ozon tabakasında incelme; bu tabakanın morötesi (UV) ışığın dünya atmosferine girmesini engelleme kabiliyetini azaltmakta, daha fazla kansere neden olan UVB ışığının dünya yüzeyine ulaşmasına neden olmaktadır. Artan bu radyasyon insan sağlığını olumsuz etkilemekte, cilt kanseri ve katarakt görülme sıklığını artırmaktadır [47], [51].

4.2.1.2.9. İnsan Zehirlenmesi

İnsan zehirlenmesi potansiyeli, çevreye salınan bir birim kimyasalın potansiyel hasar etkisini yansıtan hesaplanmış bir göstergedir. Bu kimyasallar genellikle arsenik, sodyum dikromat ve hidrojen florürdür ve bunların büyük bölümü fosil yakıtlardan elektrik üretiminden kaynaklanmaktadır. Kanerojen ve kanserojen olmayan olarak iki kategoride incelenmektedir. Avrupa Komisyonu Politika Bilgi Sözlüğü'nde İnsan zehirlenmesi (kansorejen olmayan), *“Havanın solunmasıyla, gıdanın/suyun yutulmasıyla, vücuda deri yoluyla nüfuz ederek zehirli maddelerin, partikül madde/solunum inorganikleri veya iyonlaştırıcı radyasyonun neden olmadığı kanser dışı etkilerle ilgili oldukları sürece, alınmasının insanlar üzerindeki olumsuz sağlık etkilerini açıklayan etki kategorisi”* olarak tanımlanmıştır. [47], [52], [53].

4.2.1.2.10. İyonlaştırıcı Radyasyon

İyonlaştırıcı radyasyon radyoaktif çekirdeklerin, bir ürün ya da yapının yaşam döngüsü boyunca salınmasına bağlı olarak insan sağlığına ve ekosisteme zarar vermesi ile ilgili olan etki kategorisidir. Antropojenik radyonüklid emisyonları nükleer yakıt döngüsünde (madencilik, işleme ve atık bertarafı) oluşabildiği gibi, kömürün yanması ve fosfat kayasının çıkarılması gibi diğer insan aktivitelerinde de oluşabilmektedir. İyonlaştırıcı radyasyon çeşitleri α -, β -, γ -ışınları ve nötronlardır.

Bu ışımlar DNA-moleküllerine zarar verebilmektedir. Elektrik üretiminde kullanılan nükleer güç bu etkiye sebep olabilmektedir [47], [54].

4.2.1.2.11. Fotokimyasal Sis Oluşumu

Stratosferde koruyucu olan ozon, yer seviyesinde yüksek konsantrasyonlarda insanlar için zararlıdır. Ozon solunum yollarının yanmasına ve akciğerlerin zarar görmesine neden olabilmektedir. İlaveten ozonun bitkiler üzerinde de, büyümenin ve tohum üretimin azalması, yaprak yaşlanmasının hızlanması ve stres katsayılarına dayanma yeteneğinin azalması gibi olumsuz etkileri olabilmektedir. Fotokimyasal sis oluşumu uçucu organik bileşikler ve azot oksitlerin ısı ve güneş ışığı varlığında reaksiyona girerek yer seviyesinde ozon oluşturmaya ile gerçekleşmektedir. Bu etki kategorisi büyük oranda karbonmonoksit, kükürt dioksit, azot oksit, amonyak ve NMVOC miktarına bağlıdır [47], [55].

4.2.1.2.12. İnce Partikül Madde Oluşumu

Atmosferde birincil ve ikincil aerosollere neden olan hava kirliliği, solunum semptomlarından hastaneye yatışlara ve ölüme kadar insan sağlığı üzerinde önemli olumsuz etkilere sahip olabilir. Çapı 2,5 µm'den (PM_{2,5}) küçük olan İnce Partikül Madde, organik ve inorganik maddelerin kompleks bir karışımını temsil eder. Kronik PM_{2,5} maruziyeti ölüm gibi ciddi etkilere sebep olabilmektedir. İkincil PM_{2,5} aerosolleri, havada, yaygın olarak kükürt dioksit (SO₂), amonyak (NH₃) ve nitrojen oksit (NO_x) emisyonları tarafından oluşturulur [47], [56], [57].

4.2.2. Ağırlıklandırma Yönteminin ve Kriterlerinin Belirlenmesi

Ulusal ağırlıklandırma katsayılarının belirlenmesi için Bölüm 2.5.2'de bahsi geçen yöntemlerden hangisinin kullanılacağına karar vermek amacıyla farklı çalışmalar incelenmiştir [17], [20], [58]. Bu çalışmada Türkiye'ye özgü YDED ağırlıklandırma katsayılarının belirlenmesi amacıyla, "Hedefe uzaklık" ve "Panel yaklaşımı" yöntemleri birlikte kullanılmıştır.

Sonuç olarak ulusal ağırlıklandırma katsayılarının belirlenmesi için her etki kategorisinin panelistler tarafından değerlendirilmesi amacıyla beşi çevresel sonuçları (insan sağlığı, deniz, tatlı su ve kara ekosistem sağlıkları ve doğal kaynaklar) ve dördü çevresel sonuçların derecelerini (coğrafi ölçek, etki süresi, tersinirlik, hedefe uzaklık) temsil eden 9 kriter belirlenmiştir. Bu kriterler aşağıdaki (Tablo 4.3) gibi kodlanmıştır.

Tablo 4.3: Belirlenen kriterler ve açıklamaları.

Kriterler		
K1	İnsan Sağlığı	Bu kriter ölüm ve insan hastalıklarını kapsamaktadır. Sağlık üzerindeki etkisi ne kadar şiddetli olursa, etki kategorisi o kadar önemli olur.
K2	Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	Deniz ekosistemindeki biyoçeşitlilik üzerindeki olumsuz etkiyi ifade etmektedir. Ekosistem dengesindeki türlerin azalması veya kaybolmasını kapsamaktadır. Biyoçeşitlilik üzerindeki etkisi ne kadar şiddetli olursa, etki kategorisi o kadar önemli olur.
K3	Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)	Tatlı su ekosistemindeki biyoçeşitlilik üzerindeki olumsuz etkiyi ifade etmektedir. Ekosistem dengesindeki türlerin azalması veya kaybolmasını kapsamaktadır. Biyoçeşitlilik üzerindeki etkisi ne kadar şiddetli olursa, etki kategorisi o kadar önemli olur.
K4	Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)	Karasal ekosistemdeki biyoçeşitlilik üzerindeki olumsuz etkiyi ifade etmektedir. Ekosistem dengesindeki türlerin azalması veya kaybolmasını kapsamaktadır. Biyoçeşitlilik üzerindeki etkisi ne kadar şiddetli olursa, etki kategorisi o kadar önemli olur.
K5	Doğal Kaynaklar	Bu kriter, ham maddenin doğal rezervlerindeki azalma ile ilgilidir. Bulunabilirlik üzerindeki etkisi ne kadar şiddetli olursa, etki kategorisi o kadar önemli olur.
K6	Coğrafi Ölçek	Bir faaliyetin çevre üzerindeki etkisi, gözlemlendiği coğrafi bölge ile bağlantılıdır. Etkiye katkıda bulunan diğer değişkenler sabit kaldığından, bölge sınırları ne kadar belirli olursa, yüksek hasar olasılığı o kadar fazla olur.

Tablo 4.3: Devam.

Kriterler		
K7	Etki Süresi	Bu kriter, oluşan etkinin ne kadar sürdüğü ile ilişkilidir. Bir faaliyet ne kadar uzun sürerse çevre üzerindeki etkisi o kadar önemli olur.
K8	Tersinirlik	Bu kriterde, değerlerin normal sınırları aştığı varsayımsal bir durumda, oluşan etkinin tersine çevrilebilirliğinin (yapay veya doğal) olasılığı ve zorluğu hesaba katılmalıdır. Burada amaç, bu etki kategorisi için sonuç değerinin tersine çevrilebilirliğini değerlendirmek değildir.
K9	Hedefe uzaklık	Bu kriter, etki kategorisinin referans ölçeği içindeki büyüklüğü olarak görülmelidir. Hedefe uzaklık, bir etki kategorisinin kendi içindeki durumunu veya bu etki kategorisi için bir hedef sınırına göre şiddet (katkı) seviyesini değerlendirir. Hedefe uzaklık değeri ne kadar büyük olursa, çevresel etki azaltılması gereksinimi o kadar büyük olur (etkiye katkıda bulunan diğer tüm değişkenler sabit kaldığı durumda). Bu kriter değerlendirilirken, Türkiye için geçerli olan referans sınırlar göz önünde bulundurulmalıdır.

Kaynak: [17]

Tatlı su, deniz ve kara ekosistem sağlığı kriterleri, seçilen etki yönteminde bu ayrımın bulunması nedeniyle çalışmaya eklenmiştir. Referans alınan çalışmada [17] yer almayan bu kriterlerin dikkate alınarak bir değerlendirme yapılması etki kategorilerinin farklı ekosistemler için ağırlıklandırma katsayısının hesaplanmasına da olanak sağlamıştır.

Kriterlerin değerlendirilebilmesi amacıyla, her bir kriter için altı farklı derece tanımlanmıştır (Tablo 4.4). 100 puanlık değerlendirme skalasında, belirsizliği de dikkate alabilmek amacıyla, her derece için bir aralık tanımlanmıştır. Panelistlerin görüşlerinin kesinliğine ise yüksek, orta ve düşük olmak üzere üç farklı değer atanmıştır. Referans alınan çalışmadan [17] farklı olarak çevresel sonuçların derecesinin ortalamanın altında olduğu durumlar için kesinlik ve ağırlık arasında ters orantı ilişkisi olduğu değerlendirilerek yüksek kesinlik derecesinde en düşük puan düşük kesinlik derecesine ise en yüksek puan tanımlanmıştır.

Tablo 4.4: Seçilen Dokuz kriter için etki değerlendirme dereceleri ve kesinlik seviyeleri.

Kriter i Çevresel sonuçlar	Çevresel sonuçların dereceleri				Değerlen- dirme puanı	Kesinlik		
	K6	K7	K8	K9		Yüksek	Orta	Düşük
K1, K2, K3, K4, K5								
Çok yüksek etki	Global	Çok uzun vadeli	Geri döndürülemez	Çok büyük	100 - 81	100	90	81
Oldukça yüksek etki	Kıta	Uzun vadeli	Yalnızca yapay (kısmi)	Büyük	80 - 61	80	70	61
Hafif etki	Ulusal	Orta vadeli	Yalnızca yapay (tam)	Aynı seviyede	60 - 41	60	50	41
Düşük etki	Bölgesel	Kısa vadeli	Doğal (kısmi)	Küçük	40 - 21	21	30	40
Neredeyse algılanamaz	Yerel	Çok kısa vadeli	Doğal (tam)	Çok küçük	20 - 1	1	10	20
Yok	Noktasal	Anlık	Doğal anlık	Sonsuz derecede küçük	0 - 1	0	1	1

4.2.3. Anketin Oluşturulması

Bölüm 4.2.2’de yer alan kriter ve dereceler kullanılarak etki kategorileri için anket oluşturulmuştur. Seçilen yöntem uygun olarak "Kriter Değerlendirme" ve "Değişime Direnç" olmak üzere iki bölümden oluşan bir anket hazırlanmıştır. Şekil 4.2’de anketteki etki kategorilerinden biri için oluşturulan form verilmiştir. Tatlı su, deniz ve kara ekosistem sağlığı kriterlerinin eklenmesi, ankette bulunması gerekli soru sayısını arttırmıştır. Panelistler için fazla soru sayısı olumsuzluğunu ortadan kaldırmak için anket MS Excel dokümanı olarak hazırlanmış ve değerlendirme seviyesi ve kesinlik listeden seçildiğinde puanın ilgili hücreye yazılması sağlanmıştır.

Abiyotik Kaynak Tükenmesi			
Abiyotik kaynak tükenmesi başlığı altında dikkate alınması gereken birçok farklı alt etki bulunmaktadır. Genel olarak bu etki kategorisi, fosil yakıtlar, mineraller, metaller, su vb. biyolojik olmayan kaynakların tüketimine dikkat çekmektedir. Bir maddenin (örneğin, linyit ya da kömür) abiyotik kaynak tükenmesinin değeri maddenin kütlesinin ölçüsüdür. Bu değer, kaynak miktarına ve kaynağın çıkarılma oranına bağlıdır.			
Kriterler	Değerlendirme Seviyesi	Kesinlik	Puan
İnsan Sağlığı	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Doğal Kaynaklar	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Coğrafi Ölçek	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Etki Süresi	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Tersinirlik	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Hedef uzaklık	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz

Şekil 4.2: Abiyotik Kaynak Tükenmesi Etki Kategorisi için örnek anket formu.

Aynı yapıda formlar, 12 etki kategorisi için de oluşturulmuştur. Panelistlere kriter değerlendirme amacıyla toplam 108 soru yöneltilmiştir.

Kriterlerin kendi arasında ağırlıklarının belirlenebilmesi için değişime direnç yöntemi kullanılmıştır. Değişime direnç yöntemini uygulamak için öncelikle, karar çalışmasıyla ilgili olduğu düşünülen kriterlerin sıralanmıştır. Ardından, her bir kriter için istenen seviye ve istenmeyen seviye olmak üzere iki limit veya referans kutup tanımlanmıştır [17]. Bu yöntemde kriterlerin ağırlığının belirlenmesi için panelistlerden ikili karşılaştırma yoluyla olumsuz yönde değişmesi istenmeyen kriterin seçmeleri beklenmiştir. Belirlenen referans kutupları Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5: Kriter ağırlığının belirlenmesi için değişime direnç referans kutupları.

			İstenen	İstenmeyen
Çevresel sonuçlar	K1	İnsan Sağlığı	İnsan sağlığı açısından algılanamaz.	İnsanlara ciddi zarar verir.
	K2	Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	Deniz ekosistemi sağlığı açısından algılanamaz.	Deniz ekosistemine ciddi zarar verir.
	K3	Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)	Tatlı su ekosistemi sağlığı açısından algılanamaz.	Tatlı su ekosistemine ciddi zarar verir.

Tablo 4.5: Devam.

			İstenen	İstenmeyen
Çevresel sonuçlar	K4	Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)	Kara ekosistemi sağlığı açısından algılanamaz.	Kara ekosistemine ciddi zarar verir.
	K5	Doğal Kaynaklar	Doğal kaynakların bulunabilirliğine etkisi algılanamaz.	Doğal kaynakların bulunabilirliğine ciddi zarar verir.
Çevresel sonuçların dereceleri	K6	Coğrafi Ölçek	Etki, faaliyetin bulunduğu yer ile sınırlıdır.	Etki, bütün gezegene yayılır.
	K7	Etki Süresi	Etki süresi çok kısadır (anlık).	Etki süresi sınırsızdır (kalıcı).
	K8	Tersinirlik	Etki doğal veya kolaylıkla tersine çevrilebilir.	Etki tersine çevrilemez.
	K9	Hedef uzaklık	Etki, referans sınırdan çok küçüktür.	Etki referans sınırdan çok büyüktür.

Kriterler (limitlerine göre) kare matriste ikili olarak karşılaştırılmıştır. Her bir çift için, her iki kriterin referansı bilinerek, karar vericinin istenen kutuptan en az tercih edilen kutba geçişe karşı direnci değerlendirilmiştir. Karşılaştırma, karar verici için iki değişiklikten hangisinin en istenmeyen olduğunu belirterek tamamlanmıştır [17].

Kriterlerin kendi içlerindeki ağırlıklarını belirleyebilmek için panelistlere, Şekil 4.3'te gösterilen ve ikili karşılaştırma için hazırlanan form sunulmuştur. Panelistlerden, şekilde yer alan çevresel sonuç çiftleri arasından, Tablo 4.5'te belirtilen istenmeyen tarafa doğru değiştirmeleri gerekseydi değiştirmeye diğerinden daha az istekli olacakları seçeneği işaretlemeleri talep edilmiştir. Örneğin; insan sağlığı-ekosistem sağlığı (deniz ekosistemi) çiftinden, istenmeyen yönde değiştirmeye istekli olunan ekosistem sağlığı ise insan sağlığının değişmemesinin tercih edildiğini "A'nın değişmemesini tercih ederim" sütunu; insan sağlığı ise ekosistem sağlığı (deniz ekosistemi)'nin değişmemesinin tercih edildiğini "B'nin değişmemesini tercih ederim" sütunu işaretlenerek belirtmişlerdir. Eğer karşılaştırılan çiftlerden birinin diğerinden bağımsız olarak değişmeyeceği düşünülüyorsa "Bağımsız değişim mümkün değildir" sütunu, her ikisi için de değişimin istenmeyeceği düşünülüyorsa "Her ikisi için de değişim, eşit derecede istenmez" sütununu işaretlemişlerdir. Bahsi geçen son iki seçenek işaretlendiği takdirde ağırlıklandırmaya katkısı sıfır olarak tanımlanmıştır.

Yukarıda bahsi geçen bölümleri içeren anket kolay doldurulabilirliği önceleyecek şekilde hazırlanarak, panelistlerin diledikleri seçeneği listeden seçmeleri sağlanmıştır. Anketin nasıl doldurulması gerektiğine ilişkin açıklayıcı metinler de ankete yerleştirilmiştir. Anlaşılabilir ve kolay uygulanabilir olup olmadığının test edilebilmesi amacıyla anket, panelistlere gönderilmeden önce farklı disiplinlerden kişilere iletilerek doldurulması ve anlaşılmayan hususlar hakkında görüş verilmesi talep edilmiştir. Anket, gelen görüşler doğrultusunda güncellendikten sonra panelistlere iletilmiştir. Oluşturulan anketin tamamı EK B’de sunulmuştur.



A		A'nın değişmemesini tercih ederim	Bağımsız değişim mümkün değildir	Her ikisi için de değişim, eşit derecede istenmez	B'nin değişmemesini tercih ederim	B
Çevresel sonuçlar	K1 İnsan Sağlığı	☐	☐	☐	☐	K2 Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)
	K2 Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	☐	☐	☐	☐	K3 Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)
	K3 Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)	☐	☐	☐	☐	K4 Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)
	K4 Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)	☐	☐	☐	☐	K5 Doğal Kaynaklar
	K5 Doğal Kaynaklar	☐	☐	☐	☐	K1 İnsan Sağlığı
	K1 İnsan Sağlığı	☐	☐	☐	☐	K3 Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)
	K2 Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	☐	☐	☐	☐	K4 Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)
	K3 Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)	☐	☐	☐	☐	K5 Doğal Kaynaklar
	K1 İnsan Sağlığı	☐	☐	☐	☐	K4 Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)
	K2 Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	☐	☐	☐	☐	K5 Doğal Kaynaklar
Çevresel sonuçların dereceleri	K6 Coğrafi Ölçek	☐	☐	☐	☐	K7 Etki Süresi
	K7 Etki Süresi	☐	☐	☐	☐	K8 Tersinirlik
	K8 Tersinirlik	☐	☐	☐	☐	K9 Hedefe uzaklık
	K9 Hedefe uzaklık	☐	☐	☐	☐	K6 Coğrafi Ölçek
	K6 Coğrafi Ölçek	☐	☐	☐	☐	K8 Tersinirlik
	K7 Etki Süresi	☐	☐	☐	☐	K9 Hedefe uzaklık

Şekil 4.3: Değişime direnç yöntemi için oluşturulan anket formu.

4.2.4. Panelistlerin Belirlenmesi

Panel Yaklaşımı için panelistler belirlenirken hem farklı kurum çalışanları olmaları hem uzmanlık alanları dikkate alınmıştır. Bu nedenle yaptıkları yayınlar, çalışmalar ve tezler bağlamında YDD çalışmalarında, çevresel etki analizinde veya sektör konusunda bilgi sahibi olduğu tespit edilen 22 akademik personel ve 14 kamu çalışanı olmak üzere 36 panelist seçilmiştir. Ayrıca, konuyla ilgisi olduğu düşünülen aşağıda yer alan 13 STK'ya da anket gönderilmiştir.

- Türkiye Çelik Üreticileri Derneği
- Çelik İhracatçıları Birliği
- İstanbul Sanayi Odası Çevre ve Enerji Şubesi
- Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı (TTGV)
- Bölgesel Çevre Merkezi (REC Türkiye)
- TUSİAD
- WWF-Türkiye
- Türkiye Belediyeler Birliği
- İklim Değişikliği Politika ve Araştırma Derneği
- Greenpeace
- Sosyal İklim Derneği
- Yeşil Düşünce Derneği
- İş Dünyası ve Sürdürülebilir Kalkınma Derneği (SKD Türkiye)

4.2.5. Anket Sonuçlarına Göre Ağırlıklandırma Katsayılarının Belirlenmesi

Yukarıda belirtilen kurum ve kişilere toplam 49 adet anket iletilmiş, bunlardan 17 panelist anketi doldurarak geri göndermiştir.

Anketin birinci bölümünde (kriter değerlendirme) panelistlerin değerlendirmesi sonucunda elde edilen değerlendirme puanları (D_i), ikinci bölümde belirlenen kriter ağırlıkları (a_i) ile çarpılarak kullanılmıştır. Doldurulan anketlerden 4 tanesinde yanıt verilmeyen sorular bulunduğu görülmüştür. Bu anketlerde verilen yanıtların da

ağırlıklandırma katsayılarının hesaplanmasında kullanılabilmesi için, çarpma işlemi yapılmadan önce, yanıtlanmamış alanlar için diğer panelistlerin aynı alanlara verdiği yanıtların ortalama puanları kullanılmıştır. Böylelikle ilgili alanın ortalaması değişmeden boş alanların doldurulması sağlanmıştır.

Anketin ikinci bölümünde panelistlerin işaretlediği seçenekler Şekil 4.4'te verilen matrise işlenmiştir. Burada "x" bulunduğu sütunun ait olduğu kriterin değiştirilmesine, satırın ait olduğu kriterin değiştirilmesine göre panelistin daha az istekli olduğu anlamına gelmektedir. "0" ise tam tersi, yani satırın ait olduğu kriterin değiştirilmesine, sütunun ait olduğu kriterin değiştirilmesine göre panelistin daha az istekli olduğu anlamına gelmektedir.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	Ref	p _i	a _i
K1	-	0	0	0	0					0	5	33.3%
K2		-	x	x	0					0	2	13.3%
K3			-	0	0					0	4	26.7%
K4				-	0					0	3	20.0%
K5					-					0	1	6.7%
K6						-	0	x	0	0	3	30.0%
K7							-	x	0	0	2	20.0%
K8								-	0	0	4	40.0%
K9									-	0	1	10.0%
Ref										-	0	0.0%

Şekil 4.4: Kriter ağırlıklı hesaplama matrisi örneği.

Kritere ait sütunda yer alan "x"lerin sayısı ile satırda yer alan "0"ların sayısı toplanmıştır. Diğer kriterlerle kıyaslandığında değişime direnci en düşük olan bir kriterin ağırlığının sıfır olmaması için referans bir satır ve sütun eklenerek, sütunun bütün hücrelerine "0" değeri atanmıştır. Bu şekilde bütün kriterlere ağırlıklandırma için 1'er puan eklenmiştir. Çevresel sonuçları (K1-K5) ve Çevresel sonuçların derecelerini (K6-K9) temsil eden kriterlerin aldıkları puanlar ayrı toplanmış ve ağırlıkları aşağıdaki formüller ile hesaplanmıştır.

$$a_{i,s} = \frac{p_i}{\sum_{i=1}^{i=5} p_i} \quad (4.1)$$

ve

$$a_{i,sd} = \frac{p_i}{\sum_{i=6}^{i=9} p_i} \quad (4.2)$$

Burada;

$a_{i,s}$: i çevresel sonuç kriterinin ağırlığını,

$a_{i,sd}$: i çevresel sonuç derecesi kriterinin ağırlığını,

p_i : i kriterinin toplam ağırlık puanını

temsil etmektedir.

Her etki kategorisi (j) için ağırlık puanı (A'_j), (4.3) eşitliğinde olduğu gibi, i kriteri değerlendirme puanları (D_i) ve i kriteri ağırlık puanları (a_i) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$A'_j = \sum_{i=1}^{i=5} D_{i,j,s} \times a_{i,j,s} + \sum_{i=6}^{i=9} D_{i,j,sd} \times a_{i,j,sd} \quad (4.3)$$

Etki kategorisinin (j) ağırlığı (A_j) ise kategori ağırlık puanının (A'_j) bütün kategorilerin toplam ağırlık puanlarına bölünmesi ile hesaplanmıştır.

$$A_j = \frac{A'_j}{\sum A'_j} \quad (4.4)$$

Etki kategorilerinden Küresel Isınma, Ötrofikasyon, Ekolojik Zehirlilik, Su Tüketimi ve Fotokimyasal Sis Oluşumu ReCiPe 2016 etki yönteminde insan sağlığı, tatlı su, deniz ve kara ekosistemleri gibi alt kırımlara ayrılmıştır (Tablo 4.6).

Tablo 4.6: Etki kategorilerinin alt kırımları.

Kategori	İnsan Sağlığı (K1)	Sucul Ekosistemler (K2)+(K3)	Deniz Ekosistemi (K2)	Tatlı Su Ekosistemi (K3)	Kara Ekosistemi (K4)
Küresel Isınma	*		*		*
Ötrofikasyon			*	*	
Ekolojik Zehirlilik			*	*	*
Su Tüketimi	*	*			*
Fotokimyasal Sis Oluşumu	*				*

Hesaplanan kategori ağırlıklarının alt kırılımlar detayına indirgenebilmesi için bu kırılımlara karşılık gelen kriterlerin (K1-K4) ağırlık puanlarının, bu puanların toplamı içerisindeki yüzde oranı kullanılmıştır. Örneğin, Küresel Isınma kategorisinin alt kırılımlarının ağırlıkları aşağıda verilen (4.5), (4.6) ve (4.7) numaralı eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$A_{j,1} = A_j \times \frac{D_{1,j,s} \times a_{1,s}}{\sum_{i=1;3;4} D_{i,j,s} \times a_{i,s}} \quad (4.5)$$

$$A_{j,3} = A_j \times \frac{D_{3,j,s} \times a_{3,s}}{\sum_{i=1;3;4} D_{i,j,s} \times a_{i,s}} \quad (4.6)$$

$$A_{j,4} = A_j \times \frac{D_{4,j,s} \times a_{4,s}}{\sum_{i=1;3;4} D_{i,j,s} \times a_{i,s}} \quad (4.7)$$

Burada 1, 3 ve 4 indisleri sırası ile insan sağlığı, tatlı su ekosistemi ve kara ekosistemini temsil etmektedir. Tablo 4.6'da verilen her bir etki kategorisi için alt kırılımlara ait ağırlıkları bu yöntemle hesaplanmıştır.

Etki kategorilerinin ağırlıkları her panelist için ayrı hesaplanmış ve her bir etki kategorisi için aritmetik ortalamaları alınarak, orta nokta etkiler için ağırlıklandırma katsayıları hesaplanmıştır. Her bir paneliste ait etki kategorisi ağırlıkları Tablo 4.7'de, bu ağırlıklara ait aritmetik ortalama ve hesaplanan diğer istatistiki bilgiler Tablo 4.8'de verilmiştir.

Anket sonuçlarının tutarlılık analizini yapabilmek amacıyla, sonuçların aritmetik ortalama $\pm 2\sigma$ (standart sapma) değer aralığı içinde olup olmadığına bakılmıştır. Sözü geçen sınırın dışında kalan değerler Tablo 4.7'de kırmızı renkte belirtilmiş ve Tablo 4.8'de yer alan ağırlıklandırma katsayılarının hesaplaması sırasında kapsam dışında tutulmuştur. Tablo 4.8'de yer alan diğer değerler, kullanılan değer aralığını göstermesi amacıyla ilk hali ile bırakılmıştır.

Tablo 4.7: Panelistlere ait etki kategorisi ağırlıkları.

	Abiyotik Kaynak Tükenmesi	Küresel Isınma	İnsan Sağlığı	Tatlı su	Kara	Asidifikasyon	Ötrofikasyon	Deniz	Tatlı su	Ekolojik Zehirlilik	Deniz	Tatlı su	Kara	Arazi Kullanımı	Su Tüketimi	İnsan Sağlığı	Şuul	Kara	Ozon Tabakasında İncelme	İnsan Zehirlenmesi	İyonlaştırıcı Radyasyon	Fotokimyasal Sis Oluşumu	İnsan Sağlığı	Karasal	İnce Partikül Madde Oluşumu
Panelist 1	10,1	10,2	6,8	1,7	1,7	10,2	10,5	5,2	5,2	6,9	2,3	2,3	2,3	6,6	8,0	4,6	2,3	1,3	9,8	6,4	8,4	7,9	6,6	1,3	5,1
Panelist 2	7,8	13,3	9,5	1,9	1,9	3,7	7,3	3,7	3,7	10,2	3,4	3,4	3,4	8,7	9,1	5,7	2,3	1,1	13,2	6,4	5,0	7,2	6,4	0,9	7,9
Panelist 3	5,1	11,0	3,3	3,8	3,8	7,7	6,7	2,4	4,3	7,9	2,7	2,7	2,4	6,1	6,5	2,0	3,1	1,4	8,8	8,0	16,7	7,5	3,8	3,8	7,9
Panelist 4	7,5	14,2	3,3	5,5	5,5	6,0	6,4	3,2	3,2	7,5	2,5	2,5	2,5	10,4	14,3	3,9	7,7	2,7	8,5	6,9	11,3	2,3	1,5	0,8	4,7
Panelist 5	14,1	16,0	11,0	2,8	2,2	3,8	5,1	1,9	3,2	8,3	2,9	2,9	2,5	6,7	12,6	7,7	3,1	1,9	8,6	7,3	6,0	1,3	0,8	0,5	10,2
Panelist 6	8,8	12,3	3,7	4,9	3,7	15,3	4,6	1,3	3,3	14,9	3,2	8,1	3,6	5,7	8,2	3,8	4,3	0,03	8,1	12,2	4,9	1,2	0,7	0,4	3,7
Panelist 7	4,6	10,7	8,2	1,2	1,3	11,1	5,1	3,0	2,1	7,6	2,5	2,5	2,5	5,6	7,8	5,4	1,6	0,8	8,6	4,6	10,9	12,1	10,0	2,0	11,4
Panelist 8	13,0	23,2	11,4	6,5	5,2	8,0	1,4	0,7	0,7	13,8	4,1	4,1	5,7	6,7	5,9	3,9	1,0	1,0	8,3	5,4	6,5	3,1	2,3	0,8	4,6
Panelist 9	10,0	17,4	7,5	5,3	4,6	6,1	6,1	3,4	2,7	11,5	3,8	3,3	4,4	3,8	8,4	2,5	4,2	1,7	6,4	6,2	11,8	8,1	4,7	3,4	4,2
Panelist 10	6,5	18,6	9,1	3,2	6,3	6,2	5,1	2,2	2,9	12,7	3,1	3,3	6,2	3,6	7,1	2,7	2,4	1,9	9,0	4,9	14,2	7,4	4,4	3,0	4,8
Panelist 11	9,2	12,3	7,4	2,5	2,5	8,7	4,7	2,4	2,4	8,8	2,7	2,7	3,4	8,0	8,8	4,5	3,0	1,2	7,4	10,0	10,4	6,2	5,2	1,0	5,6
Panelist 12	5,2	10,7	6,1	3,1	1,5	6,5	4,6	2,3	2,3	7,3	2,7	3,3	1,3	2,5	10,1	5,2	3,9	1,0	14,5	7,4	12,9	9,9	8,4	1,5	8,5
Panelist 13	7,8	14,2	4,1	4,4	5,7	7,9	8,9	4,2	4,8	9,3	3,0	3,0	3,3	5,6	9,0	2,5	4,0	2,5	9,3	7,9	8,9	4,4	2,0	2,4	6,8
Panelist 14	11,8	12,1	6,7	2,7	2,7	7,7	7,6	3,8	3,8	4,5	1,3	1,9	1,3	3,7	9,2	4,5	2,9	1,8	13,4	5,2	9,4	11,5	8,2	3,3	4,0
Panelist 15	8,0	14,0	4,7	4,7	4,7	9,2	6,3	2,1	4,2	11,1	3,7	3,7	3,7	8,6	10,4	3,0	4,5	3,0	13,7	2,2	7,9	3,6	2,1	1,5	5,2
Panelist 16	10,0	10,9	3,0	4,0	4,0	8,9	6,4	2,7	3,6	8,8	2,9	2,9	2,9	7,8	9,7	2,5	4,6	2,5	10,5	2,1	11,0	6,7	3,6	3,0	7,1
Panelist 17	9,5	13,9	4,1	5,8	4,1	14,8	4,7	2,0	2,8	7,9	2,9	2,9	2,0	3,5	8,7	2,3	4,3	2,0	14,9	8,8	5,9	4,6	3,5	1,2	2,7

Tablo 4.8: Ağırlıklandırma katsayılarına ilişkin istatistiki bilgiler.

	Abiyotik Kaynak Tükenmesi	Küresel Isınma	İnsan Sağlığı	Tatlı su	Kara	Asidifikasyon	Ötrofikasyon	Deniz	Tatlı su	Ekolojik Zehirlilik	Deniz	Tatlı su	Kara	Arazi Kullanımı	Su Tüketimi	İnsan Sağlığı	Suçul	Kara	Ozon Tabakasında İncelme	İnsan Zehirlenmesi	İyonlaştırıcı Radyasyon	Fotokimyasal Sis Oluşumu	İnsan Sağlığı	Karasal	İnce Partikül Madde Oluşumu
Aritmetik Ortalama (AK), %	8,8	13,8	6,7	3,9	3,8	7,8	6,2	2,8	3,5	9,4	3,2	3,1	3,1	6,1	9,1	3,8	3,4	1,8	10,6	6,5	9,5	6,4	4,2	1,9	6,4
Standart Sapma	2,60	3,3	2,7	1,5	1,5	3,1	1,9	1,1	1,1	2,6	0,6	1,3	1,3	2,1	2,0	1,5	1,5	0,8	2,6	2,5	3,2	3,2	2,7	1,1	2,3
Maksimum	14,1	23,2	11,4	6,5	6,3	15,3	10,5	5,2	5,2	14,9	4,1	8,1	6,2	10,4	14,3	7,7	7,7	3,0	14,5	12,2	16,7	12,1	10,0	3,8	11,4
Minimum	4,6	10,2	3,0	1,2	1,3	3,7	1,4	0,7	0,7	4,5	1,3	1,9	1,3	2,5	5,9	2,0	1,0	0,0	6,4	2,1	4,9	1,2	0,7	0,4	2,7
Ortalama+ 2*sigma	14,0	20,4	11,8	6,8	6,7	14,6	9,9	4,9	5,4	14,6	4,2	5,9	5,7	10,4	13,0	6,9	6,5	3,1	15,4	11,5	16,0	12,6	9,8	4,0	10,8
Ortalama- 2*sigma	3,6	7,2	1,1	0,7	0,5	2,1	2,1	0,6	1,1	4,1	1,7	0,7	0,6	1,8	5,0	1,0	0,5	0,1	5,0	1,6	3,1	-0,2	-1,0	-0,3	1,5

4.3. Ulusal normalizasyon Katsayılarının Belirlenmesi

Ulusal normalizasyon katsayılarının belirlenmesi amacıyla Şekil 4.1’de bahsi geçen model adımları uygulanmıştır. Normalizasyon katsayıları ilgili etki kategorisinin orta nokta etkilerini normalize edebilecek 2019 yılı Türkiye geneli verileri ve 2019 yılı Türkiye geneli nüfus verisi kullanılarak hesaplanmıştır. İhtiyaç duyulan veriye ulaşabilmek için Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), Avrupa Çevre Ajansı (EPA), Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP), Maden Tetkik Arama Kurumu (MTA), Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞB) gibi çeşitli kaynaklardan elde edilen veriler kullanılmıştır [59]-[68]. Ekolojik zehirlilik ve insan zehirlenmesi ile ilişkili etki kategorileri normalizasyon katsayılarına ilişkin kimyasal emisyonları ile bunların 1,4 Diklorobenzene eşdeğerliği bilgilerine ulaşamamış, bu nedenle bahsi geçen kategorilerin normalizasyon katsayıları hesaplanamamıştır. Hesaplanamayan normalizasyon katsayılarının sıfır olduğu kabul edilmiştir. Son nokta etkilerin normalizasyon katsayılarının belirlenmesi için orta nokta etkilerin insan sağlığını, ekosistemi ve doğal kaynakları nasıl etkilediğine dair hastalık, ölüm, yok olan canlı türleri gibi verilere ve söz konusu verilerin yorumlanabilmesi için uzmanlığa ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada yalnızca orta nokta etkiler için normalizasyon katsayıları belirlenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan ReCiPe 2016 etki yönteminde yer alan orta nokta etki kategorileri ve hesaplanan ulusal normalizasyon katsayıları Tablo 4.9’da verilmektedir.

Tablo 4.9: ReCiPe 2016 etki yönteminde yer alan orta nokta etki kategorileri ve hesaplanan ulusal normalizasyon katsayıları.

Etki Kategorisi	Orta Nokta Birimi	NK*	Referans Yıl	Kaynak
İnce Partikül Madde Oluşumu	kg PM _{2,5} eşd**	2,358E+00	2019	EPA, 2019 [59]
Fosil Kaynak Tükenmesi	kg petrol eşd	1,331E+00	2019	ETKB, 2019 [60]
Ekolojik Zehirlilik, tatlı su	kg 1,4-DCB	u.d.***	u.d.	
Tatlı Su Ötrofikasyonu	kg P eşd	3,672E+01	2018-2020 ortalaması	SKKY, 2020; TÜİK, 2020 [61], [62]
Küresel Isınma	kg CO ₂ eşd	6,110E+03	2019	TÜİK, 2020 [63]

Tablo 4.9: Devam.

Etki Kategorisi	Orta Nokta Birimi	NK*	Referans Yıl	Kaynak
İnsan Zehirlenmesi, kanserojen etki	kg 1,4-DCB	u.d.	u.d.	
İnsan Zehirlenmesi, kanserojen olmayan etki	kg 1,4-DCB	u.d.	u.d.	
İyonlaştırıcı Radyasyon	kBq Co-60 eşd	u.d.	u.d.	
Arazi Kullanımı	m ² a ekin eşd	4,536E+00	2019	TÜİK, 2022 [64]
Ekolojik Zehirlilik, deniz	kg 1,4-DCB	u.d.	u.d.	
Deniz ötrofikasyonu	kg N eşd	1,089E+03	2018-2020 ortalaması	SKKY, 2020; TÜİK, 2020 [61], [62]
Mineral Kaynak Tükenmesi	kg Cu eşd	6,013E+00	2019	Şahiner, M., ve diğ., 2021 [65]
Fotokimyasal Sis Oluşumu	kg NO _x eşd	9,368E+00	2019	ÇŞB, 2021 [66]
Ozon Tabakasında İncelme	kg CFC11 eşd	1,027E-04	2019	UNEP, 2022 [67]
Asidifikasyon	kg SO ₂ eşd	2,952E+01	2019	ÇŞB, 2021 [66]
Ekolojik Zehirlilik, kara	kg 1,4-DCB	u.d.	u.d.	
Su Tüketimi	m ³	3,435E+01	2018-2020 ortalaması	TÜİK, 2020 [62]

*NK: Normalizasyon Katsayısı

**eşd:eşdeğer

***u.d.: ulaşılabılır değil

Tablo 4.9'da verilen ulusal normalizasyon katsayılarının hesaplama yöntemleri her bir etki kategorisi için aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır. Normalizasyon için kullanılan 2019 yılı Türkiye nüfusu 83.154.997 kişidir [68].

- İnce Partikül Madde Oluşumu

İnce Partikül Madde Oluşumu etki kategorisinin normalizasyon katsayısını (NK_{IPMO}) belirlemek için 2019 yılı Türkiye toplam PM_{2.5} emisyon miktarı ($EM_{PM2.5,2019}$) kullanılmıştır. Etki kategorisinin normalizasyon katsayısı yıllık toplam salınan miktarın nüfusa bölünmesiyle elde edilmiştir. 2019 yılında Türkiye genelinde $1,9612 \times 10^8$ kg PM_{2.5} atmosfere salınmıştır [59].

$$NK_{IPMO} = \frac{EM_{PM2.5,2019}}{Nüfus_{2019}} = \frac{1,9612 \times 10^8 \text{ kg } PM2.5}{83.154.997 \text{ kişi}} = 2,358 \quad (4.8)$$

- Fosil Kaynak Tükenmesi

Fosil Kaynak Tükenmesi etki kategorisinin normalizasyon katsayısını (NK_{FKT}) belirlemek için 2019 yılı Türkiye’de tüketilen fosil yakıtların toplam kg eşdeğer petrol cinsinden miktarı ($Tüketim_{fosil,2019}$) kullanılmıştır. Etki kategorisinin normalizasyon katsayısı yıllık toplam tüketilen miktarın nüfusa bölünmesiyle elde edilmiştir. 2019 yılında Türkiye genelinde 1.1065×10^8 kg eşd. petrol fosil yakıt tüketilmiştir [60].

$$NK_{FKT} = \frac{Tüketim_{fosil,2019}}{Nüfus_{2019}} = \frac{1,1065 \times 10^8 \text{ kg eşd. petrol}}{83.154.997 \text{ kişi}} = 1,331 \quad (4.9)$$

- Mineral Kaynakların Tükenmesi

Mineral Kaynak Tükenmesi etki kategorisinin normalizasyon katsayısını (NK_{MKT}) belirlemek için 2019 yılı Türkiye’de üretilen maden kaynaklarının toplam miktarı ($Üretim_{mineral,2019}$) kullanılmıştır. Etki kategorisinin normalizasyon katsayısı yıllık toplam üretilen miktarın nüfusa bölünmesiyle elde edilmiştir. 2019 yılında Türkiye genelinde 5×10^8 kg madeni kaynak üretilmiştir [65].

$$NK_{MKT} = \frac{Üretim_{mineral,2019}}{Nüfus_{2019}} = \frac{5 \times 10^8 \text{ kg maden}}{83.154.997 \text{ kişi}} = 6,013 \quad (4.10)$$

- Tatlı Su Ötrofikasyonu

Tatlı Su Ötrofikasyonu etki kategorisinin normalizasyon katsayısını (NK_{TO}) belirlemek için Türkiye’de soğutma suyu hariç alıcı ortama deşarj edilen atıksu miktarları ve Su Kirliliği ve Kontrolü Yönetmeliğinde yer alan fosfor sınır değeri ($SKKY_{fosfor}$) kullanılmıştır. Su ve atıksu istatistik verileri TÜİK tarafından 2 yıllık dönemlerde toplanmaktadır ve 2018 ve 2020 yılı verileri mevcuttur. 2019 yılı atıksu miktarına ulaşabilmek amacıyla 2018 ve 2020 yılı verilerinin ortalaması alınmıştır. Tatlı su ötrofikasyonu için göl, akarsu ve baraja deşarj edilen atıksu miktarlarının toplamı kullanılmıştır. Etki kategorisinin normalizasyon katsayısı yıllık toplam

tüketilen miktarın nüfusa bölünmesiyle elde edilmiştir. 2019 yılında Türkiye genelinde $3,053 \times 10^9 \text{ m}^3$ atıksuyun tatlı su kaynaklarına deşarj edildiği hesaplanmıştır [61], [62].

$$NK_{TO} = \frac{SKKY_{fosfor} \times (ASD_{göl,ort} + ASD_{akarsu,ort} + ASD_{baraj,ort})}{Nüfus_{2019}} \quad (4.11)$$

$$= \frac{1 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \times (69285 + 2822240 + 161479) \times 1000 m^3}{83.154.997 \text{ kişi}} = 36,715$$

- Deniz Ötrofikasyonu

Deniz Ötrofikasyonu etki kategorisinin normalizasyon katsayısını (NK_{DO}) belirlemek için Türkiye’de soğutma suyu hariç alıcı ortama deşarj edilen atıksu miktarları ($ASD_{deniz,ort}$) ve Su Kirliliği ve Kontrolü Yönetmeliğinde yer alan azot sınır değeri ($SKKY_{azot}$) kullanılmıştır. Su ve atıksu istatistik verileri TÜİK tarafından 2 yıllık dönemlerde toplanmaktadır ve 2018 ve 2020 yılı verileri mevcuttur. 2019 yılı atıksu miktarına ulaşabilmek amacıyla 2018 ve 2020 yılı verilerinin ortalaması alınmıştır. Etki kategorisinin normalizasyon katsayısı yıllık toplam tüketilen miktarın nüfusa bölünmesiyle elde edilmiştir. 2019 yılında Türkiye genelinde $2,2645 \times 10^9 \text{ m}^3$ atıksuyun denize deşarj edildiği hesaplanmıştır [61], [62].

$$NK_{DO} = \frac{SKKY_{azot} \times ASD_{deniz,ort} \text{ m}^3}{Nüfus_{2019}} \quad (4.12)$$

$$= \frac{40 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \times 2264493 \times 1000 m^3}{83.154.997 \text{ kişi}} = 1,089 \times 10^3$$

- Küresel Isınma

Küresel Isınma etki kategorisinin normalizasyon katsayısını (NK_{KI}) belirlemek için 2019 yılı Türkiye toplam CO₂ eşdeğer emisyon miktarı ($EM_{CO2-eşd,2019}$) kullanılmıştır. Etki kategorisinin normalizasyon katsayısı yıllık toplam salınan miktarın nüfusa bölünmesiyle elde edilmiştir. 2019 yılında Türkiye genelinde $5.0808 \times 10^{11} \text{ kg}$ eşd. CO₂ atmosfere salınmıştır [63].

$$NK_{KI} = \frac{EM_{CO2-eşd,2019}}{Nüfus_{2019}} = \frac{5.0808 \times 10^{11} \text{ kg eşd. CO}_2}{83.154.997 \text{ kişi}} = 6,11 \times 10^3 \quad (4.13)$$

- Arazi Kullanımı

Arazi Kullanımı etki kategorisinin normalizasyon katsayısını (NK_{AK}) belirlemek için 2019 yılı Türkiye’de bulunan toplam tarım arazisi alanı ($Alan_{tarım,2019}$) kullanılmıştır. Etki kategorisinin normalizasyon katsayısı yıllık toplam salınan miktarın nüfusa bölünmesiyle elde edilmiştir. 2019 yılında Türkiye genelinde $3.7716 \times 10^8 \text{ m}^2$ tarım arazisi bulunmaktadır [64].

$$NK_{AK} = \frac{Alan_{tarım,2019}}{Nüfus_{2019}} = \frac{3.7716 \times 10^8 \text{ m}^2}{83.154.997 \text{ kişi}} = 4,536 \quad (4.14)$$

- Fotokimyasal Sis Oluşumu

Fotokimyasal Sis Oluşumu etki kategorisinin normalizasyon katsayısını (NK_{FSO}) belirlemek için 2019 yılı Türkiye toplam NOx emisyonu miktarı ($EM_{NOx,2019}$) kullanılmıştır. Etki kategorisinin normalizasyon katsayısı yıllık toplam salınan miktarın nüfusa bölünmesiyle elde edilmiştir. 2019 yılında Türkiye genelinde $7,79 \times 10^6 \text{ kg NOx}$ atmosfere salınmıştır [66].

$$NK_{FSO} = \frac{EM_{NOx,2019}}{Nüfus_{2019}} = \frac{7,79 \times 10^6 \text{ kg NOx}}{83.154.997 \text{ kişi}} = 9,368 \quad (4.15)$$

- Ozon Tabakasında İncelme

Ozon Tabakasında İncelme etki kategorisinin normalizasyon katsayısını (NK_{OTI}) belirlemek için 2019 yılı Türkiye toplam hidrokloroflorokarbon (HCFC) emisyon miktarları ($EM_{HCFC,2019}$) kullanılmıştır. Etki kategorisinin normalizasyon katsayısı yıllık toplam salınan miktarın nüfusa bölünmesiyle elde edilmiştir. 2019 yılında Türkiye genelinde $8,54 \times 10^3 \text{ kg CFC11}$ eşdeğeri HCFC atmosfere salınmıştır [67].

$$NK_{OTI} = \frac{EM_{HCFC,2019}}{Nüfus_{2019}} = \frac{8,54 \times 10^3 \text{ kg CFC11}}{83.154.997 \text{ kişi}} = 1,027 \times 10^{-4} \quad (4.16)$$

- Asidifikasyon

Asidifikasyon etki kategorisinin normalizasyon katsayısını (NK_A) belirlemek için 2019 yılı Türkiye toplam SO₂ emisyonu miktarı ($EM_{SO_2,2019}$) kullanılmıştır. Etki

kategorisinin normalizasyon katsayısı yıllık toplam salınan miktarın nüfusa bölünmesiyle elde edilmiştir. 2019 yılında Türkiye genelinde $2,455 \times 10^6$ kg SO₂ atmosfere salınmıştır [66].

$$NK_A = \frac{EM_{SO_2,2019}}{Nüfus_{2019}} = \frac{2,455 \times 10^6 \text{ m}^2}{83.154.997 \text{ kişi}} = 29,523 \quad (4.17)$$

- Su Tüketimi

Su Tüketimi etki kategorisinin normalizasyon katsayısını (NK_{ST}) belirlemek için Türkiye’de çekilen toplam su miktarından doğrudan alıcı ortama deşarj edilen atıksu miktarları çıkarılarak tüketilen net su miktarı hesaplanmıştır. Su ve atıksu istatistik verileri TÜİK tarafından 2 yıllık dönemlerde toplanmaktadır ve 2018 ve 2020 yılı verileri mevcuttur. 2019 yılı çekilen su ve atıksu miktarına ulaşabilmek amacıyla 2018 ve 2020 yılı verilerinin ortalaması alınmıştır. Etki kategorisinin normalizasyon katsayısı yıllık toplam tüketilen miktarın nüfusa bölünmesiyle elde edilmiştir. 2019 yılında Türkiye genelinde $2,8567 \times 10^9$ m³ su tüketildiği hesaplanmıştır [61], [62].

$$NK_{ST} = \frac{(Su_{çekilen,2018} - ASD_{alıcı,2018}) + (Su_{çekilen,2019} - ASD_{alıcı,2019})}{2 \times Nüfus_{2019}} \quad (4.18)$$

$$= \frac{(17528789 - 14759458) + (18238294 - 15294155) \times 1000 \text{ m}^3}{2 \times 83.154.997 \text{ kişi}} = 34,35$$

4.4. Etki Değerlendirme

Etki değerlendirme aşamasında Şekil 4.1’de bahsi geçen model adımları uygulanmıştır. Bu bölümde, pilot tesis belirlenmiş, ihtiyaç duyulan veri tanımlanarak veri formları oluşturulmuş, temin edilen ham veri ile indüksiyon ocaklı tesisler için YDD veri setleri, başka bir deyişle Yaşam Döngüsü Envanteri oluşturulmuş, indüksiyon ocaklı ve elektrik ark ocaklı tesislerin YDD çalışmaları gerçekleştirilmiş, bu çalışmanın sonuçları EAO ve IF bakımından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Burada gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları modelin sınanması aşamasında kullanılmıştır. Çalışmanın bu bölümünden EK A’da verilen makale yayınlanmıştır.

4.4.1. YDD Veri Setlerinin Oluşturulması

Çalışma kapsamında, ecoinvent veri tabanında yer alan çelik üretim prosesleri incelenmiştir. Veri tabanı içerisinde indüksiyon ocaklı çelik üretimi için veri seti bulunmadığı görülmüştür. İndüksiyon ocağına en yakın teknoloji olan elektrik ark ocağı ile çelik üretimi prosesleri baz alınarak indüksiyon ocaklı tesisler için yeni veri setleri oluşturulmuştur. Bunlardan bazıları için yeni referans akış oluşturma ihtiyacı doğmuştur. Mevcut prosesler ve bunlara karşılık oluşturulan indüksiyon ocağı proses veri setleri ile akışlar Tablo 4.10’da verilmiştir.

Tablo 4.10: Veri tabanında bulunan ve çalışma kapsamına giren çelik üretim prosesleri ile bunlara karşılık oluşturulan veri setleri ve akışlar.

Veri tabanında Mevcut Çelik Prosesleri Veri Setleri	Oluşturulan Çelik Prosesleri Veri Setleri	Oluşturulan Akışlar
sorting and pressing of iron scrap | iron scrap, sorted, pressed | APOS, U	sorting and pressing of iron scrap in induction furnace plant | iron scrap, sorted, pressed | APOS, U - TR	
scrap preparation facility construction | scrap preparation facility | APOS, U	scrap preparation facility construction | scrap preparation facility | APOS, U-TR	
steel production, electric, low-alloyed | steel, low-alloyed | APOS, U	steel production, electric, induction, low-alloyed | steel, low-alloyed | APOS, U	
electric arc furnace converter construction | electric arc furnace converter | APOS, U	induction furnace converter construction | induction furnace converter | APOS, U	induction furnace converter

APOS: İkame Noktasında Tahsis (Allocation at the Point of Substitution)

U: Birim Proses

TR: Türkiye

IF birim proses veri setlerinin oluşturulması sürecinden aşağıda bahsedilmiştir.

4.4.1.1. YDD Çalışması Yapılacak Demir-Çelik Firmasının Belirlenmesi ve Veri Temini

Bu çalışmada, 1 kg ham çelik (kütük) için bir çelik üretim tesisinde, tesis verileri ile yaşam döngüsü değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

Çelik üretim tesisi olarak indüksiyon ocaklı üretim yapan KILIÇLAR Bilecik Demir Çelik San. ve Tic. A.Ş. pilot tesis olarak seçilmiş ve ilgili veriler tesisten temin edilmiştir. Tesis teknolojisi Türkiye’de faaliyet gösteren indüksiyon ocaklı tesislerin teknolojilerini temsil edici niteliktedir.

YDD sistem prosesinin oluşturulması amacıyla pilot tesisin ham madde, enerji, su girdilerinin yıllık miktarları ile çelik, atık, atıksu, emisyon gibi çıktılarının miktarlarına ihtiyaç duyulmuştur. Bunların yanı sıra kullanılan ekipmanlar ve kullanılan malzemelerin nakliyesi hakkında bilgilerin de tesisten mümkün olduğunca temin edilmesi planlanmıştır. Bu kapsamda tesis tarafından doldurulmak üzere kapsamlı veri formları oluşturularak tesise iletilmiştir. Bu formlar EK C’de verilmiştir.

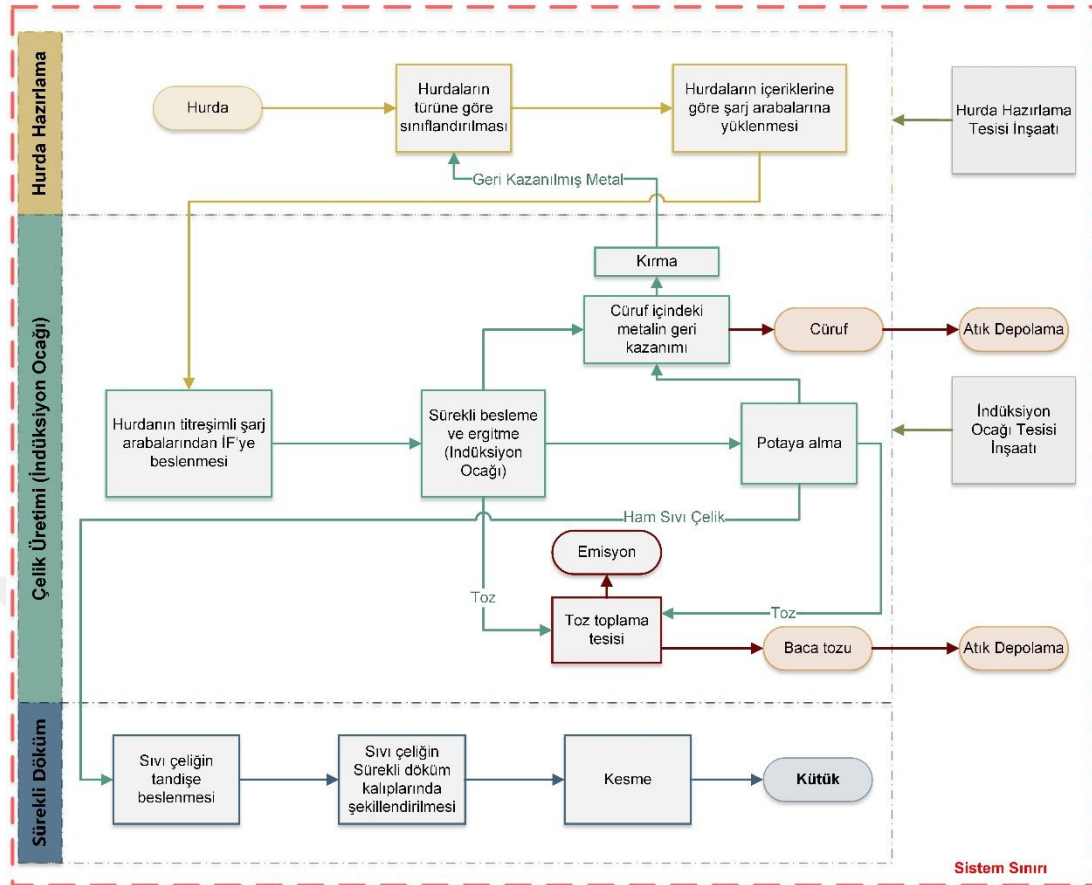
4.4.1.2. YDD çalışmasının Amaç ve Kapsam Tanımı

Çalışma kapsamında IF tesisi için envanter analizi yapılmış ve hurda hazırlama, hurda hazırlama ünitesi inşaatı, ham çelik üretimi ve indüksiyon ocağı inşaatı için YDE veri setleri oluşturulmuştur. EAO ile çelik üretimi için ise veri tabanındaki mevcut veri setleri kullanılmıştır. Çalışmada ecoinvent 3.6 veri tabanı ve OpenLCA yazılımı kullanılmıştır.

Şekil 4.5’te görüldüğü gibi, IF tesisinde hurda çelikten karbon çeliği ve düşük alaşımlı çelik üretimi temel olarak altı işlem adımından oluşmaktadır [11]:

- Hammaddelerin taşınması ve depolanması (Hurda Sahası)
- Hurda ön ısıtma
- Ergitme (Çelikhane)
- İkincil metalürji (Pota Ocağı)
- Sürekli döküm
- Haddehane

İndüksiyon Ocaklı bir tesiste 1 kg ham çelik üretimi için YDD çalışması gerçekleştirilmiştir. IF için sistem sınırı beşikten kapıya olarak tanımlanmış ve Şekil 4.5’te gösterilmiştir. Tesiste oluşan hurdanın geri kazanımı sistem kapsamında olup hurda ön ısıtması dahil değildir.



Elektrik Ark Ocaklı tesiste 1 kg ham çelik üretimi için YDD çalışması gerçekleştirilmiştir. EAO için sistem sınırı beşikten kapıya olarak tanımlanmış ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

Şekil 4.6: Elektrik ark ocaklı çelik üretim tesisinin akış şeması.

4.4.1.3. Envanter Analizi

IF tesislerinde üretilen çeliğin çevresel etkilerini belirlemek için pilot tesisinin 2019 yılı verileri kullanılarak envanter analizi yapılmış, gerekli veri setleri oluşturulmuştur. Geri dönüşümün etkilerini dahil etmek için ecoinvent veri tabanındaki APOS (İkame Noktasında Tahsis, “Allocation at the Point of Substitution”) sistem modeli seçilmiştir.

4.4.1.3.1. Hurda Hazırlama

Hurda hazırlama işlemi için ecoinvent veri tabanında yer alan “sorting and pressing of iron scrap” birim proses veri seti baz alınmıştır. Bu veri setinin sistem sınırı hurdaların tesise girmesi ile başlamakta, indüksiyon ocağına şarj edilmeye hazırlanması ile son bulmaktadır. Referans birim 1 kg hazırlanmış hurda olarak tanımlanmıştır. Hurda hazırlama sürecinde referans birim bazında hesaplanan girdi ve çıktı miktarları ve belirsizlikleri Tablo 4.11’de verilmiştir.

Tablo 4.11: Hurda hazırlama işlemi birim proses girdi ve çıktı akışları.

GİRDİLER				ÇIKTILAR			
Akış	Miktar	Birim/kg hurda	Pedigree skoru/ Belirsizlik	Akış	Miktar	Birim/kg hurda	Pedigree skoru/ Belirsizlik
Dizel	3,86E-02	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	Hurda, sınıflandırıl mış	1,00E+00	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Elektrik, orta gerilim	1,80E-02	kWh	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	Atıksu	1,73E-01	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Hurda, sınıflandırılma mış	1,00E+00	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1				
Hurda hazırlama tesisi	6,63E-11	item	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1				
Su, kuyu, TR	6,39E-05	m ³	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1				
Atıksu, kirletilmemiş	9,79E-05	m ³	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1				
Su, yağmur suyu	1,09E-02	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1				

¹ Tedarik edilen ve tesiste oluşan toplam hurda miktarı

4.4.1.3.2. Çelik Üretimi

Çelik üretimi için ecoinvent veri tabanında yer alan “steel production, electric, low-alloyed | steel” birim prosesi veri seti baz alınmıştır. Tesiste oluşan hurda, toplam hurda beslemesinin %1,3’ü oranında prosese tekrar beslenerek geri kazanılmaktadır. Tesiste üretilen bu hurda doğrudan indüksiyon ocağına beslenmekte ve tesiste üretilen çelik ile aynı çevresel etkileri paylaşmaktadır. Dolayısıyla satın alınan hurdadan farklı çevresel etkilere sahiptir. Bu etkileri göz önünde bulundurmak amacıyla ecoinvent veri tabanında üretilen çelik ile birebir aynı akışlara fakat farklı girdi ve çıktı değerlerine sahip olan bir hurda üretimi prosesi (steel production, electric, low-alloyed | iron scrap) veri seti bulunmaktadır. Tesiste üretilen hurdanın çoğu (%77) haddehaneden kaynaklanmaktadır. Çelikhaneden prosese döndürülen hurda oranı %23’tür. Haddehane prosesi çalışma kapsamında olmadığı için tesiste üretilen hurda için ayrı bir veri seti oluşturulmamıştır.

Çelik üretiminin önemli bir girdisi kömürdür. Kömür, kaynağına göre farklı karbon içeriklerine sahip bir ham maddedir. Bu nedenle kömürün kalorifik değerinin bilinmesi ve enerji içeriğinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Bununla birlikte kullanılan veri tabanında kömür için enerji girişi uygulanamamaktadır. Bu nedenle kömür girişi kütle cinsinden yapılmıştır.

Bu veri setlerinin sistem sınırı hazırlanmış hurdaların indüksiyon ocağına şarjı ile başlamakta, sürekli döküm hattından çıkan kütüklerin istenilen uzunlukta kesilmesi ile son bulmaktadır. Referans birim 1 kg ham çelik olarak tanımlanmıştır. Çelik üretim prosesinde referans birim başına hesaplanan girdi ve çıktı miktarları ve belirsizlikleri Tablo 4.12’de verilmiştir.

Tablo 4.12: İndüksiyon ocaklı tesiste çelik üretimi birim proses girdi ve çıktı akışları.

GİRDİLER				ÇIKTILAR			
Akış	Miktar	Birim/kg Pedigree ham çelik	skoru/ Belirsizlik	Akış	Miktar	Birim/kg Pedigree ham çelik	skoru/ Belirsizlik
Alüminyum	1,81E-03	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	Kadmiyum	2,12E-09	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Metal elektrolizi için anot	9,53E-04	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	Karbon monoksit, fosil	3,27E-04	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Argon, sıvı	1,23E-03	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	Krom	1,75E-09	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1

Tablo 4.12: Devam.

GİRDİLER				ÇIKTILAR			
Akış	Miktar	Birim/kg ham çelik	Pedigree skoru/ Belirsizlik	Akış	Miktar	Birim/kg ham çelik	Pedigree skoru/ Belirsizlik
Elektrik, orta gerilim	7,60E-01	kWh	(2,4,1,1,1)/ gsigma=1,113	Bakır	9,35E-10	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Ferromangan, yüksek-kömür, 74.5% Mn ²	6,06E-03	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	Dioksinler, 2,3,7,8-tetraklorodibenzo-p-dioxin olarak ölçülen	2,64E-07	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Ferrosilikon	4,23E-03	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	Hidrojen klorür	5,80E-07	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Taş kömürü ³	5,49E-04	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	Hidrojen florür	1,21E-06	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Hurda, sınıflandırılmış	1,13E+00	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	Kurşun	1,25E-08	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Refrakter, paketli	9,01E-03	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	Cıva	9,35E-11	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
İndüksiyon ocağı	7,12E-11	items	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	Azot oksitler	8,65E-05	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Doğal gaz, düşük basınç	1,78E-06	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	Çelik, düşük alaşım	1,00E+00	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Kireç, sönmüş, paketli	2,03E-02	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	Kürkürt dioksit	2,34E-05	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Çelik levha ⁴	6,14E-04	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	Su	2,05E-04	m ³	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Refrakter, yüksek alüminyum oksit, paketli ⁶	7,09E-03	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	Patiküller, tanımsız	1,17E-05	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Alüminyum oksit ⁵	1,61E-04	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	Su ⁸	5,28E-02	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Manyezit ⁷	5,84E-04	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	Arsenik	1,37E-08	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Makine yağı	4,23E-03	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	Talyum	6,86E-09	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Sodyum silikat, susuz, 48% çözelti ⁸	1,81E-04	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	Antimon	6,95E-09	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Fluşpat, 97% saflıkta	1,24E-04	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	Mangan	3,43E-09	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Su, kuyu, TR	9,54E-05	m ³	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	Vanadyum	9,35E-10	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Atıksu, kirletilmemiş	1,46E-04	m ³	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	Kobalt	1,37E-09	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Su, yağmur suyu	1,62E-02	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	UOB, C cinsinden uçucu organik bileşik	6,60E-06	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
				Toz, alaşımsız, indüksiyon ocağı çeliği	4,14E-02	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1

Tablo 4.12: Devam.

GİRDİLER				ÇIKTILAR			
Akış	Miktar	Birim/kg ham çelik	Pedigree skoru/ Belirsizlik	Akış	Miktar	Birim/kg ham çelik	Pedigree skoru/ Belirsizlik
				Cüruf, alaşımsız, indüksiyon ocağı çeliği	6,91E-02	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
				Atık yağ	1,24E-03	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
				inert atık, nihai bertaraf ⁹	3,63E-03	kg	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1

¹ Vinç ve tesis aydınlatması amacıyla tüketilen elektrik prosesler arasında eşit olarak paylaştırılmıştır.

² Tesiste FeSiMn kullanılmaktadır. Veri tabanında bu alaşıma ait akış ve proses bulunmadığı için mevcut proseste bulunan FeMn akış ve arka plan prosesi kullanılmıştır.

³ Karbon verisi için kullanılmıştır.

⁴ İndüksiyon ocağında şablon olarak kullanılan sac için kullanılmıştır.

⁵ İndüksiyon ocağına beslenen alümina ve onarım için kullanılan bobin sıvası için kullanılmıştır.

⁶ İndüksiyon ocağında kullanılan refrakter (monolitik astar) için kullanılmıştır.

⁷ İndüksiyon ocağına beslenen manyezit ve onarım için kullanılan püskürtme tamir harcı için kullanılmıştır.

⁸ Kayıp suyun buharlaştığı kabul edilmiştir.

⁹ Refrakter ve elektrot atıkları için kullanılmıştır.

4.4.1.3.3. Hurda Hazırlama ve İndüksiyon Ocağı Tesisleri İnşaatı

Hurda hazırlama ve çelik üretimine ek olarak, hurda hazırlama ve indüksiyon ocağı altyapıları için "tesis inşaatı" veri setleri oluşturulmuştur. Binaların taban alanları ve kat sayıları bulunurken Google Earth'ten yapılan ölçümler kullanılmıştır. Bina yükseklikleri, binaların kat yüksekliklerinin 3 m olduğu kabul edilerek, bu değer in kat sayısı ile çarpılmasıyla elde edilmiştir. Tesisin kapladığı toplam açık ve kapalı alan bilgileri web sitesinden temin edilmiştir. Kullanılan beton için ecoinvent veri tabanı verileri, bina zemin alanıyla orantılı olarak kullanılan beton hacmini hesaplamak için kullanılmıştır. "Hurda Tesisi İnşaatı" ve "İndüksiyon Ocağı Tesisi İnşaatı" proses veri setlerinin referans birimleri sırasıyla 1 adet hurda hazırlama ünitesi ve 1 adet indüksiyon ocağı ünitesi olarak tanımlanmıştır. Her iki veri seti ve belirsizlikleri için referans birimi başına hesaplanan girdi ve çıktı envanteri, Tablo 4.13'te sunulmaktadır.

Tablo 4.13: "Hurda Tesisi İnsaatı" ve " İndüksiyon Ocağı Tesisi İnşaatı" birim prosesleri girdi ve çıktı akışları.

Akış	Birim/ tesis	Miktar (Hurda Hazırlama)	Pedigree skoru/ Belirsizlik	Miktar ¹	Pedigree skoru/ Belirsizlik
GİRDİLER					
Bina, salon	m ²	1,52E+02	(2,4,1,1,1)/ gsigma=1,113	1,56E+04	(2,4,1,1,1)/ gsigma=1,113
Bina, çok katlı	m ³	3,62E+03	(2,4,1,1,1)/ gsigma=1,113	7,09E+03	(2,4,1,1,1)/ gsigma=1,113
Beton, normal	m ³	1,74E+00	(5,4,1,1,1)/ gsigma=1,517	-	-
Beton, taban plakası ve temel	m ³	6,10E+00	(5,4,1,1,1)/ gsigma=1,517	3,11E+02	(5,4,1,1,1)/ gsigma=1,517
Konveyör bant	m	2,00E+02	(2,4,1,1,1)/ gsigma=1,113	-	-
Endüstrüyel makine	kg	1,54E+05	(5,4,1,1,1)/ gsigma=1,517	2,40E+05 (S1) 1,12E+07 (S2)	(5,4,1,1,1)/ gsigma=1,517
İşgal, endüstriyel alan	m ² *a	1,52E+04	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	1,56E+06	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Güçlendirilmiş çelik	kg	1,20E+03	(5,4,1,1,1)/ gsigma=1,517	-	-
Refrakter, paketli	kg	-	-	2,53E+03	(3,4,1,1,1)/ gsigma=1,144
Refrakter, yüksek alüminyum oksit, paketli	kg	-	-	1,99E+03	(3,4,1,1,1)/ gsigma=1,144
Arazi dönüşümü, belirsizden	m ²	4,24E+04	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	8,83E+04	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Arazi dönüşümü, endüstriyel sahaya	m ²	4,24E+04	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	8,83E+04	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Hurda hazırlama tesisi	item	1,00E+00	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1	-	-
İndüksiyon ocağı tesisi	item	-	-	1,00E+00	(1,4,1,1,1)/ gsigma=1,1
Atık tuğla	kg	-	-	2,70E+02	(5,5,5,5,5)/ gsigma=2,156
Güçlendirilmemiş beton	kg	1,40E+04	(5,5,5,5,5)/ gsigma=2,156	6,78E+05	(5,5,5,5,5)/ gsigma=2,156
Güçlendirilmiş beton	kg	5,03E+03	(5,5,5,5,5)/ gsigma=2,156	7,18E+03	(5,5,5,5,5)/ gsigma=2,156

¹ İndüksiyon Ocağı, Pota Ocağı ve Sürekli Döküm

Ekipman ağırlıkları ile ilgili bilgiye ulaşılammıştır. Bu verinin hesaplanan etkiler üzerindeki hassasiyetini belirlemek için düşük ağırlık tahmini (S1) ve yüksek ağırlık tahmini (S2) olmak üzere iki senaryo oluşturulmuştur. Etkiler her iki senaryo için de

analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir. Ekipmanın senaryolara göre tahmini ağırlıkları Tablo 4.14'te verilmiştir. Referans birim başına ekipman ağırlığı hesaplanırken ekipman ömrü 50 yıl olarak kabul edilmiştir.

Tablo 4.14: Ekipmanın senaryolara göre tahmini ağırlıkları.

Ekipman	Birim	Adet	Ağırlık (S1)	Ağırlık (S2)
İndüksiyon Ocağı	kg/adet	6	15.000	1.000.000
Pota Ocağı (Pota hariç)	kg/adet	1	5.000	200.000
Pota	kg/adet	9	5.000	200.000
Tandış	kg/adet	5	10.000	50.000
Sürekli Döküm Makinesi	kg/adet	1	50.000	3.000.000

Farklı ekipman ağırlıklarına göre oluşturulan senaryolar için elde edilen analiz sonuçlarının birbirinden farklı olmadığı gözlemlenmiştir. Bir yılda üretilen ürün miktarının yüksek olması nedeniyle tesis inşaatının etkisinin gözlemlenemeyek kadar düşük olduğu değerlendirilmektedir.

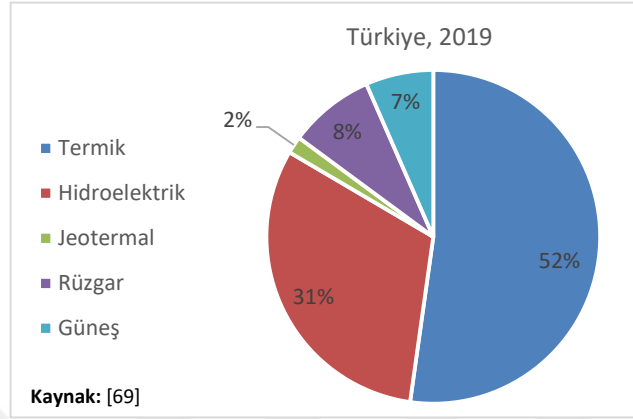
Tesis sayısı (hâlihazırda 1 adet) ürün miktarına ve tesisin kullanım ömrüne bölünerek prosesin tesis kullanımı hesaplanmıştır. Hurda hazırlama tesisi için ürün miktarı 301.787 ton sınıflandırılmış hurda, indüksiyon ocağı ile çelik üretimi için 281.090 ton ham çeliktir. Tesislerin kullanım ömrü 50 yıl olarak kabul edilmiştir. Tesis inşaatı sırasında kullanılan araçlar ve bunların yakıt tüketimleri kapsam dışında bırakılmıştır.

4.4.1.4. Senaryolar

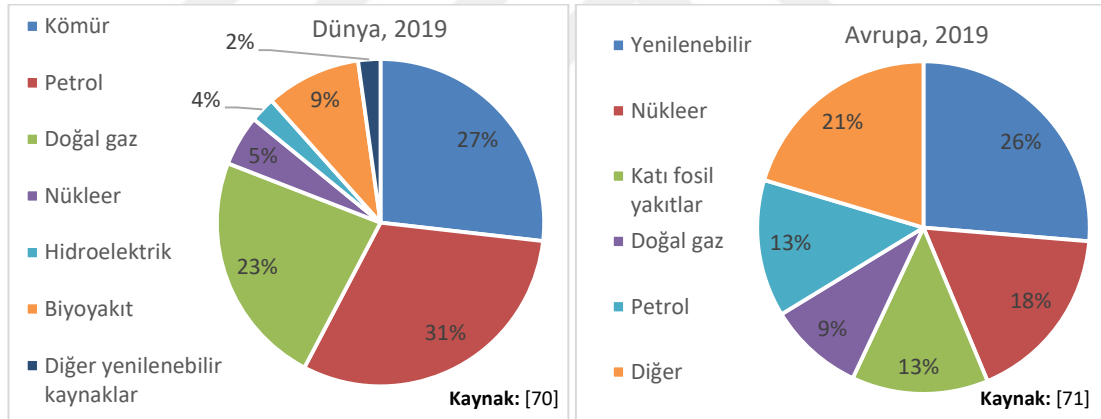
Çevresel etkilerin nedenlerini derinlemesine araştırmak, başka bir deyişle etkiler açısından en büyük farka neden olan tesisin enerji kaynağının, neden olduğu etkilere katkısının farklı üretim teknolojileri açısından kıyaslanması yapılmak istenmiştir. Bu amaçla dünya genelinde ve Avrupa'da kullanılan enerji kaynakları Türkiye'de kullanılsaydı bu IF ve EAO teknolojilerinin etkilerinde meydana getireceği farka bakmayı sağlayacak 4 farklı senaryo tanımlanmıştır.

Enerji kaynaklarının 2019 yılında Türkiye'deki enerji üretimi içerisindeki payları Şekil 4.7'de [69], Dünya ve Avrupa enerji üretimi içerisindeki payları Şekil 4.8'de

gösterilmektedir [70], [71]. Türkiye’de termik santrallerde üretilen elektrik %52 oran ile birinci sırada yer almaktadır. Şekil 4.8’e göre Dünya’da %31 oranla petrolden elektrik üretimi, Avrupa’da ise %26 oranla yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretimi ilk sırada yer almaktadır.



Şekil 4.7: Enerji kaynaklarının, 2019 yılı Türkiye enerji üretimi içinde dağılımı.



Şekil 4.8: Enerji kaynaklarının, 2019 yılı Dünya ve Avrupa enerji üretimi içinde dağılımları.

İncelenen dört teknoloji senaryosunun açıklamaları, sistem sınırları ve işlevsel birimleri Tablo 4.15'te özetlenmiştir. IF-TR senaryosunda IF teknolojisinin elektrik tedarikçileri Avrupa olarak değiştirilmiştir. EAO teknolojisi için,ecoinvent veri tabanındaki Avrupa ve Dünyanın geri kalanı (RoW) coğrafi bölgelerine ait "steel production, electric, low-alloyed | steel, low-alloyed" veri setleri herhangi bir değişiklik yapılmadan analiz edilmiştir. EAO teknolojisine ait veri setleri, elektrik tedarikçisinin yanı sıra girdi ve çıktı akışlarında da farklılıklar göstermektedir.

Tablo 4.15: Teknoloji senaryoları.

Teknoloji Senaryoları	Açıklama	Sistem Sınırları	Fonksiyonel Birim
IF-TR	Pilot tesis teknolojisi	Beşikten kapıya	1 kg ham çelik üretimi
EAO-Dünya	Avrupa hariç Dünya için EAO teknolojisi	Beşikten kapıya	1 kg ham çelik üretimi
IF, elektrik-Avrupa	Pilot tesis verisi - Avrupa elektriği	Beşikten kapıya	1 kg ham çelik üretimi
EAO-Avrupa	Avrupa için EAO teknolojisi	Beşikten kapıya	1 kg ham çelik üretimi

4.4.2. İndüksiyon Ocaklı Tesislerde Çelik Üretiminin Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi

Etki değerlendirmesini beşikten kapıya sistem sınırları içerisinde gerçekleştirebilmek amacıyla tüm akışlara ait arka plan verilerini ve nakiyelerini içeren proses veri setleri ilgili akışa tanımlanmıştır.

Orta nokta etkileri arasında Küresel Isınma Potansiyeli (KIP) ve toplam su tüketimi sırasıyla karbon ayak izi ve su ayak izinin göstergeleridir. EAO ve IF tesislerinin toplam KIP'ını ve su tüketimini belirlemek için orta nokta etkileri hesaplanmıştır. Çelik üretim faaliyetinden kaynaklanan çevresel etkileri değerlendirmek ve karşılaştırmak için son nokta etkileri hesaplanmıştır. Orta nokta etkilerinin hesaplanmasında ReCiPe 2016 MP (H) etki yöntemi, son nokta etkilerinin hesaplanmasında ise ReCiPe 2016 EP (H) tercih edilmiştir.

ISO 14044'e göre, YDED'nin isteğe bağlı bir unsuru olarak normalleştirme, bazı referans bilgilerine göre kategori gösterge sonuçlarının büyüklüğünün hesaplanmasıdır [19]. Etki kategorilerini birbirleriyle karşılaştırmak ve EAO ve IF teknolojilerinin neden olduğu çevresel etkileri tek bir sayısal değer üzerinden değerlendirmek için ReCiPe 2016 etki yöntemi için normalizasyon seti World (2010) H/H seçilmiştir.

ISO 14044'e göre, YDED'nin isteğe bağlı bir unsuru olarak grupta, etki kategorilerinin bir veya daha fazla kümeye atanmasıdır ve sıralama ve/veya sıralama içerebilir. Grupta, etki kategorilerini girdiler ve çıktılar veya küresel bölgesel ve yerel mekânsal ölçekler gibi özelliklere göre sıralayarak uygulanabilir [19]. Farklı

kaynaklardan üretilen elektrik, ayıklanmış ve sınıflandırılmamış hurda gibi belirli girdilerin ve toz ve cüruf gibi çıktıların etki kategorilerine katkısını belirlemek için gruplandırma yapılmıştır. Oluşturulan gruplar ve bunlara atfedilen akışlar Tablo 4.16’da verilmiştir.

Tablo 4.16: Oluşturulan gruplar ve bunlara atfedilen akışlar.

Gruplar	Akışlar
elektrik, taş kömürü	elektrik, yüksek gerilim (taş kömüründen üretim)
elektrik, linyit	elektrik, yüksek gerilim (linyitten üretim)
elektrik, kömür	elektrik, yüksek gerilim (kömürden üretim)
elektrik, doğal gaz	elektrik, yüksek gerilim (doğal gazdan üretim)
elektrik, petrol	elektrik, yüksek gerilim (petrol üretim)
elektrik, nükleer	elektrik, yüksek gerilim (nükleer güçten üretim)
elektrik, turba	elektrik, yüksek gerilim (turbadan üretim)
elektrik, katı atık yakma	elektrik, yüksek gerilim (katı atık yakma ile üretim)
elektrik, derin jeotermal	elektrik, yüksek gerilim (jeotermal enerjiden üretim)
elektrik, hidro	elektrik, yüksek gerilim (alüminyum sanayiinde üretim, depodan, rezervuardan ve nehir akışından pompalanan)
elektrik, fotovoltaik	elektrik, yüksek gerilim (fotovoltaik tesisatından üretim)
elektrik, güneş	elektrik, yüksek gerilim (solar tesisattan üretim)
elektrik, rüzgar	elektrik, yüksek gerilim (rüzgar türbinlerinde üretim)
ithal elektrik	elektrik, yüksek gerilim (farklı ülkelerden ithal edilen)
elektrik, diğer	elektrik için dağıtım, iletim ve market akışları elektrik, yüksek gerilim (özel proseslerde üretim)
sınıflandırılmış ve preslenmiş demir hurda	demir hurda, sınıflandırılmış, preslenmiş
sınıflandırılmamış demir hurda	demir hurda, sınıflandırılmamış
toz	toz, alaşımlı EAO çeliği toz, alaşımsız EAO çeliği
cüruf	cüruf, alaşımsız EAO çeliği
linyit madenciliği nedeniyle bozulma	linyit madenciliği nedeniyle bozulma
taş kömürü madenciliği nedeniyle bozulma	taş kömürü madenciliği nedeniyle bozulma
diğer	%1’den daha az katkısı olan akışlar

4.5. Modelin sınanması

YDED modelinin sınanması amacıyla, bu çalışmada belirlenen normalizasyon ve ağırlıklandırma katsayıları ile ReCiPe 2016 Orta Nokta (H) yönteminde yer alan normalizasyon katsayıları [72] ve Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi'nin (JRC) Çevresel Ayak İzi için Ağırlıklandırma Yaklaşımının Geliştirilmesi isimli teknik raporunda yayınlanan ağırlıklandırma katsayıları kullanılmıştır [73]. Ayrıca JRC'nin Çevresel Ayak İzi ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi için Normalizasyon Katsayıları isimli teknik raporunda yayınlanan normalizasyon katsayıları da karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır [74].

4.5.1. Ağırlıklandırma ve Normalizasyon Katsayılarının Uygulanması

Belirlenen normalizasyon ve ağırlıklandırma katsayıları ReCiPe 2016 Orta Nokta (H) yöntemine uygulanmıştır. Bu yöntem içerisinde karakterizasyon katsayılarının yanı sıra 2010 yılı Dünya normalizasyon katsayıları bulunmaktadır. Bahsi geçen orta nokta etki yönteminde ağırlıklandırma katsayıları bulunmamaktadır. Ağırlıklandırma katsayılarının değerlendirilebilmesi için JRC tarafından yayınlanan teknik raporlarda yer alan küresel ağırlıklandırma ve normalizasyon katsayıları kullanılmıştır. Uygulanan normalizasyon ve ağırlıklandırma katsayıları Tablo 4.17'de verilmiştir.

Tablo 4.17: Uygulanan normalizasyon ve ağırlıklandırma katsayıları.

Etki kategorisi	Türkiye (2019) NK	Türkiye (2019) AK	AN_JRC AK2018	AN_JRC NK2017	ReCiPe 2016 World 2010 (H) NK
İnce partikül madde oluşumu	2,36E+00	6,39E-02	8,96E-02	7,18E-04	1,20E+05
Fosil kaynakların kirliliği	1,33E+00	4,39E-02	7,55E-02	6,53E+04	4,61E+00
Ekolojik zehirlilik (tatlı su)	-	3,10E-02	4,92E-02	1,18E+04	2,77E+00
Ötrofikasyon (tatlı su)	3,90E+01	3,53E-02	2,80E-02	7,34E-01	1,03E+00
Küresel ısınma	6,11E+03	1,38E-01	2,11E-01	8,40E+03	1,04E+03
İnsan zehirlenmesi (kanserojen)	-	3,25E-02	2,13E-02	3,85E-05	1,78E+01

Tablo 4.17: Devam.

Etki kategorisi	Türkiye (2019) NK	Türkiye (2019) AK	AN_JRC AK2018	AN_JRC NK2017	ReCiPe 2016 World 2010 (H) NK
İnsan zehirlenmesi (kanserojen olmayan)	-	3,25E-02	1,84E-02	4,75E-04	7,99E+03
İyonlaştırıcı radyasyon	-	9,47E-02	5,01E-02	4,22E+03	2,56E+01
Arazi kullanımı	4,54E+00	6,07E-02	7,94E-02	1,40E+06	4,10E+01
Ekolojik zehirlilik (deniz)	-	3,16E-02	-	1,00E+00	2,06E+01
Ötrofikasyon (deniz)	1,09E+03	2,81E-02	2,96E-02	2,83E+01	2,67E+02
Mineral kaynakların kıtılığı	6,01E+00	4,39E-02	8,32E-02	6,36E-02	4,81E+02
Fotokimyasal sis oluşumu (insan sağlığı)	9,37E+00	4,18E-02	4,78E-02	4,06E+01	5,99E-02
Fotokimyasal sis oluşumu (karasal ekosistem)	9,37E+00	1,88E-02	-	1,00E+00	1,23E+00
Ozon Tabakasında İncelme	1,03E-04	1,06E-01	6,31E-02	2,34E-02	6,49E-01
Asidifikasyon	2,95E+01	7,76E-02	6,20E-02	5,55E+01	9,80E+02
Ekolojik zehirlilik (karasal)	-	3,08E-02	-	1,00E+00	6,17E+03
Su tüketimi	3,44E+01	9,08E-02	8,51E-02	1,15E+04	1,49E+02

NK: Normalizasyon Katsayısı

AK: Ağırlıklandırma Katsayısı

4.5.2. Yeni katsayılar ile YDED Çalışmasının Gerçekleştirilmesi

Uygulanan normalizasyon ve ağırlıklandırma katsayıları ile YDED çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada OpenLCA programında ReCiPe 2016 etki yönteminin içerisinde farklı normalizasyon ve ağırlıklandırma setleri oluşturulmuştur. Kullanılan setler ve bunlar içerisinde kullanılan normalizasyon ve ağırlıklandırma katsayıları kümeleri Tablo 4.18’de verilmiştir. Her set için, bahsi geçen orta nokta etki yöntemi, ecoinvent 3.6 veri tabanı ve Bölüm 0’te oluşturulan veri setleri kullanılarak ayrı YDED çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.18: Normalizasyon ve ağırlıklandırma setleri.

Katsayı Veri Seti	Kullanılan Normalizasyon katsayıları	Kullanılan Ağırlıklandırma katsayıları
ReCiPe 2016 World 2010 (H)	ReCiPe 2016 World 2010 (H/H) NK	-
Türkiye (2019)	Türkiye (2019) NK	Türkiye (2019) AK
Türkiye (2019) NK- JRC AK	Türkiye (2019) NK	JRC AK 2018
AN_JRC	JRC NK 2017	JRC AK 2018

5. BULGULAR ve TARTIŞMA

Model adımları sonucunda ortaya çıkan bulgular orta nokta, son nokta ve model sonuçları olarak ayrı başlıklar altında değerlendirilmiştir. Bu bölümde son olarak bu tez çalışmasında geliştirilen Türkiye'ye özgü katsayıları kullanan YDED YANKI modeli ile yapı malzemesi sektörü için 2014 yılında oluşturulan YDED TR modelinin karşılaştırması yapılarak sonuçlar yorumlanmıştır.

5.1. YDED Orta Nokta Sonuçları

Orta nokta düzeyinde hesaplanan etki sonuçları Tablo 5.1'de sunulmaktadır. Küresel Isınma etki kategorisindeki orta nokta etkileri, IF-TR, EAO-Dünya, IF elektrik-Avrupa ve EAO-Avrupa için sırasıyla 0,657; 0,709; 0,519 ve 0,472 kg CO₂-eşd olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.1: Orta nokta etki sonuçları.

Etki kategorisi	Referans birim	IF-TR	EAO-Dünya	IF, elektrik-Avrupa	EAO-Avrupa
İnce partikül madde oluşumu	kg PM2.5 eq	0,0041	0,0017	0,00096	0,00097
Fosil kaynakların kıtlığı	kg oil eq	0,17411	0,21327	0,1432	0,1451
Ekolojik zehirlilik (tatlı su)	kg 1,4-DCB	0,13695	0,13994	0,13362	0,12311
Ötrofikasyon (tatlı su)	kg P eq	0,00062	0,00044	0,00046	0,00034
Küresel ısınma	kg CO2 eq	0,65697	0,70932	0,51869	0,47254
İnsan zehirlenmesi (kanserojen)	kg 1,4-DCB	1,90912	1,9428	1,90089	1,93554
İnsan zehirlenmesi (kanserojen olmayan)	kg 1,4-DCB	3,66844	2,27202	3,54255	2,03042
İyonlaştırıcı radyasyon	kBq Co-60 eq	0,01551	0,08	0,17587	0,11606
Arazi kullanımı	m ² a crop eq	0,13685	0,1923	0,16596	0,15383
Ekolojik zehirlilik (deniz)	kg 1,4-DCB	0,18392	0,18794	0,17937	0,16682
Ötrofikasyon (deniz)	kg N eq	4,33E-05	6,98E-05	3,72E-05	2,85E-05
Mineral kaynakların kıtlığı	kg Cu eq	0,00544	0,00494	0,0057	0,00454
Fotokimyasal sis oluşumu (insan sağlığı)	kg NOx eq	0,00173	0,00182	0,00133	0,00145
Fotokimyasal sis oluşumu (karasal ekosistem)	kg NOx eq	0,00178	1,87E-03	0,00137	0,00149
Ozon Tabakasında İncelme	kg CFC11 eq	2,48E-07	3,76E-07	2,81E-07	2,44E-07
Asidifikasyon	kg SO2 eq	0,00292	0,00255	0,00208	0,00192
Ekolojik zehirlilik (kara)	kg 1,4-DCB	1,80062	9,97717	1,87727	9,68554
Su tüketimi	m ³	0,0059	0,00461	0,00768	0,00928

Su tüketimi etki kategorisinde IF-TR, EAO-Dünya için 0,0046 m³ su kullanımına kıyasla 0,0059 m³ su kullanımı ile daha yüksek bir etkiye sahiptir. Bununla birlikte, çelik üretimi için Avrupa elektriği kullanıldığında su tüketimindeki artış açıkça görülmektedir. Senaryoların elektrik kullanımı, su tüketimi ve KIP değerleri literatür çalışmaları ile karşılaştırılmış ve Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2: Senaryoların elektrik kullanımı, su tüketimi ve KIP değerleri literatür çalışmaları ile karşılaştırması.

	Çelik Üretim Teknolojisi	Elektrik Kullanımı (MJ/kg)	Su Tüketimi (m ³ /kg)	KIP (kg CO ₂ eq/kg)	Fonksiyonel Birim
IF-TR	IF	2,736	5,90E-03	6,57E-01	1 kg ham çelik
EAO-Dünya	EAO	2,055	4,61E-03	7,09E-01	1 kg ham çelik
IF, elektrik-Avrupa	IF	2,736	7,68E-03	5,19E-01	1 kg ham çelik
EAO-Avrupa	EAO	1,525	9,28E-03	4,73E-01	1 kg ham çelik
Bederkar, ve diğ., 2020 [11]	IF	1,854	-	-	1 kg ham çelik
Bederkar, ve diğ., 2020 [11]	EAO	1,429	-	-	1 kg ham çelik
Burchart-Korol, 2013 [75]	EAO	1,501	-	7,66E-01	1 kg ham çelik
Li, ve diğ., 2018 [10]	EAO	4,133	-	2,58E-01	1 kg ham çelik
Liang, ve diğ., 2020 [76]	EAO	0,471	-	8,77E-01	1 kg işlenmiş çelik
Özdemir, ve diğ., 2018 [12]	IF	2,880	-	6,70E-01	1 kg ham çelik

IF, elektrik Avrupa'nın elektrik enerjisi tüketimi, EAO-Avrupa'nınkinden 1,8 kat daha yüksek, KIP ise sadece 1,1 kat yüksektir. Bazı çalışmalar, IF teknolojisinin elektrik tüketiminin 1,85 MJ'e kadar azaltılabileceğini göstermiştir [11]. Elektrik tüketimi 1,85 MJ olan bir IF tesisinin, EAO-Avrupa'nın altında bir KIP'a sahip olacağı değerlendirilmektedir.

IF-TR için orta nokta ve son nokta etki kategorilerinin belirsizlik ve hassasiyet analizleri, OpenLCA yazılımında Monte Carlo Simülasyonunda 5000 rastgele çalışma yapılarak gerçekleştirilmiştir. Monte Carlo Yöntemi, olasılık analizine dayalı olarak belirsiz değişkenlerin değerlerini rastgele örnekleyebilen istatistiksel bir simülasyon

yöntemidir [77]. Simülasyonun kaç kez tekrarlanması gerektiğine dair kesin bir kanı bulunmamaktadır. Genelde, 1000 veya 10.000 çalışma yapılmaktadır. LCA veritabanlarının büyüyen boyutuyla birlikte, aşırı yüksek sayıda tekrarlama yapılarak belirsizliğin belirlenmesi daha doğru sonuçları verebilmekle birlikte bu şekilde analizlerin tamamlanması çok ciddi çalışma süresi getirmektedir [78]. Analizin amacı, ortalama çıktının tahminlerini oluşturmaksa, genellikle 100'den az olan küçük bir sayı yeterlidir. Bununla birlikte, amaç bir sonucun değişkenliğini gözlemlemekse, nadir olaylar nadiren meydana geldiğinden, genellikle binlerce çalışma gerçekleştirilmelidir [79]. Neumann ve arkadaşları 2022 yılında yaptığı bir çalışmada karakterizasyon sonuçlarının değişkenliği 1000 Monte Carlo çalışması ile nicelendirilmiştir [80]. Pérez-López ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği başka bir çalışmada ise belirsizlik ve hassasiyet analizi 5000 Monte Carlo çalışması ile gerçekleştirilmiştir [81].

Simülasyon sonuçları Tablo 5.3'te sunulmuştur. Etki kategorilerinin hesaplanan tüm sonuçları, 5. ve 95. yüzdilik belirsizlik sınırları içindedir. Orta nokta sonuçları incelendiğinde kanserojen olmayan insan zehirlenmesi kategorisinin en yüksek standart sapma değerine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Söz konusu etki kategorisi girdi ve çıktı değişimlerinden en çok etkilenen, hassasitesi en yüksek kategori olma özelliği göstermektedir. Ekolojik zehirliliğe ait kategorilerin standart sapmaları da kanserojen olmayan insan sağlığı kategorisinden sonra en yüksek değerlere sahiptir.

Tablo 5.3: Orta nokta etki kategorilerinin Monte Carlo Analizi Sonuçları (5000 kez).

ReCiPe 2016 Orta nokta (H)						
Etki kategorisi	Referans birim	Sonuç	Ortalama	Standart sapma	5% Persentil	95% Persentil
İnce partikül madde oluşumu	kg PM2.5 eq	0,0041	0,004262556	0,002504149	0,003134294	0,005643708
Fosil kaynakların kıtlığı	kg oil eq	0,17411	0,181589415	0,265107292	0,141496231	0,230384859
Ekolojik zehirlilik (tatlı su)	kg 1,4-DCB	0,13695	0,500261726	7,8821445	0,101315476	1,046714854
Ötrofikasyon (tatlı su)	kg P eq	0,00062	0,000876524	0,000678392	0,000371905	0,001765905
Küresel ısınma	kg CO2 eq	0,65697	0,686554327	1,091509642	0,534561435	0,868153113
İnsan zehirlenmesi (kanserojen)	kg 1,4-DCB	1,90912	2,525633117	1,281420202	1,14603082	4,736370149
İnsan zehirlenmesi (kanserojen olmayan)	kg 1,4-DCB	3,66844	19,2902432	308,3773465	-8,674773239	45,394797
İyonlaştırıcı radyasyon	kBq Co-60 eq	0,01551	0,031697906	0,171264973	0,004539208	0,107054876
Arazi kullanımı	m2a crop eq	0,13685	0,160652245	1,167705504	0,107770743	0,244274586
Ekolojik zehirlilik (deniz)	kg 1,4-DCB	0,18392	0,696969609	11,16935379	0,134809389	1,475050807
Ötrofikasyon (deniz)	kg N eq	4,332E-05	4,63739E-05	8,93193E-05	3,50818E-05	6,02626E-05
Mineral kaynakların kıtlığı	kg Cu eq	0,00544	0,005974813	0,069720037	0,00454319	0,007728497
Fotokimyasal sis oluşumu (insan sağlığı)	kg NOx eq	0,00173	0,001872789	0,003062676	0,001476131	0,002355309
Fotokimyasal sis oluşumu (karasal ekosistem)	kg NOx eq	0,00178	0,001929654	0,00311241	0,001522079	0,002426283
Ozon Tabakasında İncelme	kg CFC11 eq	2,482E-07	2,97844E-07	6,28581E-07	2,11994E-07	4,21823E-07
Asidifikasyon	kg SO2 eq	0,00292	0,003112924	0,005757294	0,002413374	0,003975093
Ekolojik zehirlilik (karasal)	kg 1,4-DCB	1,80062	2,681033848	7,014551709	1,547932559	4,801035359
Su tüketimi	m3	0,0059	-0,137050162	1,229383106	-2,126531708	1,534082319

5.2. YDED Son Nokta Sonuçları

Son nokta etkilerinin değerlendirilmesinde, EAO ve IF sonuçlarının sonuçlarını karşılaştırmak için dahili normalizasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle göre dört senaryo arasında en yüksek etkiye sahip değer 100 olarak kabul edilmiş ve her bir kategori için düşük değerlerin en yüksek değere göre yüzdesi hesaplanmıştır. Sonuçlar Şekil 5.1’de sunulmuştur.

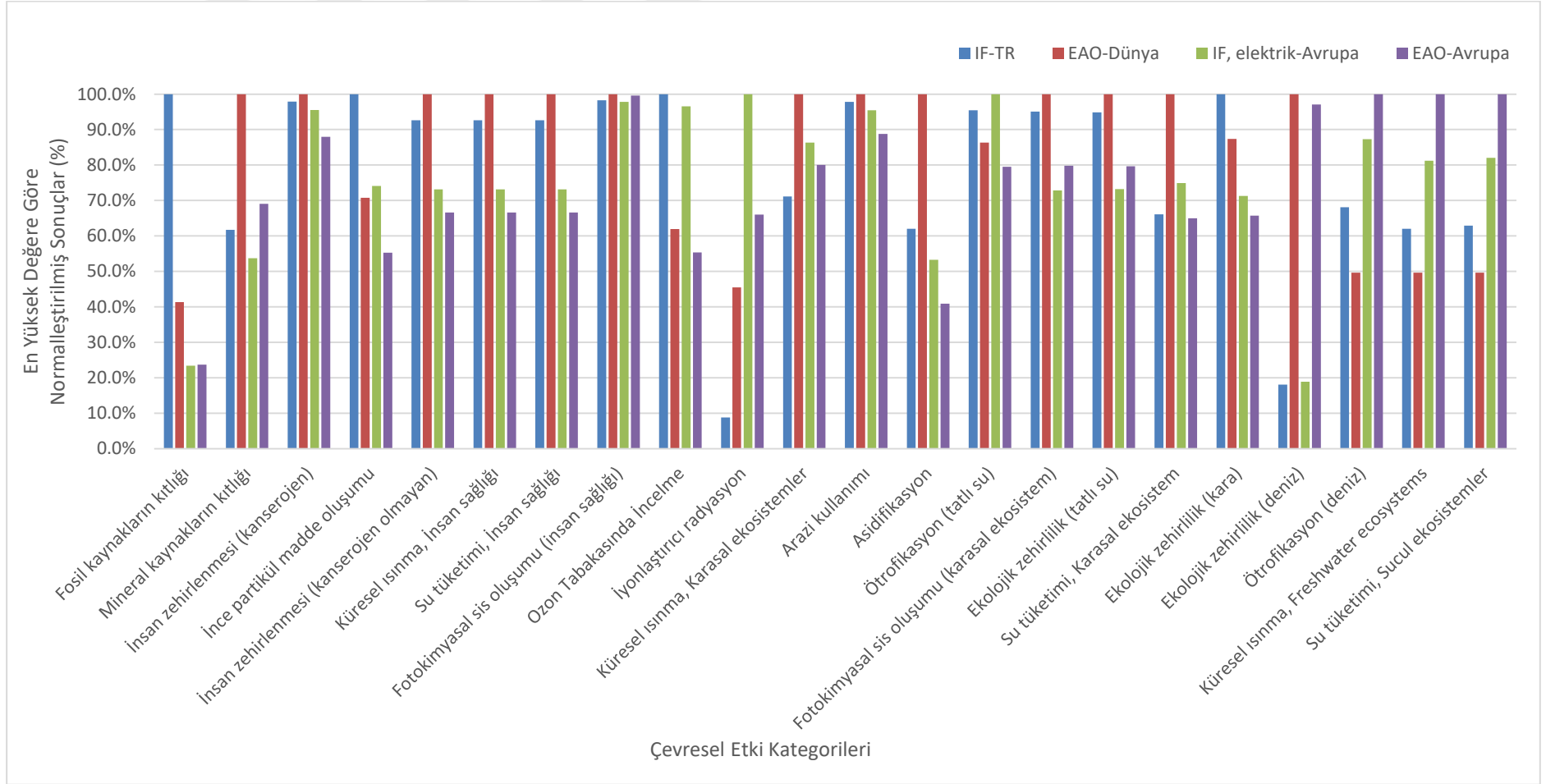
Şekil 5.1 incelendiğinde, IF-TR'nin ince partikül madde oluşumu, tatlı su ötrofikasyonu, insan zehirlenmesi (kanserojen olmayan) ve asidifikasyon kategorileri üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğu değerlendirilmektedir. IF-TR ve IF, elektrik-Avrupa senaryoları için tatlı su ötrofikasyonu, insan zehirlenmesi (kanserojen olmayan), mineral kaynakların kıtlığı, asidifikasyon kategorileri için etki sonuçları, her iki EAO senaryosundan daha yüksektir. IF-TR ve IF, elektrik-Avrupa için ekolojik zehirlilik (kara) kategorisinde dikkate değer bir azalma göze çarpmaktadır. Bununla birlikte, Avrupa elektriğinin kullanıldığı senaryolar (IF, elektrik-Avrupa ve EAO-Avrupa) karşılaştırıldığında, IF teknolojisi fosil kaynakların kıtlığı, insan zehirlenmesi (kanserojen), fotokimyasal sis oluşumu, ekolojik zehirlilik (kara) ve su tüketimi kategorileri için daha iyi görünmektedir.

Son nokta etki kategorilerinin Monte Carlo Analizi sonuçları (belirsizlik analizi sonuçları) ise Tablo 5.4’te verilmiştir. Tablo incelendiğinde, normalize edilmiş son nokta sonuçlarının standart sapmasının, normalize edilmemiş sonuçlara göre daha küçük olduğu görülmüştür. Bu durum normalize edilmiş sonuçların hassasiyetinin daha düşük olduğunu göstermektedir.

5.2.1. İnce Partikül Madde Oluşumu

Şekil 5.2, bahsi geçen çelik üretim teknolojilerinin ince partikül madde oluşumu sonuçlarını ve taşkömürü ve linyitten elde edilen elektriğin katkısını göstermektedir.

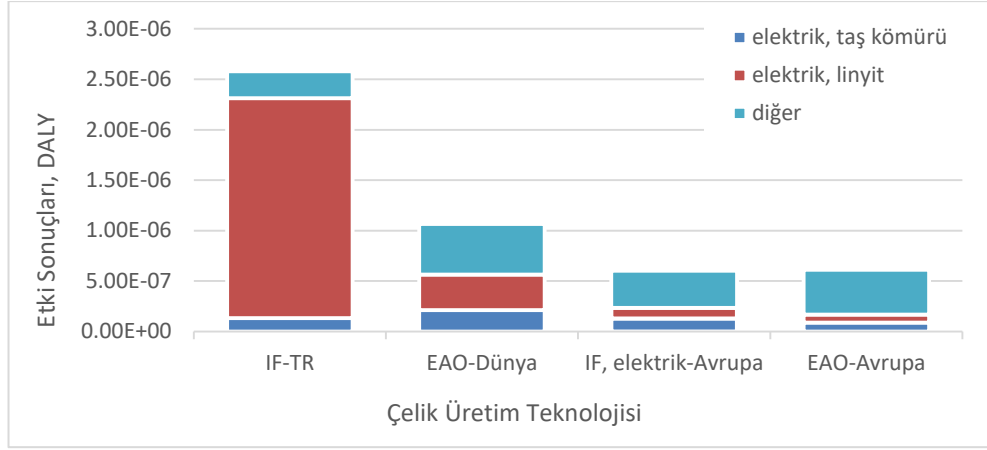
Linyitten üretilen elektriğin kullanılması nedeniyle, IF-TR'den ince partikül madde oluşumu önemli ölçüde daha yüksektir. Ancak, IF, elektrik-Avrupa ve EAO-Avrupa karşılaştırıldığında, ince partikül madde oluşumu sonuçlarında küçük bir fark gözlenmektedir.



Şekil 5.1: İndüksiyon Ocağı ve Elektrik Ark Ocağı ile üretilen 1 kg ham çeliğin son nokta etki sonuçlarının karşılaştırması.

Tablo 5.4: Son nokta etki kategorilerinin Monte Carlo Analizi Sonuçları (5000 kez).

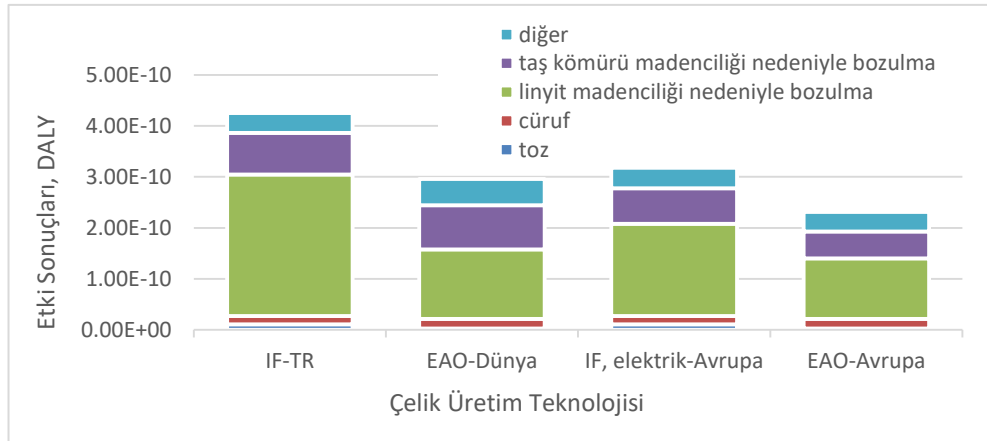
ReCiPe 2016 Endpoint H											
Etki kategorisi	Referans birim	Sonuç	Normalizasyon hariç				Normalizasyon dahil - World (2010) H/H				
			Normalize	Ortalama	Standart sapma	5% Yüzelik	95% Yüzelik	Ortalama	Standart sapma	5% Persentil	95% Persentil
İnce partikül madde oluşumu	DALY	2,58089E-06	6,13037E-08	3,52808E-06	4,55098E-05	1,97823E-06	3,55007E-06	2,66155E-06	1,30806E-06	1,97234E-06	3,49685E-06
Fosil kaynakların kıtlığı	USD2013	3,4423E-02	964,2233	7,2356E-02	1,9090E+00	2,8592E-02	4,5879E-02	3,5623E-02	4,9166E-02	2,8598E-02	4,5286E-02
Ekolojik zehirlilik (tatlı su)	species.yr	9,49001E-11	6,798E-14	3,36969E-10	3,29595E-09	6,99185E-11	6,89995E-10	2,86832E-10	1,00996E-09	7,18875E-11	8,0063E-10
Ötrofikasyon (tatlı su)	species.yr	4,14587E-10	2,96982E-13	8,45779E-10	1,36981E-08	2,52902E-10	1,20886E-09	5,80086E-10	4,28369E-10	2,52858E-10	1,18382E-09
Küresel ısınma (tatlı su ekosistemi)	species.yr	5,02539E-14	3,59985E-17	9,83976E-14	2,38523E-12	4,09846E-14	6,73569E-14	5,17038E-14	6,70405E-14	4,08879E-14	6,60826E-14
Küresel ısınma (insan sağlığı)	DALY	6,09671E-07	1,44815E-08	1,19377E-06	2,89381E-05	4,97217E-07	8,17174E-07	6,27265E-07	8,13402E-07	4,96053E-07	8,01719E-07
Küresel ısınma (karasal ekosistem)	species.yr	1,83973E-09	1,31786E-12	3,60239E-09	8,73257E-08	1,50038E-09	2,46594E-09	1,89284E-09	2,4549E-09	1,49692E-09	2,41934E-09
İnsan zehirlenmesi (kanserojen)	DALY	6,33798E-06	1,50546E-07	8,99782E-06	3,32902E-05	3,81236E-06	1,59775E-05	8,52633E-06	5,78487E-06	3,87965E-06	1,64168E-05
İnsan zehirlenmesi (kanserojen olmayan)	DALY	8,36134E-07	1,98607E-08	3,62034E-06	4,31793E-05	-2,1219E-06	1,0142E-05	3,60471E-06	1,55874E-05	-2,2073E-06	1,16699E-05
İyonlaştırıcı radyasyon	DALY	1,31571E-10	3,12521E-12	1,88288E-09	9,92432E-08	3,92125E-11	9,14568E-10	2,53889E-10	1,26323E-09	3,80568E-11	9,57148E-10
Arazi kullanımı	species.yr	1,2147E-09	8,70131E-13	7,83208E-09	3,39744E-07	9,84687E-10	2,0905E-09	1,34712E-09	8,56108E-09	9,60374E-10	2,1252E-09
Ekolojik zehirlilik (deniz)	species.yr	1,93401E-11	1,38539E-14	7,07608E-11	6,94353E-10	1,42336E-11	1,46543E-10	6,04299E-11	2,17151E-10	1,45173E-11	1,70757E-10
Ötrofikasyon (deniz)	species.yr	7,36102E-14	5,27294E-17	1,5883E-13	4,23578E-12	6,00011E-14	1,03051E-13	7,73778E-14	1,0734E-13	5,96055E-14	1,01678E-13
Mineral kaynakların kıtlığı	USD2013	1,2569E-03	35,2066	1,0337E-02	4,7748E-01	1,0564E-03	1,7923E-03	1,2553E-03	1,2224E-02	1,0604E-03	1,7863E-03
Fotokimyasal sis oluşumu (insan sağlığı)	DALY	1,57323E-09	3,73689E-11	3,36233E-09	8,98161E-08	1,3434E-09	2,15102E-09	1,6803E-09	2,14834E-09	1,34153E-09	2,13407E-09
Fotokimyasal sis oluşumu (karasal ekosistem)	species.yr	2,29248E-10	1,64218E-13	4,87902E-10	1,29475E-08	1,96627E-10	3,1405E-10	2,4546E-10	3,09201E-10	1,9628E-10	3,11795E-10
Ozon Tabakasında İncelme	DALY	1,31747E-10	3,12938E-12	3,38583E-10	9,45559E-09	1,13093E-10	2,18824E-10	1,55895E-10	2,39974E-10	1,13769E-10	2,20537E-10
Asidifikasyon	species.yr	6,18968E-10	4,43387E-13	1,31015E-09	3,48999E-08	5,11426E-10	8,4835E-10	6,51352E-10	9,21011E-10	5,12642E-10	8,37391E-10
Ekolojik zehirlilik (karasal)	species.yr	2,05504E-11	1,47209E-14	8,18524E-11	3,07857E-09	1,78405E-11	5,40594E-11	3,03711E-11	4,66208E-11	1,80031E-11	5,49411E-11
Su tüketimi (sucul ekosistem)	species.yr	3,82005E-15	2,73642E-18	-5,2336E-14	5,9003E-12	-1,3156E-12	8,82673E-13	-7,0676E-14	7,63853E-13	-1,2639E-12	9,0282E-13
Su tüketimi (insan sağlığı)	DALY	1,27861E-08	3,03707E-10	-1,9363E-07	2,16865E-05	-4,8364E-06	3,24316E-06	-2,6104E-07	2,80754E-06	-4,6468E-06	3,31669E-06
Su tüketimi (karasal ekosistem)	species.yr	7,88405E-11	5,6476E-14	-1,1764E-09	1,31878E-07	-2,9410E-08	1,97231E-08	-1,5863E-09	1,70729E-08	-2,8256E-08	2,01704E-08



Şekil 5.2: Farklı çelik üretim teknolojilerinin ince partikül madde oluşum sonuçları.

5.2.2. Ötrofikasyon (Tatlı Su)

Şekil 5.3, bahsi geçen çelik üretim teknolojilerinin tatlı su ötrofikasyonu sonuçlarını ve en çok katkı sağlayan grupları göstermektedir. En yüksek etki katkıları, taşkömürü ve linyitten üretilen elektrik nedeniyle taşkömürü ve linyit madenciliğinden kaynaklanan atıklardan gelmektedir. Ayrıca, EAO'nin (hem Dünya hem de Avrupa) cüruf oluşumunun tatlı su ötrofikasyonu üzerindeki etkisi IF'ninkinden biraz daha yüksektir.

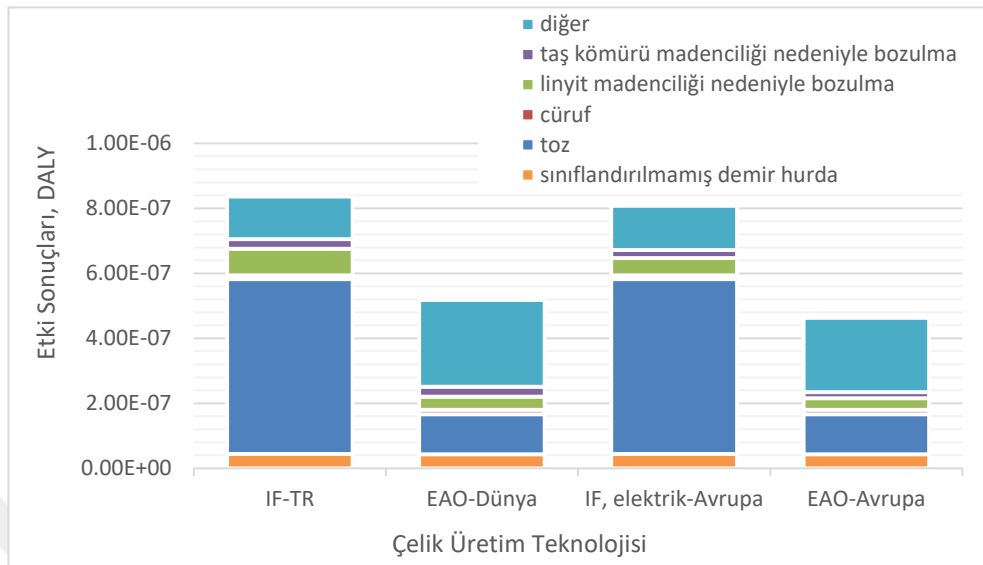


Şekil 5.3: Farklı çelik üretim teknolojilerinin tatlı su ötrofikasyon sonuçları.

5.2.3. İnsan Zehirlenmesi (Kanserojen Olmayan)

Şekil 5.4, bahsi geçen çelik üretim teknolojilerinin insan zehirlenmesi (kanserojen olmayan) sonuçlarını ve en çok katkıda bulunan grupları göstermektedir.

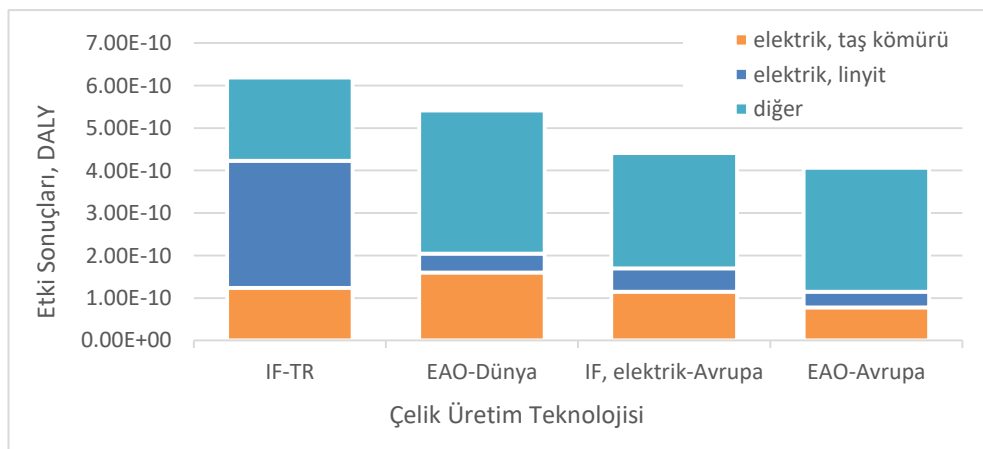
Her iki IF teknolojisi için de en yüksek etki katkısı (yaklaşık %64), düzenli depolama alanına gönderilen baca tozundan gelmektedir.



Şekil 5.4: Farklı çelik üretim teknolojilerinin İnsan zehirlenmesi (kanserojen olmayan) sonuçları.

5.2.4. Asidifikasyon

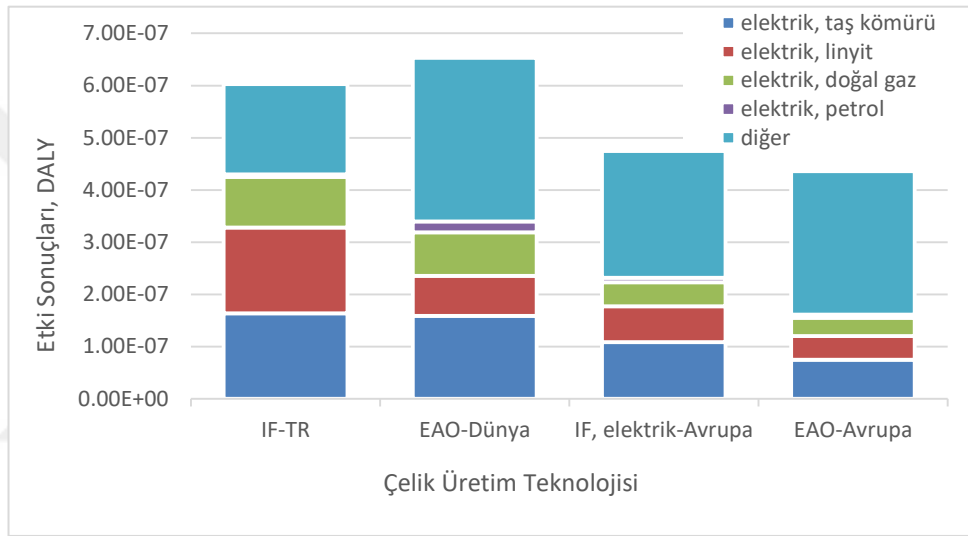
Şekil 5.5, bahsi geçen çelik üretim teknolojilerinin asidifikasyon sonuçlarını ve en çok katkıda bulunan grupları göstermektedir. IF-TR için linyitten üretilen elektriğin tüketimi, asidifikasyonun ana nedenidir. Bu enerji taşıyıcıları tarafından üretilen elektriğin kullanımından kaynaklanan etki katkısı, toplam etkinin %60'ından fazlasını oluşturmaktadır.



Şekil 5.5: Farklı çelik üretim teknolojilerinin karasal asidifikasyon sonuçları.

5.2.5. Küresel Isınma, İnsan Sağlığı

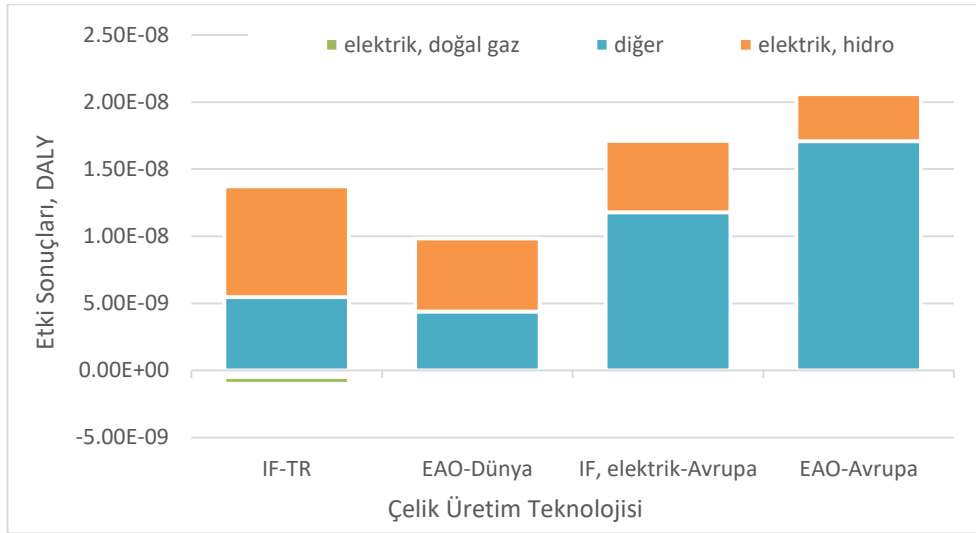
Şekil 5.6, bahsi geçen çelik üretim teknolojilerinin küresel ısınma, insan sağlığı sonuçlarını ve fosil yakıtlardan elektriğin katkısını göstermektedir. IF-TR için linyitten elde edilen elektriğin etkiye katkısının diğerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, küresel ısınmanın insan sağlığı üzerindeki genel etkisi, EAO-Dünya'ya kıyasla IF-TR için daha düşükken, EAO-Avrupa, çoğunlukla fosil yakıtlardan üretilen elektriğin daha düşük kullanım oranı nedeniyle en düşük etkiye sahiptir.



Şekil 5.6: Farklı çelik üretim teknolojilerinin küresel ısınma, insan sağlığı sonuçları.

5.2.6. Su Tüketimi, İnsan Sağlığı

Şekil 5.7, bahsi geçen çelik üretim teknolojilerinin su tüketimi, insan sağlığı sonuçlarını ve en çok katkı sağlayan grupları göstermektedir. Su tüketiminin %50'den fazlası IF-TR için baraj hidroelektrik santrallerinde üretilen elektrikten gelmektedir. IF-TR su tüketimi sonuçları EAO-Dünya'dan daha yüksek olmasına rağmen, EAO-Avrupa ve IF, elektrik-Avrupa'dan daha düşüktür. Sadece elektrik üretim tedarikçilerinin değiştirildiği IF, elektrik-Avrupa'nın IF-TR'den daha yüksek su tüketimine sahip olması, çelik üretiminde elektrik kullanımının baskın etkisini göstermektedir.



Şekil 5.7: Farklı çelik üretim teknolojilerinin su tüketimi, insan sağlığı sonuçları.

5.2.7. Tek Skor Sonuçları

World (2010) H/H normalizasyon seti ile normalize edilmiş EAO ve IF tesisleri için tek puan sonuçları Tablo 5.5'te verilmiştir. IF-TR, EAO-Dünya, IF, elektrik-Avrupa ve EAO-Avrupa toplam tek skor sonuçları sırasıyla 3×10^5 , $4,75 \times 10^5$, $2,63 \times 10^5$ ve $3,32 \times 10^5$ olarak hesaplanmıştır. IF'ler için toplam etkinin % 96,5'i fosil kaynakların kıtlığı etki kategorisinden kaynaklanmaktadır. EAO'lar için bu oran % 98'dir. Bu kategoriden sonra en yüksek ikinci etki mineral kaynakların kıtlığı kategorisinden gelmektedir. Sınıflandırılmamış demir hurdası, IF-TR, EAO-Dünya, IF, elektrik-Avrupa ve EAO-Avrupa için sırasıyla mineral kaynakların kıtlığı kategorisine yaklaşık %58, %73, %56 ve %54 katkıda bulunmaktadır.

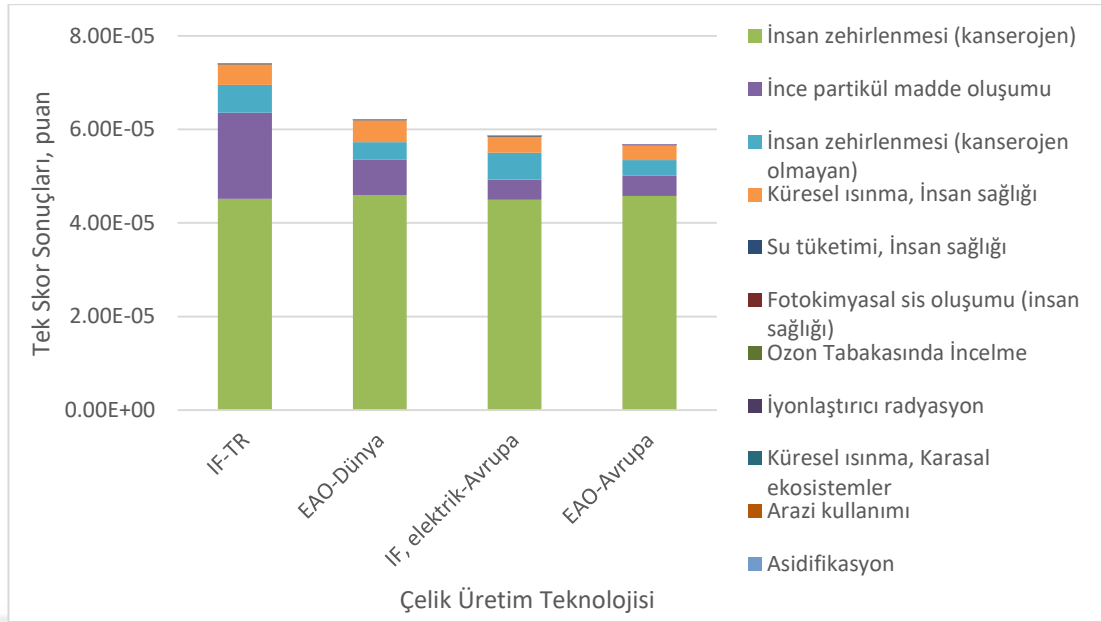
Tablo 5.5: Çalışılan senaryolar için tek skor sonuçları.

Etki kategorisi	IF-TR	EAO-Dünya	IF, elektrik-Avrupa	EAO-Avrupa	Birim
Fosil kaynakların kıtlığı	2,89E+05	4,68E+05	2,52E+05	3,23E+05	Puan
Mineral kaynakların kıtlığı	1,06E+04	9,60E+03	1,11E+04	8,82E+03	Puan
İnsan zehirlenmesi (kanserojen)	4,52E-05	4,60E-05	4,50E-05	4,58E-05	Puan
İnce partikül madde oluşumu	1,84E-05	7,60E-06	4,31E-06	4,36E-06	Puan
İnsan zehirlenmesi (kanserojen olmayan)	5,96E-06	3,69E-06	5,75E-06	3,30E-06	Puan
Küresel ısınma, İnsan sağlığı	4,34E-06	4,69E-06	3,43E-06	3,12E-06	Puan
Su tüketimi, İnsan sağlığı	9,11E-08	7,30E-08	1,19E-07	1,47E-07	Puan

Tablo 5.5: Devam.

Etki kategorisi	IF-TR	EAO-Dünya	IF, elektrik-Avrupa	EAO-Avrupa	Biri m
Fotokimyasal sis oluşumu (insan sağlığı)	1,12E-08	1,18E-08	8,60E-09	9,41E-09	Puan
Ozon Tabakasında İncelme	9,39E-10	1,42E-09	1,06E-09	9,23E-10	Puan
İyonlaştırıcı radyasyon	9,38E-10	4,84E-09	1,06E-08	7,02E-09	Puan
Küresel ısınma, Karasal ekosistemler	5,27E-10	5,69E-10	4,16E-10	3,79E-10	Puan
Arazi kullanımı	3,48E-10	4,89E-10	4,22E-10	3,91E-10	Puan
Asidifikasyon	1,77E-10	1,55E-10	1,26E-10	1,17E-10	Puan
Ötrofikasyon (tatlı su)	1,19E-10	8,41E-11	8,80E-11	6,56E-11	Puan
Fotokimyasal sis oluşumu (karasal ekosistem)	6,57E-11	6,93E-11	5,07E-11	5,52E-11	Puan
Ekolojik zehirlilik (tatlı su)	2,72E-11	2,78E-11	2,65E-11	2,44E-11	Puan
Su tüketimi, Karasal ekosistem	2,26E-11	1,78E-11	2,95E-11	3,59E-11	Puan
Ekolojik zehirlilik (kara)	5,89E-12	3,26E-11	6,14E-12	3,16E-11	Puan
Ekolojik zehirlilik (deniz)	5,54E-12	5,66E-12	5,40E-12	5,03E-12	Puan
Ötrofikasyon (deniz)	2,11E-14	3,40E-14	1,81E-14	1,39E-14	Puan
Küresel ısınma, Freshwater ecosystems	1,44E-14	1,55E-14	1,14E-14	1,04E-14	Puan
Su tüketimi, Sucul ekosistemler	1,09E-15	7,98E-16	1,40E-15	1,61E-15	Puan
Toplam	3,00E+05	4,78E+05	2,63E+05	3,32E+05	Pt

Fosil ve mineral kaynak kıtlıkları, en yakın etki kategorisi olan insan kanserojen toksisitesinden en az 10^8 kat daha fazla katkıda bulunan en büyük etkenlerdir. Bahsi geçen ilk iki kategori diğer kategorilerin karşılaştırmalı katkısına odaklanabilmek amacıyla Şekil 5.8'de gösterilmemektedir.



Şekil 5.8: Farklı çelik üretim teknolojilerinin tek puan sonuçları.

5.3. YANKI Modeli Sonuçlarının Ham Etki Sonuçları ile Karşılaştırılması ve Değerlendirme

Bölüm 4.5'te belirlenen katsayılar öncelikle kullanılan etki yöntemine uygulanmış, daha sonra YDED gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen YDED'lere ait ham etki sonuçları ile normalizasyon ve ağırlıklandırma setlerine göre hesaplanmış sonuçları Tablo 5.6'da verilmiştir. Gerekli veriye ulaşamadığı için normalizasyon katsayıları hesaplanamayan etki kategorileri için normalizasyon ve ağırlıklandırma sonuçları da hesaplanamamıştır.

Ham etki sonuçlarına göre indüksiyon ocaklı tesislerde 1 kg ham çelik üretiminin etkileri kanserojen olmayan insan zehirlenmesi kategorisinde en yüksek, ozon tabakasında incelme etki kategorisinde en düşüktür. Bu çalışmada belirlenen Türkiye normalizasyon katsayıları ile yapılan analiz sonucunda en yüksek etkinin (insan zehirlenmesi kateorilerine ait sonuçlar hesaplanamadığından) fosil kaynakların kıtlığı kategorisinde bulunduğu ve en düşük etkiye sahip etki kategorisinin deniz ötrofikasyonu olarak değiştiği gözlemlenmiştir.

Tablo 5.6: YDED çalışmalarının ham etki sonuçları ile normalizasyon ve ağırlıklandırma setlerine göre hesaplanmış sonuçları.

Etki Kategorisi	Ham Etki Sonucu	Birim	ReCiPe 2016 World 2010 (H) Normalleştirilmiş Sonuç	Türkiye (2019) Normalleştirilmiş Sonuç	Türkiye (2019) Ağırlıklandırılmış Sonuç (Tek skor)	Türkiye (2019) NK-AK_JRC Ağırlıklandırılmış Sonuç (Tek skor)	AN_JRC 2017 Normalleştirilmiş Sonuç	AN_JRC 2018 Ağırlıklandırılmış Sonuç (Tek skor)
İnce partikül madde oluşumu	4,10E-03	kg PM2.5 eq	1,60E-04	1,74E-03	1,10E-04	1,60E-04	5,72E+00	5,12E-01
Fosil kaynakların kirliliği	1,74E-01	kg oil eq	1,80E-04	1,31E-01	5,74E-03	9,88E-03	2,67E-06	2,01E-07
Ekolojik zehirlilik (tatlı su)	1,37E-01	kg 1,4-DCB	1,12E-01	-	-	-	1,16E-05	5,71E-07
Ötrofikasyon (tatlı su)	6,20E-04	kg P eq	9,50E-04	1,59E-05	5,62E-07	4,72E-07	8,40E-04	2,36E-05
Küresel ısınma	6,57E-01	kg CO2 eq	8,23E-05	1,10E-04	1,48E-05	2,26E-05	7,82E-05	1,65E-05
İnsan zehirlenmesi (kanserojen)	1,91E+00	kg 1,4-DCB	6,89E-01	-	-	-	4,96E+04	1,06E+03
İnsan zehirlenmesi (kanserojen olmayan)	3,67E+00	kg 1,4-DCB	2,46E-02	-	-	-	7,72E+03	1,42E+02
İyonlaştırıcı radyasyon	1,55E-02	kBq Co-60 eq	3,23E-05	-	-	-	3,67E-06	1,84E-07
Arazi kullanımı	1,37E-01	m2a crop eq	2,22E-05	3,02E-02	1,83E-03	2,40E-03	9,77E-08	7,76E-09
Ekolojik zehirlilik (deniz)	1,84E-01	kg 1,4-DCB	1,78E-01	-	-	-	1,84E-01	0,00E+00
Ötrofikasyon (deniz)	4,33E-05	kg N eq	9,40E-06	3,98E-08	1,12E-09	1,18E-09	1,53E-06	4,53E-08

Tablo 5.6: Devam.

Etki Kategorisi	Ham Etki Sonucu	Birim	ReCiPe 2016 World 2010 (H) Normalleştirilmiş Sonuç	Türkiye (2019) Normalleştirilmiş Sonuç	Türkiye (2019) Ağırlıklandırılmış Sonuç (Tek skor)	Türkiye (2019) NK-AK_JRC Ağırlıklandırılmış Sonuç (Tek skor)	AN_JRC 2017 Normalleştirilmiş Sonuç	AN_JRC 2018 Ağırlıklandırılmış Sonuç (Tek skor)
Mineral kaynakların kıtlığı	5,44E-03	kg Cu eq	4,53E-08	9,00E-04	3,97E-05	7,52E-05	8,55E-02	7,11E-03
Fotokimyasal sis oluşumu (insan sağlığı)	1,73E-03	kg NOx eq	8,40E-05	1,80E-04	7,71E-06	8,82E-06	4,26E-05	2,04E-06
Fotokimyasal sis oluşumu (karasal ekosistem)	1,78E-03	kg NOx eq	1,00E-04	1,90E-04	3,57E-06	-	1,78E-03	0,00E+00
Ozon Tabakasında İncelme	2,48E-07	kg CFC11 eq	4,14E-06	2,42E-03	2,60E-04	1,50E-04	1,06E-05	6,69E-07
Asidifikasyon	2,92E-03	kg SO2 eq	7,12E-05	9,89E-05	7,68E-06	6,13E-06	5,26E-05	3,26E-06
Ekolojik zehirlilik (kara)	1,80E+00	kg 1,4-DCB	1,74E-03	-	-	-	1,80E+00	0,00E+00
Su tüketimi	5,90E-03	m3	2,21E-05	1,70E-04	1,56E-05	1,46E-05	5,13E-07	4,37E-08

ReCiPe 2016 World 2010 H/H normalizasyon sonuçlarına göre ise kanserojen insan zehirlenmesi en yüksek, mineral kaynak tükenmesi en düşük etkiye sahiptir. JRC normalizasyon katsayıları ile yapılan analizde benzer şekilde etki kanserojen insan zehirlenmesinde en yüksektir, fakat en düşük etki arazi kullanımındadır. Ağırlıklandırma katsayılarının kullanılmasıyla elde edilen sonuçlarda gözlenen en yüksek ve en düşük etkiye sahip etki kategorileri normalize edilmiş sonuçlarda elde edilenlerle aynıdır. Ham sonuç etkilerine kıyasla ağırlıklandırılmış etkileri en yüksek oranda değişen ilk iki kategori sırasıyla, küresel ısınma ve deniz ötrofikasyonudur. Bunları tatlı su ötrofikasyonu kategorisi takip etmektedir. Bu üç etki kategorisi ulusal bazda normalizasyon ve ağırlıklandırma yapılmasından en çok etkilenen kategorilerdir.

Türkiye'ye özgü normalizasyon ve ağırlıklandırma katsayılarının kullanıldığı Türkiye (2019) Ağırlıklandırılmış Sonuç (Tek skor) ve JRC'nin yayınladığı katsayıların kullanıldığı AN_JRC 2018 Ağırlıklandırılmış Sonuç (Tek skor) sonuçları karşılaştırıldığında yalnızca küresel ısınma etki kategorisi sonucunun aynı mertebede olduğu görülmektedir. Bununla birlikte en yüksek değişim arazi kullanımı kategorisinde gözlenmiştir. Bu kategoride Türkiye katsayıları kullanıldığında elde edilen sonuçların, JRC katsayılarının kullanıldığı duruma göre 10^6 kat yüksek olduğu gözlenmektedir. Benzer şekilde fosil kaynakların kıtlığı 10^5 , su tüketimi ve ozon tabakasında incelme 10^3 , fotokimyasal sis oluşumu (insan sağlığı) ve asidifikasyon 10 kat mertebelerinde yüksek sonuçlara sahipken; hem ötrofikasyon (tatlı su) hem de ötrofikasyon (deniz) 10^{-1} , mineral kaynakların kıtlığı 10^{-2} , ince partikül madde oluşumu 10^{-3} kat daha düşük sonuçlara sahiptir. Sonuçlar arasındaki farkın büyüklüğü dikkat çekmektedir. Fakat sonuçlar, toplam tarım arazisi alanı gibi, bölgesel olarak büyük oranda değişebilen değerlere bölündüğünden bu farkların oluşmasının olası olduğu değerlendirilmektedir. Huijbregts ve arkadaşlarının 2003 yılında yaptığı bir çalışmada, Hollanda normalizasyon faktörleri ile hesaplanan etki sonuçları ile Dünya geneli normalizasyon faktörleri ile hesaplanan etki sonuçları karşılaştırıldığında, özellikle arazi kullanımı etki kategorisi sonuçları arasında yaklaşık 10^4 kat fark bulunduğu görülmektedir. [82]. Bu durum YDD sonuçlarının yerel katsayılardan önemli derecede etkilendiğini ortaya koymaktadır.

Türkiye normalizasyon ve ağırlıklandırma katsayıları kullanılarak hesaplanan orta nokta etki sonuçlarının belirsizlik ve hassasiyet analizleri, OpenLCA yazılımında Monte Carlo simülasyonunda 5000 rastgele çalışma yapılarak gerçekleştirilmiştir. Türkiye (2019) seti kullanılarak yapılan Monte Carlo Analizinin sonuçları Tablo 5.7’de verilmiştir.



Tablo 5.7: Model sonucu orta nokta etki kategorilerinin Monte Carlo Analizi Sonuçları (5000 kez).

Etki kategorisi	Referans birim	Ortalama	Standart sapma	Minimum	Maksimum	Medyan	5% Persentil	95% Persentil
İnce partikül madde oluşumu	kg PM2.5 eq	4,1977E-03	4,2965E-03	-2,8879E-01	4,2891E-02	4,1699E-03	3,1267E-03	5,6569E-03
Fosil kaynakların kıtlığı	kg oil eq	1,7619E-01	4,6493E-01	-3,1942E+01	4,7324E+00	1,7916E-01	1,4068E-01	2,3041E-01
Ekolojik zehirlilik (tatlı su)	kg 1,4-DCB	4,4389E-01	2,4347E+00	-2,4536E+01	1,2094E+02	1,9855E-01	1,0129E-01	1,1004E+00
Ötrofikasyon (tatlı su)	kg P eq	8,5581E-04	8,4879E-04	-4,7165E-02	7,6760E-03	7,4404E-04	3,7305E-04	1,7690E-03
Küresel ısınma	kg CO2 eq	6,6414E-01	1,9972E+00	-1,3764E+02	1,8787E+01	6,7743E-01	5,3415E-01	8,6965E-01
İnsan zehirlenmesi (kanserojen)	kg 1,4-DCB	2,5281E+00	1,5440E+00	-4,0635E+01	5,7367E+01	2,2740E+00	1,1725E+00	4,7656E+00
İnsan zehirlenmesi (kanserojen olmayan)	kg 1,4-DCB	1,6958E+01	1,1388E+02	-2,8960E+03	4,7359E+03	8,3748E+00	-	4,9218E+01
İyonlaştırıcı radyasyon	kBq Co-60 eq	2,0322E-02	9,7405E-01	-6,8169E+01	8,1181E+00	1,8055E-02	4,6087E-03	1,0634E-01
Arazi kullanımı	m2a crop eq	1,3964E-01	2,0111E+00	-1,3875E+02	2,0478E+01	1,5320E-01	1,0863E-01	2,3540E-01
Ekolojik zehirlilik (deniz)	kg 1,4-DCB	6,1675E-01	3,4474E+00	-3,3814E+01	1,7138E+02	2,6950E-01	1,3454E-01	1,5446E+00
Ötrofikasyon (deniz)	kg N eq	4,4562E-05	1,5475E-04	-1,0684E-02	1,3768E-03	4,5546E-05	3,4979E-05	5,9728E-05
Mineral kaynakların kıtlığı	kg Cu eq	4,5469E-03	1,2958E-01	-9,0008E+00	1,1354E+00	5,7104E-03	4,5446E-03	7,7730E-03
Fotokimyasal sis oluşumu (insan sağlığı)	kg NOx eq	1,8028E-03	5,9391E-03	-4,0971E-01	5,3762E-02	1,8457E-03	1,4700E-03	2,3413E-03
Fotokimyasal sis oluşumu (karasal ekosistem)	kg NOx eq	1,8587E-03	6,0259E-03	-4,1565E-01	5,4587E-02	1,9037E-03	1,5160E-03	2,4068E-03
Ozon Tabakasında İncelme	kg CFC11 eq	2,8597E-07	1,1644E-06	-7,9960E-05	1,1717E-05	2,8884E-07	2,1307E-07	4,2102E-07
Asidifikasyon	kg SO2 eq	2,9981E-03	1,0050E-02	-6,9302E-01	9,5363E-02	3,0668E-03	2,4103E-03	3,9528E-03
Ekolojik zehirlilik (karasal)	kg 1,4-DCB	2,5282E+00	1,1363E+01	-7,8389E+02	1,0512E+02	2,4029E+00	1,5725E+00	4,6790E+00
Su tüketimi	m3	-1,2456E-01	1,2193E+00	-6,5455E+00	3,6828E+01	-4,2682E-02	-	1,4708E+00
						02	2,0604E+00	

5.4. YDED TR Modeli ile YANKI Modeli Katsayılarının Karşılaştırması

2014 yılında Türkiye için Yapı Sektörü özelinde oluşturulan YDED TR Modeli'nin normalizasyon ve ağırlıklandırma katsayıları [14] incelenmiştir. Bahsi geçen model ile YANKI Modeli'nin katsayıları Tablo 5.8'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 5.8: YDED TR Modeli ile YANKI Modeli Katsayılarının Karşılaştırması.

Etki Kategorisi	Normalizasyon Katsayıları		Ağırlıklandırma Katsayıları	
	YDED TR	YANKI	YDED TR	YANKI
Küresel Isınma	5710	6110	0,15	0,138
İnsan Sağlığı	-	6110	-	0,067
Tatlı su	-	6110	-	0,039
Kara	-	6110	-	0,038
Fosil Kaynak Tüketimi	1,36	1,33	0,19	0,044
Su Tüketimi	0,21	34,35	0,15	0,091
Mineral Kaynak Tükenmesi	5	6,013	0,07	0,044
Asidifikasyon	-	29,52	0,03	0,039
Ötrofikasyon	-	-	0,05	0,062
Tatlı su	-	36,72	-	0,035
Deniz	-	1089	-	0,028
Fotokimyasal Sis Oluşumu	-	9,37	0,03	0,064
Arazi Kullanımı	-	4,54	0,1	0,061
Ozon Tabakası İncelmesi	-	0,0000103	0,03	0,106
İnce Partikül Madde Oluşumu	-	2,358	-	0,088
Ekolojik Zehirlilik	-	-	-	0,094
Tatlı su	-	-	-	0,031
Deniz	-	-	-	0,032
Kara	-	-	-	0,031
İnsan Zehirlenmesi	-	-	-	0,065
İyonlaştırıcı Radyasyon	-	-	-	0,095
İç Hava Kalitesi	-	-	0,08	-
Atık	13,1	-	0,12	-

Normalizasyon katsayıları incelendiğinde su tüketimi etki kategorisinin katsayıları arasında oldukça büyük bir fark olduğu gözlenmektedir. YDED TR Modeli'nde su tüketimi için normalizasyon katsayısı olarak TÜİK tarafından açıklanan kişi başı su tüketimi verisi kullanılmıştır. Bu veri, çekilen içme ve kullanma suyu

miktarının belediye nüfusuna bölünmesi ile elde edilmektedir. YANKI Modeli’de ise aynı katsayının hesaplanmasında TÜİK Su ve Atıksu İstatistikleri [62] kullanılmış, belediyeler, köyler, imalat sanayi, termik santraller, maden işletmeleri ve OSB’ler tarafından çekilen ve alıcı ortama deşarj edilen su miktarları ve 2019 yılı Türkiye nüfusu kullanılarak hesaplama yapılmıştır.

Ağırlıklandırma katsayıları incelendiğinde fosil kaynak tüketimi ve su tüketimi etki kategorileri katsayıları arasında diğerlerine göre daha büyük farklar olduğu gözlenmektedir. Bu farkların iki çalışmada ayrı sektörlerden (Yapı malzeme sektörü ile demir-çelik sektörü) seçilen panelist grubu arasındaki farkın yarattığı panelistlerin öznel görüşlerinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

YANKI Modeli ile katsayılar, YDED TR modelinde bulunmayan etki kategorileri için hesaplanarak ve modelde bulunan etki kategorileri için güncellenerek daha geniş kapsamlı ve daha güncel sonuçlara ulaşılmıştır.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinde dikkate alınan etki kategorilerine farklı bölgeler için farklı önemler atfedilebilmektedir. Coğrafi bölgenin ekolojik ve demografik göstergelerinin hesaplanan etki sonuçlarının değerlendirilmesinde dikkate alınması, doğruluğu daha yüksek bir yorum yapma olanağı sunmaktadır. Söz konusu göstergelerin değerleri zamana bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu edğişimler normalizasyon ve ağırlıklandırma katsayıları ile çevresel etki sonuçlarına yansıtılabilmektedir. Normalizasyon ve ağırlıklandırma katsayılarının kullanımı ile hem kategoriler arası kıyaslama yapmak mümkün olmakta hem de bölgesel olarak önemli olan kategoriler ön plana çıkarılabilmektedir. Bu durum göz önünde bulundurularak, Türkiye'ye özgü güncel normalizasyon ve ağırlıklandırma katsayılarının belirlenmesinde kullanılacak bir model oluşturulmuştur.

Ülkemizde daha önce yapı malzemesi sektörü için çevresel etki değerlendirilmesine yönelik bir model oluşturulmuştur. Değişen ekolojik ve demografik koşullar ve güncellenen etki yöntemleri nedeniyle modelin güncellenme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte, demir-çelik sektörüne yönelik bu kapsamda bir çalışma daha önce gerçekleştirilmemiştir. Bu amaçla, bu çalışmada farklı olarak "hedefe uzaklık" ve "panel yaklaşımı" çok kriterli karar verme yöntemleri ile "değişime direnç" kriter ağırlıklandırma yöntemi birlikte kullanılarak model yapısı tekrar oluşturulmuş ve demir-çelik sektörüne yönelik olarak sınanmıştır.

Türkiye'ye özgü Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi ağırlıklandırma katsayılarının belirlenmesine yönelik oluşturulan modelde (YDED YANKI) 4 aşama bulunmaktadır. Etki değerlendireme, normalizasyon katsayılarının belirlenmesi ve ağırlıklandırma katsayılarının belirlenmesi aşamaları etki kategorileri belirlenene kadar birbirinden bağımsız olarak yürütülmüştür. Son aşamada model bir indüksiyon ocaklı bir çelik üretim tesisinin etki sonuçları üzerinden sınanmıştır. YDED YANKI Modeli ile Türkiye için güvenilir ağırlıklandırma ve normalizasyon katsayıları belirlenmiştir.

Ulusal bazda ağırlıklandırma katsayılarının belirlenmesi için panelistlere gönderilmek üzere bir anket oluşturulmuş, bu amaçla 9 adet kriter belirlenmiş ve puanlama cetveli oluşturulmuştur. Hem kriterlerin hem de etki kategorilerinin

ağırlıklandırması için hesaplama yöntemleri tanımlanmıştır. Ağırlıklandırma katsayılarının belirlenmesi amacıyla 17 panelist tarafından doldurulmuş olan anketler kullanılmıştır. Panel yöntemi öznel görüşlere dayandığından yöntemin hassasiyeti panelist sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Daha çok panelistle daha kapsamlı bir çalışmanın yüz yüze yürütülmesinin sonuçların doğruluğunu arttıracığı değerlendirilmektedir.

Anket sonuçlarına göre ağırlıklandırma katsayıları hesaplanmıştır. Aritmetik ortalama $\pm 2\sigma$ (standart sapma) değer aralığı dışında kalan anket sonuçları ağırlıklandırma katsayılarının hesaplaması sırasında kapsam dışında tutulmuştur.

Normalizasyon katsayılarını hesaplamak amacıyla ulusal istatistikler, raporlar ve uluslararası kuruluşlara sağlanan veriler incelenmiş gerekli veriler temin edilmiş, katsayılar hesaplanmıştır. Türkiye'ye özgü normalizasyon ve ağırlıklandırma katsayıları için seçilen etki yöntemi içerisinde bir katsayı seti oluşturulmuştur. Her veri kaynağında olduğu gibi katsayıların belirlenmesinde kullanılan istatistiki veriye eşlik eden bir belirsizlik mevcuttur ve sonuçları etkilemektedir. Gelecekte yapay zekâ ve uzaktan algılama ile veri kaynağının takip edilerek sürekli veri toplanması gibi teknolojiler devreye girdiğinde veri belirsizliğinin de azalması beklenmektedir. Verinin gerçeğe daha yakın hale gelmesi, bu çalışma gibi geniş bir coğrafya için geniş sayıda hassas veri talep eden çalışmaların doğruluğu daha yüksek sonuçlara ulaşmasını sağlayacaktır.

Etki değerlendirme aşamasında, bir indüksiyon ocağı tesisinde üretilen 1 kg ham çelik ile ark ocağı tesisinde üretilen 1 kg ham çelik, YDD yaklaşımı kullanılarak çevresel etki açısından karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, IF tesisleri için kullanılacak veri seti olmadığından, Türkiye'de faaliyet gösteren bir IF tesisi için envanter analizi yapılmıştır. Seçilen bir indüksiyon ocaklı çelik üretim tesisinde, oluşturulan çevresel etki değerlendirme modelinin sonuçlarının uygulandığı bir yaşam döngüsü değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. İndüksiyon ocaklı tesislerdeki kaynak kullanımı ve oluşan çevresel etkiler incelenmiş ve ilgili olabilecek etki kategorileri belirlenmiştir. OpenLCA programında, ecoinvent 3.6 veri tabanı kullanılarak, tesiste bulunan her proses için ayrı birim proses veri setleri oluşturulmuştur. Sistem sınırları beşikten kapiya, ana fonksiyonel birim 1 kg ham çelik olarak belirlenmiştir. Bu çalışma ile, daha

sonra yapılacak YDD çalışmalarında kullanılabilecek, bir IF tesisine ait Yaşam Döngüsü Envanteri (YDE) veri setleri geliştirilmiştir.

Farklı ekipman ağırlıklarına göre oluşturulan senaryolar için elde edilen analiz sonuçlarının birbirinden farklı olmadığı gözlemlenmiştir. Daha sonra yapılacak çalışmalarda çelik üretimi için tesis inşaatı verisinin, ihmal (cut-off) kriteri olarak kapsam dışında bırakılabileceği değerlendirilmektedir.

Çevresel etkilerin nedenlerini derinlemesine araştırmak için dört farklı senaryo çalışılmıştır. Baz senaryoda (IF-TR) pilot tesis verileri doğrudan kullanılmıştır. IF için elektrik tedarikçileri Avrupa olarak değiştirilmiş (IF-elektrik Avrupa); EAO teknolojisi için, Avrupa (EAO-Avrupa) ve Dünyanın geri kalanı (EAO-Dünya) için veri setleri analiz edilmiştir. EAO'larda üretilen çelik için, YDD, ecoinvent veri tabanındaki "çelik üretimi, elektrik, düşük alaşımlı, çelik, düşük alaşımlı" veri setinde herhangi bir değişiklik yapılmadan gerçekleştirilmiştir. Veri tabanında bulunan EAO teknolojisine ait bu veri setleri, elektrik tedarikçisinin yanı sıra EAO teknolojisi, başka bir deyişle üretim sürecindeki girdi ve çıktı akışlarında da farklılıklar göstermektedir.

Orta nokta sonuçlarına göre IF-TR, EAO-Dünya ile karşılaştırıldığında, IF-TR'nin % 7,3 daha az CO₂-eşd (sera gazı) emisyonu yaydığı ve EAO-Dünya'nın % 21,8 daha az su tükettiği görülmektedir. EAO-Avrupa'nın KIP'ı IF, elektrik-Avrupa'dan %9,7 daha düşük ve su tüketimi %20,8 daha yüksektir.

En yüksek su tüketimi EAO-Avrupa'da ve en düşük EAO-Dünya'da hesaplanmıştır. KIP sonuçları dikkate alındığında, EAO-Dünya en yüksek KIP'a sahipken, EAO-Avrupa en düşük KIP'a sahiptir. Sadece su tüketimi ve küresel ısınma değil, çevresel etkilerin çoğu elektrik arzıyla ilgilidir. Bu durum bize birçok ürünün tedarik zincirlerinde çeliğin büyük önem taşıması nedeniyle elektrik üretiminde CO₂ emisyonlarının azaltılmasının küresel ısınmayı azaltmada ve ürünlerin karbon ayak izini azaltmada çok önemli bir role sahip olduğunu göstermektedir. Yenilenebilir hidroelektrik kullanımının su tüketiminini artırdığı dikkat çekmektedir.

Son nokta sonuçlarına göre, yüksek ince partikül madde oluşumu, karasal asitleşme, tatlı su ötrofikasyonu ve küresel ısınma potansiyelinin nedeni, %60'ın üzerinde bir katkı oranıyla linyit ve taşkömüründen üretilen elektriğin kullanılmasıdır. Su tüketiminin %50'den fazlası, tüm su tüketim kategorileri için rezervuar hidroelektrik santrallerinde üretilen elektrikten kaynaklanmaktadır. Bu durum

yenilenebilir hidroelektrik kullanımının su tüketiminini artırdığını göstermektedir. Elektrik tüketiminin etkilerinin IF için EAO'ya göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, Türkiye'de elektrik üretimi için enerji kaynaklarının (kömür, hidro, rüzgâr, güneş vb.) kullanım oranlarının Avrupa'dakinden farklı olmasıdır.

IF için daha yüksek etkiye sahip olduğu hesaplanan etki kategorileri arasında yer alan kanserojen olmayan insan toksisitesinin %64'ü baca tozunun atık depolama sahasına gönderilmesinden kaynaklanmaktadır. Baca tozunun çeşitli geri kazanım yöntemleriyle arıtılması ve temiz hurda kullanımı gibi mevcut en iyi tekniklerin (MET) uygulanmasıyla bu etkinin azaltılabileceği değerlendirilmektedir. MET'lerin uygulanması aynı zamanda ince partikül madde oluşumu kategorisindeki etkilerin azaltılmasına da katkıda bulunacaktır.

IF, elektrik Avrupa'nın elektrik enerjisi tüketimi, EAO-Avrupa'nınkinden 1,8 kat daha yüksek, KIP ise sadece 1,1 kat yüksektir. Bazı çalışmalar, IF teknolojisinin elektrik tüketiminin 1,85 MJ'e kadar azaltılabileceğini göstermiştir [11]. Elektrik tüketimi 1,85 MJ olan bir IF tesisinin, EAO-Avrupa'nın altında bir KIP'a sahip olacağı değerlendirilmektedir.

Tek puan sonuçlarına göre, EAO için hesaplanan toplam etki, IF için hesaplanan etkiden daha yüksektir. Her iki üretim rotası için de en yüksek ve en belirleyici etkiler, etki kaynağı kısıtlılığı kategorilerindedir. IF ile üretilen çelik, mineral ve fosil kaynakların tüketimi açısından EAO ile üretilen çeliğe göre daha avantajlıdır.

Bu çalışma, spesifik elektrik tüketimi ve üretilen baca tozu miktarı gibi yukarıda belirtilen olumsuz özellikler ve etkiler azaltılırsa, çelik üretiminde IF kullanımının sera gazı emisyonlarının azaltılmasında aktif bir rol oynayabileceğini göstermektedir. IF'nin bir diğer olumsuz özelliği, işlevsel birim başına çevresel etkinin artmasına neden olan düşük üretim kapasitesidir. Daha yüksek üretim kapasitelerine sahip IF teknolojilerinin geliştirilmesi bu olumsuzluğu etkisiz hale getirecektir. Tüm bunlara ek olarak maliyet de dikkat edilmesi gereken önemli bir konudur. Maliyeti de dikkate alan daha kapsamlı çalışmaların yapılması ve buna bağlı olarak daha verimli, daha ucuz ve çevreye daha az olumsuz etkisi olan bir üretim stratejisi oluşturulması önem arz etmektedir.

Modelin sınanması aşamasında, belirlenen ağırlıklandırma ve normalizasyon katsayıları ile mevcutta yayınlanmış olan Avrupa ağırlıklandırma ve normalizasyon

katsayıları kullanılarak gerçekleştirilen YDED çalışmaları sonuçları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Ham sonuç etkilerine kıyasla ağırlıklandırılmış etkileri en yüksek oranda değişen ilk iki kategori sırasıyla, küresel ısınma ve deniz ötrofikasyonudur. Bunları tatlı su ötrofikasyonu kategorisi takip etmektedir. Bununla birlikte Türkiye'ye özgü normalizasyon ve ağırlıklandırma katsayılarının kullanıldığı Türkiye (2019) Ağırlıklandırılmış Sonuç (Tek skor) ve JRC'nin yayınladığı katsayıların kullanıldığı AN_JRC 2018 Ağırlıklandırılmış Sonuç (Tek skor) sonuçları karşılaştırıldığında küresel ısınma etki kategorisi sonucunun mertebesi aynı kalmış olsa da diğer kategorilerin sonuçlarının 10^6 ila 10^{-3} kat mertebelerinde değişiklik gösterdiği görülmektedir. Bu durum YDD sonuçlarının yerel katsayılardan önemli derecede etkilendiğini ortaya koymaktadır. Sonuçların yorumlanması da değişen sonuçlara göre farklılık gösterecektir. Bu nedenle yerel ağırlıklandırma ve normalizasyon katsayılarının belirlenmesi ve belirsizliklerin azaltılmasında bu katsayıların oluşturulduğu modelin seçimi büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışma orta nokta etkilerin normalizasyon ve ağırlıklandırma katsayılarını kapsamaktadır. Son nokta etkilerin normalizasyon veya ağırlıklandırma katsayılarının belirlenmesi için orta nokta etkilerin insan sağlığını, ekosistemi ve doğal kaynakları nasıl etkilediğine dair hastalık, ölüm, yok olan canlı türleri gibi verilere ve söz konusu verilerin yorumlanabilmesi için ilgili alanda uzmanlığa ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla gerekli ulusal verinin tutulması gerekmektedir. Etki kategorilerinin karakterizasyon katsayılarının belirlenmesinde uzmanlık ve verinin önemi oldukça yüksektir. Bununla birlikte Türkiye'de söz konusu katsayıların belirlenmesi konusunda yapılmış bir çalışma bulunmamaktadır. Taranan literatürde mevcut etki yöntemleri birçok çalışmadan derlenen katsayılar ile oluşturulmuştur. Birleşmiş Milletler Çevre Programı çatısı altındaki Yaşam Döngüsü Girişimi, çevresel yaşam döngüsü etki değerlendirme göstergeleri üzerinde küresel fikir birliğini geliştirmek amacıyla bir çalışma başlatmıştır. Söz konusu çalışma YDE yöntem geliştiricileri, yaşam döngüsü bakışı çalışmaları sağlayıcıları ve hükümet ve hükümetler arası kuruluşlar, hükümet, sanayi, STK'lar ve akademisyenler dahil yaşam döngüsü bilgisi kullanıcılarından oluşan katılımcılar tarafından 2013 yılından beri sürdürülmektedir. Ülkemize ait karakterizasyon katsayıların belirlenmesi amacıyla benzer bir çalışmanın ulusal

ölçekte başlatılmasının YDD çalışmalarında hassasiyeti attiracağı değerlendirilmektedir.

Ülkemizde YDD çalışmalarının daha yüksek hassasiyet ve doğrulukta yapılabilmesi için, yerel etki yönteminin oluşturulması önem taşımaktadır. Bu amaçla orta ve son nokta karakterizasyon katsayılarının yerel olarak belirlenmesi gerekmektedir. Ülkemizde henüz bu çalışmayı gerçekleştirebilecek düzeyde veri bulunmamaktadır. Mevcut veriye ulaşmak konusunda da sıkıntılar yaşanmaktadır. Bahsi geçen sıkıntıların aşılması amacıyla konu ile ilgili yasal mevzuatın oluşturulması gerekmektedir. Karakterizasyon katsayılarının belirlenmesinde kullanılacak detaylı verinin Türkiye’de oluşturulmasının ve bu veriye erişimin sağlanmasının, etki yöntemi oluşturma çalışmalarının başlamasına olanak sağlayacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Web 1, (2021), <https://iklim.csb.gov.tr/kyoto-protokolu-i-4363>, (Erişim Tarihi: 31/12/2021).
- [2] Web 2, (2021), <https://iklim.csb.gov.tr/paris-anlasmasi-i-98587>, (Erişim Tarihi: 31/12/2021).
- [3] EC, (2019), Communication from the Commission to The European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions - The European Green Deal, European Commission.
- [4] Yeşil Düşünce Derneği, (2020), Avrupa Yeşil Mutabakatı.
- [5] USEPA, (2006), Life Cycle Assessment: Principles and Practice, EPA/600/R-06/060, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, USA,.
- [6] Menoufi K. A. I., (2011), "Life Cycle Analysis and Life Cycle Impact Assessment Methodologies: A state of the art" Yüksek Lisans Tezi, Universitat de Lleida Escola Politécnica Superior, Lleida, Spain.
- [7] Ölmez G. Ölmez, (2011), "Demir ve Çelik Üretimi Alt Süreçleri ve Nihai Ürünlerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ile Karşılaştırılması", Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- [8] Aksel H., (2014), "Çelik Yapı Bileřenlerinin Yaşam Döngüsü İçinde Yeniden Kullanım ve Geri Dönüşüm Olanaklarının Değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi.
- [9] Web 3, (2021), <https://www.cib.org.tr/en/statistics.html>, (Erişim Tarihi: 24 08 2021).
- [10] Li X., Sun W., Zhao L., Cai J., (2018), "Material metabolism and environmental emissions of BF-BOF and EAF steel production routes", Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 39 (1), 50-58.
- [11] Bedarkar S. S., Dalal N. B., (2020), "Energy Balance in Induction Furnace and Arc Furnace Steelmaking", International Journal of Engineering Research and Applications, 6 (10), 57-61.
- [12] Özdemir A., Günkaya Z., Özkan A., Ersen O., Bilgiç M., Banar M., (2018), "Life Cycle Assessment of Steel Rebar Production with Induction Melting Furnace: Case Study in Turkey", Journal of Hazardous Toxic, and Radioactive Waste, 22, 04017027.

- [13] Yiğit Ç., (2013), “Demir Döküm Endüstrisinde Yaşam Döngüsü Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- [14] Karaman Öztaş S., (2014), “Türk Yapı Malzemesi Sektörü İçin Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirilmesine Yönelik Bir Model Önerisi”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi,.
- [15] EC-JRC-IES, (2010), International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook-General Guide for Life Cycle Assessment-Detailed Guidance, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability.
- [16] EC-JRC-IES, (2010), International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment-First Edition, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability.
- [17] Soares S. R., Toffoletto L. ve Deschênes L., (2006), “Development of weighting factors in the context of LCIA”, Journal of Cleaner Production, 14, 649-660.
- [18] ISO, (2020), Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework, ISO 14040:2006+A2, International Organization for Standardization.
- [19] ISO, (2020), Environmental Management-Life Cycle Assessment-Requirements and guidelines, ISO 14044:2006+A2, International Organization for Standardization.
- [20] Pennington D. W., Potting J., Finnveden G., Lindeijer E., Joliet O., Rydberg T., Rebitzer G., (2003), “Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice”, Environment International, 30, 721–739.
- [21] Web 4, (2021), <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>, (Erişim Tarihi: 01 03 2022).
- [22] Web 5, (2019), <https://gabi.sphera.com/databases/gabi-databases/>, (Erişim Tarihi: 01 03 2022).
- [23] Web 6, (2018), <https://cerorecycling.com/blog/the-benefits-of-recycled-steel/>, (Erişim Tarihi: 21 03 2022).
- [24] Worldsteel, (2021), Steel Statistical Yearbook 2020 concise version, Worldsteel Association.
- [25] IBM, (2018), Iron & Steel and Scrap, Government of India, Ministry of Mines, Indian Bureau of Mines.
- [26] Barutçugil D. İ. S., (1978), «Türkiye'de Demir Çelik Endüstrisi İkinci Bölüm: Türkiye Demir Çelik Endüstrisi”, Bursa Üniversitesi.

- [27] Şeşen M. K., (2012), "Türkiye Çelik Üretim Sanayinin Analizi - EAF ile Yassı Çelik Üretiminin Anlamı", International Iron & Steel Symposium, 2-4.04.2012, Karabük.
- [28] EC-JRC, (2013), "Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document Best Available Techniques (BAT) for Iron and Steel Production", European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability.
- [29] Worldsteel, (1987), Steel Statistical Year Book 1987, Worldsteel Association.
- [30] Worldsteel, (1997), Steel Statistical Year Book 1997, Worldsteel Association.
- [31] Worldsteel, (2007) Steel Statistical Year Book 2007, Worldsteel Association.
- [32] Mihok L., Demeter P., Baricova D., Seilerova K., (2006), "Utilization of Ironmaking and Steelmaking Slags", Metabk, 45 (3), 163-168.
- [33] Buonicore A., Davis W., (1992), "Air Pollution Engineering Manual", Van Nostrand Reinhold.
- [34] EC-JRC, (2005), "Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Reference Document on Best Available Techniques (BAT) in the Smitheries and Foundries Industry", European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability.
- [35] CSE, (2012), "Best Available Techniques For Indian Iron and Steel Sector", Centre for Science and Environment, New Delhi.
- [36] Schifo J. F., Radia J. T., (2004), "Theoretical/Best Practice Energy Use In Metalcasting Operations", KERAMIDA Environmental, Inc.
- [37] Campbell F. C., (2013), "Metals Fabrication-Understanding the Basics", ASM International.
- [38] EC-JRC, (2001), "Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Reference Document on Best Available Techniques (BAT) for Ferrous Metals Processing Industry", European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability.
- [39] Web 7, (2016), <http://www.euroslag.com/>, (Erişim Tarihi: 26.09.2016).
- [40] Gündoğdu N., (2013), "Demir-Çelik Tesislerinde Açığa Çıkan Tufalden Demirin Geri Kazanımı", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [41] Çubukçuoğlu B., Ouki S. K., (2009), "The use of alternative constituents in cement-based solidification/stabilization of electric arc furnace dust", Proceedings of the 7th international conference on sustainable management of waste and recycled materials in construction, WASCON.

- [42] Pavao B., De Vargas A. S., Masuero A. B., Dal Molin D. C., Vilela A. C., (2009), "Influence of Electric Arc Furnace Dust (EAFD) in Alkali-Activated Fly Ash Binder", Proceedings of the 11th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies (NOCMAT'09).
- [43] Nikolic I., Đurovic D., Markovic S., Veselinovic L., Jankovic-Castvan I, Radmilovic V. V., Radmilovic V. R., (2020) "Alkali activated slag cement doped with Zn-rich electric arc furnace dust", Journal of Materials Research and Technology, 6 (9), 12783-12794.
- [44] Aziz I. H., Abdullah M. M. B., Salleh M. A. A. M., Ming L. Y., Li L. Y., Sandu A. V., Vizureanu P., Nemes O, Mahdi S. N., (2022), "Recent Developments in Steelmaking Industry and Potential Alkali Activated Based Steel Waste: A Comprehensive Review", Materials, 5 (15), 1948.
- [45] Web 8, (2009),
https://webdosya.csb.gov.tr/db/ippc/editordosya/BREF_Energy_Efficiency_2011_TR.pdf, (Erişim Tarihi: 01 04 2018).
- [46] Teo P. T., Zakaria S. K., Salleh S. Z., Taib M. A. A., Sharif N. M., Seman A. A., Mohamed J. J., Yusoff M., Yusoff A. H., Mohamad M., Masri M. N., Mamat S., (2020), "Assessment of Electric Arc Furnace (EAF) Steel Slag Waste's Recycling Options into Value Added Green Products: A Review", Metals, (10), 1347.
- [47] Acero A. P., Rodriguez C., Citroth A., (2016), "LCIA Methods, Impact Assessment Methods in Life Cycle Assessment and Their Impact Categories", GreenDeLTa.
- [48] Huijbregts M. A., Steinmann Z., Elshout P., Stam G., Verones F., Vieira M., Hollander A., Zijp M., van Zelm R., (2016), "ReCiPe 2016 - A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization", National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, Netherlands.
- [49] EPA, (2022), "Understanding Global Warming Potentials", United States Environmental Protection Agency.
- [50] Elshout P. M. F., Steinmann Z. J. N., Huijbregts M. A. J., (2016), "12-Land Use". In: "ReCiPe 2016 - A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization", National Institute for Public Health and the Environment.
- [51] Steinmann Z. J. N., Huijbregts M. A. J., (2016), "3-Stratospheric ozone depletion". In: "ReCiPe 2016 - A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization", National Institute for Public Health and the Environment.
- [52] Huijbregts M., Rombouts L. J., Ragas A. M., van de Meent D., (2005), "Human-toxicological effect and damage factors of carcinogenic and noncarcinogenic

- chemicals for life cycle impact assessment”, Integr Environ Assess Manag, 1, 181-244.
- [53] Web 9, (2018), https://glossary-item/human-toxicity-non-cancer_en. (Erişim Tarihi: 30.10.2022).
- [54] Steinmann Z. J. N., Huijbregts M. A. J., (2016), “4-Ionising Radiation”. In: “ReCiPe 2016 - A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization”, National Institute for Public Health and the Environment.
- [55] van Zelm R., Huijbregts M. A. J., (2016), “6-Photochemical Ozone Formation”. In: “ReCiPe 2016 - A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization”, National Institute for Public Health and the Environment.
- [56] van Zelm R., Huijbregts M., den Hollander H. A., van Jaarsveld H. A., Sauter F. J., Struijs J., van Wijnen H. J. ve van de Meent D., (2013), “8 Human Health Damage Due to PM10 and Ozone”. In: “ReCiPe 2008 Report I: Characterisation” Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM), 77.
- [57] van Zelm R., Preiss P., van Goethem T., Van Dingenen R., Huijbregts M., (2016), “Regionalized life cycle impact assessment of air pollution on the global” Atmospheric Environment, 134, 129-137.
- [58] Castellani V., Benini L., Sala S., Pant R., (2016), “A distance-to-target weighting method for Europe 2020”, International Journal of Life Cycle Assessment, 21, 1159-1169.
- [59] EPA, (2019), EioNET Central Data Repository-Annex_I_emission_reporting_2022_v2.xlsx, United States Environmental Protection Agency.
- [60] ETKB, (2019), EİGM Raporları, Ulusal Enerji Denge Tabloları, Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı
- [61] Resmi Gazete (2020), Su Kirliliği ve Kontrolü Yönetmeliği, 31.12.2004 tarihli ve 25687 sayılı Resmi Gazete.
- [62] TÜİK, (2020), 2020 Su ve Atıksu İstatistikleri, Türkiye İstatistik Kurumu.
- [63] TÜİK, (2020), 2020 Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, Türkiye İstatistik Kurumu.
- [64] TÜİK, (2022), İstatistik Veri Portalı-Tarım, Türkiye İstatistik Kurumu.
- [65] şahiner M., Gençbay B. ve Dinlen İ., (2021), “Madencilik Sektörüne Ait Temel Ekonomik Göstergeler, 2020”, MTA Genel Müdürlüğü Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, Ankara.

- [66] ÇŞB, (2021), "Turkey's Informative Inventory Report (IIR)" T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- [67] UNEP, (2022), UNEP Ozone Secretariat, United Nations Environment Programme.
- [68] TÜİK, (2020), 2019 Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları, Türkiye İstatistik Kurumu.
- [69] TEİAŞ, (2023), Elektrik İstatistikleri - Türkiye Elektrik Üretim-İletim İstatistikleri 2019, Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
- [70] IEA, (2023), World Energy Balances: Overview.
- [71] Eurostats, (2023), Eurostats Statistics Explained, European Statistical Office.
- [72] RIVM, (2017), Life Cycle Assessment (LCA), Hollanda Ulusal Halk Sağlığı ve Çevre Enstitüsü.
- [73] Sala S., Cerutti A. K., Pant R., (2018), "Development of a weighting approach for the Environmental Footprint", European Commission, Joint Research Center.
- [74] Sala S., Crenna E., Secchi M., Pant R., (2017), "Global normalisation factors for the Environmental Footprint and Life Cycle Assessment" European Commission, Joint Research Center.
- [75] Burchart-Korol D., (2013), "Life Cycle Assessment of Steel Production in Poland: A Case Study", Journal of Cleaner Production, 54, 235-243.
- [76] Liang T., Wang S., Lu C., Jiang N., Long W., Zhang M., Zhang R., (2020), "Environmental impact evaluation of an iron and steel plant in China: Normalized data and direct/indirect contribution", Journal of Cleaner Production, 264.
- [77] Sun S., Ertz M., (2020), "Life cycle assesment and Monte Carlo simulation to evaluate the environmental impact of promoting LNG vehicles", MethodsX, 101046.
- [78] Heijungs R., (2020), "On the number of Monte Carlo runs in comparative probabilistic LCA", The International Journal of Life Cycle Assessment, (25), 394-402.
- [79] Bonate P. L., (2001), "A Brief Introduction to Monte Carlo Simulation", Clin Pharmacokinet, 1 (40), 15-22.
- [80] Neumann P., Riquelme C., Cartes J., Kuschel-Otárola M., Hospido A., Vidal G., (2022), "Relevance of sludge management practices and substance modeling in LCA for decision-making: A case study in Chile", Journal of Environmental Management, 324, 116357.

- [81] Pérez-López P., Montazeri M., Feijoo G., Moreira M. T., Eckelman M. J., (2018), "Integrating uncertainties to the combined environmental and economic assessment of algal biorefineries: A Monte Carlo approach", *Science of The Total Environment*, 626, 762-775.
- [82] Huijbregts M. A. J., Breedveld L., Huppes G., de Koning A., van Oers L., Suh S., (2003), "Normalisation figures for environmental life-cycle assessment The Netherlands (1997/1998), Western Europe (1995) and the world (1990 and 1995)", *Journal of Cleaner Production*, (11), 737-748,.



ÖZGEÇMİŞ

Ayşegül AVİNAL lisans eğitimini, Hacettepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü'nde 2002 yılında tamamladı. 2002-2008 yılları arasında Yelkenciler Mak. Ltd. Şti PVC Profil fabrikasında laboratuvar sorumlusu olarak çalıştı.

2008 yılında TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsü'nde Araştırmacı olarak göreve başladı. 2011 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Polimer Bilim ve Teknolojisi Programında yüksek lisans eğitimini ve Anadolu Üniversitesi (Açık Öğretim) İşletme Bölümü'nde lisans eğitimini tamamladı. 2012 yılında TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Çevre ve Temiz Üretim Enstitü'nde göreve başladı.

2012 yılından bu yana birçok projede, proje yürütücü yardımcısı veya demir-çelik sektör sorumlusu olarak görev aldı. 2016 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde doktora programındaki eğitimine başladı. TÜBİTAK MAM İklim Değişikliği ve Sürdürülebilirlik Başkan Yardımcılığı Döngüsel Ekonomi ve Kaynak Verimliliği Araştırma Grubu'nda Başuzman Araştırmacı olarak görevine halen devam etmektedir.

Araştırma ilgisi ve yaptığı çalışmalar, yaşam döngüsü değerlendirmesi, kaynak verimliliği, temiz üretim uygulamaları ve denetimleri, demir ve çelik üretim prosesleri ve mevcut en iyi teknikler, iklim değişikliği, sera gazı hesaplamaları ve azaltımı, petrokimya üretim prosesleri ve mevcut en iyi teknikler, iletken polimerler, tekstillerin iletken polimer kaplanması alanlarını kapsamaktadır.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Avinal A., Ergenekon P., (2022), "Life cycle impacts of induction furnace technology for crude steel production: case study", Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 44 (4), 9974-9987, DOI: 10.1080/15567036.2022.2143946

Ek B: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinde Çevresel Etki Kategorileri için Ağırlıklandırma Katsayılarının Belirlenmesi Anketi

YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİNDE ÇEVRESEL ETKİ KATEGORİLERİ İÇİN AĞIRLIKLANDIRMA KATSAYILARININ BELİRLENMESİ ANKETİ			
1960'lı yıllarda endüstriyel ürünlerin çevreye etkilerinin araştırılması amacıyla sanayileşmiş ülkelerde ortaya çıkan yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) yaklaşımı bugün sanayi kuruluşları tarafından kaynak yönetimi alanındaki fırsat ve riskleri iyi tespit etmek, maliyet avantajı elde etmek, prestij kazanmak, uluslararası pazarda öne çıkmak, çevre politikalarını oluşturmak, çevresel etkilerini azaltmak amacıyla etkin olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde üretilen tüm ürün ve hizmetlerin çevresel etkilerinin bütüncül ve somut olarak ölçülüp değerlendirilebilmesi amacıyla ülkemizin koşullarını yansıtan yerel etki modellerinin geliştirilmesine gereksinim duyulmaktadır. Bu kapsamda YDD çevresel etki kategorileri için ağırlıklandırma katsayıları belirlenmelidir. Bu çalışmada, siz değerli uzmanların desteği ile ülkemiz koşullarını ve önceliklerini yansıtan ağırlıklandırma katsayılarının belirlenmesi hedeflenmektedir. Bu anket, "Kriter Değerlendirme" ve "Değişime Direnç" olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Anketi doldurmanız için gerekli olan açıklamalar her iki bölüm için ayrıca hazırlanarak ilgili bölüm girişinde sunulmuştur.			
1. BÖLÜM KRİTER DEĞERLENDİRME	Soru Sayısı 108	Tahmini Süre 30-60 dk	Ankete başla
2. BÖLÜM DEĞİŞİME DİRENÇ	16	5-10 dk	Ankete başla
Dilerseniz sorularınızı aysegulavinal@gmail.com adresinden, 0 533 434 0894 nolu telefondan veya çevrim içi bir toplantı talep ederek iletebilirsiniz. Anketi tamamladıktan sonra aysegulavinal@gmail.com adresine göndermenizi rica ediyoruz. Destekleriniz için çok teşekkür ederiz.			
Doktora Öğrencisi Ayşegül AVİNAL Gebze Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği		Tez Danışmanı Doç. Dr. Pinar ERGENEKON Gebze Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği	

Şekil B1.1: Ağırlıklandırma anketi – açıklama sayfası.

1. BÖLÜM

KRİTER DEĞERLENDİRME

Bu bölümde oluşturulacak etki değerlendirme modelinde kullanılmak üzere seçilen 12 adet etki kategorisinin çok kriterli değerlendirmesi istenmektedir. Etki kategorileri ve bunları değerlendirmek için belirlenen 9 adet kriter ile açıklamaları aşağıda verilmiştir.

Etki kategorileri	
<u>Abiyotik Kaynak Tükenmesi</u>	<u>Su Tüketimi</u>
<u>Küresel Isınma</u>	<u>Ozon Tabakasında İncelme</u>
<u>Asidifikasyon</u>	<u>İnsan Zehirlenmesi</u>
<u>Ötrofikasyon</u>	<u>İyonlaştırıcı Radyasyon</u>
<u>Ekolojik Zehirlilik</u>	<u>Fotokimyasal Sis Oluşumu</u>
<u>Arazi Kullanımı</u>	<u>İnce Partikül Madde Oluşumu</u>

* Etki kategorisinin anketine gitmek için ilgili kategorinin üzerine tıklayabilirsiniz.

Kriterler		
K1	İnsan Sağlığı	Bu kriter ölüm ve insan hastalıklarını kapsamaktadır. Sağlık üzerindeki etkisi ne kadar şiddetli olursa, etki kategorisi o kadar önemli olur.
K2	Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	Deniz ekosistemindeki biyoçeşitlilik üzerindeki olumsuz etkiyi ifade etmektedir. Ekosistem dengesindeki türlerin azalması veya kaybolmasını kapsamaktadır. Biyoçeşitlilik üzerindeki etkisi ne kadar şiddetli olursa, etki kategorisi o kadar önemli olur.
K3	Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)	Tatlı su ekosistemindeki biyoçeşitlilik üzerindeki olumsuz etkiyi ifade etmektedir. Ekosistem dengesindeki türlerin azalması veya kaybolmasını kapsamaktadır. Biyoçeşitlilik üzerindeki etkisi ne kadar şiddetli olursa, etki kategorisi o kadar önemli olur.
K4	Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)	Karasal ekosistemdeki biyoçeşitlilik üzerindeki olumsuz etkiyi ifade etmektedir. Ekosistem dengesindeki türlerin azalması veya kaybolmasını kapsamaktadır. Biyoçeşitlilik üzerindeki etkisi ne kadar şiddetli olursa, etki kategorisi o kadar önemli olur.
K5	Doğal Kaynaklar	Bu kriter, hammaddenin doğal rezervlerindeki azalma ile ilgilidir. Bulunabilirlik üzerindeki etkisi ne kadar şiddetli olursa, etki kategorisi o kadar önemli olur.
K6	Coğrafi Ölçek	Bir faaliyetin çevre üzerindeki etkisi, gözlemlendiği coğrafi bölge ile bağlantılıdır. Etkiye katkıda bulunan diğer değişkenler sabit kaldığından, bölge sınırları ne kadar belirli olursa, yüksek hasar olasılığı o kadar fazla olur.
K7	Etki Süresi	Bu kriter, oluşan etkinin ne kadar sürdüğü ile ilişkilidir. Bir faaliyet ne kadar uzun sürerse çevre üzerindeki etkisi o kadar önemli olur.
K8	Tersinirlik	Bu kriterde, değerlerin normal sınırları aştığı varsayımsal bir durumda, oluşan etkinin tersine çevrilebilirliğinin (yapay veya doğal) olasılığı ve zorluğu hesaba katılmalıdır. Burada amaç, bu etki kategorisi için sonuç değerinin tersine çevrilebilirliğini değerlendirmek değildir.
K9	Hedefe uzaklık	Bu kriter, etki kategorisinin referans ölçeği içindeki büyüklüğü olarak görülmelidir. Hedefe uzaklık, bir etki kategorisinin kendi içindeki durumunu veya bu etki kategorisi için bir hedef sınırına göre şiddet (katkı) seviyesini değerlendirir. Hedefe uzaklık değeri ne kadar büyük olursa, çevresel etki azaltılması gereksinimi o kadar büyük olur (etkiye katkıda bulunan diğer tüm değişkenler sabit kaldığı durumda). Bu kriter değerlendirilirken, Türkiye için geçerli olan referans sınırlar göz önünde bulundurulmalıdır.

Şekil B1.2: Ağırlıklandırma anketi – 1. bölüm (açıklamalar).

Her bir etki kategorisi için, her kriterin değerlendirme seviyesini ve belirsizliğin hesaplanabilmesi amacıyla görüşünüzün kesinliğini (yüksek, orta, düşük) işaretlemeniz beklenmektedir. Kriterler ve değerlendirme seviyeleri ile bunlara ait puanlama cetveli aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Dokuz kriter için değerlendirme seviyeleri

Kriter i	Değerlendirme puanı				Kesinlik		
Çevresel sonuçlar	Çevresel sonuçların dereceleri				Yüksek	Orta	Düşük
K1, K2, K3, K4, K5	K6	K7	K8	K9			
Çok yüksek etki	Global	Çok uzun vadeli	Geri döndürülemez	Çok büyük	100 - 81	100	81
Oldukça yüksek etki	Kıta	Uzun vadeli	Yalnızca yapay (kısmi)	Büyük	80 - 61	80	61
Hafif etki	Ulusal	Orta vadeli	Yalnızca yapay (tam)	Aynı seviyede	60 - 41	60	41
Düşük etki	Bölgesel	Kısa vadeli	Doğal (kısmi)	Küçük	40 - 21	21	40
Neredeyse algılanamaz	Yerel	Çok kısa vadeli	Doğal (tam)	Çok küçük	20 - 1	1	20
Yok	Noktasal	Anlık	Doğal anlık	Sonsuz derecede küçük	0 - 1	0	1

Bu bölümde sadece değerlendirme seviyesini ve bu seviyenin sizin için kesinliğini seçmeniz beklenmektedir. Puanlama yukarıdaki tabloya göre otomatik olarak yapılmaktadır. Kesinlik sütununda işaretleme yapmadığınız durumda yanıtınız *düşük* kesinlikte olarak değerlendirilir. Değerlendirme seviyesini seçmediğiniz durumda ise o kriter ile ilgili yanıtınız *geçersiz* olarak değerlendirilir.

Başla
Dön

Abiyotik Kaynak Tükenmesi

Abiyotik kaynak tükenmesi başlığı altında dikkate alınması gereken birçok farklı alt etki bulunmaktadır. Genel olarak bu etki kategorisi, fosil yakıtlar, mineraller, metaller, su vb. biyolojik olmayan kaynakların tüketimine dikkat çekmektedir. Bir maddenin (örneğin, linyit ya da kömür) abiyotik kaynak tükenmesinin değeri maddenin kıtlığının ölçüsüdür. Bu değer, kaynak miktarına ve kaynağın çıkarılma oranına bağlıdır.

Kriterler	Değerlendirme Seviyesi	Kesinlik	Puan
İnsan Sağlığı	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Doğal Kaynaklar	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Coğrafi Ölçek	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Etki Süresi	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Tersinirlik	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Hedef uzaklık	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz

Şekil B1.3: Ağırlıklandırma anketi – 1. bölüm (açıklamalar ve abiyotik kaynak tükenmesi).

Başla Dön	Küresel Isınma			
	Küresel ısınma, sera gazlarının salınması sonucu oluşan sera etkisinin neden olduğu küresel sıcaklıktaki değişim olarak tanımlanmaktadır. Sera gazı emisyonlarındaki artışın iklim üzerinde kayda değer bir etkisi olduğu konusunda bilimsel bir fikir birliği mevcuttur. Küresel sıcaklık artışının iklimsel bozulmaya, çölleşmeye, yükselen deniz seviyelerine ve hastalıkların yayılmasına neden olacağı tahmin edilmektedir.			
Kriterler	Değerlendirme Seviyesi	Kesinlik	Puan	
İnsan Sağlığı	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Doğal Kaynaklar	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Coğrafi Ölçek	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Etki Süresi	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Tersinirlik	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Hedefe uzaklık	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz

Başla Dön	Asidifikasyon			
	Kükürt dioksit (SO ₂) gibi asidik gazlar, atmosferdeki suyla tepkimeye girerek "asit yağmuru" oluşturmaktadır. Asit yağmurları genellikle, sebep olan gazın ortaya çıktığı yerden oldukça uzak mesafeleri etkileyerek ekosistemin bozulmasına neden olur. Asit yağmurlarına neden olan gazlar, amonyak (NH ₃), azot oksitler (NOx) ve kükürt oksitlerdir (SOx). Ancak sadece SO ₂ ve NOx kaynaklı asidifikasyon hesaba katılmaktadır. Buna gübre kullanımından kaynaklanan asitlenme de dahildir. Alanların asidifikasyona az ya da çok duyarlı olmasından dolayı ortaya çıkan bölgesel farklılıklar dikkate alınmamaktadır.			
Kriterler	Değerlendirme Seviyesi	Kesinlik	Puan	
İnsan Sağlığı	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Doğal Kaynaklar	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Coğrafi Ölçek	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Etki Süresi	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Tersinirlik	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Hedefe uzaklık	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz

Şekil B1.4: Ağırlıklandırma anketi – 1. bölüm (küresel ısınma ve asidifikasyon).

Başa
Dön

Ötrofikasyon

Ötrofikasyon, bir ekosistemde olağan dışı büyümeye yol açan besin maddelerinin birikmesidir. Bu durum sucul ortamlarda algler başta olmak üzere bitkilerde aşırı büyümeye, su kalitesinin ciddi derecede düşmesine ve suda yaşayan hayvan popülasyonunun azalmasına neden olmaktadır. Amonyak, nitrat, azot oksit ve fosforlu bileşiklerin havaya veya suya olan emisyonlarının ötrofikasyon üzerinde etkisi bulunmaktadır.

Kriterler	Değerlendirme Seviyesi	Kesinlik	Puan
İnsan Sağlığı	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz
Doğal Kaynaklar	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz
Coğrafi Ölçek	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz
Etki Süresi	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz
Tersinirlik	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz
Hedefe uzaklık	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz

Başa
Dön

Ekolojik Zehirlilik

Ekolojik zehirlilik, tatlı su, deniz ve karasal ekosistemleri inceleyen üç ayrı etki kategorisi olarak ölçülmektedir. Ağır metaller gibi bazı maddelerin emisyonlarının ekosistem üzerinde etkileri olmaktadır. Ekolojik zehirliliğin değerlendirilmesi, ekosistemler için sudaki maksimum tolere edilebilir konsantrasyona dayanmaktadır.

Kriterler	Değerlendirme Seviyesi	Kesinlik	Puan
İnsan Sağlığı	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz
Doğal Kaynaklar	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz
Coğrafi Ölçek	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz
Etki Süresi	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz
Tersinirlik	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz
Hedefe uzaklık	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz

Şekil B1.5: Ağırlıklandırma anketi – 1. bölüm (ötrofikasyon ve ekolojik zehirlilik).

Başla Dön	Arazi Kullanımı			
	Arazi kullanımında, gösterge olarak "potansiyel olarak kaybolan tür oranı (PDF)" kullanılmaktadır. Arazi kullanımında sadece hedef türler değil, tüm türler dikkate alınır. Burada dört farklı modele ihtiyaç duyulur: Arazi işgalinin yerel etkisi, arazi dönüşümünün yerel etkisi, arazi işgalinin bölgesel etkisi ve arazi dönüşümünün bölgesel etkisi. Yerel etki, işgal edilen ya da dönüştürülmüş arazide meydana gelen tür sayılarındaki değişime işaret ederken, bölgesel etki, işgal edilen ya da dönüştürülmüş alanın dışındaki doğal alanlardaki değişiklikleri değerlendirmektedir. Tür sayıları hakkındaki veriler, modellere değil gözlemlere dayanmaktadır. Alan büyüklüğünde, işgal süresinde veya eskiden dönüştürülmüş bir alan için restorasyon süresinde bir artış olması durumunda hasar da artmaktadır.			
Kriterler	Değerlendirme Seviyesi	Kesinlik	Puan	
İnsan Sağlığı	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz	
Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz	
Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz	
Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz	
Doğal Kaynaklar	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz	
Coğrafi Ölçek	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz	
Etki Süresi	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz	
Tersinirlik	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz	
Hedef uzaklık	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz	

Başla Dön	Su Tüketimi			
	Su, dünyanın birçok bölgesinde kıt olarak nitelendirilebilecek bir kaynaktır. Aynı zamanda diğer bölgelerde bol miktarda bulunabilmektedir. Diğer kaynakların aksine, suyun büyük mesafeler katederek bir bölgeden diğerine taşınması çok yüksek maliyetler gerektirdiği için mümkün değildir. Su ktlığı, suyun buharlaşması veya bir ürün içerisinde kullanıldığı durumlarda söz konusudur. Kullanılan suyun tüketildiği bölgeye çok yakın bir noktaya deşarj edildiği durumlarda su kullanımının su ktlığına neden olduğu söylenemez.			
Kriterler	Değerlendirme Seviyesi	Kesinlik	Puan	
İnsan Sağlığı	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz	
Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz	
Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz	
Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz	
Doğal Kaynaklar	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz	
Coğrafi Ölçek	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz	
Etki Süresi	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz	
Tersinirlik	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz	
Hedef uzaklık	Seçiniz ▼	Seçiniz ▼	Geçersiz	

Şekil B1.6: Ağırlıklandırma anketi – 1. bölüm (arazi kullanımı ve su tüketimi).

Başla Dön	Ozon Tabakasında İncelme			
Ozon tabakasında incelme; atmosferde kalıcı olan, insani kullanım amaçlı maddelerden kaynaklı kayıp kaçaklar nedeniyle ozon parçalama hızının artması nedeniyle meydana gelmektedir. Uzun ömürlü olmaları nedeniyle stratosfere ulaşabilen klor ve brom içeren kimyasallar (CFCl₃, halonlar ve HCFCler) ozon tabakasını inceltme potansiyeline sahiptir.				
Kriterler	Değerlendirme Seviyesi	Kesinlik	Puan	
İnsan Sağlığı	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Doğal Kaynaklar	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Coğrafi Ölçek	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Etki Süresi	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Tersinirlik	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Hedef uzaklık	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz

Başla Dön	İnsan Zehirlenmesi			
İnsan zehirlenmesi potansiyeli, çevreye salınan bir birim kimyasalın potansiyel hasar etkisini yansıtan hesaplanmış bir göstergedir. Bu kimyasallar genellikle arsenik, sodyum dikromat ve hidrojen florürdür ve bunların büyük bölümü fosil yakıtlardan elektrik üretiminden kaynaklanmaktadır.				
Kriterler	Değerlendirme Seviyesi	Kesinlik	Puan	
İnsan Sağlığı	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Doğal Kaynaklar	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Coğrafi Ölçek	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Etki Süresi	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Tersinirlik	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz
Hedef uzaklık	Seçiniz	Seçiniz		Geçersiz

Şekil B1.7: Ağırlıklandırma anketi – 1. bölüm (ozon tabakasında incelme ve insan zehirlenmesi).

Başla Dön	İyonlaştırıcı Radyasyon			
İyonlaştırıcı radyasyon radyoaktif çekirdeklerin, bir ürün ya da yapının yaşam döngüsü boyunca salınmasına bağlı olarak insan sağlığına ve ekosisteme zarar vermesi ile ilgili olan etki kategorisidir. Bu kategoride alfa-, beta-, gama-ışınlarının ve nötronların ısıma çeşitleri dikkate alınır. Elektrik üretiminde kullanılan nükleer güç bu etkiye sebep olabilmektedir.				
Kriterler	Değerlendirme Seviyesi	Kesinlik	Puan	
İnsan Sağlığı	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz	
Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz	
Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz	
Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz	
Doğal Kaynaklar	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz	
Coğrafi Ölçek	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz	
Etki Süresi	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz	
Tersinirlik	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz	
Hedefe uzaklık	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz	

Başla Dön	Fotokimyasal Sis Oluşumu			
Stratosferde koruyucu olan ozon, yer seviyesinde yüksek konsantrasyonlarda insanlar için zararlıdır. Fotokimyasal sis oluşumu uçucu organik bileşikler ve azot oksitlerin ısı ve güneş ışığı varlığında reaksiyona girerek yer seviyesinde ozon oluşturmaya ile gerçekleşmektedir. Bu etki kategorisi büyük oranda karbon monoksit, kükürt dioksit, azot oksit, amonak ve NMVOC miktarına bağlıdır.				
Kriterler	Değerlendirme Seviyesi	Kesinlik	Puan	
İnsan Sağlığı	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz	
Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz	
Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz	
Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz	
Doğal Kaynaklar	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz	
Coğrafi Ölçek	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz	
Etki Süresi	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz	
Tersinirlik	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz	
Hedefe uzaklık	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz	

Şekil B1.8: Ağırlıklandırma anketi – 1. bölüm (iyonlaştırıcı radyasyon ve fotokimyasal sis oluşumu).

İnce Partikül Madde Oluşumu			
Başla Dön Atmosferde birincil ve ikincil aerosollere neden olan hava kirliliği, solunum semptomlarından hastaneye yatışlara ve ölüme kadar insan sağlığı üzerinde önemli olumsuz etkilere sahip olabilir. Çapı 2,5 µm'den (PM_{2,5}) küçük olan İnce Partikül Madde, organik ve inorganik maddelerin karmaşık bir karışımını temsil eder. PM_{2,5}, solunduğunda solunum yollarının üst kısmına ve akciğerlere ulaştığı için insan sağlığı sorunlarına neden olur. İkincil PM_{2,5} aerosoller, diğer elementlerin yanı sıra kükürt dioksit (SO₂), amonyak (NH₃) ve nitrojen oksit (NO_x) emisyonlarından kaynaklanan havada oluşur. DSÖ çalışmaları, kronik PM maruziyetinin ölüm etkilerinin daha iri PM parçacıklarından ziyade PM_{2,5}'e atfedilebileceğini göstermektedir. 2,5–10 µm (PM_{2,5–10}) çapındaki partiküller solunum hastalıkları ile ilişkilidir.			
Kriterler	Değerlendirme Seviyesi	Kesinlik	Puan
İnsan Sağlığı	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Doğal Kaynaklar	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Coğrafi Ölçek	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Etki Süresi	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Tersinirlik	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz
Hedefe uzaklık	Seçiniz	Seçiniz	Geçersiz

Şekil B1.9: Ağırlıklandırma anketi – 1. bölüm (ince partikül madde oluşumu).

2. BÖLÜM

DEĞİŞİME DİRENÇ

Bu bölümde kriterlerin ağırlığının belirlenmesi için ikili karşılaştırma yoluyla olumsuz yönde değişmesini istemediğiniz kriteri seçmeniz beklenmektedir. Bu amaçla, iki kutuplu "değişime direnç" yapısı aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur. Bu yapıda etki sonuçlarının istenen tarafı ve istenmeyen tarafı olmak üzere iki kutup belirlenmiştir.

		İstenen	İstenmeyen
Çevresel sonuçlar	K1 İnsan Sağlığı	İnsan sağlığı açısından algılanamaz	İnsanlara ciddi zarar verir
	K2 Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	Deniz ekosistemi sağlığı açısından algılanamaz	Deniz ekosistemine ciddi zarar verir
	K3 Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)	Tatlı su ekosistemi sağlığı açısından algılanamaz	Tatlı su ekosistemine ciddi zarar verir
	K4 Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)	Kara ekosistemi sağlığı açısından algılanamaz	Kara ekosistemine ciddi zarar verir
	K5 Doğal Kaynaklar	Doğal kaynakların bulunabilirliğine etkisi algılanamaz	Doğal kaynakların bulunabilirliğine ciddi zarar verir
Çevresel sonuçların dereceleri	K6 Coğrafi Ölçek	Etki, faaliyetin bulunduğu yer ile sınırlıdır	Etki, bütün gezegene yayılır
	K7 Etki Süresi	Etki süresi çok kısadır (anlık)	Etki süresi sınırsızdır (kalıcı)
	K8 Tersinirlik	Etki doğal veya kolaylıkla tersine çevrilebilir	Etki tersine çevrilemez
	K9 Hedefe uzaklık	Etki, referans sınırdan çok küçüktür	Etki referans sınırdan çok büyüktür

Aşağıda yer alan çevresel sonuç çiftlerinden birini, yukarıda belirtilen istenmeyen tarafa doğru değiştirmeniz gerekseydi hangisini değiştirmeye diğerinden

daha az istekli olurdunuz?

(Örneğin; insan sağlığı-ekosistem sağlığı (deniz ekosistemi) çiftinden, istenmeyen yönde değiştirmeye istekli olduğunuz ekosistem sağlığı ise insan sağlığının değişmemesini tercih ettiğinizi "**A'nın değişmemesini tercih ederim**" sütununu; insan sağlığı ise ekosistem sağlığı (deniz ekosistemi)'nin değişmemesini tercih ettiğinizi "**B'nin değişmemesini tercih ederim**" sütununu işaretleyerek belirtebilirsiniz. Eğer karşılaştırılan çiftlerden birinin diğerinden bağımsız olarak değişmeyeceğini düşünüyorsanız "**Bağımsız değişim mümkün değildir**" sütununu, her ikisi için de değişimin istenmeyeceğini düşünüyorsanız "**Her ikisi için de değişim, eşit derecede istenmez**" sütununu işaretlemelisiniz.)

Şekil B1.10: Ağırlıklandırma anketi – 2. bölüm (açıklamalar).

		A	A'nın değişmemesini tercih ederim	Bağımsız değişim mümkün değildir	Her ikisi için de değişim, eşit derecede istenmez	B'nin değişmemesini tercih ederim	B
Çevresel sonuçlar	K1 İnsan Sağlığı	☐	☐	☐	☐		K2 Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)
	K2 Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	☐	☐	☐	☐		K3 Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)
	K3 Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)	☐	☐	☐	☐		K4 Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)
	K4 Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)	☐	☐	☐	☐		K5 Doğal Kaynaklar
	K5 Doğal Kaynaklar	☐	☐	☐	☐		K1 İnsan Sağlığı
	K1 İnsan Sağlığı	☐	☐	☐	☐		K3 Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)
	K2 Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	☐	☐	☐	☐		K4 Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)
	K3 Ekosistem Sağlığı (Tatlı su ekosistemi)	☐	☐	☐	☐		K5 Doğal Kaynaklar
	K1 İnsan Sağlığı	☐	☐	☐	☐		K4 Ekosistem Sağlığı (Kara ekosistemi)
	K2 Ekosistem Sağlığı (Deniz ekosistemi)	☐	☐	☐	☐		K5 Doğal Kaynaklar
Çevresel sonuçların dereceleri	K6 Coğrafi Ölçek	☐	☐	☐	☐		K7 Etki Süresi
	K7 Etki Süresi	☐	☐	☐	☐		K8 Tersinirlik
	K8 Tersinirlik	☐	☐	☐	☐		K9 Hedefe uzaklık
	K9 Hedefe uzaklık	☐	☐	☐	☐		K6 Coğrafi Ölçek
	K6 Coğrafi Ölçek	☐	☐	☐	☐		K8 Tersinirlik
	K7 Etki Süresi	☐	☐	☐	☐		K9 Hedefe uzaklık

Şekil B1.10: Ağırlıklandırma anketi – 2. Bölüm.

Ek C: Veri Formları

Tesis Bilgileri			
Tesise Dair Genel Bilgiler			
Tesis Adı	.....		
Tesisin Kuruluş Yılı	.....		
Tesisin Koordinatları (WGS84 - Enlem/Boylam)	.....		
Tesisin Kurulu Kapasitesi (ton/yıl)	.....		
Tesisin Yıllık Ham Çelik Üretim Miktarı (ton/yıl)	.....		
Tesisin Yıllık İnşaat Çeliği Üretim Miktarı (ton/yıl)	.....		
Tesisin Yıllık Su Tüketim Miktarı (m ³ /yıl)	.....		
Yıllık Enerji Tüketimi (kWh/yıl)	.....		
Tesisinin kapladığı alanı (m ²)	.....		
Arazinin tesis kurulmadan önceki kullanım amacı	.....		
Suyun Alındığı Kaynak			
	Miktar (m³/yıl)	Kaynak Adı	
Yeraltı suyu (kuyu)	☐	.....	.....
OSB	☐	.....	.....
Şebeke	☐	.....	.....
Diğer	☐	.....	.....
Kullanılan Araçlar			
	Mesafe (km)	Yakıt Miktarı (ton/yıl)	Yakıt Türü
Kamyon	☐	.....	.....
Tır	☐	.....	.....
Forklift	☐	.....	.....
Otomobil	☐	.....	.....
Personel Servisi	☐	.....	.....
Diğer (Lütfen belirtiniz)	☐	.....	.....

Şekil C1.1: Veri Formu - Tesis Bilgileri sayfası.

[illegible]

Tedarik edilen hammadde / kimyasal	Miktar (ton)	İthal edildiği ülke	Tedarik edildiği firma	Taşıma mesafesi	Taşıma aracı

Şekil C1.7: Veri Formu – Tedarik bilgileri sayfası.

]