

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**DEMİR VE ÇELİK ENDÜSTRİSİNDE 2050 YILI NET SIFIR EMİSYONLARI
ÇERÇEVESİNDE AKADEMİK ÇALIŞMALARIN ARAŞTIRILMASI**

Mehmet BUCAKLI

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAYIS 2025

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**DEMİR VE ÇELİK ENDÜSTRİSİNDE 2050 YILI NET SIFIR EMİSYONLARI
ÇERÇEVESİNDE AKADEMİK ÇALIŞMALARIN ARAŞTIRILMASI**

Mehmet BUCAKLI

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAYIS 2025

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEMİR VE ÇELİK ENDÜSTRİSİNDE 2050 YILI NET SIFIR EMİSYONLARI
ÇERÇEVESİNDE AKADEMİK ÇALIŞMALARIN ARAŞTIRILMASI

Mehmet BUCAKLI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 02/05/2025 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR (Danışman)

Doç. Dr. Emre ARABACI

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇOŞGUN

ÖZET

DEMİR VE ÇELİK ENDÜSTRİSİNDE 2050 YILI NET SIFIR EMİSYONLARI ÇERÇEVESİNDE AKADEMİK ÇALIŞMALARIN ARAŞTIRILMASI

Mehmet BUCAKLI

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR

Mayıs 2025; 52 sayfa

Sanayi devrimiyle birlikte artan insan faaliyetleri, atmosferdeki karbondioksit (CO₂) konsantrasyonunun dramatik bir şekilde yükselmesine neden olmuş ve bu durum, dünya yüzeyinden yansıyan ışınların hapsolmasına ve sera etkisi yaratmasına yol açmıştır. Bu süreç, küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi ciddi çevresel sorunları beraberinde getirmiştir. Bu sorunların farkına varılmasıyla, CO₂ ve benzeri sera gazlarının atmosfere salınımını azaltma ve sıfırlama çabaları başlamıştır. Bu bağlamda, karbon ayak izi kavramı geliştirilmiş ve üretim ile faaliyetler sonucu ortaya çıkan emisyonların azaltılması için hedefler belirlenmiştir.

Demir ve çelik endüstrisi, büyük ölçekli bir sektör olup, yüksek enerji ihtiyacı nedeniyle önemli bir emisyon kaynağıdır. Özellikle çelik üretim tesislerindeki yüksek fırınlar, işletmenin üretim maliyetlerinin büyük bir kısmını oluşturmakta ve kömür kullanımı nedeniyle yüksek emisyonlara neden olmaktadır. Bu nedenle, sektörde iyileştirme çalışmalarına öncelik verilmesi gerekmektedir. Farklı ülkelerde demir ve çelik üretimi yapan tesislerde, 2050 yılı net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmak için çeşitli çalışmalar yapılmış ve senaryolar geliştirilmiştir.

Çelik, sanayi devriminden bu yana dünyanın en çok kullanılan metallerinden biri olmuştur. Çelik üretimi, yüksek enerji tüketimi ve karbon salınımı ile iklim değişikliğine katkıda bulunmaktadır. Bu çalışmada, global düzeyde çelik üretimi yapan ülkelerin 2050 yılı net sıfır emisyon hedefine ulaşmak için uygulayabilecekleri farklı senaryolar incelenmiştir. Enerji verimliliği, karbon tutma teknolojileri ve hidrojen kullanımı gibi seçenekler, senaryo ve vaka çalışmaları dikkate alınarak emisyon azaltma başarıları ve maliyetleri ile karşılaştırılmıştır. Bulgular, çelik üretiminde hidrojen kullanımının en etkili seçenek olduğunu göstermektedir. Ancak, hidrojen kullanımının yaygınlaştırılması için altyapı, politika ve finansman gibi zorlukların aşılması gerekmektedir.

Sonuç olarak, demir ve çelik endüstrisi, 2050 yılı net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmak için kısa, orta ve uzun vadeli stratejiler geliştirmekte ve bu doğrultuda çeşitli akademik çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar, enerji verimliliği, karbon tutma teknolojileri ve hidrojen kullanımı gibi konuları içermekte ve hedef yıllarına göre emisyon azaltma başarıları ve maliyetleri ile ilgili değerli bilgiler sunmaktadır. Sektörün geleceği, bu tür yenilikçi çözümlerin uygulanabilirliği ve sürdürülebilirliği ile yakından

ilişkilidir. Bu çalışma, global düzeyde çelik sektörünün karbon emisyonlarının azaltılması için önemli bir kaynak sunmaktadır. Daha detaylı ve güncel verilerle, ülke bazında daha özelleştirilmiş senaryoların geliştirilmesi gelecek çalışmalar için önemli bir adım olacaktır.

ANAHTAR KELİMELELER: Demir ve çelik endüstrisi, Karbon nötr, Sera gazı, Sıfır emisyon, Vaka çalışmaları

JÜRİ: Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR

Doç. Dr. Emre ARABACI

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇOŞGUN



ABSTRACT

RESEARCHING ACADEMIC STUDIES WITHIN THE FRAMEWORK OF 2050 NET ZERO EMISSIONS IN THE IRON AND STEEL INDUSTRY

Mehmet BUCAKLI

MSc Thesis in Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR

May 2025; 52 pages

Increasing human activity since the industrial revolution has led to a dramatic rise in the concentration of carbon dioxide (CO₂) in the atmosphere, which traps radiation reflected from the earth's surface and creates a greenhouse effect. This process has led to serious environmental problems such as global warming and climate change. With the realization of these problems, efforts to reduce and eliminate the emission of CO₂ and similar greenhouse gases into the atmosphere have begun. In this context, the concept of carbon footprint has been developed and targets have been set to reduce emissions resulting from production and activities.

The iron and steel industry are a large-scale sector and a significant source of emissions due to its high energy demand. Especially blast furnaces in steel production facilities constitute a large part of the production costs of the enterprise and cause high emissions due to the use of coal. Therefore, improvement works in the sector should be prioritized. Various studies have been conducted and scenarios have been developed for iron and steel production facilities in different countries to achieve net zero emission targets for 2050.

Steel has been one of the world's most widely used metals since the industrial revolution. Steel production contributes to climate change through high energy consumption and carbon emissions. In this study, different scenarios that global steel producing countries can implement to achieve the 2050 net zero emission target are examined. Options such as energy efficiency, carbon sequestration technologies and hydrogen utilization are compared with their emission reduction achievements and costs by considering scenarios and case studies. The findings show that the use of hydrogen in steelmaking is the most effective option. However, challenges such as infrastructure, policy and financing need to be overcome for the widespread use of hydrogen.

In conclusion, the iron and steel industry are developing short, medium and long-term strategies to achieve the net zero emission targets for 2050 and various academic studies are being conducted in this direction. These studies cover topics such as energy efficiency, carbon sequestration technologies and hydrogen utilization, and provide valuable insights into emission reduction achievements and costs relative to the target years. The future of the industry is closely linked to the viability and sustainability of such innovative solutions. This study provides an important resource for reducing the carbon

emissions of the steel sector globally. Developing more customized scenarios on a country-by-country basis with more detailed and up-to-date data will be an important step for future studies.

KEYWORDS: Iron and steel industry, Carbon neutral, Greenhouse gas, Zero emissions, Case studies

COMMITTEE: Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR

Assoc. Prof. Dr. Emre ARABACI

Asst. Prof. Dr. Ahmet ÇOŞGUN



ÖNSÖZ

Değerli Okuyucular,

Bu tez çalışması, demir ve çelik endüstrisinin 2050 yılı net sıfır emisyon hedeflerine ulaşma yolculuğunu ele almakta ve bu süreçte karşılaşılan zorlukları, uygulanan stratejileri ve elde edilen başarıları kapsamlı bir şekilde incelemektedir.

Dünyanın en çok kullanılan metallerinden biri olan çelik, üretim süreçlerinin doğurduğu yüksek karbon salınımı ile küresel ısınmanın artışına önemli derecede katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda, çelik endüstrisi, iklim değişikliğiyle mücadelede öncelikli olarak ele alınması gereken sektörlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu sebeple, araştırmalarımı bu kritik sektör üzerine yoğunlaştırmayı tercih ettim.

Sektördeki çalışmaları derinlemesine incelediğimde, yerel tesislerden elde edilen verilerle hazırlanan akademik vaka ve senaryo çalışmalarının, 2050 yılı net sıfır emisyon hedeflerine ulaşma konusunda daha gerçekçi ve uygulanabilir çözümler sunduğunu gözlemledim. Bu tespit, akademik senaryo çalışmalarını araştırma ve bir derleme çalışması yapma kararını almama yardımcı oldu.

Bu tez çalışmasıyla, demir ve çelik endüstrisinde emisyonları azaltma ve nihayetinde sıfırlama yolunda atılan adımları akademik bir perspektifle ele almayı ve literatürdeki senaryo çalışmalarını derleyerek bu alandaki bilgi birikimine katkıda bulunmayı amaçlamaktayım. Umarım bu çalışma, sektörde sürdürülebilirlik ve çevresel sorumluluk konularında yeni araştırmalara ilham verecek ve gelecekteki politika yapıcılarına yol gösterecek bir kaynak olur.

Bu tez çalışmasının hazırlanması sürecinde bana rehberlik eden, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli hocam Prof. Dr. Afşin Güngör'e derin şükranlarımı sunarım. Bilimsel merakımı beslemek amacıyla çıktığım bu yolda, kendisine yeterli zamanı ayıramama rağmen her zaman beni destekleyen sevgili eşime de ayrıca teşekkürü borç bilirim. Onların desteği olmadan bu çalışma mümkün olamazdı.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	v
AKADEMİK BEYAN	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	3
2.1. Hava Kirliliği	3
2.1.1. Hava kirliliğine neden olan doğal sebepler.....	3
2.1.2. Hava kirliliğine neden olan yapay sebepler	3
2.2. Küresel Isınma	4
2.2.1. Küresel ısınma için yapılan uluslararası çalışmaların kronolojik tarihi....	4
2.3. Sera Etkisi ve Sera Gazları.....	7
2.4. Karbon Ayak İzi.....	8
2.4.1. Kişisel karbon ayak izi	9
2.4.2. Kurumsal karbon ayak izi	9
2.5. 2050 Net Sıfır Emisyon.....	10
3. MATERYAL VE METOT	11
3.1. Çelik Üretimi.....	11
3.1.1. Entegre çelik üretim yöntemi	11
3.1.2. Elektrik ark ocağı yöntemi	13
3.2. Çelik Üretiminde Karbon Emisyonlarını Düşürme Yöntemleri	15
3.2.1. Mevcut emisyonları düşürmek için verimlilik çalışmaları.....	17
3.2.2. Karbon yakalama ve depolama teknolojileri (CCS)	28
3.2.3. Demir indirgeme fırını yakıt kaynağı değişimi (hidrojen).....	34
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	43
5. SONUÇLAR.....	46
6. KAYNAKLAR.....	47
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Demir ve Çelik Endüstrisinde 2050 Yılı Net Sıfır Emisyonları Çerçevesinde Akademik Çalışmaların Araştırılması” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

02/05/2025

Mehmet BUCAKLI

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

CH₄ : Metan gazı

CO₂ : Karbondioksit

Gton : Giga ton

H₂ : Hidrojen gazı

Kg : Kilogram

Kt : Kiloton

Mt : Milyon Ton

N₂O : Nitröz Oksit

MWh : Mega watt saat

O₃ : Ozon gazı

PJ : Petajoule

°C : Santigrat derece

Kısaltmalar

BM : Birleşmiş Milletler

BF-BOF : Yüksek Fırın – Bazik Oksijen Fırını

CCS : Karbon yakalama (tutma) ve depolama

CCU : Karbon yakalama (tutma) ve yeniden kullanma

CCUS : bon yakalama (tutma), yeniden kullanma ve ayırma

CNY : Çin Yeni (para birimi)

COP3 : 3. taraflar Konferansı

COP13 : 13. taraflar Konferansı

COP17 : 17. taraflar Konferansı

CO₂e : Karbondioksit eşdeğeri

DRI	: Doğrudan İndirgenmiş Demir
EAF	: Elektrik Ark Ocağı
GWP	: Küresel Isınma Potansiyeli
GWP100	: 100 yıllık birikmiş etkisi
GWP 500	: 500 yıllık birikmiş etkisi
LCA	: Yaşam Döngüsü Analizi
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
IPCC	: Hükümetler Arası İklim Değişikliği
NZE	: Net Sıfır Emisyon
Rio+20	: Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Konferansı
WMO	: Dünya Meteoroloji Örgütü
UNEP	: Birleşmiş Milletler Çevre Programı
UNFCCC	: Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Dünya üzerinde çelik üretim proseslerinin dağılımı ve lokasyonları 15

Şekil 3.2. Hidrojenin üretim yöntemlerine göre birim maliyetlerinin karşılaştırılması.. 37



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Sera Gazları ve Atmosfere Olan Zarar Katsayıları.....	8
Çizelge 3.1. Örnek bir BF-BOF tesisinde ana bölümlerin ortalama CO ₂ emisyon oranı dağılımı	13
Çizelge 3.2. Doğalgaz kaynaklı DRI-EAF ve hurda beslemeli EAF tesisinde ana bölümlerin ortalama CO ₂ emisyon oranı dağılımı	14
Çizelge 3.3. Küresel olarak demir ve çelik üretimi kaynaklı emisyonları azaltmak amaçlı uygulanan popüler programlar ve projeler	15
Çizelge 3.4. Çin’de demir ve çelik endüstrisinde emisyonları azaltmak için yapılan en popüler iyileştirme çalışmasının detayları	17
Çizelge 3.5. Demir ve çelik endüstrisinde sıfır emisyon hedefine ulaşmak için verimlilik temelinde uygulanan akademik senaryo çalışmalarından popüler olanların özet ve detayları	20
Çizelge 3.6. Demir ve çelik endüstrisinde sıfır emisyon hedefine ulaşmak için karbon tutma ve depolama teknolojileri temelinde uygulanan akademik senaryo çalışmalarından popüler olanların özet ve detayları.....	30
Çizelge 3.7. Demir ve çelik endüstrisinde sıfır emisyon hedefine ulaşmak için yakıt kaynağı olarak hidrojen kullanım teknolojileri temelinde uygulanan akademik senaryo çalışmalarından popüler olanların özet ve detayları.....	38

1. GİRİŞ

İnsanoğlu bütün ihtiyaçlarını karşılamak için var olduğu sürece doğal kaynakları kullanmıştır. Ancak, son yüzyılda nüfusun artması ve üretim yöntemlerinin gelişmesiyle birlikte doğal kaynaklar adeta sömürülmeye başlanmıştır. Buna bağlı olarak doğaya ciddi etkileri olan endüstriyel atıklar ortaya çıkmış ve bilinçsiz bir şekilde doğaya bırakılmıştır.

Sanayi devrimi sonrası özellikle fosil yakıtların kullanımının artması sebebiyle atmosfere salınan CO₂ (Karbondioksit gazı) miktarı artmaya başlamıştır. 2023 yılı verilerine göre atmosferdeki CO₂ miktarı 420.13 ppm (milyonda bir parçacık) seviyelerine yükseldiği tespit edilmiştir (NOAA 2023). Bu oranın sanayi devrimi öncesi olarak kabul edilen 18. Yüzyılın başlarında 280 ppm seviyelerinde olduğu bilinmektedir. Atmosferdeki CO₂ oranı; son 420.000 yıl boyunca bugün ki seviyelerini hiç aşmadığı tahmin edilmektedir (Lead vd. 2001). Atmosferde bulunan su buharı, CO₂, CH₄, N₂O ve O₃ gibi gazlar güneşten kısa dalga olarak gelip yeryüzünden uzaya uzun dalga olarak geri yansıyan ışınların bir miktarını tutarak sera etkisi yapmaktadır. Sera etkisi sayesinde dünyanın sıcaklığı yaşam için elverişli bir ortam oluşturmaktadır. Fakat son birkaç yüzyılda atmosferdeki CO₂ gazı başta olmak üzere sera gazlarının oranı dramatik şekilde yükselerek küresel ısınmayı artırarak doğal yaşamı tehdit etmektedir. Yapılan araştırmalara göre; insan faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonları, 18. yüzyılın sonundan günümüze kadar olan küresel sıcaklıkların ortalama 1°C ısınmasından sorumludur. Mevcut ısınma hızı devam ederse 2040 yılında insan kaynaklı küresel ısınmanın 1,5 °C'ye ulaşması beklenmektedir (Masson-Delmotte 2018). Küresel sıcaklıkların artması sonucunda iklimde beklenmeyen değişiklikler ortaya çıkarak iklim değişikliğine sebep olmaktadır.

Küresel bir sorun olan iklim değişikliği ile mücadele için Birleşmiş Milletler bünyesinde faaliyet gösteren Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) tarafından 1988 yılında Hükümetler Arası İklim Değişikliği (IPCC) programı kurulmuştur. Bu kuruluşun amacı iklim değişikliğinin nedenlerini, etkilerini ve bu etkiler ile mücadele yöntemleri gibi araştırmaları inceleyerek hükümetlere iklim politikaları geliştirebilmek için kullanabilecekleri veriyi sağlamaktır. İklim değişikliği ve çevre konularında yapılan bütün çalışmaları takip edip, özellikle 5 yılda bir değerlendirme raporları hazırlayarak tüm aktör ve paydaşlara mevcut durum için raporlar, tavsiyeler ve bilimsel tahminler sunmaktadır. IPCC; 2013 yılında yayınladığı raporda; sanayi devrimi öncesine göre insan kaynaklı küresel ısınmanın 2100 yılında 4,5 °C kadar artabileceğini ve bu artışın 1,5 °C'de durdurulması gerektiğini, 2 °C'nin üstüne çıkarsa felaket olabileceğini belirtmiştir. Bu uyarı göz önünde bulundurularak 2016 yılında yürürlüğe giren Paris Anlaşmasında küresel sıcaklık artışını sanayi devrimi öncesine kıyasla 2 °C düzeyinin altında kalacak biçimde 1,5 °C ile sınırlandırmaya yönelik hedef konulmuştur (Stocker vd. 2013). Böylece 21. Yüzyılın ikinci yarısına kadar sera gazlarının salınımının nötr hale gelmesi hedeflenmiştir.

Net sıfır emisyon (NZE) 2050 hedeflerine ulaşmak için küresel olarak en büyük sorumlu olan demir ve çelik endüstrisine öncelikli olarak odaklanmak gereklidir. Gelişen üretim yöntemleriyle birlikte çelik ve çelik türevi malzemelerin kullanımı arttığı için emisyon değerleri de yıldan yıla artma eğilimindedir. IEA (Uluslararası Enerji Ajansı) 2023 raporuna göre; Demir ve Çelik Endüstrisi yıllık 2,8 Gton CO₂ emisyonu salınımı yaparak dünyadaki toplam (enerji ile ilgili) emisyonların %8'inden sorumludur (IEA

2023). 2022 yılında dünya üzerindeki bütün otomobillerin ürettiği emisyon miktarı yıllık 3,2 Gton CO₂ ve dünya üzerindeki bütün binaların ürettiği emisyon miktarı yıllık 3,4 Gton CO₂ olarak raporlanmıştır (Tiseo 2023). Böylece Demir ve çelik endüstrisinin tek başına ne kadar fazla emisyon ürettiği daha net anlaşılabilir. Demir ve Çelik sektörü aynı zamanda toplam endüstriyel kaynaklı emisyonların yaklaşık olarak %28'ini oluşturmaktadır (IRENA 2020). Sektörde emisyon oranlarının büyük olmasının temel iki sebebi vardır. Birincisi; dünyanın en çok kullanılan metali olan demir madeninden çelik üretilmesi için kullanılan enerjinin çok yüksek olmasıdır. İkincisi; günümüzde çelik üretimi için kullanılan enerji kaynağının %75'inin hala kömür olmasıdır (Fan ve Friedmann 2021a; Zhang vd. 2021a). Ayrıca dünya üzerinde kullanılan kömürün yaklaşık olarak %16'sı bu sektör tarafından kullanılmaktadır (IEA 2020b).

Demir ve çelik endüstrisi büyüyen bir sektör olduğundan dolayı, üretim proseslerinin gözden geçirilip emisyonların sıfırlanması gereklidir. Fakat sektör oldukça büyük ve rekabetçi bir küresel pazarda ticarete sahip olduğu için emisyonları düşürme çalışmaları beraberinde bazı zorlukları da getirmektedir. Emisyonların düşürülmesi için uygulanacak olan yöntemler hem mevcut fabrikalara ek yatırım maliyetleri getirmekte hem de çeliğin üretim maliyetlerini arttırmaktadır. Bundan dolayı emisyonları azaltmak için ilk önce kısa vadede mevcut üretim yöntemlerinde iyileştirmeler ve düşük yatırım maliyetleri ile enerji verimliliğini arttırmaya yönelik yöntemler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Orta vadede salınan sera gazlarını yeni teknolojiler yardımıyla tutarak atmosferde birikmesini engellemek ve uzun vadede enerji kaynaklarını fosil yakıtlar dışında yenilenebilir enerji kaynaklarıyla değiştirmek fikirleri ön plana çıkmaktadır.

2. KAYNAK TARAMASI

Bu bölümde küresel ısınma, iklim değişikliği, iklim değişikliğine olan sebepler, sera gazları, karbon ayak izi ve uluslararası küresel ısınma için alınan önlemler hakkında bilgilere yer verilmiştir.

2.1. Hava Kirliliği

İnsanlara ve diğer canlılara zarar veren veya onların bir şekilde zarar görmesine sebep olan veya çevreye zarar veren kimyasalların, partiküllerin ve biyolojik moleküllerin dünya atmosferinde artmasına hava kirliliği denilir. Hava kirliliği insanların yaşam kalitesini etkilemekle birlikte hastalıklara, alerjiye ve ölümlere neden olmaktadır. Aynı zamanda bitkilere, hayvanlara ve ekolojiye de geri dönülemez zararlar vermektedir (İzah vd. 2023).

Havayı kirliliği sebeplerinden olan zararlı gazlar bulutlara ve yağmurlara karışmasıyla asit yağmurları oluşturmaktadır. Asit yağmurları yeşil alanları yok eder ve suları kirletir. Freon, kloroflorokarbon gibi gazların atmosferde artması sonucu güneşin zararlı ışınlarını engelleyen ozon tabakası incelendiği için dünyaya ulaşan zararlı ışınlar doğaya ve insanlara çok ciddi zararlar verir.

Hava kirliliğine neden olan kirleticiler; insan faaliyetleri sonucu yapay kaynaklardan meydana gelen kirlilik ve tabii kaynaklardan meydana gelen kirlilik olarak ikiye ayrılır. İnsan faaliyetleri sonrası meydana gelen yapay kirlilik hava kirliliğinin ana sebebi olarak sayılmaktadır.

2.1.1. Hava kirliliğine neden olan doğal sebepler

Doğal olarak oluşan volkanlar, tozlar, orman yangınları, okyanus spreyleri ve buharlaşma hava kirliliğine neden olabilmektedir (Odubo ve Kosoe 2024). Bu kaynaklardan atmosfere çeşitli gazlar ve partiküller yayılabilmektedir.

Volkanik faaliyetler sırasında meydana çıkan kükürt dioksit ve partiküler maddeler yayılır ve atmosferdeki radyasyon dengesi olumsuz yönde etkilenir. Volkanlar hava kirliliğinin doğal olarak en büyük nedeni olarak bilinirler. Orman yangınlarında yanma sonucu ortaya çıkan yüksek miktarda karbondioksit, duman ve zehirli gaz atmosfere karışır. Böylece hem hava kirliliğine sebep olur hem de fotosentez yapacak bitkiler yandığı için atmosferdeki miktarı artar. Okyanuslar ve denizler üzerinde tuz spreyleri şeklinde sodyum klorür buharlaşma ve rüzgarlar ile atmosfere yayılırlar.

2.1.2. Hava kirliliğine neden olan yapay sebepler

Yapay olan hava kirliliği sebeplerine; insan faaliyetleri olan ısınma, endüstri, ulaşım, enerji üretimi, nükleer gibi faaliyetler örnek gösterilebilir.

Isınma için kullanılan kömürler hava kirliliğinin ana sebeplerinden olmasına rağmen kaliteleri düştükçe kirlilik seviyesi artmaktadır. Özellikle linyit kömürü kullanan termik santrallerde yeterli filtrasyon sistemleri kullanılmadığı takdirde çevreye çok ciddi kirlilik yaydığı gözlemlenmiştir. Kükürt, kül ve nem oranı yüksek olup kalorisi düşük olan kömürlerin yanması sonucu atmosfere kükürt dioksit gazı daha çok salınır. Kükürt

dioksit gazının insan sağığına ciddi zararları vardır. Astım hastalarında ve kalp hastalarında ciddi belirtiler göstermekte ve akciğerlerin bağışıklığını azaltmaktadır.

Endüstriyel faaliyetlerde fosil yakıtlar, kimyasal maddeler ve organik ürünler kullanılıp işlenmektedir. Böylece atmosfere yüksek miktarlarda karbondioksit ve çeşitli zehirli ve kimyasal gazların salınımı olmaktadır. Ayrıca endüstriyel faaliyetler sonrası hava kirliliğinin yanında toprak ve su kirliliğini arttıran atıklar oluşmaktadır.

Ulaşım; hava kirliliğine neden olan en büyük yapay sebeplerdendir. Kara, deniz, hava ulaşımında petrol ürünleri kullanılmaktadır. Ulaşım araçları insanların yoğun olduğu kentlerde daha yoğun şekilde kullanıldığı için ciddiye alınması gereken bir hava kirliliği yaratmaktadır. Araçların egzozlarından zararlı gazların yanında partiküller de çevreye yayılmakta ve insan sağığını tehdit etmektedir. Gelişmiş ülkeler üretilen ulaşım araçları için belirli egzoz emisyon standartları getirmektedir.

2.2. Küresel Isınma

Küresel ısınma; yeryüzünün yıllar içinde anormal bir şekilde sıcaklık ortalamasının yükselmesiyle orman yangınları, kuraklık ve bazı meteorolojik afetlere yol açarak ekosistemi tehdit eden bir olgudur. İnsan yaşamını olumsuz şekilde etkilerken bitki ve hayvan türlerini yok olmasına sebep olmaktadır. Enerji üretimi ve kullanımı başta olmak üzere, endüstrileşme, ormansızlaştırma ve bilinçsiz tarım gibi insan faaliyetleri küresel ısınmaya neden olan başlıca sebeplerdir (Özmen 2009).

Dünya nüfusunun aşırı şekilde artması, sanayi devrimi sonrası endüstrileşme, yaşam standartlarının yükselmesi, kentlere göçler ile kalabalıklar halinde barınma, ormanların ve doğal çevrenin tahrip edilmesinin yanında yaklaşık 150 yıldır kullanılan ve zamanla kullanımı artan petrol, doğal gaz, kömür gibi fosil yakıtların büyük miktarda zararlı gaz ve parçacıkların atmosfere salması küresel ısınmaya sebep olmaktadır. Küresel ısınmaya sebep olan gazlara genel olarak sera gazları denmektedir.

2.2.1. Küresel ısınma için yapılan uluslararası çalışmaların kronolojik tarihi

Küresel ısınmaya bağılı olarak iklim değışikliği etkileri de ciddi şekilde görülmeye başlamasıyla küresel bir sorun haline gelmiştir. İklim değışikliği araştırmaların ve önlemlerin bilimsel çerçevede yürütülmesi çözüm için yetersiz kalmaya başlamıştır. Böylece çözüm için hükümetlerin ve uluslararası toplulukların konuyu ciddi şekilde ele alması gerektiği kanaati oluşmuştur. Çünkü bir bölgedeki yapılan zararlı faaliyetler sadece o bölgeye değil bütün dünyaya zarar vermektedir. Uluslararası yapılan çalışmalarla kurulan örgütler yaptıkları çalışmalar ve kampanyalar ile devletlerin konuyu ciddi şekilde ele almasını sağlamışlardır. İklim değışikliği çalışmaları için kurulan örgütler ve yapılan çalışmalar kronolojik şekilde şöyledir.

Stockholm Konferansı

Çevre ile ilgili olarak ilk büyük uluslararası toplantı olan Stockholm Konferansı aynı zamanda Birleşmiş Milletler İnsan Çevresi Konferansı olarak da adlandırılır. İsveç'in başkenti Stockholm şehrinde Birleşmiş Milletler himayesinde 5-16 Haziran 1972 tarihinde düzenlenmiştir. Bu konferansa 114 hükümetten delegasyonlar katılmıştır. Gelişmiş ve gelişmekte olan farklı düzeydeki ülkeler çevre konusu çerçevesinde ilk defa

bir araya gelerek Birleşmiş Milletler İnsan Çerçevesi Bildirisini kabul etmişlerdir (Aşan 2022).

Bu bildiri, sağlıklı çevre yönetimini vurgulayarak ve 26 ilkeyi aydınlatarak çevre sorunlarını uluslararası gündemin başına taşıdı. Sanayileşmiş ve gelişmekte olan ülkeler arasında ekonomik büyüme, kirlilik (hava, su ve okyanuslar) ve küresel refah arasındaki ilişkiyi tartışmaya başladı.

Konferans, ayrıca İnsan Çevresi için Eylem Planı'nı da oluşturdu. Bu plan üç ana kategoriye içeriyordu:

- Küresel Çevresel Değerlendirme Programı (izleme planı)
- Çevre yönetimi faaliyetleri
- Ulusal ve uluslararası düzeyde değerlendirme ve yönetim faaliyetlerini desteklemek için uluslararası önlemler. Bu kategoriler daha sonra 109 öneriye ayrıldı.

Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP): Stockholm konferansının önemli sonuçlarından biri, UNEP'nin kurulmasıydı. Bu program, küresel çevre çabalarını koordine etmede önemli bir rol oynar (Handl 2012).

Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC)

1988 yılında Birleşmiş Milletler tarafından kurulan ve iklim değişikliğiyle mücadelede kilit bir rol oynayan bir kurumdur. IPCC'nin temel görevi, politika yapıcıları en son bilimsel araştırmalarla bilgilendirmektir. Çalışmaları, periyodik olarak yayınlanan Değerlendirme Raporları (AR) ile odaklanır. En son raporlarından biri olan AR6, iklim değişikliğinin hızlandığını ve acil eylem gerektiğini vurgular (IPCC 2023).

IPCC, üç çalışma grubu aracılığıyla iklim bilimini değerlendirir:

- Çalışma Grubu I (Fiziksel Temel): Sera gazı emisyonları, sıcaklık eğilimleri ve iklim modelleri gibi fiziksel temelleri inceler.
- Çalışma Grubu II (Etkiler ve Adaptasyon): İklim değişikliğinin tarım, su kaynakları, sağlık ve diğer alanlardaki etkilerini araştırır.
- Çalışma Grubu III (Azaltma Stratejileri): Politika, teknoloji ve azaltma yollarını değerlendirir.

Küresel iş birliği ve özel raporlar da IPCC'nin gücünü oluşturur. Bu çabalar, gezegenin geleceğini şekillendirmek için kolektif çabaların önemini hatırlatır.

Kurum için çalışan yazarlar iklim değişikliğinin etkilerine ile uyum ve hafifletmenin nasıl gerçekleştirilebileceğinin kapsamlı bir özetini sağlamak için her yıl yayınlanan binlerce bilimsel makaleyi değerlendirmek için gönüllü olarak zaman ayırırlar.

BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC)

1992 yılında Brezilya'nın Rio de Janeiro şehrinde Birleşmiş Milletler öncülüğünde imzalanan ilk çevre sözleşmesi, küresel ısınmaya karşı alınması gereken önlemleri belirlemiştir. Bu sözleşme, 197 ülkenin taraf olduğu ve iklim sisteminin endüstri ve diğer sektörlerden kaynaklanan sera gazlarından etkilendiğini kabul eden bir anlaşmadır.

Sözleşme, iki ana kategoriye ayrılan ülkeleri yükümlendirmiştir:

- Ek-I Tarafları: Bu kategori, OECD üyesi sanayileşmiş ülkeleri, Rusya Federasyonu'nu, Baltık Devletleri'ni ve Orta ve Doğu Avrupa'daki bazı geçiş ekonomilerini içerir. Ek-I Tarafları, 2000 yılına kadar sera gazı salım düzeylerini 1990 seviyelerine indirme taahhüdünde bulunmuştur. Bu nedenle, iklim değişikliği ile mücadele için yeni politikalar üretmeli ve gerekli önlemleri almalıdırlar.
- Ek-II Tarafları: Bu kategori, gelişmiş ülkeleri içerir ve Ek-I ülkelerinin sorumluluklarına ek olarak gelişmekte olan ülkelerin UNFCCC'den kaynaklanan yükümlülüklerini yerine getirmelerine yardımcı olmakla görevlidir. Ek-II Tarafları, mali destek sağlamak ve teknoloji transferi çalışmaları yapmak için çaba göstermelidir. Ek dışı ülkeler ise sera gazı salımlarını azaltmalı ve diğer ülkelerle iş birliği yapmalıdır, ancak doğrudan bir yükümlülükleri yoktur (Unfccc 1992).

Kyoto Protokolü

Kyoto Protokolü, küresel ısınma ve iklim değişikliği konusunda mücadeleyi sağlamaya yönelik uluslararası bir anlaşmadır. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi içinde imzalanmıştır. Bu protokolü imzalayan ülkeler, karbon dioksit ve sera etkisine neden olan diğer beş gazın salımını azaltmaya veya bunu yapamıyorlarsa karbon ticareti yoluyla haklarını arttırmaya söz vermişlerdir. Protokol, ülkelerin atmosfere saldıkları karbon miktarını 1990 yılındaki düzeylere düşürmelerini gerekli kılmaktadır.

1997'de imzalanan protokol, 2005'te yürürlüğe girebilmiştir. Çünkü, protokolün yürürlüğe girebilmesi için, onaylayan ülkelerin 1990'daki emisyonlarının (atmosfere saldıkları karbon miktarının) yeryüzündeki toplam emisyonun %55'ini bulması gerekmekteydi ve bu orana ancak 8 yılın sonunda Rusya'nın katılımıyla ulaşılabilmiştir. Kyoto Protokolü, şu anda yeryüzündeki 160 ülkeyi ve sera gazı salımının %55'inden fazlasını kapsamaktadır. Bu anlaşma, çevre ve gelecek nesiller için önemli bir adımdır, çünkü sera gazlarının kontrol altına alınması, gezegenimizin sürdürülebilirliği için hayati önem taşımaktadır (Birleşmiş Milletler 1998).

Paris Anlaşması

Küresel sıcaklık artışının 2 santigrat derecenin altında tutulması için Kasım 2015 tarihinde Paris İklim Konferansında 195 ülkenin oy birliği ile Paris Anlaşması kabul edilmiştir. UNFCCC'ye taraf olan 196 ülkenin imzasıyla birlikte Kasım 2016 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Paris Anlaşması'nın temel hedefleri şunlardır:

- Anlaşma, insan kaynaklı sera gazı salımlarının neden olduğu küresel sıcaklık artışını uzun vadede, sanayileşme öncesi döneme kıyasla 2 °C'nin altıyla sınırlamayı hedeflemektedir. Ayrıca, bu konuda 1,5 °C'yi yakalamanın önemine dikkat çekmektedir.
- Ülkelerin iklim değişikliğiyle mücadeleyle “ortak fakat farklılaştırılmış sorumluluklar ve göreceli kabiliyetler” ilkesi çerçevesinde katkıda bulunmaları hususu teyit edilmiştir.
- Anlaşma, düşük emisyonlu ve iklim değişikliğine karşı dirençli kalkınmayı desteklemek amacıyla finansman akışını yönlendirmeyi hedeflemektedir (Unfccc 2015).

Anlaşmaya taraf olan ülkelerin emisyon azaltımına yönelik olarak üstlenecekleri sorumluluklar ise şunlardır: Gelişmekte olan ülkelerin şartları göz önünde bulundurulmak kaydıyla bütün ülkelerin en kısa zamanda emisyonlarını azaltmaya başlaması gerekmektedir. Bu doğrultuda, bütün ülkelerin iklim değişikliğiyle mücadeleyle yönelik ulusal katkılarını açıklamaları ve bu katkıları beş yılda bir güncellemeleri gerekmektedir. Ulusal katkılar dahilinde gelişmiş ülkelerin mutlak emisyon azaltımı hedefi olarak sürece liderlik etmeye devam etmeleri beklenmektedir (Unfccc 2015).

Ayrıca, anlaşmaya taraf olan ülkelerin uzun vadeli düşük emisyonlu kalkınma stratejilerini de ortaya koymaları öngörülmüştür. Bu stratejiler, iklim değişikliğiyle mücadelede daha sürdürülebilir ve çevre dostu bir geleceğe yönelik yol haritasını belirlemeyi amaçlamaktadır (Rocha ve Falduto 2019).

2.3.Sera Etkisi ve Sera Gazları

Dünya nüfus artışı ile fosil yakıtların aşırı kullanımı, sanayileşme, kimyasal ürünlerin kullanımının artması ve ormanların yok edilmesi gibi yaşanan olumsuzluklar atmosferin gaz bileşim oranlarının bozulmasına sebep olmaktadır.

Atmosferde denge halinde bulunan ve sera gazları olarak bilinen karbondioksit, metan, nitrik oksitler, diazotmonoksit, azot ve florokarbonlar gibi gazlar dünyanın sıcaklığının yaşanabilir şekilde dengede olabilmesi için vazgeçilmez bir öneme sahiptirler. Güneşten dünyaya gelen radyasyon atmosferi geçerek yeryüzüne gelir ve yeri ısıtır. Bir kısım da yer yüzü radyasyonu olarak uzaya geri döner. Atmosferden geçen radyasyonun bir kısmı başta su buharı olmak üzere karbondioksit, ozon, metan, aerosoller gibi gazlar tarafından tutulur. Yapılan araştırmalara göre atmosferdeki sera gazları olmasaydı, dünyamız bugünkü sıcaklığından 30 derece daha soğuk olacaktı. Bunun yanında sera gazların fazla olması da dünyanın daha fazla ısı tutmasına ve ısınmasına sebep olmaktadır.

Dünya atmosferinin %78'i azottan, %28'i oksijenden oluşur. Geri kalan %1'lik kısım ele alındığında %0,93 kadarı su buharından oluşmaktadır. %0,07 oranda diğer gazlar bulunmaktadır. Bu oranın büyük çoğunluğu da sera gazları olarak bildiğimiz gazlardan oluşmaktadır. Atmosferin binde birinden daha azını oluşturan sera gazlarının dengesinin bozulması geri dönülemez sorunlar ortaya çıkarmaktadır (UNEP 2023).

Bu sera gazları genel olarak şöyle ifade edilebilir. Dünya üzerinde su kaynaklarından buharlaşma ile atmosferde biriken su buharı, küresel ısınmanın ana sebebi

olan nitelendirilen karbondioksit, karbondioksitten 25 kat daha fazla sera etkisi yaratan metan gazı, karbondioksit oranla atmosfere 300 kat daha fazla zarar veren ve ozon tabakasında sorunlara neden olan azot oksit, ozon tabakasında güneşin zararlı ışınlarını absorbe ederken alt tabakalara birikmesi sera etkisini arttıran ozon gazı ve endüstriyel olarak soğutucularda kullanım amacıyla üretilen kloroflorokarbonlar için kesin önlemler alınmalıdır (Moore 2024)

2.4. Karbon Ayak İzi

Karbon ayak izi; insan faaliyetleri, süreç veya hizmetler yoluyla salınan sera gaz emisyon hacimlerinin karbondioksit cinsinden hesaplanmasına denir. Karbon ayak izi farklı şekillerde incelenebilir. Bir evin ısınması, soğutulması ve aydınlanması gibi konfor özelindeki hizmetlerin karbon ayak izi hesaplanabildiği gibi, herhangi bir yiyeceğin veya giyeceğinde karbon ayak izi hesaplanabilmektedir. Bunların yanında bir şirketten alınan hizmetin, iş seyahatinin ve bir otelde konaklamanın da karbon ayak izi hesaplanmaktadır. Çünkü bu faaliyetlerin sonucunda sera gazları salınmaktadır.

Faaliyetler sonucu atmosfere karbondioksit dışında Kyoto protokolünde belirtilen diğer sera gazları da salınmaktadır. Fakat bir ölçü birimi oluşturulabilmesi açısından metan, azot oksit, ozon ve florokarbonlar gibi gazların karbondioksit gazına göre atmosferde bulunma oranları ve zarar verme katsayıları hesaplanarak karbondioksit eşdeğeri (CO₂e) oluşturulmuştur. Karbon ayak izi genellikle yıllık periyotlar halinde ton bazında ölçülerek hesaplanır.

Aşağıdaki tabloda karbon ayak izi çalışmaları için sera gazlarının karbondioksit gazına oranla etki katsayıları beş ayrı değerlendirme raporunda verilmiştir. Raporlarda verilen gazların atmosferde 100 yıllık birikmiş etkisi (GWP 100) dikkate alınarak oranları gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Sera Gazları ve Atmosfere Olan Zarar Katsayıları (Ponsioen 2014).

Sera Gazları ve Atmosfere olan zarar katsayıları	AR1 (1990)	AR2 (1995)	AR3 (2001)	AR4 (2007)	AR5 (2013)
Karbondioksit, Fosil K. (CO ₂)	1	1	1	1	1
Metan, Fosil Kaynaklı (CH ₄)	21	21	23	25	28
Metan, Biyolojik K. (CH ₄)	18.25	18.25	20.25	22.25	25.25
Nitroz Oksit (N ₂ O)	290	310	296	298	265
HCFC-141b	440	-	700	725	782
HFC-134a	1200	1300	1300	1430	1300
HCFC-22	1500	-	1700	1810	1760
HCFC-142b	1600	-	2400	2310	1980
CFC-11	3500	-	4600	4750	4660
CFC-12	7300	-	10600	10900	10200
Kükürt Hekzaflorür (SF ₆)	-	23900	22200	22800	23500

IPCC, fosil metan için ek faktörler vermektedir, ancak bu faktörler göz ardı edilmelidir. Yukarıdaki tablodaki biyogenik metan faktörü, metan faktörlerinden kg metan başına 2,75 kg CO₂ çıkarılarak hesaplanmıştır. 2.75'lik düzeltme faktörü için CO₂'nin molar kütlesi CH₄'ün molar kütlesine bölünmüştür. 20 yıllık birikmiş etki için GWP faktörlerindeki değişiklikler benzerdir: en son raporlarda fosil metan, kg başına 72'den 84 kg CO₂ eşdeğerine ve N₂O, kg başına 289'dan 264 kg CO₂ eşdeğerine değişmiştir. Metan ve N₂O için GWP 500 (500 yıllık birikmiş etki) faktörleri son raporda yayınlanmadı (Ponsioen 2014).

Karbon ayak izini temel olarak kişisel ve kurumsal yapının altında farklı kategorilerde değerlendirmek mümkündür. Böylece çevreye ve atmosfere verilen zararın daha açık şekilde görülmesi mümkündür.

2.4.1. Kişisel karbon ayak izi

Birincil Karbon Ayak İzi: Günlük hayat içerisinde insanların ihtiyaçlarını gidermek için gerçekleştirdiği faaliyetler sonucu tükettiği enerji tüketiminden ortaya çıkan emisyon değerleridir. Isınmak için kullanılan doğalgaz, ulaşım amacıyla kullanılan fosil yakıtlar birincil karbon izi adı altında incelenmektedir (Kumaş vd. 2019).

İkincil Karbon Ayak İzi: İnsanların kullanmış oldukları ürünlerin imalatından tüketime ve hatta bertaraf edilmesine kadar geçen yaşam süresi boyunca dolaylı olarak açığa çıkan sera gazlarının karbon cinsinden miktarını ifade eder. Birincil ayak izinde ulaşım için aracın kullandığı fosil yakıt sonrası ortaya çıkan emisyonlar birincil ayak izi kapsamında değerlendirilirken, aracın üretilmesi, müşteriye ulaştırılması, kullanım esnasında bakım ile tamirat işlemleri ve aracın kullanım ömrünün tamamlanması sonrası bertaraf işlemleri neticesinde ortaya çıkan emisyonlar ikincil (dolaylı) karbon ayak izi kapsamında değerlendirilmektedir (Kumaş vd. 2019).

2.4.2. Kurumsal karbon ayak izi

Doğrudan Karbon Ayak İzi (Kapsam 1): Kuruluş tarafından sahip olunan, kontrol (Garvey vd. 2022) edilen kaynaklar ve faaliyetlerin doğrudan neden olan emisyonlar birincil karbon ayak izi olarak değerlendirilir. Bu emisyonlar aynı zamanda kapsam (Scope) 1 sınıfı altında değerlendirilir.

Dolaylı Karbon Ayak İzi (Kapsam 2): Kuruluşun dışarıdan tedarik ettiği elektrik, ısı ve su buharı gibi kaynaklar neticesinde ortaya çıkan emisyonlar ikincil karbon ayak izi olarak değerlendirilir. Bu emisyonlar aynı zamanda kapsam (scope) 2 sınıfı altında değerlendirilmektedir.

Diğer Dolaylı Karbon Ayak İzi (kapsam 3): Kurumların tedarik zinciri içerisinde kullandıkları ve dışarıdan alınan bütün hizmetlerin kapsadığı faaliyetler sonucu ortaya çıkan emisyonlar bu kapsamdadır. Çalışanların iş seyahatleri, tedarik zinciri lojistiği, taşeron firma faaliyetleri örnek olarak verilebilir. Bu emisyonlar aynı zamanda kapsam (scope) 3 sınıfı altında değerlendirilmektedir (Tarleton 2023).

2.5. 2050 Net Sıfır Emisyon

Küresel olarak insan kaynaklı karbon salınımının azaltılarak ya da uzaklaştırarak, 2050 yılına kadar atmosferdeki karbon miktarının net sıfıra düşülmesi durumu net sıfır olarak ifade edilmektedir (Allen vd. 2022). Küresel emisyonlar sıfırın üstünde kaldığı sürece gezegenimiz ısınmaya devam edecek ve küresel felakete yol açacaktır.

Dünyanın geleceği için, ısınmayı sadece 1,5 °C ile sınırlamak gerekiyor. Bu, daha az karbon salınımı yapılması ve 2050 yılına kadar ‘sıfır karbon’ hedefine ulaşılması anlamına geliyor. ‘Sıfır karbon’, atmosfere zarar veren gazların neredeyse hiç kalmayacak şekilde azaltılması demektir. Şu anda, ülkelerin çoğunun iklim değişikliğiyle mücadele planları yeterli değil. 2010 yılına göre, 2030 yılında sera gazı salınımının %9 artacağı tahmin ediliyor.

Birleşmiş Milletler Çevre Konseyinin 2023 yılında yayınladığı rapora göre; enerji üretimi, sera gazı salınımının en büyük kaynağıdır ve bu yüzden enerji sektöründe büyük değişiklikler yapılması gerekiyor. Kömür, doğalgaz ve petrol gibi kirletici enerji kaynakları bırakılıp, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerjilere geçiş yapılmalı. Bu sayede, karbon salınımı büyük ölçüde azaltılabilir. Dünya genelinde birçok ülke, şehir ve şirket, sıfır karbon hedefine ulaşmak için söz veriyor. Bu sözü verenler arasında Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Hindistan ve Avrupa Birliği gibi büyük kirleticiler de var. Ancak, bu sözlerin gerçek eyleme dönüşmesi için daha fazla çaba gerekiyor. Birleşmiş Milletler, bu taahhütlerin daha hızlı ve etkili bir şekilde yerine getirilmesi için özel bir uzman grup kurdu (UNEP 2023).

Demir ve çelik üretimi, çok fazla enerji tüketen ve bu yüzden de çok fazla karbon salınımı yapan bir sektördür. Bu sektör, iklim değişikliğiyle mücadelede çimento, kimyasal ve gübre üretimi gibi öncelikli olarak iyileştirilmesi gereken alanlardan biridir. Daha temiz ve daha verimli üretim yöntemleri kullanılarak, bu sektördeki karbon salınımı azaltılabilir.

3. MATERYAL VE METOT

2050 yılına kadar net sıfır karbon emisyonu hedefleyen demir ve çelik endüstrisi için emisyonların ortadan kaldırılması büyük bir öncelik taşımaktadır. Bu sektörün gelecek yıllarda büyümesi beklenirken, emisyonların bu büyümeyle ters orantılı olarak azaltılması gerekmektedir. Bu nedenle, sektörde acil ve etkili çözümler bulunmalıdır.

Bu çalışma, demir ve çelik endüstrisinde emisyon azaltımı ve sıfırlama hedeflerine ulaşmak için planlanan stratejileri ve yeni teknolojileri ele almaktadır. Hükümetler, akademik kurumlar ve şirketler tarafından 2050 net sıfır emisyon hedeflerine yönelik olarak planlanan projeler incelenmiştir. Bu projelerin temelini oluşturan teknolojiler tanımlanmış ve sınıflandırılmıştır.

Küresel çapta geliştirilen projeler ve metodolojiler doğrultusunda yapılan akademik senaryo ve vaka çalışmaları, bu yazıda sistematik bir şekilde incelenmiştir. Sayısız senaryo ve vaka çalışmasına rağmen, hedef emisyon miktarları ve maliyetleri konusunda net bilgi sunabilen çalışmalar öne çıkarılmıştır. Bu çalışmalarda, belirlenen senaryoların uygulanması durumunda, azaltılan emisyon miktarları, senaryo maliyetleri veya her ikisi ayrıntılı olarak sunulmuştur.

3.1. Çelik Üretimi

Dünya çapında çelik üretimi için en çok kullanılan iki yöntem bulunmaktadır. İlki, entegre çelik üretim yöntemi olarak bilinen ve demir cevherinden çelik üretimi için kullanılan yöntemdir; bu yöntem yüksek fırın ve bazik oksijen fırını (BF-BOF) aşamalarını içerir. Diğer yöntem ise, doğrudan hurda çelik veya indirgenmiş demir kullanılarak çelik üretimi gerçekleştiren elektrik ark ocağı (EAF) yöntemidir.

Her ne kadar hali hazırda kullanılan bu iki yöntemin kendine has avantajları ve dezavantajları olsa da emisyonları azaltmak amacıyla öncelikle mevcut entegre çelik üretim tesislerinin iyileştirilmesine odaklanılmalıdır.

3.1.1. Entegre çelik üretim yöntemi

Entegre çelik üretim prosesi; demir cevheri, kok kömür ve kireç taşı kullanarak pik demir üretimi yapan yüksek fırın – bazik oksijen fırını (BF-BOF) rotası olarak da bilinir. Çeliğin yaklaşık %70'i bu yöntem ile üretilir. Bu rota; sinterleme veya peletleme, koklaştırma, yüksek fırın, bazik oksijen fırını ve sürekli döküm olarak ana bölümlerden oluşmaktadır.

Sinterleme işlemi toz cevherin yüksek fırında kullanılabilecek tane iriliğine, gaz geçirgenliğine ve mukavemetine aglomerasyon ile getirilmesidir. İnce ve toz halindeki malzeme fırın içinde yüksek sıcaklıkta bekletildiğinde yüzeylerinde filmleşme görülerek birbirlerini tutmaya başlarlar. Böylece tane boyutları büyümüş olurlar. Sinterlemede 3 amaç vardır.

- Fazla tozlu ve küçük cevherlerin tozlarını aglomere ederek yüksek fırında kullanılabilir boyuta erştirmek.
- Cevherdeki fazla kükürdü oksitleyerek, zararsız miktarlara indirmek
- Yüksek fırınlarda şarj edilebilecek mukavemette, ufalanmayacak ve kaliteli bir şekilde indirgemeye müsait malzeme etmek.

Peletleme işleminin amacı genel olarak sinterleme ile aynı olmasına rağmen sinterleme ile bağlanamayacak kadar pasif ve ergime sıcaklığı yüksek malzemelerde ekstra kimyasal bağlayıcı malzemeler kullanarak tanelerin birbirini tutması sağlanmasıdır. Peletleme sonrası oluşan malzeme sinterlemeye göre daha kaliteli ve doğrudan yüksek fırına beslenebilen yapıdadır.

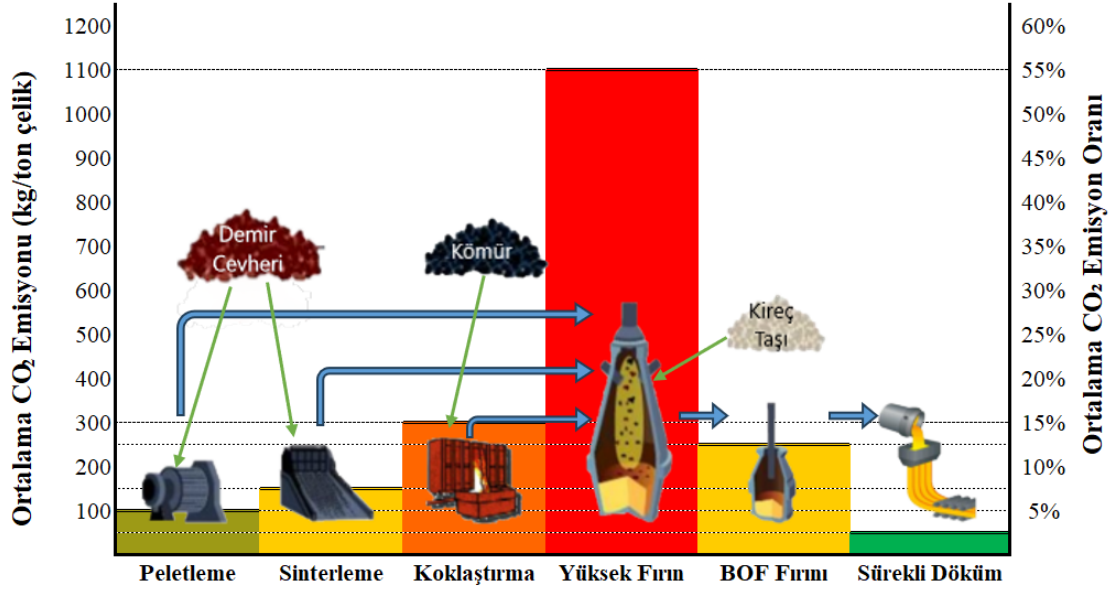
Koklaştırma prosesi, en basit haliyle kömürün oksijensiz ortamda yüksek sıcaklıklarda ısıtılmasıyla atık maddelerin uzaklaştırılarak karbon oranının arttırılması işlemidir. Böylece kömürün yanma ve ısı kalitesi arttırılırken çeliğin üretiminde istenmeyen hidrojen, azot ve sülfür gibi malzemeler ortamdan uzaklaştırılır. Koklaştırma prosesinde genel olarak kömür 900-1000 °C sıcaklıklara ısıtılırken enerji kaynağı olarak kömür kullanılmaktadır. Bundan dolayı koklaştırma ünitesi işletmede karbon emisyonu en fazla olan bölümdür.

Yüksek fırın; boyu 15 ile 90 metre boylarında olan katlardan ve raflardan oluşan, yukarıdan demir cevheriyle birlikte kireç taşı ve kok kömürü doldurulup alt kısmından basınçlı sıcak hava üflenmesiyle malzemenin eritilerek alt kısmından akıtılması sağlanan bir yapıdır. Cehennemlik olarak da bilinen bu yapının iç hacmi 250 – 850 m³ arasında olabilmektedir. Geleneksel çelik üretiminde büyük hacimli fırınlarda 1850 °C'ye ulaşan sıcaklıklara ulaşmak için yüksek miktarda kok kömürü kullanılmaktadır. Bu sebeple yüksek fırın işletmede ikinci en yüksek karbon emisyonuna sahip bölümdür.

Bazik oksijen fırını, yüksek fırından çıkan karbonca zengin ve kırılgan olan sıvı haldeki demirin içine saf oksijen üflenerek karbon oranının azaltılmasını sağlayan yapıdır.

Sürekli döküm; proseslerden geçerek çelik haline gelen akışkan malzemenin belirli şekillerde ve sürekli soğutulan bir kalıptan geçirilerek şekil verilerek soğutulması işlemidir. Sıvı haldeki çeliğin ekstra ısıtılmasına gerek kalmadan direk belirli şekillerde ürünlere çevrilmesi ile enerji tasarrufu sağlanmış olur.

Çizelge 3.1. Örnek bir BF-BOF tesisinde ana bölümlerin ortalama CO₂ emisyon oranı dağılımı (Na vd. 2022)anı dağılımı (Na vd. 2022). Tesis için basit akış diyagramı ve ünitelerin ortaya çıkardığı ortalama emisyon oranlarını belirtmektedir. Kırmızıdan yeşil renk tonuna doğru emisyon miktarları düşmektedir.

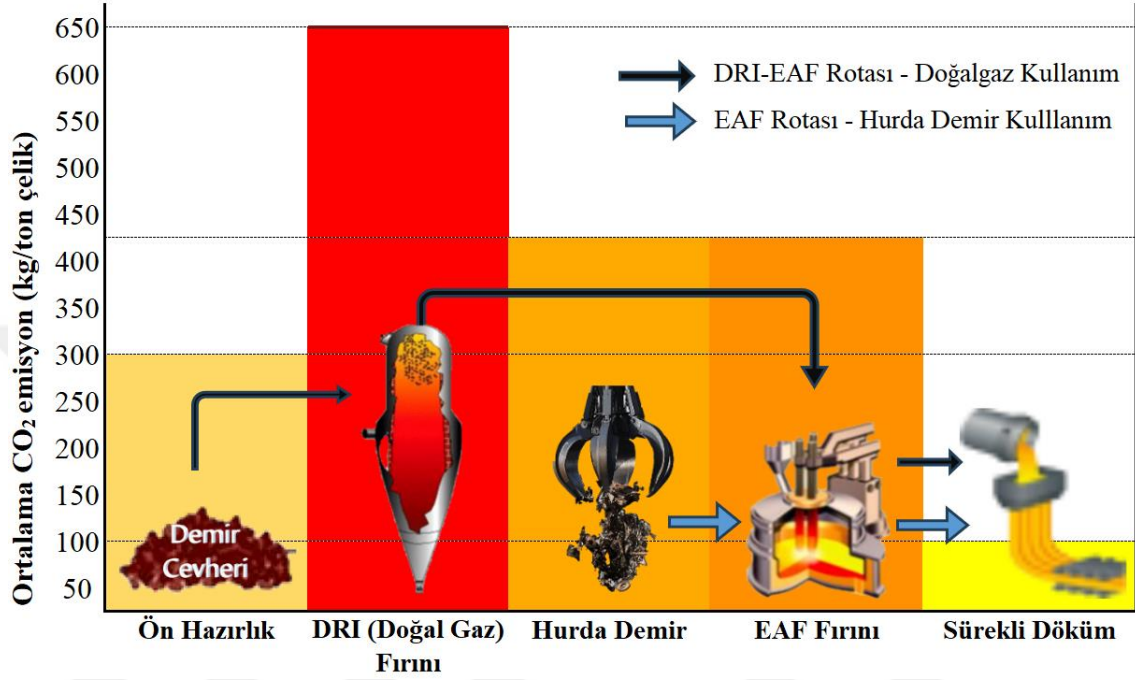


Günümüz demir ve çelik üretim BF-BOF tesisleri incelendiğinde; Fosil yakıt olan kömür kaynaklı en fazla emisyonu koklaşırma tesisi ve sonrası yüksek fırın oluşturduğu görülmektedir. Emisyonların azaltılması amacıyla öncelikli olarak bu bölgelere odaklanılması gerekmektedir. Tesislerde bu ünitelerin kurulum maliyetleri ve amortisman süreleri dikkate alındığında, değiştirmek yerine mevcut üniteleri daha verimli kullanmaya çalışmak kısa vadeli olarak emisyon azaltmada fayda sağlamaktadır.

3.1.2. Elektrik ark ocağı yöntemi

Çelik üretiminde ikinci yaygın üretim yöntemi; hurda demir kullanan elektrik ark ocağı (EAF) rotasıdır (WSA 2020). EAF rotası, BF-BOF rotasına göre daha az enerji tüketir (Zhang vd. 2017). Ayrıca elektrik enerjisi yenilenebilir kaynaklardan üretildiğinde temel olarak kömürden daha temiz bir enerji kaynağı olduğu için EAF rotası daha çevreci bir üretim yöntemidir. Fakat artan çelik talebini karşılamada geri dönüşüm hurda miktarı yetersiz olduğu için bu yöntem kullanımı sınırlıdır.

Çizelge 3.2. Doğalgaz kaynaklı DRI-EAF ve hurda beslemeli EAF tesisinde ana bölümlerin ortalama CO₂ emisyon oranı dağılımı (Cappel 2021). Tesis için basit akış diyagramı ve ünitelerin ortaya çıkardığı ortalama emisyon oranlarını belirtmektedir. Kırmızıdan sarı renk tonuna doğru emisyon miktarları düşmektedir. Elektrik üretimi için 460 kg CO₂ /ton-MWh kullanılmıştır.



Üretilen çeliğin %80-90 arasında geri dönüşüm faydası olmasına rağmen 2019 yılında çelik üretiminde hurda girdisi %32,1 olarak belirlenmiştir. 2050 yılında bu oran %45 civarlarında olması beklenmektedir (IEA 2020b). Önümüzdeki on yılda hurda miktarı üretime göre çok düşük olacağı tahmin edildiği için elektrik ark ocağı kullanımının sınırlı olacağı ön görülmektedir. Dolayısıyla, günümüz şartlarında mevcut işletmelerde kullanılan üretim yöntemleri iyileştirilerek ve kademeli olarak yeni teknolojilere geçiş yapılarak, kabul edilebilir yatırım maliyetleri ile karbon emisyonları azaltılabilir.



Şekil 3.1. Dünya üzerinde çelik üretim proseslerinin dağılımı ve lokasyonları (Anonymous 1 2024). Harita üzerinde bulunan sayılar; bölgedeki işletme sayısını ifade ederken, renk dağılımı; bölgedeki işletmelerinin karbon ayak izi hakkında bilgi vermektedir. Yeşil renk en az emisyon salınımını ifade ederken kırmızı ise en yüksek salınımı ifade etmektedir.

3.2. Çelik Üretiminde Karbon Emisyonlarını Düşürme Yöntemleri

Dünya genelinde çelik üretimi yapan pek çok ülke karbon emisyonlarını azaltmak ve 2050 yılı hedeflerine ulaşmak için projeler geliştirmektedir. Aşağıdaki listede demir ve çelik üretiminde emisyonları azaltmak amacıyla çelik üretimi yapan ülkeler tarafından uygulanan uluslararası popüler programlar Çizelge 3.3'te listelenmiştir.

Çizelge 3.3. Küresel olarak demir ve çelik üretimi kaynaklı emisyonları azaltmak amaçlı uygulanan popüler programlar ve projeler.

	Bölge / Ülke	Adı	Proje detayı	Hedef	Hedef Yılı	Kaynak
1	Avrupa	ULCOS I - II	Avrupa; 48 adet kuruluş ve 15 Avrupa ülkesi tarafından desteklenen Ultra Low CO ₂ steelmaking projesi	Üretimde karbon emisyonlarını azaltma	2050	(Zhao vd. 2019), (Zhang vd. 2021b)
2	Avusturya	SUSTEEL	Leoben Madencilik ve metaruliji üniversitesi ve ALD Vakum Teknolojileri tarafından Voalstaltine tesislerinde yürütülen temel hidrojen plazma araştırma teknolojisidir.	Hidrojen plazma teknolojisi kullanılarak demir cevherinin eritilerek doğrudan indirgenmesi amaçlanmaktadır.	Çelik üretimine geçişin en erken 2035 yılı olması beklenmektedir.	(Gielen vd. 2020)
		H2FUTURE	2016 yılında başlatılıp 2020 yılında tamamlanması amaçlanan hidrojen üzerine odaklanan projedir.	Üretimde sıfır emisyon sağlayan yeşil hidrojenin üretimi ve depolanması	2050 yılında emisyonları %80 azaltmak	(Zhao vd. 2019), (Zhang vd. 2021b)
4	Almanya	Arcelormittal Midrex Plant	Arcelormittal Hamburg GmbH tarafından Hamburg tesislerinde yürütülen çalışmadır.	Demir indirgeme işlemini tamamen hidrojen kaynaklı olarak yapmayı amaçlamaktadır.	2050 yılında çelik üretim emisyonlarını %91 azaltmak	(Gielen vd. 2020)

Devamı Arkada

Çizelge 3.3'ün devamı.

		Carbon2Chem	ThyssenKrupp tarafından, Fraunhofer derneği, Max Planck Enstitüsü ve diğer 15 araştırma gurubuyla geliştirilmektedir.	Üretim sonrası atılan gazların geridönüşümü ile tekrar kullanılabilir yan ürünler elde etmek	2025 yılına kadar yatırımların tamamlanması hedefleniyor	(Zhao vd. 2019), (Zhang vd. 2021b)
		SALCOS	Salzgitter, Almanya ve Tenofa tarafından imzalanmıştır.	Rüzgar enerjisi ile elektroliz yoluyla hidrojen üretimi yapmak	2033 yılında tam hedefe ulaşılması hedefleniyor	(Zhao vd. 2019), (Zhang vd. 2021b)
5	ABD	Flash Iron Making	Utah Üniversitesi Tarafından yürütülen çalışmadır.	Büyük ölçekli bir tezgah fırınında doğalgaz özel tasarlanmış bir yakıcıda oksijen ile kısmen oksitlenerek H ve CO dönüştürülerek demirin indirgenmesi amaçlanmaktadır.	2050	(Gielen vd. 2020), (Abdelghany vd. 2019)
		AISI	ABD Enerji Bakanlığı ve ABD Çelik Birliği tarafından yürütülmektedir.	Kok kömürünü çeşitli temiz enerji kaynaklarıyla değiştirerek ve katbon yakalama teknolojileri kullanarak emisyonları azaltmak	2050	(Zhao vd. 2019), (Zhang vd. 2021b)
6	Çin	COREX	Baosteel firmasının öncülük ettiği sistemdir	Kok kömürü kullanımını azaltarak emisyonların düşürülmesine katkıda bulunmak	2050	(Zhao vd. 2019), (Zhang vd. 2021b)
		HISMELT	Shandong Molong Petroleum Machinery Co., Ltd ile Rio Tinto Group işbirliği ile oluşturulan eritme indirgemeli demir üretim teknolojisi.	Eritme indirgemeli demir üretim teknolojisi olarak üretim kapasitesi ve optimizasyon yoluyla operasyon seviyesini sürekli iyileştirmek	2050	
7	Japonya	COURSE50	Janponya Demir ve Çelik Federasyonu tarafından başlatılan yenilikçi demir üretim süreci geliştirmek amaçlayan ulusal bir programdır	Hidrojen indirgeme ve karbon tutma teknolojileri kullanarak emisyonları azaltmak	2030 yılında emisyonları %30 azaltmak	(Zhao vd. 2019), (Zhang vd. 2021b), (Abdul Quader vd. 2016)
8	Güney Kore	POSCO - FİNEX	Güney Kore POSCO ve Primetals Technologies Austria GmbH sürecidir. İnce demir cevheri ısıtılarak ve kömürün gazlaştırılmasıyla tepkimeye sokulması temeline dayanır.	Yüksek fırın ile karşılaştırıldığında kurulum maliyeti %20, işletme maliyeti %15 düşüktür. Emisyonlarda %90'a varan azaltma hedeflenmektedir.	Mevcut kullanımda olan sistem	(Talaie vd. 2020)

Çizelge 3.3 incelendiğinde Çelik üretimi yapan ülkelerin yetkili kurumlarının karbon emisyonlarının nötr hale getirilebilmesi için teşvik edici ulusal programlar yürüttükleri görülmektedir. Ayrıca büyük çaplı üreticilerin de emisyonları düşürmek için yeni teknolojik yöntemler geliştirdiği görülmektedir. Projeler, ülkelerin ekonomik, coğrafi ve sanayi durumuna değişkenlikler gösterse de temel olarak enerji verimliliği, karbon tutma, depolama, yeniden ekonomiye kazandırma ve yakıt kaynağını yenilenebilir yeşil enerji kaynakları ile değiştirme üzerinde durmaktadır.

3.2.1. Mevcut emisyonları düşürmek için verimlilik çalışmaları

Çelik üretimi prosesleri içinde bulunan fırınlar ve sürekli döküm hatları yüksek sıcaklıklarda çalıştığı için ısı kaybı ve yüksek sıcaklıkta atık ısı ortaya çıkmaktadır. Sistemde yapılan iş sonrası ortaya çıkan atık ısının azaltılması veya tekrar kullanılmasıyla enerji girdileri azaltılmakta, verimlilik artırılmakta ve emisyonlar azaltılmaktadır. Demir – çelik sektöründe karbon ayak izinin temel sebebi olan fırınların verimliliğinin iyileştirilmesi ve çıkan atık ısılarının tekrar kullanılması birinci önceliktir.

Çelik eritme yüksek fırınlarında yapılan iyileştirmelerle giren enerji maksimum verimlilikte kullanılsa bile enerji kaynağı fosil yakıtlar olduğu sürece emisyon salınımı devam etmektedir. Net sıfır karbon 2050 hedeflerini tutturabilmek için verimlilik ve atık ısı kullanımı çalışmaları yeterli değildir. İşletmeden salınan karbondioksit ve eş değer sera gazları bir şekilde azaltılması gereklidir. Proses sonrası çıkan karbonu azaltmak ve tamamen yok etmek için çalışmalar yapılmakta ve yeni teknolojiler geliştirilmektedir.

Dünyada üretilen çeliğin neredeyse yarısı Çin tarafından üretildiğinden ve entegre tesislerin fazlalığından dolayı buradaki işletmeler özelinde yapılan verimlilik çalışmalarını öncelikle incelemek gereklidir. Zhang ve arkadaşları 2017 yılındaki yayınladıkları makalenin bir bölümünde Çin'deki tesisleri dikkate alarak en popüler 35 adet enerji tasarrufu teknolojisi üzerinde yoğunlaşmışlardır. Yapılan çalışmada toplanan verilerin uzmanlarla görüşmelerden, Çin demir ve çelik işletmelerinde yapılan araştırmalardan, küçük ve orta ölçekli işletmelerden elde edildiği belirtilmiştir. Toplanan veriler aşağıdaki tabloda detaylı bir şekilde listelenmiştir.

Çizelge 3.4. Çin'de demir ve çelik endüstrisinde emisyonları azaltmak için yapılan en popüler iyileştirme çalışmasının detayları (Zhang vd. 2017). Her iyileştirme yönteminin enerji tasarrufu, 1 ton çelik üretimi başına maliyeti ve bakım maliyeti, kullanım ömrü ve mevcut tesislerde kullanım oranı verilmiştir. Çalışmanın yapıldığı 2017 yılında 1 Dolar = 6,8 - 6,9 Yuan karşılığıdır.

Üretim Hatları	No	Enerji Tasarrufu Teknolojileri	Enerji Tasarrufu (GJ/t)	Yıllık Sermaye Maliyeti (Yuan/t)	Yıllık İşletme Bakım Maliyeti (Yuan/t)	Kullanım Ömrü (yıl)	Mevcut Uygulama Oranı
Kok Üretim Süreci	1	Kok kuru söndürme	0,37	9,97	1,87	20	85%
	2	Kömür nem kontrolü	0,06	14,6	4,4	15	9%
Sinterleme işlemi	3	Sinterleme ve sinter soğutucusundan ısı geri kazanımı	0,35	2,39	0	10	20%
	4	Yatak derinliğinin artırılması	0,08	0,48	0	10	80%
	5	Hava kaçağının azaltılması	0,18	0,16	0	10	70%
	6	Düşük sıcaklıkta sinterleme teknolojisi	0,35	0,24	0	10	60%

Devamı Arkada

Çizelge 3.4'ün devamı

Demir üretimi - Yüksek Fırın (BF)	7	Pulverize kömür enjeksiyonu (130 kg/t)	0,7	1,7	-17,29	20	40%
	8	Üst basınç geri kazanım türbinleri	0,12	0,96	0	15	83%
	9	Sıcak hava sobası için yakıt ve havanın ön ısıtılması	0,25	1,69	0	20	5%
	10	Yüksek fırın gazının geri kazanımı	0,01	1,52	0	20	94%
	11	Cüruf ısı geri kazanımı	0,18	26,63	0	20	1%
	12	Toz haline getirilmiş kok fırını gazı enjeksiyonu	0,39	2,59	0	20	0%
	13	Toz haline getirilmiş atık plastik enjeksiyonu	0,1	1,32	0	20	3%
Çelik Üretimi - Bazık Oksijen Fırını (BOF)	14	BOF gazının ve duyulur ısının geri kazanımı	0,12	1,99	0	10	40%
	15	Kuru gaz temizleme sistemi (ıslaktan kuruya)	0,14	4,14	0	15	20%
	16	Baca gazı atık ısı geri kazanımı	0,09	4,23	0,65	10	15%
	17	Dönüştürücü gazının LT-PR'si	0,69	0,24	3,5	15	20%
	18	Cüruf ısı geri kazanımı	0,06	27,32	-4,85	20	5%
Çelik Üretimi - Elektrik Ark Ocağı (EAF)	19	Hurda ön ısıtma	0,02	2,06	0	30	10%
	20	Güç kaynağının optimizasyonu	0,01	0,08	0	30	15%
	21	Baca gazı atık ısı geri kazanımı	0,06	2,85	0	30	10%
	22	Köpüklü Cüruf Uygulamaları	0,01	4,04	0	30	30%
Sürekli Döküm Hattı	23	Sürekli döküm	0,39	2,26	-6,8	20	75%
	24	Verimli pota ön ısıtma	0,02	1,66	0	20	15%
Sıcak Haddeleme	25	Entegre döküm ve haddeleme (şerit döküm)	0,28	253,11	-148,93	30	20%
	26	Rekuperatif veya rejeneratif brülör	0,15	2,03	0	10	40%
	27	Sıcak şerit değirmeninde proses kontrolü	0,28	20,32	0	10	80%
	28	Soğutma suyundan atık ısı geri kazanımı	0,04	23,09	2	15	20%
	29	Döküm kütüğünün sıcak teslimatı ve sıcak şarjı	0,23	0,42	1,95	10	80%
Soğuk Haddeleme	30	Tavlama hattında ısı geri kazanımı	0,11	55,25	0	10	55%
	31	Otomatik izleme ve hedefleme sistemleri	0,2	21,92	0	10	55%
Genel Teknolojiler	32	Önleyici bakım	0,45	4,28	0	15	40%
	33	Enerji izleme ve yönetim sistemleri	0,12	2,06	0	10	50%
	34	Kojenerasyon	0,38	57,51	0	20	90%
	35	Kombine çevrim enerji santrali-DGKÇS	0,51	0,21	0,27	15	15%

Yapılan çalışmada 35 adet iyileştirmenin 20 tanesi atık ısı enerji kazanımı, 10 tanesi üretim süreci enerji tasarrufu ve 5 tanesi genel enerji tasarrufu teknolojisi olarak tanımlanmıştır. Veriler 2010 ve 2050 yılı hedef alınarak 2010 yılı şartlarına göre değerlendirilmiştir. 35 adet teknolojinin kullanılmasıyla teknik potansiyel olarak 2,78 GJ/ton tasarruf edileceğini göstermiştir. Tesislerdeki atık ısının %62'nin yüksek fırın, BOF ve haddeleme ünitelerinde olduğu belirtilmiştir. Bu veriler kapsamında iyileştirme çalışmalarının temelini oluşturacak bölgeler açıkça görünmektedir (Zhang vd. 2017).

Literatür incelemelerinde çelik üretimi yapılan gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde son 5 yıl içinde 2050 net sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda yapılmış olan senaryo ve vaka çalışmalarına odaklanılmıştır. Bölgesel olarak mevcut tesisler ve hükümetlerin emisyonları azaltma konusunda yaklaşımı doğrultusunda geliştirilen senaryolar üzerinde 2035 ve 2050 hedefleri incelenmiştir. Literatür incelendiğinde demir ve çelik endüstrisinde verimlilikle ilgili birçok çalışma olmasına rağmen sadece belirli kriterleri sağlayanlar tarafımızca dikkate alınmıştır. Bu kriterler; senaryoların hedeflerinin net şekilde belli olması, hedef yılında düşürülmesi planlanan emisyon miktarlarının sayısal olarak net ifade edilmesi veya senaryo hedefine ulaşabilmesi için maliyetlerin sayısal olarak net olarak hesaplanmış olması olarak özetlenebilir.

Çizelge 3.5. Demir ve çelik endüstrisinde sıfır emisyon hedefine ulaşmak için verimlilik temelinde uygulanan akademik senaryo çalışmalarından popüler olanların özet ve detayları.

	Ülke/Yıl Yazarlar	Yöntem	Hedef Yılı Ana içerik	Bulgular	Kaynak
1	Çin 2023 Huang ve arkadaşları	Senaryo 1: SPS_DET: Belirtilen Politika Senaryosu Deterministik: 2060 yılına kadar; hurda miktarı 2 katına çıkıyor. Kömür yerine doğalgaz %14, biyoenerji %9 oranına çıkıyor. Elektrikte yenilenebilir enerji %30'a çıkıyor. CCUS oranı %13, Hidrojen kullanımı %8'e ulaşıyor. Malzeme verimliliği çelik talebini %18 azaltıyor.	2060 2060 yılı hedeflenerek 3 adet deterministik ve 3 adet belirsizlik temelinde senaryolar hazırlanmıştır. Senaryolar neredeyse bütün çözümlerin harmanlanmış halidir. Hurda kullanım teşviki, üretimde kömür yerine doğalgaz ve hidrojen kullanımı, elektrik enerjisinde yenilenebilir enerji oranını arttırma, CCUS ve hidrojen kullanımı,	Deterministik senaryoda 2020 yılında çelik üretiminde 2080 Mt CO2 emisyonu üretilirken, 2060 yılında emisyonların sıfırlanacağı öngörülmektedir.	(Huang vd. 2023)
		Senaryo 2: SPS_UNC: Belirtilen Politika Senaryosu Belirsizlik: 2060 yılına kadar; hurda miktarı 2 katına çıkıyor. Kömür yerine doğalgaz %14, biyoenerji %9 oranına çıkıyor. Elektrikte yenilenebilir enerji %30'a çıkıyor. CCUS oranı %13, Hidrojen kullanımı %8'e ulaşıyor. Malzeme verimliliği çelik talebini %18 azaltıyor.		Belirsizlik senaryosunda 2020 yılında çelik üretiminde 2080 Mt CO2 emisyonu üretilirken, 2065 yılında emisyonların sıfırlanacağı öngörülmektedir.	
		Senaryo 3: SPS_SLI_DET: Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosu-Yavaş İnovasyon-Deterministik: 2060 yılına kadar; hurda miktarı %32 oluyor. Kömür yerine doğalgaz %17, biyoenerji %9 oranına çıkıyor. Elektrikte yenilenebilir enerji %45'e çıkıyor. CCUS oranı %11, Hidrojen kullanımı %6'ya ulaşıyor. Malzeme verimliliği çelik talebini %20 azaltıyor.		Deterministik senaryoda 2020 yılında çelik üretiminde 2080 Mt CO2 emisyonu üretilirken, 2050 yılında emisyonların sıfırlanacağı öngörülmektedir.	
		Senaryo 4: SPS_SLI_UNC: Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosu-Yavaş İnovasyon-		Belirsizlik senaryosunda 2020 yılında çelik üretiminde 2080 Mt CO2 emisyonu	

Devamı Arkada

Çizelge 3.5'in devamı

		Belirsizlik: 2060 yılına kadar; hurda miktarı %32 oluyor. Kömür yerine doğalgaz %17, biyoenerji %9 oranına çıkıyor. Elektrikte yenilenebilir enerji %45'e çıkıyor. CCUS oranı %11, Hidrojen kullanımı %6'ya ulaşıyor. Malzeme verimliliği çelik talebini %20 azaltıyor. Senaryo 5: SPS_FAI_DET: Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosu-Hızlı İnovasyon-Deterministik: 2055 yılına kadar; hurda miktarı %32 oluyor. 2060 yılına kadar Kömür yerine doğalgaz %5, biyoenerji %20 oranına çıkıyor. Elektrikte yenilenebilir enerji %50'ye çıkıyor. CCUS oranı %15, Hidrojen kullanımı %6'ya ulaşıyor. Malzeme verimliliği çelik talebini %22 azaltıyor. Senaryo 6: SPS_FAI_UNC: Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosu-Hızlı İnovasyon-Belirsizlik: 2055 yılına kadar; hurda miktarı %32 oluyor. 2060 yılına kadar Kömür yerine doğalgaz %5, biyoenerji %20 oranına çıkıyor. Elektrikte yenilenebilir enerji %50'ye çıkıyor. CCUS oranı %15, Hidrojen kullanımı %6'ya ulaşıyor. Malzeme verimliliği çelik talebini %22 azaltıyor.	malzeme verimliliği ile talebin azalması dikkate alınmıştır.	üretilirken, 2058 yılında emisyonların sıfırlanacağı öngörülmektedir. Deterministik senaryoda 2020 yılında çelik üretiminde 2080 Mt CO2 emisyonu üretilirken, 2050 yılında emisyonların sıfırlanacağı öngörülmektedir. Belirsizlik senaryosunda 2020 yılında çelik üretiminde 2080 Mt CO2 emisyonu üretilirken, 2060 yılında emisyonların sıfırlanacağı öngörülmektedir.	
2	Çin 2022 Liu ve arkadaşları	Senaryo 1: BAU: Mevcut uygulanan genel teknolojiler. 2060 yılına kadar hiç önleyici müdahalede bulunmayan senaryodur.	2060 Çelik üretiminde 22 adet verimlilik teknolojilerinin kullanılmasına ek	Enerji tüketimi 2020 yılında 678,4 Mtce, 2025'te 722,3 Mtce, 2030'ta 671,3 Mtce ve 2060'ta 572,6 Mtce olacaktır. CO ₂ emisyonları 2025 yılında 1893 Mt ile zirve yapacak 789,02 Mt değerine düşecektir.	(Zhu vd. 2023)

Devamı Arkada

Çizelge 3.5'in devamı

3	Çin 2021 Shen ve arkadaşları	Senaryo 2: Teknoloji Geliştirme Senayosu (TD): 22 adet belirlenmiş iyileştirme teknolojilerinin uygulanmasını içermektedir.	olarak hurda katkısı ve CCS teknolojilerinin desteğini analiz etmektedir.	Enerji tüketimi 2060 yılında 519,6 Mtce olarak öngörülmektedir. CO ₂ emisyonları 2060 yılında 261 Mt olacaktır.	
		Senaryo 3: Gelişmiş Üretim Altyapısı Senaryosu (IPS): TD senaryosunda üretim alt yapısını değiştirerek hurda-EAF ve EAF teknolojilerinin entegre edildiği senaryodur. 2020 yılında %20, 2040 yılında %35 ve 2060 yılında %60 hurda-EAF oranı		Enerji tüketimi 2060 yılında 542,02 Mtce olarak öngörülmektedir. CO ₂ emisyonları 2060 yılında 516 Mt olacaktır.	
		Senaryo 4: Ultra Düşük Emisyon Senaryosu (ULE): Üretimde ekstra olarak CCS teknolojisinin kullanıldığı senaryodur. 2020-2030 yılında %5 ve 2031-2060 yılında %8 CCS teknolojisi kullanım oranı		Enerji tüketimi 2060 yılında 482,4 Mtce olarak öngörülmektedir. CO ₂ emisyonları 2060 yılında 157 Mt olacaktır. CCS kullanımı ile birlikte maliyetler 2020-2030 arasında 800 CNY/t CO ₂ ve 2031-2060 arasında 500 CNY/t CO ₂ olması beklenmektedir.	
		Senaryo 1: BAU: Mevcut uygulanan genel teknolojiler		Mevcut teknolojiler ile emisyonların 2015'ten 2050'ye kadar 1690,82 Mt'dan 1474,75 Mt'a düşmesi hedeflenmektedir.	
3	Çin 2021 Shen ve arkadaşları	Senaryo 2: NDC: Paris Anlaşması doğrultusunda, Çin iklim hedefleri doğrultusunda hazırlanmış senaryodur	2050 Çin iklim hedeflerine ulaşmak için çelik üretiminde verimlilik teknolojileri kullanılmaktadır. 2030 yılında emisyonların zirveyi görüp 2050 yılına kadar hedeflerin tutturulması amaçlanmaktadır.	NDC senaryosu ile emisyonların 2015'ten 2050'ye kadar 1690,82 Mt'dan 1249,39 Mt'a düşmesi hedeflenmektedir.	(Shen vd. 2021)
		Senaryo 3: 2 derece: Paris Anlaşması doğrultusunda 2050 yılında sıcaklıkların 2 °C altında kalmasına yönelik senaryodur.		2 derece senaryosu ile emisyonların 2015'ten 2050'ye kadar 1690,82 Mt'dan 484,77 Mt'a düşmesi hedeflenmektedir.	
		Senaryo 4: 1,5 derece: Paris Anlaşması doğrultusunda 2050 yılında sıcaklıkların 1,5 °C altında kalmasına yönelik senaryodur.		2 derece senaryosu ile emisyonların 2015'ten 2050'ye kadar 1690,82 Mt'dan 252,13 Mt'a düşmesi hedeflenmektedir.	

Devamı Arkada

Çizelge 3.5'in devamı

4	Çin 2020 Gao ve Arkadaşları	Senaryo 1: (BM) Kıyaslama Senaryosu: Hiçbir su ve enerji tasarrufu yapılmayan senaryo	2025 21 adet enerji tasarrufuna ve 9 adet su tasarrufuna odaklanan toplam 30 ana teknoloji seçilerek 5 adet senaryo çalışması geliştirilmiştir.	2025 yılında 932 Mt ham çelik üretiminin yapılacağı öngörülmüş ve tasarruf çalışması yapılmamıştır.	(Gao vd. 2020)
		Senaryo 2: (CP) Kısıtlı Ürün Senaryosu: ürün kullanımının ve üretiminin kısıtlandığı bir modeli ele alır. Enerji ve kaynak verimliliğine odaklanarak, sürdürülebilirlik açısından daha fazla kontrol ve düzenleme getirilmesini önerir.		2025 yılında 811 Mt ham çelik üretiminin yapılacağı ön görülmüş ve BM senaryosuyla tutarlı olan senaryodur.	
		Senaryo 3: (BAU) Olağan İş Senaryosu: 'Business as Usual' olarak da bilinen bu senaryo, mevcut eğilimlerin ve politikaların sürdürüldüğü bir geleceği temsil eder. Bu, önemli bir değişiklik olmaksızın, mevcut endüstriyel ve ekonomik yapıların devam ettiği bir senaryodur.		2025 yılında enerji tasarrufu potansiyeli 1,75 PJ ve çelik üretiminde ton başına enerji tüketimi 15,01 GJ/t olarak ve çelik üretiminde ton başına su kullanımı 58,77 m ³ olarak öngörülmektedir.	
		Senaryo 4: (BD) Fayda/Maliyet Odaklı Senaryo: Bu senaryo, fayda ve maliyet analizlerine dayalı karar verme süreçlerini vurgular. Yatırımların ve politikaların, maliyet etkinliği ve çevresel etki açısından değerlendirildiği bir yaklaşımı benimser.		2025 yılında enerji tasarrufu potansiyeli 1,21 PJ ve çelik üretiminde ton başına enerji tüketimi 15,59 GJ/t olarak ve çelik üretiminde ton başına su kullanımı 57,83 m ³ olarak öngörülmektedir.	
		Senaryo 5: (SP) Güçlendirilmiş Politika Senaryosu: Bu senaryo, iklim değişikliğiyle mücadele ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için güçlendirilmiş politikaların uygulandığı bir geleceği öngörür. Yenilenebilir enerji ve temiz teknolojilere yapılan yatırımların artırılmasını ve karbon emisyonlarının azaltılmasını içerir.		2025 yılında enerji tasarrufu potansiyeli 1,65 PJ ve çelik üretiminde ton başına enerji tüketimi 15,11 GJ/t olarak ve çelik üretiminde ton başına su kullanımı 54,13 m ³ olarak öngörülmektedir.	
5	Çin 2020	Senaryo 1: Mevcut Durum: İşletmenin mevcut şartlarında değişiklik olmadan	2050	Mevcut durumda 1 ton çelik üretmek için 590,16 kgce (kilogram kömür eşdeğeri)	(Wang vd. 2020)

Devamı Arkada

Çizelge 3.5'in devamı

	Wang ve Arkadaşları	yapılan hesaplamaları kapsar. Referans durumu olarak kullanılır.	Mevcut tesisteki veriler kullanılarak enerji verimliliği merkezli senaryo oluşturulup öngörü analizi yapılmıştır.	yakıt, 3,17 m ³ tatlı su gerekiyken, 2437,45 kg karbon emisyonu ve 9,48 m ³ su ayak izi üretimi olmaktadır.	
		Senaryo 2: Hedef Senaryo: İşletmede enerji tasarrufu, su tasarrufu, karbon emisyonları azaltma amacıyla seçilen 31 adet enerji tasarrufu teknolojisinin uyguladığı durumdur.		Hedef senaryo ile 1 ton çelik için 7,84 GJ enerji, 1,65 m ³ tatlı su, 7,54 m ³ su ayak izi tasarrufu yapılırken 911,26 kg karbon emisyonu azaltılmaktadır. Enerji maliyetleri %13,84 düşmüştür.	
6	Çin 2018 An ve Arkadaşları	Senaryo 1: BAU: Mevcut politikaların devam ettiği ve üretim yapısının, teknolojik gelişmenin ve yakıt kullanımının değişmediği varsayılan senaryodur Senaryo 2: PS: Eski, verimi düşük kalmış ve düşük kapasiteli ekipmanlar yerine uluslararası standartlarda ve büyük ekipmanların oranını arttırmak. Senaryo 3: LT: Üretim yapısında; kuru söndürme, kuru temizleme ve atık ısı geri kazanımı gibi karbon ayak izi düşük olan ekipmanların eklenmesi Senaryo 4: CF: Kömür tüketiminin azaltılması ve doğal gaz ve fosil olmayan yakıtların artırılması	2030 Çin genelinde uygulanacak olan karbon emisyonu iyileştirme senaryolarının hedef yılına göre irdelenmesi.	Ortalama 1001,27 MtCO₂ emisyon oluşması beklenmektedir. Mevcut senaryoya göre %1,45 azalma ile ortalama 986,76 MtCO₂ emisyon azaltılması beklenmektedir. Birim azaltım maliyeti 6050 CYN/tCO₂. Mevcut senaryoya göre %4,17 azalma ile ortalama 959,9 MtCO₂ emisyon azaltılması beklenmektedir. Birim azaltım maliyeti 1680 CYN/tCO₂. Mevcut senaryoya göre %4,91 azalma ile ortalama 952,8 MtCO₂ emisyon azaltılması beklenmektedir. Birim azaltım maliyeti 1740 CYN/tCO₂.	(An vd. 2018)
7	Kanada 2020 Talaie ve arkadaşları	Senaryo 1: Karbon tutma ve depolama teknolojileri, demir indirgeme ocakları (DRI-EAF) gibi teknolojiler haricinde 26 senaryo seçilmiştir. Senaryolar incelenirken yatırım maliyetleri, ekonomik performansları, uygulanabilirlik durumları ve işletme maliyetleri dikkate alınmıştır	2030 CO ₂ emisyon azaltma ve maliyet kontrolü	(-76\$/tCO₂) maliyet ile toplamda 19 Mton CO₂e (CO₂ eşdeğer) emisyon azaltılması (-51\$/tCO₂) maliyet ile toplamda 38Mton CO₂e emisyon azaltılması	(Talaie vd. 2020)

Devamı Arkada

Çizelge 3.5'in devamı

8	Brezilya 2023 Hebeda ve arkadaşları	Senaryo 1: BAU: Mevcut genel yöntem ve iş planı	2050 16 adet enerji verimliliği teknolojisi ve yapısal değişiklikler değerlendirilerek CO ₂ azaltma ve yatırım maliyeti hesabı	Emisyonların 42,5 Mt CO ₂ e seviyesinden 72,2 Mt CO ₂ e seviyesine yükselmesi öngörülmekte	(Hebeda vd. 2023)
		Senaryo 2: NIS: 2050 sera gazı azaltma hedefleri doğrultusunda %0 emisyon salınımı planı		Emisyonları 42,5 Mt CO ₂ e olarak sınırlandırmayı hedeflemektedir. Karbon maliyeti 11,4 \$ / tCO ₂ e olarak hesaplanmıştır	
		Senaryo 3: SDS: 2050 sera gazı azaltma hedefleri doğrultusunda %42 emisyon azaltımı için sürdürülebilir kalkınma planı		Emisyonları 24,5 Mt CO ₂ e olarak sınırlandırmayı hedeflemektedir. Karbon maliyeti 23,4 \$ / tCO ₂ e olarak hesaplanmıştır	
		Senaryo 4: SDS+ : 2050 sera azaltma hedefleri doğrultusunda %88 derin sürdürülebilir kalkınma planı		Emisyonları 7,6 Mt CO ₂ e olarak sınırlandırmayı hedeflemektedir. Karbon maliyeti 43,4 \$ / tCO ₂ e olarak hesaplanmıştır.	
9	UK 2022 Garvey ve arkadaşları	Senaryo 1: Güçlendirme: Kullanılabilir Enerji Veritabanından türetilen yenileme verimliliği teknolojilerinin uygulanması	2050 Emisyonları düşürme amaçlı olarak 4 plan üzerinde analizler yapılmıştır.	Emisyonların %54 ile %64 arasında azaltılması potansiyeline sahip	(Garvey vd. 2022)
		Senaryo 2: Değiştirme: Mevcut ekipman stoğunun yeni, mevcut en iyi uygulama verimlilik teknolojilerine güncellenmesi.		Emisyonların %31 ile %39 arasında azaltılması potansiyeline sahip	
		Senaryo 3: Yakıt Değişimi: BF-BOF tarafından üretimde bir azalma ile EAF üretiminde daha büyük bir paya geçiş.		Emisyonların %11 ile %55 arasında azaltılması potansiyeline sahip	
		Senaryo 4: Yeni Teknolojiler: Henüz ticarileştirilmemiş veya ölçekte kanıtlanmış, ancak radikal süreç değişiklikleri ve emisyon azaltımları sunan teknolojilerin benimsenmesi.		Emisyonların %16 ile %41 arasında azaltılması potansiyeline sahip	
10	Almanya 2022	Senaryo 1: Dekarbonizasyon Yöntemi	2050 Küresel	Emisyonların ortalama %28 ile %37 arasında azaltılması hedeflenmekte	(Harpprecht vd. 2022)

Devamı Arkada

Çizelge 3.5'in devamı

	Harpprecht ve arkadaşları	Senaryo 2: Elektrifikasyon İyileştirme Yöntemi	sıcaklıkları 1,75 santigrat derece düşürmek amaçlı emisyon düşürme çalışmaları	Emisyonların min %24'e (360 Mt CO ₂) azaltılması	
		Senaryo 3: Elektrifikasyon CSS Yöntemi		Emisyonların maksimum %46'ya (677 Mt CO ₂) azaltılması	
11	İsveç 2020	Senaryo 1: (SUB ve MIX) biyokütle bazlı ürünlerin fosil yakıtların yerini alması için yüzde oranları belirleyen bir politikadır. Hedef yüksek biyo-kütle kullanımı	2050 Biyo-kütle kullanımı ekonomik şartlar altında analiz edilmiştir.	%27 maliyet artışıyla maliyet ile maksimum %43'luk CO ₂ azaltımı gerçekleşmektedir.	(Nwachukwu vd. 2021)
	Nwachukwu ve arkadaşları	Senaryo 2: (TAX ve MIX) Karbon emisyonlarından dolayı fosil yakıtların fiyatları arttıkça biyo-kütle kullanımında etkili olduğunu belirten politikadır. Hedef maliyet odaklı biyo-kütle kullanımı		200€ / Ton CO ₂ maliyet ile maksimum %36'luk CO ₂ azaltımı gerçekleşmektedir.	
12	Hindistan 2020	Senaryo 1: NBD - Üretimde mevcut duruma göre senaryo	Bölgedeki 108 işletmeden alınan anket verilerine göre 4 farklı yatırım senaryo geliştirilmiş ve doğalgaz bazlı olarak hedefler değerlendirilmiştir.	15.1 PJ doğalgaz alımıyla beraber emisyonlar 1,6 Mt CO ₂ azaltılması	(Moya vd. 2020)
		Senaryo 2: CAPEX - Yatırım maliyeti odaklı senaryo. Doğal gaz geçiş için sermaye harcamasına dayalı kararlar içerir		25 PJ doğalgaz alımıyla beraber emisyonlar 1,715 Mt CO ₂ azaltılması	
	Moya ve arkadaşları	Senaryo 3: OPEX - İşletme maliyeti odaklı senaryo. Doğal gaz kullanımı için işletme giderlerine dayalı kararlar içerir		9,1 PJ doğalgaz alımıyla beraber emisyonlar 1,708 Mt CO ₂ azaltılması	
		Senaryo 4: CAPEX - OPEX: Doğal gaz kullanımı için sermaye giderleri ve işletme maliyetleri kararları eşit olarak değerlendirilir.		12 PJ doğalgaz alımıyla beraber emisyonlar 2 Mt CO ₂ azaltılması	
13	ABD 2020	Senaryo 1: BS (Temel Senaryo)	2050 CSS, elektrifikasyon,	Mevcut senaryo ile 2050 yılında 802 kt CO ₂ / Mt çelik değeri ve kümülatif emisyonların 3608 Mt CO ₂ olması bekleniyor.	(Luh vd. 2020)

Devamı Arkada

Çizelge 3.5'in devamı

	Luh ve arkadaşları	Senaryo 2: CAS (İklim İddialı Senaryo)	yakıt değiştirme teknolojilerini kapsayan senaryo üzerinde çalışılmıştır	CAS senaryosu ile 2050 yılında 154 kt CO ₂ / Mt çelik (%79)değeri ve kümülatif emisyonların 2158 Mt CO ₂ olarak %40 azaltılması hedefleniyor.	
14	Japonya 2016 Takeshi Kuramoçi	Senaryo 1: REF - Mevcut rotalar doğrultusunda elektrik üretiminin karbon emisyonlarının azaltıldığı durum	2030 2010 yılından 2030 yılına kadar CCS (Karbon tutma hariç) iyileştirme çalışmalarının potansiyeli araştırılmıştır	2010 yılında 175 Mt CO ₂ / yıl olan emisyon 2020 yılında 190 Mt ve 2030 yılında 188 Mt olabileceği varsayılmıştır.	(Kuramochi 2016)
		Senaryo 2: BAT - Mevcut teknolojilerin maksimum olarak uygulanması		Ref senaryosuna göre 4 Mt CO ₂ / yıl (%12) azaltımı hedeflenmektedir.	
		Senaryo 3: ER - Gelişmiş indirgeme senaryosu olarak, teknolojilerin maksimum kullanımı, Kömür kullanımının azaltımı ve hurda girişinin maksimum olduğu durumdur.		Ref senaryosuna göre 20 Mt CO ₂ / yıl (%12) azaltımı hedeflenmektedir. 9 Mt olan bölümü hurda geri dönüşümü kaynaklı olacağı varsayılmaktadır.	

Çizelge 3.5'teki çalışmalar incelendiğinde, 2030 ve 2060 yılları arasında farklı ülkelerde çeşitli senaryolar altında emisyon azaltma potansiyelini ve ilgili maliyetleri değerlendirdikleri görülmektedir. Çalışmalarda kullanılan farklı veri ve metodolojiler göz önüne alındığında, bunları tek bir çerçeve içinde sentezlemek mümkün değildir.

Çin'de senaryolar, emisyonların 2030 yılına kadar ortalama 1001,27 MtCO₂'den 952,8 MtCO₂'ye kadar azaltılmasını ve birim maliyet düşüşlerinin 6050 CNY/tCO₂ ile 1740 CNY/tCO₂ arasında değişmesini öngörmektedir (An vd. 2018). Kanada, emisyonları 2030 yılına kadar 19 Mt CO₂e ve 2050 yılına kadar 38 Mt CO₂e azaltmayı hedeflemektedir ve maliyetler -76\$/tCO₂ ve -51\$/tCO₂ olarak belirlenmiştir, bu da karbon kredileri veya diğer teşvikler yoluyla potansiyel gelir elde edilebileceğini göstermektedir (Talaie vd. 2020). Brezilya senaryoları, 2050 yılına kadar 42,5 Mt CO₂e'den 7,6 Mt CO₂e'ye kadar azaltım hedeflemektedir ve karbon maliyetleri 11,4 /tCO₂e ile 43,4/tCO₂e arasında değişmektedir (Hebeda vd. 2023).

İngiltere ve Almanya gibi ülkelerde de benzer hedefler belirlenmiştir, ancak belirli maliyetler ayrıntılı olarak belirtilmemiştir. İsveç'te yapılan çalışmalar, biyokütle kullanımının artırılmasının %27'lik bir maliyet artışı ile %43'e kadar CO₂ azaltımı sağlayabileceğini göstermektedir (Nwachukwu vd. 2021). Hindistan'da doğal gaz kullanımına dayalı senaryolar, değişen miktarlarda doğal gaz alımına bağlı olarak 1,6 Mt CO₂ ile 2 Mt CO₂ arasında azaltım öngörmektedir (Moya vd. 2020). ABD, 2050 yılına kadar 154 kt CO₂/Mt çeliğe kadar bir azalma hedeflemektedir (Luh vd. 2020) ve bu da %40'a varan bir düşüş anlamına gelmektedir. Japonya senaryoları, 2010 yılında 175 Mt CO₂/yıl olan emisyonların 2030 yılına kadar 188 Mt CO₂/yıla düşeceğini varsayarak teknoloji kullanımı ve hurda geri dönüşümünün etkisini vurgulamaktadır (Kuramochi 2016).

Bu rakamlar, karbon salınımını azaltmaya yönelik çeşitli stratejilerin küresel ölçekte uygulandığını göstermektedir. Çizelgede hedefler incelendiğinde sıfırlanan emisyon olmadığı görülmektedir. Böylece tesislerde yapılan verimlilik çalışmalarının pratik, hızlı ve ucuz yöntemler sunduğu görülürken 2050 yılı net sıfır emisyonlarına ulaşmak için yetersiz olduğu anlaşılmaktadır.

3.2.2. Karbon yakalama ve depolama teknolojileri (CCS)

Paris anlaşmasında belirtilen iklim hedeflerine ulaşmak için karbon yakalama teknikleri (CCS) hızlı müdahale olarak düşünülebilir (IEA 2016). Uluslararası Enerji Ajansı 2005 yılı özel raporunda karbon yakalama teknolojisinin 2050 yılına kadar emisyonların %17'ini tutacağını öngörmüş ve dünya ülkelerinin politikalarının bir parçası olması gerektiğini iddia etmiştir (Raza vd. 2019), (IPCC 2005), (IEA 2020a). Yüksek sıcaklık girdisi gerektiren proseslerde fosil yakıttan daha uygun maliyetli alternatifler pek olmadığı için karbon yakalama yöntemlerini kullanmak mevcut tesislerin durumu açısından önemlidir (Subraveti vd. 2023).

Günümüzde entegre çelik üretimi yapılan tesislerde yoğunlukla fosil yakıt kullanımı nedeniyle yüksek fırın (BF) işlemi sonrası büyük miktarda CO ve CO₂ ortaya çıkmaktadır (McQueen vd. 2019). Prosesler sonrası ortaya çıkan CO₂ emisyonları ile mücadelede sınırlı seçeneklere sahip olan demir ve çelik sektöründe karbon yakalama ve depolama yöntemi kilit role sahiptir (Williams vd. 2021). Küresel olarak karbon yakalama ve tutma amacıyla demo projeler üzerinde çalışılmaktadır. Bu projeler çoğunlukla yakma öncesi ve sonrası tiplerden ve çok azı oksijen-yakıt karbon tutma tipinden oluşmaktadır (Rajabloo vd. 2023).

Karbon yakalama ve depolama (CCS) pahalı bir işlem olmasından dolayı işletmeye ek maliyetler getirmekte ve çeliğin üretim maliyetini arttırmaktadır. Bu teknolojiyi daha verimli kullanmak amacıyla karbon yakalama ve yeniden kullanma (CCU) ve karbon yakalama, tekrar kullanma ve ayırma (CCUS) teknolojileri kullanılarak maliyetlerin düşürülmesi gerekmektedir (Ho vd. 2022). Yakalanan karbon ekonomik olarak faydalı bir ürüne çevrilebilirse karbon yakalama prosesleri yatırımcılar tarafından daha cazip hale gelebilir. En azından tutulan karbonun farklı bir üretim prosesinin bir bileşeni olması bile karbon tutma proseslerinin maliyetlerini indirebilir.

Karbon yakalama prosesleri için yapılan akademik çalışmalar incelenmiştir. Bazı ülkelerde yapılan akademik vaka çalışmaları listelenmiş ve farklı bakış açısı içeren bir çalışma aşağıda özetlenmiştir.

Krishna ve arkadaşları, karbon yakalama ve çevresel iyileştirme için tekniklerinden demir ve çelik cürufalarının uygulamalarının eleştirel incelemesini yapmışlardır. Karbon tutma tekniklerini ve yöntemleri inceleyerek klasik yöntemlerin hem ekonomik olmadığı hem de yüksek enerji yoğunluğunun olduğunu söylemişlerdir.

Sürdürülebilir yöntemler içinde olan demir ve çelik cürufalarının karbon tutma kapasitelerini incelemişlerdir. Demir ve çelik cürufalarının inşaat ve tarım sektöründe faydalı bir şekilde kullanılması için metotlar üzerinde çalışmışlardır. Çelik cürufalarının benzersiz kimyasal özelliklerinden dolayı çevresel uygulamalarda potansiyelinden bahsedilmiştir. Çelik cürufunun farklı teknikler ile kullanılması; metan gazının (CH₄) sebep olduğu çöp gazı emisyonları azaltma, taş ocağı ve enerji tesislerinde depo örtüsü olarak doğal toprak kullanımı azaltma, hidrojen sülfür (H₂S) emisyonlarını azaltarak kimyasal çöplüklerdeki kötü kokuları azaltma ve çelik fabrikalarında stoklanan çelik cürufunu azaltma olarak fayda sağlama potansiyeli tespit edilmiştir (Reddy, Gopakumar, ve Chetri 2019).

Küresel olarak CCS teknoloji çerçevesinde yapılmış olan uluslararası akademik senaryo ve vaka çalışmaları detaylı olarak incelenmiştir. Son 5 yıl içinde yapılan akademik çalışmalar içinde emisyon hedeflerini ve maliyetlerini net şekilde bulgular kısmında veren akademik çalışmalar değerlendirilmeye alınmıştır. Analiz edilerek anlamlı sonuçlar çıkartılmış olan akademik çalışmalar aşağıdaki çizelgede özet şeklinde verilmiştir.

Çizelge 3.6. Demir ve çelik endüstrisinde sıfır emisyon hedefine ulaşmak için karbon tutma ve depolama teknolojileri temelinde uygulanan akademik senaryo çalışmalarından popüler olanların özet ve detayları.

	Ülke Yıl Yazarlar	Yöntem	Hedef Yılı Ana içerik	Bulgular	Kaynak
1	Global 2021	Senaryo 1: BF-BOF fırını kullanan entegre tesiste biyokütle yakıt, CCS ve sıfır karbon emisyonlu elektrik kullanımı	2050 Mevcut kurulu işletmelerde karbon azaltma teknolojilerini kombine halinde kullanarak karşılaştırma	Sistemin karbon azaltma potansiyeli %93.6, pratikte %75 olarak hesaplanmıştır. Sıcak metal ton başına ortalama 140 \$ maliyet artmaktadır.	(Fan ve Friedmann 2021b)
	Fan ve Friedmann	Senaryo 2: DRI kömür fırını kullanan entegre tesiste biyokütle yakıt, CCS ve sıfır karbon emisyonlu elektrik kullanımı		Sistemin karbon azaltma potansiyeli %121.1, pratikte %97 olarak hesaplanmıştır. Sıcak metal ton başına ortalama 400 \$ maliyet artmaktadır.	
2	KANADA 2023 Zecca N. ve arkadaşları	Senaryo 1: DRI-EAF tesisinde yanma sonrası MEA (Monoetanolamin) karbon yakalama	2050 Bölgede bulunan ArchelorMittal Contrecoeur firması Montreal DRI-EAF tesislerinde karbon yakalama teknolojileri senaryolarını karşılaştırmak	Tesisteki mevcut DRI-EAF tesisine göre 1 ton sıcak metal üretimi başına seviyelendirilmiş olarak 39,92€ maliyet artışı ile 0,421 ton CO ₂ azalması hesaplanmaktadır.	(Zecca vd. 2023)
		Senaryo 2: DRI-EAF tesisinde ön yakma MDEA (Metildietanolamin) karbon yakalama		Tesisteki mevcut DRI-EAF tesisine göre 1 ton sıcak metal üretimi başına seviyelendirilmiş olarak 54,52€ maliyet artışı ile 0,389 ton CO ₂ azalması hesaplanmaktadır.	
		Senaryo 3: DRI-EAF tesisinde ön yanmalı SEWGS (Soğurma Geliştirilmiş Su Gaz Kaydırma) karbon yakalama		Tesisteki mevcut DRI-EAF tesisine göre 1 ton sıcak metal üretimi başına seviyelendirilmiş olarak 39,89€ maliyet artışı ile 0,426 ton CO ₂ azalması hesaplanmaktadır.	

Devamı Arkada

Çizelge 3.6'nın devamı

3	ROMANYA 2019	Senaryo 1: Entegre çelik tesisinde post-kombüsyon CO ₂ yakalama teknolojisi olarak mono-etanol amin (MEA) bazlı kimyasal absorpsiyon kullanılır. Bu teknoloji, çelik üretim sürecinde oluşan CO ₂ 'i atmosfere salınmadan önce yakalar ve depolar.	2050 entegre bir çelik fabrikasının post-kombüsyon CO ₂ yakalama ve depolama teknolojileri	Küresel ısınma potansiyeli (GWP), asitlenme potansiyeli (AP), ozon tabakasının tükenme potansiyeli (ODP) ve insan sağlığı üzerindeki toksik etkiler açısından referans duruma göre % 60-70 arasında bir azalma sağlarken enerji tüketimini % 30-40, maliyeti % 40-50 artırır	(Chisalita vd. 2019)
	Chisalita ve arkadaşları	Senaryo 2: Entegre çelik tesisinde kalsiyum döngüsü (CaL) adı verilen daha yenilikçi bir teknoloji kullanılır. Bu teknoloji, kireçtaşı ve kalsiyum oksit gibi kalsiyum bazlı malzemeleri kullanarak CO ₂ 'i yakalar ve depolar.	kullanarak, 2 farklı CCS senaryosunun çevresel etkisinin yaşam döngüsü analizi (LCA) yöntemiyle değerlendirilmesi	Küresel ısınma potansiyeli (GWP), asitlenme potansiyeli (AP), ozon tabakasının tükenme potansiyeli (ODP) ve insan sağlığı üzerindeki toksik etkiler açısından referans duruma göre % 70-80 arasında bir azalma sağlarken enerji tüketimini % 20-30, maliyeti % 30-40 artırır.	
4	AVRUPA 2019 Mandova ve Arkadaşları	Senaryo 1: Mevcut durum göz önüne alınarak hiçbir CCS teknolojisi kullanılmayacak ve biyo-kütle kullanımı 2050 yılında ortalama %14,5 olduğu varsayılmıştır.	2050 Avrupa'da 15 ülkede toplam 30 adet tesis verileri kullanılarak emisyonların düşürülmesi için 4 farklı biyo-CCS senaryosu üzerinde çalışılmıştır.	Bu senaryoda, biyokütle kullanımı 2050 yılında ortalama %14,5 olurken CO ₂ kaçınma maliyeti ise ton başına ortalama 60 € olmakta ve %20'ye kadar emisyon azaltımı sağlanmaktadır.	(Mandova vd. 2019)
		Senaryo 2: CCS teknolojisi 2030 yılında devreye alınacak ve biyo-kütle kullanımı 2050 yılında ortalama %29,5 olduğu varsayılmıştır.		Bu senaryoda, biyokütle kullanımı 2050 yılında ortalama %10,5 olurken CO ₂ kaçınma maliyeti ise ton başına ortalama 80 € olmakta ve %50'ye kadar emisyon azaltımı sağlanmaktadır.	
		Senaryo 3: CCS teknolojisi 2025 yılında devreye alınacak ve biyo-kütle kullanımı 2050 yılında ortalama %44,5 olduğu varsayılmıştır.		Bu senaryoda, biyokütle kullanımı 2050 yılında ortalama %15,5 olurken CO ₂ kaçınma maliyeti ise ton başına ortalama 90 € olmakta ve %80'e kadar emisyon azaltımı sağlanmaktadır.	
		Senaryo 4: CCS teknolojisi 2020 yılında devreye alınacak ve biyo-kütle kullanımı 2050 yılında ortalama %59,5 olduğu varsayılmıştır.		Bu senaryoda, biyokütle kullanımı 2050 yılında ortalama %20,5 olurken CO ₂ kaçınma maliyeti ise ton başına ortalama 100 € olmakta ve %100'e kadar emisyon azaltımı sağlanmaktadır.	

Devamı Arkada

Çizelge 3.6'nın devamı

5	GÜNEY KORE 2023 Jeong ve arkadaşları	Senaryo 1: FINEX off-gas: Yanma sonrası CO ₂ yakalama önerilmiştir.	2050 FINEX işleminin çevresel yararını daha da arttırmak için 3 farklı CCS teknolojisi sisteme entegre edilerek sonuçları analiz edilmiştir.	Çevre dostu bir seçenek olarak sunulmuştur. Mevcut duruma emisyonlar %35 oranında düşmektedir. Diğer senaryolara göre en düşük emisyon değerine sahiptir.	(Jeong vd. 2023)
		Senaryo 2: Yanma Öncesi CO ₂ Yakalama: CO ₂ yanma öncesinde yakalanması önerilmiştir.		Mevcut duruma göre emisyonlar %22 oranında düşmüştür. 68\$ / ton levha maliyet ile en ucuz yöntem olarak belirlenmiştir. Diğer seçeneklere göre en düşük maliyete sahiptir.	
		Senaryo 3: Yanma öncesi CO ₂ yakalama ve sonrası metanol üretimi önerilmiştir.		Mevcut duruma göre emisyonlar %32 oranında düşmüştür. Diğer 2 seçeneğe göre yüksek maliyetlere sahip olmasına rağmen üretilen metanolün piyasa fiyatına göre en cazip yöntem olarak değerlendirilebilir.	
6	Fransa 2024 Andrade ve arkadaşları	Senaryo 1: REF: Referans Senayosu: Emisyon düşürme çabalarına girmeden, sadece üretim hedefleri dikkate alınır.	2050 ile 2060 yılı hedeflerine dikkate alınırken 2100 yılına kadar tahminde bulunur Hedef yılları doğrultusunda emisyon hedeflerine ulaşmak için karbon tutma, saklama ve yeniden kullanma teknolojileri, COREX ve	2018 yılında yaklaşık 2,8 Gt CO ₂ olan emisyonlar, 2050 yılında 6 Gt CO ₂ 'ye yükselip 2100 yılında 6 Gt CO ₂ olarak sabitleneceği öngörülmektedir.	(Andrade vd. 2024)
		Senaryo 2: 2C: Küresel sıcaklık artışını 2C dereceye sınırlandıran senaryo.		2040 yılında neredeyse 5 Gt CO ₂ seviyelerine arttıktan sonra 2100 yılında sıfırlanma seviyelerine geleceği öngörülmektedir.	
		Senaryo 3: PA: Paris Antlaşmasına referanstır. Küresel sıcaklık yükselişinin 1,5C derece altında tutma hedefi vardır.		2040 yılında neredeyse 3,5 Gt CO ₂ seviyelerine arttıktan sonra 2060 yılında 1 Gt CO ₂ seviyelerine inip 2075 yılında sıfırlanma seviyelerine geleceği öngörülmektedir.	
		Senaryo 4: IISO: Karbon nötr çelik üretimi hedefler. Gelişmiş ülkelerde 2050 yılı, gelişmekte olan ülkelerde 2060 yılına kadar küresel sıcaklık artışını 1,5 C altında tutmaya odaklanır. Bölgeler arası iş birliği vardır.		2040 yılında neredeyse 3,6 Gt CO ₂ seviyelerine arttıktan sonra 2060 yılında nötr seviyelere inip 2090 yılında - 0,4 Gt CO ₂ seviyelerine geleceği öngörülmektedir.	

Devamı Arkada

Çizelge 3.6'nın devamı

		Senaryo 5: IISR_0: IISO senaryosunda bölgeler arası iş birliği yoktur	Demirin doğrudan indirilmesi yöntemine yoğunlaşır.	2040 yılında neredeyse 3,6 Gt CO ₂ seviyelerine arttıktan sonra 2060 yılında nötr seviyelere inip 2090 yılında - 0,4 Gt CO ₂ seviyelerine geleceği öngörülmektedir.	
		Senaryo 6: IISB50: IISO senaryosunda bölgeler arası iş birliği varken karbon yakalama verimliliği %20 azalmaktadır.		2040 yılında neredeyse 3,5 Gt CO ₂ seviyelerine arttıktan sonra 2060 yılında nötr seviyelere inip 2090 yılında - 0,4 Gt CO ₂ seviyelerine geleceği öngörülmektedir.	
		Senaryo 7: IISB100: IISO senaryosunda bölgeler arası iş birliği varken karbon yakalama verimliliği %44 azalmaktadır.		2030 yılında neredeyse 3,3 Gt CO ₂ seviyelerine arttıktan sonra 2060 yılında eksi seviyelere inip 2090 yılında - 0,5 Gt CO ₂ seviyelerine geleceği öngörülmektedir.	
		Senaryo 8: IISB0: Belirli bir ISI hedefleri uygulanmamakla beraber biyokütle fosil yakıtların yerini almamaktadır..		2040 yılında neredeyse 4,1 Gt CO ₂ seviyelerine arttıktan sonra 2070 yılında 0,4 Gt CO ₂ seviyelere inip 2100 yılında 0,3 Gt CO ₂ seviyelerine geleceği öngörülmektedir.	

Çizelge 3.6’da sunulan ve karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojilerini kullanan senaryolar, karbon emisyonlarını azaltma potansiyeli ve maliyet etkinliği konusunda önemli bilgiler sunmaktadır. Her bir senaryo, farklı ülkelerde ve zaman dilimlerinde çeşitli teknolojik yaklaşımların uygulanabilirliğini ve etkisini göstermektedir.

Kanada ve Romanya gibi ülkelerin senaryoları, yanma sonrası ve yanma öncesi CO₂ yakalama teknolojilerinin kullanımını ve bunların maliyetlerini değerlendirmektedir. Bu senaryolar, karbon yakalama teknolojilerinin uygulanmasının ekonomik bir maliyetle de olsa emisyonları önemli ölçüde azaltabileceğini ortaya koymaktadır. Avrupa’da senaryolar, biyo-CCS teknolojilerinin kullanımını ve bunların 2050 yılına kadar emisyonları azaltma potansiyelini araştırmaktadır. Biyokütle kullanımındaki artış, senaryoya bağlı olarak %20 ila %100 arasında değişen emisyon azaltma oranlarıyla CO₂’den kaçınma maliyetlerini değişken bir şekilde etkilemektedir. Güney Kore’den senaryolar, farklı CCS teknolojilerinin çelik üretim sürecine entegrasyonunu ve bunların 16 çevresel faydasını analiz etmektedir. Bu senaryolar çevre dostu seçenekler sunmakta ve mevcut duruma kıyasla emisyonları önemli ölçüde azaltmaktadır.

Genel olarak tablo, karbon yakalama teknolojilerinin uygulanmasının karbon emisyonu azaltma hedeflerine ulaşmak için etkili bir yol olduğunu göstermektedir. Ancak, bu teknolojilerin maliyetleri ve uygulanabilirliği yerel koşullara, mevcut endüstriyel altyapıya ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, her ülkenin kendine özgü ekonomik ve çevresel koşullarını dikkate alarak karbon yakalama teknolojilerinin uygulanmasına yönelik kapsamlı bir strateji geliştirmesi gerekmektedir. Bu stratejiler, sürdürülebilir bir gelecek için elzem olan düşük karbonlu sanayiye geçiş yolunda önemli bir adım olabilir.

3.2.3. Demir indirgeme fırını yakıt kaynağı değişimi (hidrojen)

Dünya üzerindeki çelik üretim tesislerinin neredeyse %70’ini BF-BOF ünitesi kullanmaktadır (IEA 2020b). Bu fırınlarda demir indirgeme işlemi için kömür kullanıldığından her zaman yüksek karbon emisyonları ortaya çıkmaktadır. Küresel ısınmayı 1,5 °C altında tutabilmek için kısa vadeli verim arttırıcı iyileştirmeler ve orta vadeli karbon tutma teknolojileri yeterli değildir. Artan çelik talebi de göz önünde bulundurularak neredeyse sıfır karbon salınımı olan yeni bir teknolojiye ihtiyaç vardır.

BF-BOF ünitelerinde indirgeyici olarak kullanılan kömürün yerine hidrojen kullanılarak karbon emisyonlarına çözüm bulunabilir. Madenlerden çıkarılan demir oksitler BF-BOF yöntemi yerine DRI (doğrudan indirgenmiş demir) yöntemi kullanılarak hidrojen yardımıyla indirgenebilir. Bu yöntemle genel olarak doğada hematit, manyetit vb. olarak bulunan demir madeninin içeriğindeki oksijeni kimyasal işlemler ile karbon yerine hidrojene bağlanması amaçlanmıştır. Böylece çelik üretimi sonrası karbon yerine su molekülü üretilmesi amaçlanmaktadır.

Hidrojen kullanılarak çelik üretimi için günümüzde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Mevcut BF-BOF yöntemi kullanılan tesislerde indirgeyici ajan olarak hidrojen kullanılmaktadır. Mevcut tesislerde düşük maliyetli emisyon düşürücü seçenek olarak düşünülebilir. DRI yöntemi ile demir madeni hidrojen ile indirgenmektedir. Araştırma aşamasında olan bir başka yöntem ise hidrojen plazması kullanılarak demirin indirgenmesi yöntemidir (Voestalpine 2022). Bu yöntem ticari aşamaya gelirse 2050 net sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda büyük bir adım atılmış olur.

Karbon emisyonlarını azaltılması için kullanılan hidrojen; üretim yöntemlerine göre farklı renklerde kategorize edilmektedir. Renk kategorilerine göre hidrojen üretiminde ortaya çıkan emisyon miktarları hakkında fikir oluşması amaçlanmaktadır.

Hidrojen üretim yöntemleri

Yeşil Hidrojen

Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak suyun elektrolizi yoluyla üretilen hidrojene yeşil hidrojen denilmektedir. Bu yöntemle üretilen hidrojen demir indirgeme işleminde (DRI) kullanılırken elektrolizden elde edilen oksijen de çelikleştirme işlemi yapılan BOF fırınında kullanılmaktadır. Entegre tesislerde fosil yakıt kullanan yüksek fırından çıkan gazlardan metanol ve metan gazı üretmek için de hidrojen gazı kullanılmaktadır. Hidrojeni DRI işlemi için kullanmak emisyonları hatırı sayılır şekilde azaltsa da mevcut tesisler için yatırım maliyetleri çok yüksektir. Bu teknolojiye geçilmesi için mevcut BF-BOF tesislerin kullanım ve ekonomik ömürlerini doldurması gereklidir. Elektrolizden elde edilen hidrojenin satılıp oksijenin BOF fırınında kullanılması en ucuz yöntemdir. Hatta uzun vadede eksi maliyet bile yaratmaktadır. Baca gazından metanol ve metan gazı üretmek DRI fırınında hidrojen kullanıma göre daha ekonomiktir. Baca gazına bağlı emisyonları azaltmasına rağmen DRI hidrojen indirgemeye göre daha az emisyon azaltma potansiyeli vardır (Choi ve Kang 2023). Biyo-kütle kaynaklı proliz işlemi ile üretilen hidrojen de bu grup içinde olup olmaması gerekliliği tartışılmaktadır (Arcos ve Santos 2023). Biyo-kütle yenilenebilir kaynak olarak kabul edilir ve üretimi fosil yakıtlara nispeten daha az karbon emisyonu oluşturur.

Gri Hidrojen

Doğalgazdan elde edilen hidrojene denilmektedir. Kısmi oksidasyon ve buhar metan reformasyonu ile hidrojen üretimi yapılmaktadır (Ingale vd. 2022). Doğalgazdan üretilen gri hidrojenin emisyon miktarı 11 ile 13 kg CO₂ eşdeğeri / kg H₂ arasındadır. (Suer vd. 2022)(Birleşmiş Milletler 1998), (Mehmeti vd. 2018).

Mavi Hidrojen

Doğalgazdan buhar reformasyonu yöntemi ile hidrojen üretilirken ortaya çıkan CO₂ emisyonlarının yakalanıp toprağa gömülmesi prosesiyle üretilir. Gri hidrojenden genel olarak farkı sistemin CCS teknolojisi ile birlikte çalışarak emisyonları azaltmasıdır. Doğalgaz kaynaklı ve CCS teknolojisi kullanılarak üretilen mavi hidrojenin emisyon miktarı 0,6 ile 4,7 kg CO₂ eşdeğeri / kg H₂ arasındadır , (Suer vd. 2022).

Kahverengi Hidrojen

Kömür gazlaştırma yönteminin kullanılarak üretilen hidrojene kahverengi hidrojen denir. Toz halindeki kömür atmosferik basınçta oksijen ve buhar kullanılarak kısmi oksidasyona uğrattılır. Sonrasında ham gaz soğutulma, tozları süzme ve saflaştırma işlemlerinden sonra yüksek saflığa yakın hidrojen üretilir. Kömürün gazlaştırılması ile üretilen hidrojenin emisyon miktarı 19 ile 24 kg CO₂ eşdeğeri / kg H₂ arasındadır (Mehmeti vd. 2018), (Suer vd. 2022). Kömür gazlaştırma için yukarı çekişli gazlaştırıcı, aşağı çekişli gazlaştırıcı, akışkan yataklı gazlaştırıcı, sürüklemeli gazlaştırıcı ve plazma gazlaştırıcı prosesleri geliştirilmiştir (Suer vd. 2022).

Su (Aqua) Hidrojeni

Kanada’da geliştirilmekte olan bir teknolojidir. Jeotermal kaynaklardan ve yağlı kumlardan faydalanarak çıkarılmaktadır. Ana kaynağı fosil yakıt olmasına rağmen yeşil hidrojen kadar temiz bir enerjidir. Yeraltından hidrojenin çıkartılıp, karbonun yer altında doğal olarak kalması emisyonsuz bir üretim sağlamaktadır (Yu vd. 2021).

Pembe – Mor – Kırmızı Hidrojen

Nükleer enerji kullanılarak üretilen hidrojenlere verilen isimlerdir. Hidrojen üretiminde sadece nükleer kaynaklı elektrik kullanılırsa pembe hidrojen, sadece nükleer kaynaklı termal enerji kullanılırsa kırmızı hidrojen ve nükleer kaynaklı elektrik ile termal enerjiyi kombine olarak kullanılırsa mor hidrojen oluşmaktadır (Incer-Valverde vd. 2023).

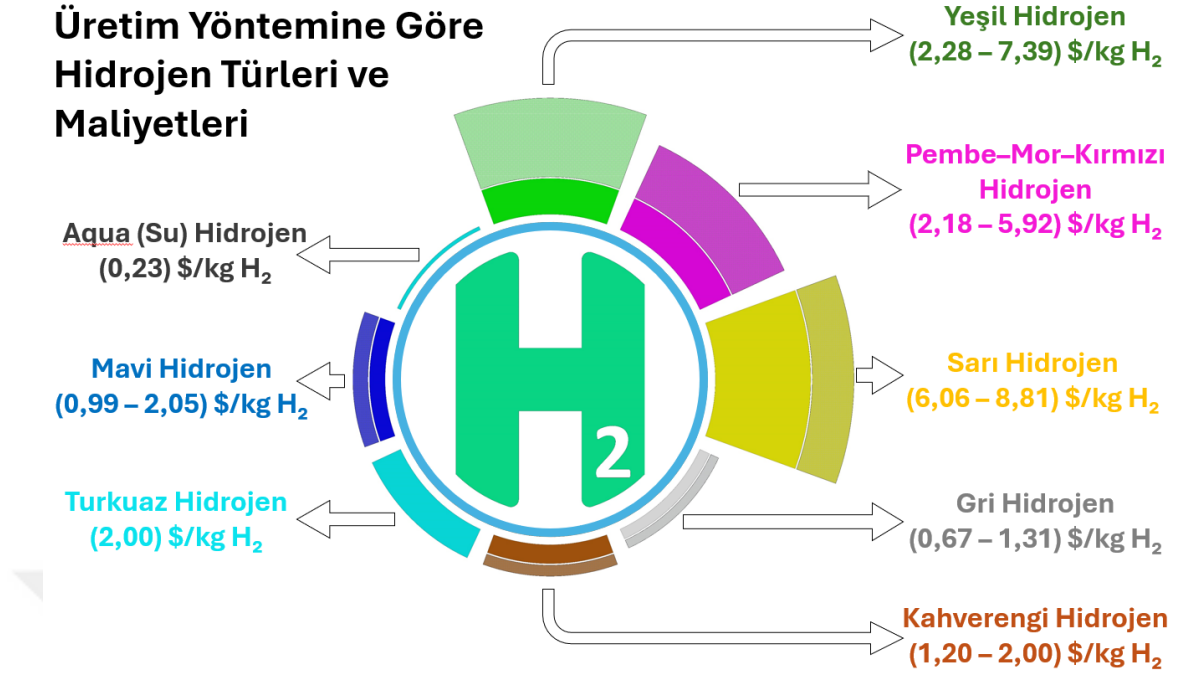
Turkuaz Hidrojen

Metan pirolizi işlemiyle üretilmektedir. Bu yöntemler ile yüksek sıcaklıklarda bölünerek hidrojen gaz halde karbon katı halde ayrışır. Atmosfere karbon salınımı olmadığı için emisyonu çok düşüktür. Bu yöntem henüz ticarileşmemiştir ve araştırma seviyesindedir (Incer-Valverde vd. 2023).

Beyaz Hidrojen

En net ifade ile doğada bulunan hidrojene beyaz hidrojen denir. Hidrojen doğada saf olarak çok nadir bulunmasına rağmen yeni araştırmalar ile kıtasal kabuğun katmanlarında doğal olarak bulunabileceğini göstermektedir (Blay-Roger vd. 2024).

Üretim Yöntemine Göre Hidrojen Türleri ve Maliyetleri



Şekil 3.2. Hidrojenin üretim yöntemlerine göre birim maliyetlerinin karşılaştırılması (Arcos ve Santos 2023).

Çelik üretiminde 2050 net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmak için karbon ayak izi içermeyen hidrojen gazını kullanmak zorunludur. Ancak günümüzün mevcut teknolojileri ve ekonomik şartları göz önünde bulundurulduğunda, sektörün zorlu bir geçiş süreciyle karşı karşıya olduğu da bir gerçektir. Bu zorlu geçiş sürecini simüle edebilmek ve olası sorunları görmek için çelik üretiminde hidrojen kullanımı üzerine akademik senaryo ve vaka çalışmaları yapılmaktadır. Emisyon hedeflerini ve maliyetlerini net şekilde sonuçlar kısmında ifade eden değerli akademik çalışmalardan güncel olanlar incelenmiştir ve aşağıdaki çizelgede özetlenerek sunulmuştur.

Çizelge 3.7. Demir ve çelik endüstrisinde sıfır emisyon hedefine ulaşmak için yakıt kaynağı olarak hidrojen kullanım teknolojileri temelinde uygulanan akademik senaryo çalışmalarından popüler olanların özet ve detayları.

	Ülke Yıl Yazarlar	Yöntem	Hedef Yılı Ana içerik	Bulgular	Kaynak
1	Avrupa 2022 Suer ve Arkadaşları	Senaryo 1: Çelik üretiminde geleneksel BF-BOF kullanımı durumu	2040 Geleneksel çelik üretimi ile şebeke elektriği kaynaklı hidrojen bazlı çelik üretiminin 2040 yılı emisyonlarını analiz etmektedir.	Standart üretim yöntemleri ile emisyon miktarı 2 kg CO ₂ e / Kg çelik olarak hesaplanmaktadır.	(Suer vd. 2022)
		Senaryo 2: Çelik üretiminde doğal gaz bazlı doğrudan indirgeme fırını (NG-DRI-EAF) kullanımı durumu		Doğal gaz bazlı üretim yöntemleri ile emisyon miktarı 1,4 kg CO ₂ e / Kg çelik olarak hesaplanmaktadır.	
		Senaryo 3: Çelik üretiminde Hidrojen bazlı doğrudan indirgeme fırını (H ₂ -DRI-EAF) kullanımı durumu		Avrupa şebeke karışımı tahminli hidrojen bazlı üretim yöntemleri ile emisyon miktarı 0,75 kg CO ₂ e / Kg çelik olarak hesaplanmaktadır.	
2	Cin 2021 Ren ve Arkadaşları	Senaryo 1: Yüksek Talep, CCS Yok, Karbon Kısıtlaması Yok, Düşük Hurda Tabanlı EAF Payı (HiDem_NoCCS_CapNo_LoScr)	2050 Çelik üretiminde karbon emisyonları 2015 yılı için 1244,38 Mt iken 2020 yılında 1398,08 Mt'na yükseldi. Senaryolarda 2050 yılı emisyonları analiz edilmektedir.	Senaryoya göre 2050 yılında toplam emisyonlar 936.02 Mt olarak hesaplanmıştır. 2020 yılına göre %33 daha az olacaktır.	(Ren vd. 2021)
		Senaryo 2: Düşük Talep, CCS Yok, Karbon Kısıtlaması Yok, Düşük Hurda Tabanlı EAF Payı (LoDem_NoCCS_CapNo_LoScr)		Senaryoya göre 2050 yılında toplam emisyonlar 738.26 Mt olarak hesaplanmıştır. 2020 yılına göre %47 daha az olacaktır.	
		Senaryo 3: Düşük Talep, CCS Yok, Sadece Demir ve Çelik Üretimi için Karbon Kısıtlaması, Yüksek Hurda Tabanlı EAF Payı (LoDem_NoCCS_CapI_HiScr)		Senaryoya göre 2050 yılında toplam emisyonlar yaklaşık 670 Mt olarak hesaplanmıştır. 2020 yılına göre %52 daha az olacaktır.	

Devamı Arkada

Çizelge 3.7'nin devamı

		Senaryo 4: Düşük Talep, CCS Yok, Tüm Üretim Süreçleri için Karbon Kısıtlaması, Yüksek Hurda Tabanlı EAF Payı (LoDem_NoCCS_CapA_HiScr)		Senaryoya göre 2050 yılında toplam emisyonlar yaklaşık 371 Mt olarak hesaplanmıştır. 2020 yılına göre %73,4 daha az olacaktır.	
		Senaryo 5: Düşük Talep, CCS Mevcut, Sadece Demir ve Çelik Üretimi için Karbon Kısıtlaması, Yüksek Hurda Tabanlı EAF Payı (LoDem_CCS_CapI_HiScr)		Senaryoya göre 2050 yılında toplam emisyonlar yaklaşık 428 Mt olarak hesaplanmıştır. 2020 yılına göre %69 daha az olacaktır.	
		Senaryo 6: Düşük Talep, CCS Mevcut, Tüm Üretim Süreçleri için Karbon Kısıtlaması, Yüksek Hurda Tabanlı EAF Payı (LoDem_CCS_CapA_HiScr)		Not specified, but total CO2 emissions decrease by 70% from 2015-2050	
3	Almanya 2021 Bhaskar ve Arkadaşları	Temel Durum: Mevcut Doğal gaz kaynaklı direk indirgeme fırını ve elektrikli ark ocağı (NG-DRI-EAF) kullanım senaryosu	2050 Çelik üretiminde kullanılan hidrojenin üretim yöntemi, maliyet, emisyon başarısı karşılaştırması	Sıcak çelik ton başına 541 Kg CO ₂ emisyon oluşurken 20 yıllık seviyelendirilmiş üretim maliyeti (LCOP) 414\$ olduğu varsayılmıştır.	
		Senaryo 1: Çelik üretiminde kullanılması planlanan hidrojenin metan prolizi tabanlı üretilmesi		Sıcak çelik ton başına 129,42 Kg CO ₂ emisyon oluşurken 20 yıllık seviyelendirilmiş üretim maliyeti (LCOP) 631\$ olduğu varsayılmıştır.	(Bhaskar vd. 2021)
		Senaryo 2: Çelik üretiminde kullanılması planlanan hidrojenin şebeke elektriği kullanılarak su elektrolizi tabanlı sistemde üretilmesi		Standart şebeke elektriği karbon emisyonları dikkate alınarak sıcak çelik ton başına 129,42 Kg CO ₂ emisyon oluşurken 20 yıllık seviyelendirilmiş üretim maliyeti (LCOP) 669\$ olduğu varsayılmıştır.	

Devamı Arkada

Çizelge 3.7'nin devamı

4	Avustralya 2023 Wang ve Arkadaşları	Senaryo 1: Çelik üretiminde kullanılan elektriğin tamamı Bilpara Bölgesinde rüzgar enerjisinden üretilmesi durumu. H2DR-EAF şaft fırınında hurda demir kullanımı yok.	2050 Hedef yılında sıfır karbon çelik üretimi için yenilenebilir enerji kullanımı maliyetlerinin analizi yapılmaktadır.	Hesaplamalara göre 2030 yılındaki çeliğin ton başına üretim maliyetleri 2025 yılına göre yaklaşık %11 azalacağı, 2050 yılında ise 2025 yılına göre yaklaşık %23 azalacaktır.	(Wang vd. 2023)
		Senaryo 2: Çelik üretiminde kullanılan elektriğin tamamı Bilpara Bölgesinde güneş enerjisinden üretilmesi durumu. H2DR-EAF şaft fırınında hurda demir kullanımı yok.		Hesaplamalara göre 2030 yılındaki çeliğin ton başına üretim maliyetleri 2025 yılına göre yaklaşık %13,5 azalacağı, 2050 yılında ise 2025 yılına göre yaklaşık %29,5 azalacaktır.	
		Senaryo 3: Çelik üretiminde kullanılan elektriğin tamamı Bilpara Bölgesinde rüzgar ve güneş enerjisinden hibrit olarak üretilmesi durumu. H2DR-EAF şaft fırınında hurda demir kullanımı yok.		Hesaplamalara göre 2030 yılındaki çeliğin ton başına üretim maliyetleri 2025 yılına göre yaklaşık %12 azalacağı, 2050 yılında ise 2025 yılına göre yaklaşık %26 azalacaktır.	
5	İsveç 2020 Toktarova ve arkadaşları	Senaryo 1: Yol 1 olarak adlandırılan; CCS ve biyokütle ile değiştirilmiş yüksek fırın kombinasyonu ve biyokütle ile EAF kullanılarak birincil çelik üretim tesisinin değiştirilmesi. Üretim hızı sabit olması beklenmektedir (2045 yılında 4,9 Mton çelik).	2045 Hedef yılı odaklı hidrojen yakıt kaynağı başta olmak üzere kombine sistemlerin analizi yapılmaktadır.	2030 yılında emisyonlar %80 azaltılıyor, 2045 yılında maksimum %83 azalıyor. Hiçbir şekilde sıfır emisyon hedeflerine ulaşamaz.	(Toktarova vd. 2020)
		Senaryo 2: Yol 2 olarak adlandırılan H-DR/EAF süreci ile birincil çelik üretiminin elektrifikasyonu üzerinde çalışılan senaryodur. Üretim hızı sabit olması beklenmektedir (2045 yılında 4,9 Mton çelik).		2025 ile 2035 yılları arasında emisyonlar 3,7 - 3,8 Mt CO ₂ arasındayken 2040 yılı ve sonrasında hidrojen kullanımı ile emisyonlar neredeyse sıfırlanmaktadır. Ayrıca İsveç'in toplam karbon emisyonlarında %10 düşüş sağlayabilir.	

Devamı Arkada

Çizelge 3.7'nin devamı

		Senaryo 3: Yol 3 olarak adlandırılan HBI üretiminde H-DR/ EAF ve EAF/Biyokütle teknolojisi kullanılan senaryodur. Üretim hızının artacağı beklenmektedir (2045 yılında 6 Mton çelik).		2035 yılı ve sonrasında emisyonların sıfırlanacağı öngörülmektedir. Bu yol, ihraç edilen HBI'nin EAF aracılığıyla dönüştürülmesi ve alıcı ülkenin karbonsuz bir enerji sektörüne sahip olması varsayıldığında, İsveç dışındaki çelik endüstrisinin karbon salınımını azaltabilir	
6	İspanya 2023	Senaryo 1: İleri enerji tekniklerini kullanan ve yeniden ısıtma için H ₂ kullanan tesis senaryosu	2050 Hidrojen gazını mevcut tesislerde farklı yöntemler ile kullanılarak senaryolar kurulanmıştır.	Bu yöntem ile tesiste yıllık 229 kt CO ₂ e emisyon azaltılması öngörülmüştür.	(Rodríguez Diez vd. 2023)
	Diez ve Arkadaşları	Senaryo 2: DRI üretim sürecine direk H ₂ entegre edilerek yakıt kaynağının nispeten değiştirilmesi		Yakıt olarak H ₂ kullanılmasıyla DRI ünitesinde %90 emisyon azaltımı başarısı gösterilmektedir.	

Hidrojenin demir ve çelik üretiminde nasıl kullanılabileceğine dair değerli bilgiler Çizelge 3.7’de sunmaktadır. Hidrojen, fosil yakıtların yerini alabilecek ve bu süreçte karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilecek bir enerji taşıyıcısıdır. Çizelgede özetlenen senaryolar, hidrojenin çeşitli şekillerde kullanılmasının (örneğin, metan pirolizi veya su elektrolizi yoluyla üretilen hidrojen) karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir.

Örneğin, Çin'deki senaryolar 2050'deki toplam emisyonların 2020'ye kıyasla %33 ile %73,4 arasında azaltılabileceğini öngörmektedir (Ren vd. 2021). Benzer şekilde, Almanya'daki senaryolar, hidrojen üretimi için farklı yöntemlerin kullanılmasının karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltabileceğini, ancak ton başına çelik üretim maliyetini artırabileceğini göstermektedir.

Avustralya'daki senaryolar, yenilenebilir enerji kullanımının çelik üretim maliyetlerini 2025 yılına kıyasla 2050 yılına kadar %23 ile %29,5 arasında azaltabileceğini öngörmektedir (Wang vd. 2023). Bu da çelik üretiminde hidrojen kullanımının sadece çevresel faydalar değil, aynı zamanda ekonomik faydalar da sağlayabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, tablonuz demir ve çelik üretiminde hidrojen kullanımının 2050 yılına kadar net sıfır emisyon hedefine ulaşmak için önemli bir strateji olabileceğini göstermektedir. Bu hem çevresel sürdürülebilirliği hem de ekonomik verimliliği artırabilir. Bu nedenle, demir çelik üretiminde hidrojenin daha fazla kullanılması, gelecekteki karbon nötr hedeflerine ulaşma yolunda önemli bir adım olabilir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çelik sektörü, iklim değişikliğiyle mücadelede kilit bir sektördür ve bu nedenle, 2050 yılına kadar net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmak için sektördeki emisyonları azaltma çabaları hayati öneme sahiptir. Bu çalışma, çelik üretiminde karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik küresel stratejileri ve senaryo analizlerini incelemektedir.

Paris İklim Anlaşması ve Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri gibi uluslararası anlaşmalar, endüstriyel faaliyetlerin karbon ayak izini azaltmada önemli bir rol oynamaktadır. Bu anlaşmalar, ülkeleri ve şirketleri net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmaya teşvik etmektedir. Küresel iş birliği ve politika uyumu, bu hedeflere ulaşılmasında kritik öneme sahiptir ve tüm paydaşların katılımını ve taahhüdünü gerektirmektedir.

Enerji verimliliği üzerine yapılan senaryo çalışmaları, farklı ülkelerin enerji kullanımını daha etkin hale getirerek emisyonları nasıl azaltabileceklerini ele alır. Bu çalışmalar, emisyonların önemli ölçüde azaltılmasının mümkün olduğunu ve bu sürecin maliyetinin zamanla düşebileceğini öngörmektedir. Çalışmalar incelendiğinde mevcut olan çelik üretim tesislerinde üretim yöntemleri değiştirilemediği için iyileştirmeler yapıldığı görülmüştür. Fosil yakıt olarak kömür kullanan tesislerin amortisman süreleri bitmediği için kapatılamayacağından dolayı fosil yakıtların ortaya çıkardığı karbon emisyonlarını düşürmeye yönelik çalışmalar üzerinde yoğunlaşmaktadır. Emisyonları düşürmek için de mevcut enerjiyi daha verimli kullanmak gereklidir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde de temelinde ısı kayıplarını azaltma, proses sonrası artık ısıyı farklı proseslerde kullanma ve sıcak yarı mamulü soğutmadan bir sonraki prosese sokma prensibi yatmaktadır.

Enerji verimliliği çalışmaları başarılı şekilde uygulandığı takdirde uzun vadede yatırım maliyetlerini de amorti ederek maliyetleri negatif yapabileceği görülmüştür. Karbon emisyonlarını azaltma amacıyla yapılan verimlilik çalışmaları yatırımcı için de enerji maliyetlerinde tasarruf sağladığından dolayı teşvik edici bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır. Tabi ki kısa vadeli olarak mevcut tesislerde başarılı bir şekilde emisyonları azaltmak enerji verimliliği ile mümkün olsa da NZE 2050 hedefleri için kesinlikle yetersiz kalacağı da senaryo özetlerinde görülmektedir. Özetler incelendiğinde 2050 yılı için çelik üretim emisyonlarının sıfırlandığı hiçbir senaryo görülememektedir. Çizelge 3.5 tekrar incelenmek istenirse Kanada'nın hedefleri, emisyonları belirli bir süre içinde azaltmayı ve bu süreçte maliyetlerin negatif olabileceğini, yani karbon kredileri veya diğer teşvikler yoluyla gelir elde edilebileceğini göstermektedir. Brezilya'nın çalışmaları, emisyon azaltımının mümkün olduğunu ve karbon maliyetlerinin değişken olabileceğini ortaya koymaktadır.

Karbon yakalama teknolojiler tek başına ele alındığında işletmelere fazladan maliyet yükleyen zorunluluklar olarak bilinmektedir. Fakat yakalanmış olan karbon okyanus dibine depolanmak yerine faydalı bir şekilde kullanılabilirse maliyetleri düşürebilir. Yakalanmış (tutulmuş) olan karbon farklı bir malzemeye çevrilebilirse ya da farklı proseslerde kullanılabilirse işletmeye katma değer sağlayacaktır. Karbon tutma teknolojilerinin hibrit olarak kullanımıyla verimli şekilde yüksek kar marjlı bir ürün elde edilmesi halinde karbon yakalama proses maliyetlerinin sıfırlanması teorik olarak mümkün olabilir.

Çizelge 3.6 incelendiğinde karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojileri üzerine yapılan senaryo çalışmaları, genel olarak tek başına kullanılmamaktadır. Hibrit olarak kullanılan senaryolarda bile bir tanesi hariç %100 emisyonların azaltıldığı görülmemektedir. Bunun sebebi fosil yakıt kullanımının ortaya çıkardığı karbon emisyonlarının tamamının tutulması için gerekli olan teknoloji ve ekipman maliyetinin çok fazla olması ve üretimde birim maliyetlerinin çok yükseltilmesidir. NZE 2050 yılı hedefleri için mevcut tesislerde enerji verimliliğinin yetersiz kalmasından dolayı maliyetli ve hızlı bir çözüm olarak CSS teknolojileri hayat kurtarıcıdır. Fakat kesinlikle NZE 2050 hedeflerini tutturmak için tek başına bir çözüm değildir.

Enerji verimliliğinin ve CCS teknolojilerinin NZE 2050 hedeflerinde yetersiz kalması nedeniyle fosil yakıtlar yerine alternatif yakıtlar üzerinde çalışmalar hızlandırılmış ve hidrojenin sıfır emisyon potansiyeli keşfedilmiştir. Enerji verimliliğinde ve CCS teknolojileri ne kadar verimli kullanılırsa kullanılsın, bu teknolojilerin tükettiği elektrik enerjisi bile günümüzde yüksek karbon ayak izi içermektedir. İşletmelerde hem yakıt hem de elektrik tamamen sıfır emisyonu ve nötr karbon ayak izine sahip olması gerekmektedir.

Çizelge 3.7 incelendiğinde hidrojen kullanımı üzerine yapılan senaryo çalışmaları, hidrojenin demir ve çelik üretiminde fosil yakıtların yerini alabileceğini ve bu süreçte karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir. Çin'deki çalışmalar, hidrojen kullanımının toplam emisyonları önemli ölçüde azaltabileceğini öngörmektedir. Avustralya'daki çalışmalar, yenilenebilir enerji kullanımının çelik üretim maliyetlerini azaltabileceğini göstermektedir.

Mevcut teknolojik ve ekonomik koşullar altında hidrojen bazlı çelik üretimi yüksek yatırım ve işletme maliyetlerine sahiptir. Ancak, küresel ısınmanın etkileriyle mücadelenin aciliyeti arttıkça, hükümetlerin ve özel sektörün karbon vergileri, emisyon ticareti sistemleri ve yeşil teknolojilere yatırım gibi ekonomik teşvikler yoluyla bu maliyetleri dengelemesi beklenmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının maliyetlerinin düşmesi ve üretim teknolojilerindeki ilerlemeler, hidrojen bazlı çelik üretiminin maliyet etkinliğini artıracak ve daha cazip hale getirecektir. Nitekim derleme için kullanılan makalelerde de hidrojen kullanımı ve hidrojen üretim yöntemlerinin yıllar içinde ekonomik hale geleceği belirtilmektedir.

Yeşil hidrojen kullanımı, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltacak ve karbon emisyonlarını önemli ölçüde düşürecek bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Yeşil hidrojen, suyun elektrolizi ile üretilmekte ve bu süreçte yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik kullanılmaktadır. Alternatif olarak nispeten sıfır emisyonu sahip olan nükleer enerji kaynaklı elektrikten üretilen hidrojen ve biyo-kütle kaynaklı piroliz yöntemi ile üretilen hidrojen üzerine çalışmalar da devam etmektedir. Böylece, çelik üretim sürecinde fosil yakıtların yerini alarak sektörün karbon ayak izini en aza indirme potansiyeline sahiptir.

Sonuç olarak, 2050 net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmak için enerji verimliliği, CCS ve yeşil hidrojen gibi çözümlerin entegre edilmesi gerekmektedir. Bu entegrasyon, endüstriyel ve ekonomik dönüşümü yönlendirecek ve sürdürülebilir bir gelecek için zemin hazırlayacaktır.

Bu alışma, elik endüstrisinde karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik çeşitli senaryoları ve bunların 2050 yılına kadar olan potansiyel etkilerini incelemektedir. Bu çalışmada; teorik olan bilgileri gerçek işletme verileri ile harmanlayarak elde edilen gerçeğe en yakın senaryo çalışmalarını derleyip analizini yapmaktadır. Böylece araştırma sūreci sonrasında ortaya ık mış olan teknolojilerden ūretilen senaryoların elik endüstrisi tarafından pratikte uygulanabilirliği grūlmūř olmaktadır.



5. SONUÇLAR

Bu çalışma, çelik endüstrisinde karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik çeşitli senaryoları ve bunların 2050 yılına kadar potansiyel etkilerini incelemektedir. Net sıfır emisyon (NZE) çerçevesinde 2050 yılı için belirlediği emisyon azaltım hedeflerine ulaşılmasında, yeşil hidrojen kullanımının yakıt kaynağı olarak en etkili yöntem olduğu tespit edilmiştir. Mevcut ekonomik koşullar altında, hidrojen bazlı çelik üretiminin yüksek yatırım ve operasyonel maliyetleri bulunmaktadır. Ancak, ilerleyen yıllarda politik düzenlemeler, üretim teknolojilerindeki ilerlemeler ve yenilenebilir enerji kaynaklarının artan kullanımı sayesinde, hidrojen bazlı çelik üretimi maliyetlerinin düşeceği ve bu yöntemin popülerlik kazanacağı öngörülmektedir.

2050'ye kadar net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmak için demir çelik endüstrisinin küresel bir dönüşümü hedeflemesi gerekmektedir. Bu dönüşümün, çelik üretiminin büyük kısmını gerçekleştiren ülkelerdeki teknolojik gelişmeleri ve politikaları dikkate alması gerekmektedir.

Net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmak için uluslararası iş birliği ve politika uyumu kritik önem taşımaktadır. Bu bağlamda, gelecekteki çalışmaların daha detaylı ve güncel ülkelere özgü verilerle desteklenen özelleştirilmiş senaryolar geliştirmesi ve bu senaryoları küresel emisyon azaltma stratejilerine entegre etmesi gerekmektedir.

Bu çalışmanın gelecekteki çalışmalara aşağıda belirtildiği şekillerde ilham vermesi beklenmektedir.

- Çelik üretimi yapılan ülkeler ve bölgeler için gerçek işletme verileri kullanılarak akademik senaryo ve vaka çalışmalarının artırılması gerekmektedir. Bu çalışmalar, mevcut teknolojilerin etkinliğini değerlendirmek ve emisyon azaltımı için en iyi stratejileri belirlemek için önemlidir.
- Emisyonları düşürmeye yönelik yeni teknolojilerin, mevcut ekonomik çerçeve ve tesis yapısı dikkate alınarak 2050 yılına kadar olası etkilerini ve başarı oranını analiz etmek için akademik senaryo çalışmalarına öncelik verilmelidir. Bu analizler, gelecekteki araştırmalara yol gösterecektir.
- Mevcut akademik senaryo çalışmaları sistematik olarak karşılaştırılmalı ve kullanılan teknolojiler kıyaslanmalıdır. Bu sayede en etkili stratejiler belirlenebilir ve gelecekteki araştırmalara temel oluşturulabilir.
- Çelik üretimi yaygın olmasına rağmen emisyon azaltımı için senaryo çalışmaları yapılmayan ülkelerde de akademik senaryo çalışmalarının yapılmasına teşvik edilmelidir. Bu, küresel emisyon azaltımına katkı sağlayacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Abdelghany, A., Fan, D.Q., Elzohiery, M. ve Sohn, H.Y. 2019. Experimental investigation and computational fluid dynamics simulation of a novel flash ironmaking process based on partial combustion of natural gas in a reactor. *steel research international*, 90(9):1900126. doi: 10.1002/SRIN.201900126.
- Abdul Quader, M., Ahmed, S.Z., Dawal, S.Z. ve Nukman, Y. 2016. Present needs, recent progress and future trends of energy-efficient Ultra-Low Carbon Dioxide (CO₂) Steelmaking (ULCOS) program. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55:537-549. doi: 10.1016/J.RSER.2015.10.101.
- Allen, M.R., Friedlingstein, P., Girardin, C.A.J., Jenkins, S., Malhi, Y., Mitchell-Larson, E., Peters, G.P. ve Rajamani, L. 2022. Net Zero: Science, Origins, and Implications. *Annual Review of Environment and Resources*, 47:849-887. doi: 10.1146/ANNUREV-ENVIRON-112320-105050.
- An, R., Yu, B., Li, R. ve Wei, Y.M. 2018. Potential of energy savings and CO₂ emission reduction in China's iron and steel industry. *Applied Energy*, 226:862-880. doi: 10.1016/J.APENERGY.2018.06.044.
- Andrade, C., Desport, L. ve Selosse, S. 2024. Net-negative emission opportunities for the iron and steel industry on a global scale. *Applied Energy*, 358:122566. doi: 10.1016/J.APENERGY.2023.122566.
- Anonymous 1: Tracker Map - Global Energy Monitor. <https://globalenergymonitor.org/projects/global-steel-plant-tracker/tracker-map/> [Son erişim tarihi: 05.09.2023].
- Arcos, J.M.M. ve Santos, D.M.F. 2023. The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production. *Gases*, 3(1):25-46. doi: 10.3390/GASES3010002.
- Aşan, D. 2022. Su ve Çevre Teknolojileri Dergisi 169. Sayı (Ağustos 2022).
- Bhaskar, A., Assadi, M. ve Nikpey Somehsaraei, H. 2021. Can methane pyrolysis based hydrogen production lead to the decarbonisation of iron and steel industry? *Energy Conversion and Management: X*, 10:100079. doi: 10.1016/J.ECMX.2021.100079.
- Birleşmiş Milletler. 1998. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Kyoto Protokolü.
- Blay-Roger, R., Bach, W., Bobadilla, L.F., Reina, T.R., Odriozola, J.A., Amils, R. ve Blay, V. 2024. Natural hydrogen in the energy transition: Fundamentals, promise, and enigmas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189:113888. doi: 10.1016/J.RSER.2023.113888.
- Cappel, J. 2021. EAF Efficiency. Meerbusch: MENASteelForum2021.
- Chisalita, D.A., Petrescu, L., Cobden, P., van Dijk, H.A.J., Cormos, A.M. ve Cormos, C.C. 2019. Assessing the environmental impact of an integrated steel mill with post-combustion CO₂ capture and storage using the LCA methodology. *Journal of Cleaner Production*, 211:1015-1025. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.11.256.

- Choi, W. ve Kang, S. 2023. Greenhouse gas reduction and economic cost of technologies using green hydrogen in the steel industry. *Journal of Environmental Management*, 335:117569. doi: 10.1016/J.JENVMAN.2023.117569.
- Fan, Z. ve Friedmann, S.J. 2021. Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy. *Joule*, 5(4):829-862. doi: 10.1016/J.JOULE.2021.02.018.
- Gao, C.K., Na, H.M., Song, K.H., Tian, F., Strawa, N. ve Du, T. 2020. Technologies-based potential analysis on saving energy and water of China's iron and steel industry. *Science of The Total Environment*, 699:134225. doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2019.134225.
- Garvey, A., Norman, J.B. ve Barrett, J. 2022. Technology and material efficiency scenarios for net zero emissions in the UK steel sector. *Journal of Cleaner Production*, 333:130216. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.130216.
- Gielen, D., Saygin, D., Taibi, E. ve Birat, J.P. 2020. Renewables-based decarbonization and relocation of iron and steel making: A case study. *Journal of Industrial Ecology*, 24(5):1113-1125. doi: 10.1111/JIEC.12997.
- Handl, G. 2012. Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment (Stockholm Declaration), 1972 and the Rio Declaration on Environment and Development, 1992.
- Harpprecht, C., Naegler, T., Steubing, B., Tukker, A. ve Simon, S. 2022. Decarbonization scenarios for the iron and steel industry in context of a sectoral carbon budget: Germany as a case study. *Journal of Cleaner Production*, 380:134846. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.134846.
- Hebeda, O., Guimarães, B.S., Cretton-Souza, G., La Rovere, E.L. ve Pereira, A.O. 2023. Pathways for deep decarbonization of the Brazilian iron and steel industry. *Journal of Cleaner Production*, 401:136675. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2023.136675.
- Ho, H.J., Iizuka, A., Lee, C.H. ve Chen, W.S. 2022. Mineral carbonation using alkaline waste and byproducts to reduce CO₂ emissions in Taiwan. *Environmental Chemistry Letters*, 21(2):865-884. doi: 10.1007/S10311-022-01518-6.
- Huang, D., Dinga, C.D., Tao, Y., Wen, Z., Wang, Y. ve Razmadze, D. 2023. Quantitative analysis of net-zero transition pathways and synergies in China's iron and steel industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 183:113495. doi: 10.1016/J.RSER.2023.113495.
- IEA. 2016. 20 years of carbon capture and storage. Paris.
- IEA. 2020a. Energy Technology Perspectives 2020.
- IEA. 2020b. Iron and steel technology roadmap: Towards more sustainable steelmaking, OECD Publishing. doi: 10.1787/3dcc2a1b-en.
- IEA. 2023. Emissions Measurement and Data Collection for a Net Zero Steel Industry. Paris.
- Incer-Valverde, J., Korayem, A., Tsatsaronis, G. ve Morosuk, T. 2023. 'Colors' of hydrogen: Definitions and carbon intensity. *Energy Conversion and Management*, 291:117294. doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2023.117294.
- Ingale, G.U., Kwon, H.M., Jeong, S., Park, D., Kim, W., Bang, B., Lim, Y.I., Kim, S.W., Kang, Y.B., Mun, J., Jun, S. ve Lee, U. 2022. Assessment of Greenhouse Gas Emissions from

- Hydrogen Production Processes: Turquoise Hydrogen vs. Steam Methane Reforming. *Energies*, 15(22):8679. doi: 10.3390/EN15228679.
- IPCC. 2005. Special report on carbon dioxide capture and storage (2005), Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK & New York, USA.
- IPCC. 2023. AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 — IPCC.
- IRENA. 2020. Reaching zero with renewables: Eliminating CO2 emissions from industry and transport in line with the 1.5° C climate goal.
- Izah, S.C., Iyiola, A.O., Yarkwan, B. ve Richard, G. 2023. Impact of air quality as a component of climate change on biodiversity-based ecosystem services. *Visualization Techniques for Climate Change with Machine Learning and Artificial Intelligence*, 123-148. doi: 10.1016/B978-0-323-99714-0.00005-4.
- Jeong, W., Lee, J., Ko, C.K., Yi, S.H. ve Lee, J.H. 2023. Development and evaluation of FINEX off-gas capture and utilization processes for sustainable steelmaking industry. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 127:103936. doi: 10.1016/J.IJGGC.2023.103936.
- Kumaş, K., Akyüz, A. ve Güngör, A. 2019. Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bucak Yerleşkesi Yükseköğretim Birimlerinin Karbon Ayak İzi Tespiti. doi: 10.28948/ngumuh.598212.
- Kuramochi, T. 2016. Assessment of midterm CO2 emissions reduction potential in the iron and steel industry: a case of Japan. *Journal of Cleaner Production*, 132:81-97. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2015.02.055.
- Lead, C.O., Prentice, I.C., Farquhar, G.D., Fasham, M.J.R., Goulden, M.L., Heimann, M., Jaramillo, V.J., Kheshgi, H.S., Le Quéré, C., Scholes, R.J., Wallace, D.W.R., Archer, D., Ashmore, M.R., Aumont, O., Baker, D., Battle, M., Bender, M., Bopp, L.P., Bousquet, P., Caldeira, K., Ciais, P., Cox, P.M., Cramer, W., Dentener, F., Enting, I.G., Field, C.B., Friedlingstein, P., Holland, E.A., Houghton, R.A., House, J.I., Ishida, A., Jain, A.K., Janssens, I.A., Joos, F., Kaminski, T., Keeling, C.D., Keeling, R.F., Kicklighter, D.W., Kohfeld, K.E., Knorr, W., Law, R., Lenton, T., Lindsay, K., Maier-Reimer, E., Manning, A.C., Matear, R.J., McGuire, A.D., Melillo, J.M., Meyer, R., Mund, M., Orr, J.C., Piper, S., Plattner, K., Rayner, P.J., Sitch, R., Slater, S., Taguchi, S., Tans, P.P., Tian, H.Q., Weirig, M.F., Whorf, T., Yool, A., Pitelka, L. ve Ramirez Rojas, A. 2001. The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide.
- Luh, S., Budinis, S., Giarola, S., Schmidt, T.J. ve Hawkes, A. 2020. Long-term development of the industrial sector – Case study about electrification, fuel switching, and CCS in the USA. *Computers & Chemical Engineering*, 133:106602. doi: 10.1016/J.COMPCHEMENG.2019.106602.
- Mandova, H., Patrizio, P., Leduc, S., Kjärstad, J., Wang, C., Wetterlund, E., Kraxner, F. ve Gale, W. 2019. Achieving carbon-neutral iron and steelmaking in Europe through the deployment of bioenergy with carbon capture and storage. *Journal of Cleaner Production*, 218:118-129. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.01.247.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J.B.R., Chen, Y.,

- Zhou, X., Gomis, M.I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M. ve Waterfield, T. (eds.). 2018. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.
- McQueen, N., Woodall, C., Psarras, P.C. ve Wilcox, J. 2019. Chapter 11. CCS in the Iron and Steel Industry. Ss. 353-391 içinde.
- Mehmeti, A., Angelis-Dimakis, A., Arampatzis, G., McPhail, S.J. ve Ulgiati, S. 2018. Life Cycle Assessment and Water Footprint of Hydrogen Production Methods: From Conventional to Emerging Technologies. *Environments*, 5(2). doi: 10.3390/environments5020024.
- Moore, E. 2024. 6 ana sera gazı (ve kimyasal özellikleri) - Tıbbi - 2024.
- Moya, D., Budinis, S., Giarola, S. ve Hawkes, A. 2020. Agent-based scenarios comparison for assessing fuel-switching investment in long-term energy transitions of the India's industry sector. *Applied Energy*, 274:115295. doi: 10.1016/J.APENERGY.2020.115295.
- Na, H., Sun, J., Qiu, Z., Yuan, Y. ve Du, T. 2022. Optimization of energy efficiency, energy consumption and CO2 emission in typical iron and steel manufacturing process. *Energy*, 257:124822. doi: 10.1016/J.ENERGY.2022.124822.
- NOAA. 2023. Global Monitoring Laboratory - Carbon Cycle Greenhouse Gases.
- Nwachukwu, C.M., Wang, C. ve Wetterlund, E. 2021. Exploring the role of forest biomass in abating fossil CO2 emissions in the iron and steel industry – The case of Sweden. *Applied Energy*, 288:116558. doi: 10.1016/J.APENERGY.2021.116558.
- Odubo, T.C. ve Kosoe, E.A. 2024. Sources of Air Pollutants: Impacts and Solutions. 75-121. doi: 10.1007/698_2024_1127.
- Özmen, M.T. 2009. Sera Gaz-Küresel Isınma ve Kyoto Protokolü. *IMO Dergisi*, 453(1):42-46.
- Ponsioen, T. 2014. Updated carbon footprint calculation factors - PRé Sustainability. <https://pre-sustainability.com/articles/updated-carbon-footprint-calculation-factors/> [Son erişim tarihi: 12.05.2024].
- Rajabloo, T., Valee, J., Marenne, Y., Coppens, L. ve De Ceuninck, W. 2023. Carbon capture and utilization for industrial applications. *Energy Reports*, 9:111-116. doi: 10.1016/J.EGYR.2022.12.009.
- Raza, A., Gholami, R., Rezaee, R., Rasouli, V. ve Rabiei, M. 2019. Significant aspects of carbon capture and storage – A review. *Petroleum*, 5(4):335-340. doi: 10.1016/J.PETLM.2018.12.007.
- Reddy, K.R., Gopakumar, A. ve Chetri, J.K. 2019. Critical review of applications of iron and steel slags for carbon sequestration and environmental remediation. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 18(1):127-152. doi: 10.1007/s11157-018-09490-w.
- Ren, M., Lu, P., Liu, X., Hossain, M.S., Fang, Y., Hanaoka, T., O'Gallachoir, B., Glynn, J. ve Dai, H. 2021. Decarbonizing China's iron and steel industry from the supply and demand sides for carbon neutrality. *Applied Energy*, 298:117209. doi: 10.1016/J.APENERGY.2021.117209.

- Rocha, M. ve Falduto, C. 2019. Key questions guiding the process of setting up long-term low-emission development strategies.
- Rodríguez Diez, J., Tomé-Torquemada, S., Vicente, A., Reyes, J. ve Orcajo, G.A. 2023. Decarbonization Pathways, Strategies, and Use Cases to Achieve Net-Zero CO₂ Emissions in the Steelmaking Industry. *Energies*, 16(21). doi: 10.3390/en16217360.
- Shen, J., Zhang, Q., Xu, L., Tian, S. ve Wang, P. 2021. Future CO₂ emission trends and radical decarbonization path of iron and steel industry in China. *Journal of Cleaner Production*, 326:129354. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.129354.
- Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M. ve Allen, S.K. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge.
- Subraveti, S.G., Angel, E.R., Ramírez, A. ve Roussanaly, S. 2023. Is Carbon Capture and Storage (CCS) Really So Expensive? An Analysis of Cascading Costs and CO₂ Emissions Reduction of Industrial CCS Implementation on the Construction of a Bridge. *Environmental Science & Technology*, 57(6):2595-2601. doi: 10.1021/acs.est.2c05724.
- Suer, J., Traverso, M. ve Jäger, N. 2022. Carbon Footprint Assessment of Hydrogen and Steel. *Energies*.
- Talaei, A., Ahiduzzaman, M., Davis, M., Gemechu, E. ve Kumar, A. 2020. Potential for energy efficiency improvement and greenhouse gas mitigation in Canada's iron and steel industry. *Energy Efficiency*, 13(6):1213-1243. doi: 10.1007/S12053-020-09878-0/FIGURES/11.
- Tarleton, A. 2023. How to calculate a carbon footprint for your business | EcoAct.
- Tiseo, I. 2023. Global CO₂ emissions by sector 2022 | Statista.
- Toktarova, A., Karlsson, I., Rootzén, J., Göransson, L., Odenberger, M. ve Johnsson, F. 2020. Pathways for Low-Carbon Transition of the Steel Industry—A Swedish Case Study. *Energies*, 13(15):3840. doi: 10.3390/EN13153840.
- UNEP. 2023. Emissions Gap Report 2023. doi: 10.59117/20.500.11822/43922.
- Unfccc. 1992. United Nations Framework Convention on Climate Change United Nations.
- Unfccc. 2015. Adoption of the Paris Agreement - Paris Agreement text English.
- Voestalpine. 2022. Voestalpine AG Page1/2 Press Release.
- Wang, C., Walsh, S.D.C., Weng, Z., Haynes, M.W., Summerfield, D. ve Feitz, A. 2023. Green steel: Synergies between the Australian iron ore industry and the production of green hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(83):32277-32293. doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.05.041.
- Wang, X., Zhang, Q., Xu, L., Tong, Y., Jia, X. ve Tian, H. 2020. Water-energy-carbon nexus assessment of China's iron and steel industry: Case study from plant level. *Journal of Cleaner Production*, 253:119910. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.119910.
- Williams, R., Jack, C., Gamboa, D. ve Shackley, S. 2021. Decarbonising steel production using CO₂ Capture and Storage (CCS): Results of focus group discussions in a Welsh steel-making community. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 104:103218. doi: 10.1016/J.IJGGC.2020.103218.

- WSA. 2020. World Steel Association, About Steel. <https://worldsteel.org/> [Son erişim tarihi: 31.05.2023].
- Yu, M., Wang, K. ve Vredenburg, H. 2021. Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(41):21261-21273. doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2021.04.016.
- Zecca, N., Cobden, P.D., Lücking, L. ve Manzolini, G. 2023. SEWGS integration in a direct reduction steelmaking process for CO2 mitigation. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 130:103991. doi: 10.1016/J.IJGGC.2023.103991.
- Zhang, Q., Zhao, X., Lu, H., Ni, T. ve Li, Y. 2017. Waste energy recovery and energy efficiency improvement in China's iron and steel industry. *Applied Energy*, 191:502-520. doi: 10.1016/J.APENERGY.2017.01.072.
- Zhang, X., Jiao, K., Zhang, J. ve Guo, Z. 2021. A review on low carbon emissions projects of steel industry in the World. *Journal of Cleaner Production*, 306:127259. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.127259.
- Zhao, J., Zuo, H., Wang, Y., Wang, J. ve Xue, Q. 2019. Review of green and low-carbon ironmaking technology. *Ironmaking & Steelmaking*, 47(3):296-306. doi: 10.1080/03019233.2019.1639029.
- Zhu, T., Liu, X., Wang, X. ve He, H. 2023. Technical Development and Prospect for Collaborative Reduction of Pollution and Carbon Emissions from Iron and Steel Industry in China. *Engineering*. doi: 10.1016/J.ENG.2023.02.014.

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet BUCAKLI

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2024-	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2005-2010	Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü Bursa

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Mühendis 2020-Devam Ediyor	Antalya İl Emniyet Müdürlüğü Destek Hizmetleri Müdürlüğü
Mekanik Tasarım Yöneticisi 2016-2020	Psl Elektronik A.Ş. / Fiberli Organize Sanayi Bölgesi, Antalya
Tasarım Sorumlusu 2014-2016	Cantek Endüstriyel A.Ş. Organize Sanayi Bölgesi, Antalya
Üretim & Planlama Müdürü 2013-2014	Pollet Water Group / ESLİ Organize Sanayi Bölgesi, Antalya
Proje Sorumlusu 2011-2013	Ake Asansör A.Ş. Organize Sanayi Bölgesi, Antalya